

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Ingeniería en Construcción

Análisis del impacto de estrategias bioclimáticas de ventilación y sombra sobre el confort higrotérmico y desempeño energético de una configuración arquitectónica residencial en las condiciones climáticas de Nosara, Guanacaste.

Trabajo de graduación

Para obtener el grado de Máster (Ma.) en Diseño y Construcción Sostenible

Presenta:

Ing. Marlon Fabián Camacho Coto, Lic.

Tutor del Proyecto de Graduación:

Arq. Enmanuel Salazar Ceciliano, M.Arch.

Campus Tecnológico Local San José

Costa Rica, agosto 2024

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Maestría en Diseño y Construcción Sostenible

Trabajo final de Graduación

Evaluación final

Datos Generales		
Estudiante:	Ing. Marlon Camacho Coto	
Nombre del proyecto:	"Análisis del impacto de estrategias bioclimáticas de ventilación y sombra sobre el confort higrotérmico y desempeño energético de una configuración arquitectónica residencial en las condiciones climáticas de Nosara, Guanacaste"	
Tutor	Arq. Enmanuel Salazar Ceciliano, MArch	
Lector 1	Ing. Carlos Manuel Castro Campos, MSc	
Lector 2	Ing. Manuel Alán Zúñiga, MGP, MBA	
Coordinación / representante	Dra. Arq. Kenia García Baltodano	
Fecha:	Viernes 30 de agosto del 2024	
Instrucciones		
Asigne a cada criterio la puntuación obtenida en el instrumento de evaluación respectivo.		
Evaluación		
Criterios	Nota	%
Informe final		
Evaluación del Tutor	99,38	39,8
Evaluación lector 1	100,00	15,0
Evaluación Lector 2	90,63	13,6
Defensa pública		
Evaluación de la coordinación/representante	93,00	9,3
Evaluación lector 1	94,00	9,4
Evaluación Lector 2	89,00	8,9
NOTA		96,0

Firmado digitalmente por
ENMANUEL SALAZAR CECILIANO
(FIRMA)
Fecha: 2024.08.30 20:15:58 -06'00'

Arq. Enmanuel Salazar Ceciliano, MArch

TEC | Tecnológico de Costa Rica

Firmado digitalmente por KENIA
GARCIA BALTODANO (FIRMA)
Fecha: 2024.08.30 20:17:19 -06'00'

Dra. Arq. Kenia García Baltodano

Firmado digitalmente por CARLOS
MANUEL CASTRO CAMPOS
(FIRMA)
Fecha: 2024.08.30 20:44:08 -06'00'

Ing. Carlos Manuel Castro Campos, MSc

MANUEL
ANTONIO ALLAN
ZUÑIGA (FIRMA)

Firmado digitalmente por
MANUEL ANTONIO ALLAN
ZUÑIGA (FIRMA)
Fecha: 2024.08.30 21:13:39
-06'00'

Ing. Manuel Alán Zúñiga, MGP, MBA

402170839

Ing. Marlon Camacho Coto

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2024, junio, 15.

De acuerdo con la ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, el autor conserva el derecho moral y patrimonial sobre la obra, no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones, reproducciones u obras derivadas de la misma. Para cualquier adaptación, comunicación al público o modificación de la obra, se deberá contar con autorización expresa y por escrito del autor.

Licencia creative commons

Fecha: 2024, junio, 15.

Análisis del impacto de estrategias bioclimáticas de ventilación y sombra sobre el confort higrotérmico y desempeño energético de una configuración arquitectónica residencial en las condiciones climáticas de Nosara, Guanacaste © 2024 by Marlon Fabián Camacho Coto is licensed under Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial

Fecha: 2024, junio, 15.

Declaro que no utilicé herramientas de inteligencia artificial para para la elaboración del presente trabajo final de graduación.

*Dondequiera se puede vivir bien, pues vivir bien consiste
en una absoluta adaptación nuestra al medio.*

Noel Clarasó Daudí

*No escuches los consejos de nadie, sino los susurros del viento,
que pasa y nos cuenta la historia del mundo.*

Claude Debussy

Dedicatoria

Para Tania,
mi futura esposa y la mujer por quien quiero ser mejor cada día.

Agradecimientos

A Dios, quien con amor y paciencia me ha ido enseñando la manera correcta de vivir y a confiar en que Él tiene un propósito para mí. Al mirar atrás logro comprender por qué muchas cosas sucedieron de una determinada manera, y entiendo que Él siempre tuvo un plan.

A mis padres, que han hecho muchos sacrificios por su familia y nunca se doblegaron ante las dificultades; son un ejemplo de entrega y amor, y agradezco que siempre me han apoyado y han buscado lo mejor para mí. Gracias a ellos soy un hombre de bien y agradezco poder tenerlos conmigo y devolverles un poquito de todo lo que me han dado. Los amo.

A mi prometida Tania, que llegó a mi vida en el momento adecuado y me ha apoyado en este proceso y en muchas otras cosas. A su lado he descubierto un amor desinteresado y sincero, y doy gracias cada día por tenerla conmigo. ¡Te amo!

A mis amigos que han sido un apoyo y una fuente de alegría en los momentos complicados, son muchos y no podría mencionarlos a todos, pero ustedes saben quiénes son. Cada uno es un tesoro y espero que la vida nos regale muchos momentos más para compartir.

A mi tutor Enmanuel Salazar Ceciliano, por la guía en la elaboración de esta investigación; sin duda su aporte fue indispensable para enfocar el desarrollo del tema de la manera más adecuada y marcarme los límites necesarios para lograr el proyecto en tiempo y forma.

A la empresa Sphera Sostenible por el apoyo brindado al permitirme utilizar su licencia del software IES-VE para desarrollar las simulaciones bioclimáticas que son la columna vertebral de esta investigación. En especial al Ing. Federico Steinvorth por su confianza y buena disposición y al Ing. Esteban Calderón, un buen amigo que me dejó la universidad, por ayudarme a entender el software y sacar tiempo para revisar los primeros modelos y resultados.

A la directora de la Maestría en Diseño y Construcción Sostenible, la Dra. Kenia García por la ayuda en conseguir una licencia estudiantil del software IES-VE, la cual también resultó de utilidad para lograr realizar las simulaciones requeridas.

Al cuerpo de docentes de la Maestría en Diseño y Construcción Sostenible por todo el conocimiento que compartieron con nosotros y por su esmero en capacitarnos de la mejor forma para buscar impactar de manera positiva la realidad de nuestra profesión.

A mis compañeros de generación, con los cuales trabajé durante todos los cursos de la maestría y que fueron un gran apoyo para compartir la carga académica. Gracias por su profesionalismo y les deseo los mayores éxitos profesionales y personales.

A todo aquel que olvidé mencionar explícitamente; y que de una u otra forma ha estado en mi vida y me ha ayudado y apoyado. Gracias.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN	13
1.1. INTRODUCCIÓN	13
1.2. JUSTIFICACIÓN	17
1.2.1. Problema específico	17
1.2.2. Importancia	19
1.3. OBJETIVOS	23
1.3.1. Objetivo general	23
1.3.2. Objetivos específicos.....	23
1.4. ESTADO DEL ARTE.....	23
1.4.1. Tesis de maestría realizada en la Universidad de Colima (UCOL), México ..	24
1.4.2. Tesis de grado realizada en la Universidad de Costa Rica (UCR).....	25
1.4.3. Tesis de grado realizada en la Universidad de los Andes, Colombia	26
CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO.....	29
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA.....	29
2.1.1. Fase 1: Recopilación de información y creación de perfiles	29
2.1.2. Fase 2: Modelo digital y simulaciones bioclimáticas.....	29
2.1.3. Fase 3: Análisis de los resultados obtenidos	31
2.2. RESUMEN DEL ALCANCE	31
2.2.1. Zona de análisis.....	31
2.2.2. Datos climáticos	32
2.2.3. Softwares utilizados	32
2.2.4. Modelo arquitectónico	33
2.3. CARACTERIZACIÓN DEL ALCANCE	33
2.3.1. Escogencia de la zona de análisis	33
2.3.2. Perfil socioeconómico del distrito de Nosara	36

2.3.3.	Perfil climático del distrito de Nosara	39
2.3.4.	Perfil bioclimático del distrito de Nosara.....	50
2.3.5.	Potenciales estrategias bioclimáticas por evaluar	55
2.3.6.	Configuración arquitectónica de estudio.....	57
2.3.7.	Características térmicas de los materiales	62
2.3.8.	Proceso de análisis.....	63
2.3.9.	Validación climática del archivo EPW utilizado	65
2.3.10.	Variables.....	74
2.4.	CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE	77
2.4.1.	Consideraciones para la construcción del modelo.....	77
2.4.2.	Consideraciones para la asignación de parámetros	77
2.4.3.	Consideraciones para la simulación	79
2.5.	RESULTADOS POR ANALIZAR	80
2.6.	LIMITACIONES	80
CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA.....		81
3.1.	ANÁLISIS DEL PROYECTO ORIGINAL.....	81
3.1.1.	Modelo computacional en Revit.....	81
3.1.2.	Modelo computacional en IES-VE	85
3.1.3.	Asignación de parámetros al modelo computacional en IES-VE	88
3.1.4.	Simulación bioclimática del proyecto original	94
3.1.5.	Simulación de dinámica de fluidos computacional para ventilación	106
3.2.	PROPUESTA DE MEJORA CON MODIFICACIONES BIOCLIMÁTICAS.....	110
3.2.1.	Estrategias bioclimáticas incorporadas	110
3.2.2.	Proceso de simulación del modelo modificado bioclimáticamente	112
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y FACTIBILIDAD.....		123
4.1.	COMPARATIVA ENTRE MODELO ORIGINAL Y MODELO MODIFICADO.....	123

4.1.1.	Temperatura	123
4.1.2.	Humedad relativa	126
4.1.3.	Ganancias solares directas.....	128
4.1.4.	Calidad del aire.....	131
4.1.5.	Porcentaje de personas insatisfechas (PPD)	132
4.1.6.	Requerimientos de aire acondicionado y consumo energético	134
4.2.	FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN.....	136
4.2.1.	Descripción de las modificaciones.....	137
4.2.2.	Análisis FODA.....	138
4.2.3.	Análisis MECA.....	140
4.2.4.	Aspectos económicos	141
4.2.5.	Veredicto de factibilidad y planteamiento alternativo.....	143
4.2.6.	Costo de implementación en etapa de diseño.....	144
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		145
5.1.	Conclusiones	145
5.2.	Recomendaciones y futuras líneas de investigación	147
5.3.	Fuentes de consulta	148
ANEXOS		153
Anexo A: Determinación de los días representativos de comportamiento climático para la estación seca y la estación lluviosa.....		153

TABLA DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de proyectos certificados LEED y EDGE por uso y ubicación geográfica	21
Cuadro 2. Resumen sinóptico-climático de la subregión occidental de la Península de Nicoya	35

Cuadro 3. Datos generales de las estaciones meteorológicas Barco Quebrado y Cuajiniquil	39
Cuadro 4. Temperaturas estimadas para Nosara por hora del día y mes del año	42
Cuadro 5. Resumen de parámetros climáticos del distrito de Nosara	50
Cuadro 6. Temperaturas de confort para el distrito de Nosara	51
Cuadro 7. Estrategias de ventilación propuestas para el distrito de Nosara	51
Cuadro 8. Estrategias bioclimáticas propuestas por mes según las tablas de Mahoney (1971)	55
Cuadro 9. Propiedades térmicas de algunos materiales constructivos de la Residencia Maru	63
Cuadro 10. Comportamiento de la zona de confort en Nosara por hora del día y mes del año	76
Cuadro 11. Características de los espacios en el modelo IES-VE de la Residencia Maru ...	86
Cuadro 12. Ganancias térmicas contempladas en el modelo IES-VE de la Residencia Maru	90
Cuadro 13. Aberturas contempladas en el modelo IES-VE de la Residencia Maru	91
Cuadro 14. Resumen de parámetros en el modelo IES-VE de la Residencia Maru	93
Cuadro 15. Resumen de confort higrotérmico D_R de época seca con sistema VN	101
Cuadro 16. Resumen de confort higrotérmico D_R de época lluviosa con sistema VN	103
Cuadro 17. Cargas térmicas y consumo energético mensual por climatización activa	105
Cuadro 18. Escala de índice de confort según el software IES-VE	133
Cuadro 19. Clases de eficiencia energética relativas a los acondicionadores de aire	134
Cuadro 20. Lista de estrategias bioclimáticas incorporadas al modelo original	138
Cuadro 21. Análisis FODA de las modificaciones bioclimáticas propuestas en Residencia Maru	139
Cuadro 22. Presupuesto resumido de implementación de mejoras bioclimáticas	141
Cuadro A-1. Valores para la determinación del día representativo de la estación seca ...	153

Cuadro A-2. Valores para la determinación del día representativo de la estación lluviosa	156
.....	163

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Histórico de aumento de temperatura global promedio anual	14
Figura 2. Consumo energético de edificios por combustible y sector en periodo 2010-2021	17
Figura 3. Estrategias bioclimáticas incluidas en el diseño del centro integral en Tortuguero	26
Figura 4. Modelo final en Revit (izquierda) y modelo final en IES-VE (derecha).....	27
Figura 5. Esquema metodológico para el desarrollo de la investigación	30
Figura 6. Ubicación del distrito de Nosara en la provincia de Guanacaste, Costa Rica	34
Figura 7. Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica.....	35
Figura 8. Ubicación de las estaciones meteorológicas Barco Quebrado y Cuajiniquil	40
Figura 9. Temperaturas mensuales promedio del distrito de Nosara.....	41
Figura 10. Gráfico de isotermas del distrito de Nosara	41
Figura 11. Humedad relativa promedio mensual del distrito de Nosara.....	44
Figura 12. Gráfico de isohigras del distrito de Nosara	44
Figura 13. Precipitación mensual promedio del distrito de Nosara.....	46
Figura 14. Índice ombrotérmico mensual del distrito de Nosara.....	46
Figura 15. Radiación incidente mensual del distrito de Nosara.....	47
Figura 16. Soleamiento efectivo mensual del distrito de Nosara.....	48
Figura 17. Velocidad media del viento mensual del distrito de Nosara	49
Figura 18. Dirección del viento en el distrito de Nosara durante el día (izquierda) y durante la noche (derecha)	49
Figura 19. Horas-Grado mensuales del distrito de Nosara	52
Figura 20. Indicador porcentaje de personas insatisfechas (PPD) del distrito de Nosara...	53

Figura 21. Carta bioclimática de Olgay para el distrito de Nosara	54
Figura 22. Ubicación de Residencia Maru en Playa Guiones de Nosara	58
Figura 23. Fotografías del proyecto Residencia Maru	58
Figura 24. Distribución arquitectónica del primer nivel de la Residencia Maru	59
Figura 25. Distribución arquitectónica del segundo nivel de la Residencia Maru	60
Figura 26. Estudio primer nivel (izquierda) y gradas hacia segundo nivel (derecha)	61
Figura 27. Sala-cocina segundo nivel (izquierda) y dormitorio principal (derecha)	61
Figura 28. Elevación lateral este de la Residencia Maru	61
Figura 29. a) Muro de retención de mampostería. b) Muro de concreto. c) Losa de entepiso. d) Unión entre viga corona y estructura de techo.....	62
Figura 30. Campos de aplicación de las herramientas de análisis del software IES-VE	64
Figura 31. Esquema del proceso de análisis para el desarrollo de la investigación	65
Figura 32. Ubicación de la estación meteorológica La Ceiba en Nicoya, Guanacaste	66
Figura 33. Comparación de temperaturas promedio de Nosara y Nicoya.....	67
Figura 34. Comparación de humedad relativa promedio de Nosara y Nicoya.....	68
Figura 35. Comparación de precipitación promedio de Nosara y Nicoya.....	69
Figura 36. Comparación de soleamiento efectivo promedio de Nosara y Nicoya	70
Figura 37. Comparación de velocidad del viento promedio de Nosara y Nicoya	71
Figura 38. Rosa de los vientos del distrito de Nicoya obtenida de archivo EPW	71
Figura 39. a) Temperatura máxima, mínima y promedio, b) precipitación mensual promedio y c) radiación solar mensual promedio	72
Figura 40. Comparación de temperaturas promedio de archivos EPW de Nosara y Nicoya.....	73
Figura 41. Estructura de la herramienta BTM dentro de la aplicación Apache en IES-VE ..	78
Figura 42. Modelo 3D original en software Revit de la Residencia Maru.....	82
Figura 43. Fotografía de los elementos aledaños al objeto de estudio	82
Figura 44. Modelo Revit de Residencia Maru; original (izquierda) y simplificado (derecha)	84

Figura 45. Modelo simplificado en Revit (izquierda) y modelo en IES-VE (derecha)	86
Figura 46. Vista en planta de la ubicación de los espacios en el modelo IES-VE	87
Figura 47. Perfiles de ocupación diaria de la Residencia Maru.....	88
Figura 48. Ejemplo de asignación de materiales a la envolvente del modelo en IES-VE....	91
Figura 49. Ejemplo de asignación de propiedades a las aperturas del modelo en IES-VE .	93
Figura 50. Temperatura del aire interior en el modelo original con sistema VN	95
Figura 51. Horas anuales por rango de temperatura interior original con sistema VN.....	96
Figura 52. Horas anuales por rango de temperatura por habitación original con sistema VN	96
Figura 53. Temperatura del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en modelo original.....	97
Figura 54. Humedad relativa en el modelo original con sistema VN.....	98
Figura 55. Horas anuales por rango de humedad relativa interior original con sistema VN99	
Figura 56. Horas anuales por rango de humedad relativa por habitación original con sistema VN	99
Figura 57. Humedad relativa del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en modelo original	100
Figura 58. Porcentaje de personas insatisfechas en D_R época seca original con sistema VN	102
Figura 59. Porcentaje personas insatisfechas en D_R época lluviosa original con sistema VN	102
Figura 60. Temperatura del aire interior del modelo original con sistema AC	104
Figura 61. Cargas de enfriamiento y consumo energético modelo original con sistema AC	105
Figura 62. Modelo computacional original utilizado en la herramienta Autodesk CFD	107
Figura 63. Distribución de velocidad del viento en el primer nivel del modelo original....	108
Figura 64. Distribución de velocidad del viento en el segundo nivel del modelo original .	108

Figura 65. Secciones de distribución de velocidad del viento en el modelo original.....	109
Figura 66. Modelo IES-VE original (izquierda) y con modificaciones bioclimáticas (derecha)	112
Figura 67. Temperatura del aire interior en el modelo modificado con sistema VN	113
Figura 68. Horas anuales por rango de temperatura interior en el modelo modificado ...	114
Figura 69. Horas anuales por rango de temperatura por habitación en modelo modificado	114
Figura 70. Temperatura del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en el modelo modificado.....	115
Figura 71. Humedad relativa en el modelo modificado con sistema VN	116
Figura 72. Horas anuales por rango de humedad relativa interior en modelo modificado	116
Figura 73. Horas anuales por rango de humedad relativa por habitación en el modelo modificado.....	117
Figura 74. Humedad relativa del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en modelo original	117
Figura 75. Distribución de velocidad del viento en el primer nivel del modelo modificado	118
Figura 76. Distribución de velocidad del viento en el segundo nivel del modelo modificado	119
Figura 77. Secciones de distribución de velocidad del viento en el modelo modificado...	120
Figura 78. Porcentaje de personas insatisfechas D_R época seca modificado con sistema VN	121
Figura 79. Porcentaje personas insatisfechas D_R época lluviosa modificado con sistema VN	121
Figura 80. Carga de enfriamiento y consumo energético modelo modificado sistema AC	122
Figura 81. Comparación de la temperatura del aire entre modelo original y modificado .	123
Figura 82. Comparación de las horas anuales por rango de temperatura del aire	124

Figura 83. Comparación de la temperatura del aire en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha).....	125
Figura 84. Comparación de temperatura del aire con la temperatura de bulbo seco (TBS)	126
Figura 85. Comparación de la humedad relativa entre modelo original y modificado.....	127
Figura 86. Comparación de la humedad relativa en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha).....	128
Figura 87. Comparación de la radiación solar incidente entre modelo original y modificado	129
Figura 88. Radiación solar anual incidente sobre la envolvente del modelo original	130
Figura 89. Radiación solar anual incidente sobre la envolvente del modelo modificado ..	130
Figura 90. Comparación de la concentración de CO ₂ en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha)	131
Figura 91. Comparación del porcentaje de personas insatisfechas en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha).....	132
Figura 92. Comparación del índice de confort en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha).....	133
Figura 93. Comparación del consumo energético anual por uso de aire acondicionado entre modelo original y modificado según eficiencia.....	135
Figura 94. Ahorro energético anual en uso de aire acondicionado entre modelo original y modificado según eficiencia.....	135
Figura 95. Retorno de inversión por concepto de ahorro energético anual a 50 años.....	142
Figura 96. Efecto de las estrategias de ventilación y sombra analizadas por separado ...	144

Camacho Coto, Marlon Fabián.

Análisis del impacto de estrategias bioclimáticas de ventilación y sombra sobre el confort higrotérmico y desempeño energético de una configuración arquitectónica residencial en las condiciones climáticas de Nosara, Guanacaste.^a

Proyecto de Graduación – Diseño y Construcción Sostenible – San José, C.R.:

Camacho, M. (2024).

xxii, 152, [11]h; ils. col. – 33 refs.

RESUMEN

La arquitectura bioclimática ha estado históricamente integrada al proceso de diseño y construcción, principalmente de viviendas, a través de la arquitectura vernácula. Algunos estudios han hallado incluso un mejor comportamiento en eficiencia energética de viviendas de varios siglos atrás, en comparación con algunas modernas. En el 2021, la inversión global en eficiencia energética para edificaciones aumentó un 16% con respecto al 2020 (UNEP, 2022), sin embargo, el consumo energético del sector continúa mostrando una tendencia al alza, lo que sugiere que, mundialmente, se construyen o remodelan edificaciones con un diseño bioclimático insuficiente, que conduce al malgasto de cantidades elevadas de energía.

En Costa Rica, los métodos utilizados para implementar estrategias bioclimáticas en el diseño son, mayoritariamente, empíricos y, además, hay pocos estudios que ahonden en la efectividad y correcta utilización de las distintas estrategias de climatización pasiva, evaluadas en condiciones climáticas particulares de nuestro país.

El presente Proyecto Final de Graduación evalúa las condiciones de confort higrotérmico presentes en una vivienda unifamiliar ubicada en Nosara, en la provincia de Guanacaste, Costa Rica y determina el consumo energético asociado a métodos de climatización activa, para posteriormente, proponer estrategias de climatización pasiva de ventilación natural y sombra para determinar el efecto que tienen sobre las condiciones de confort higrotérmico de la vivienda, y a partir de ello, desarrolla un análisis de su contribución al ahorro energético. Para esta evaluación, se recurre al desarrollo de un modelo computacional de la edificación, el cual se utiliza para realizar simulaciones mediante el software IES-VE que consideren el perfil climatológico de la zona en estudio.

ALABRAS CLAVE: ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA, VENTILACIÓN NATURAL, SOMBRA, CONFORT HIGROTÉRMICO, EFICIENCIA ENERGÉTICA, COSTA RICA.

^a Proyecto para optar por el grado de Máster en Diseño y Construcción Sostenible en el Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Arquitectura y Urbanismo & Escuela de Ingeniería en Construcción. Cont: coti3101@gmail.com

Camacho Coto, Marlon Fabián.

Analysis of the impact of bioclimatic ventilation and shading strategies on the hygrothermal comfort and energy performance of a residential architectural configuration in the climatic conditions of Nosara, Guanacaste.^a

Graduation Project – Sustainable Design and Construction – San José, C.R.:

Camacho, M. (2024).

xxii, 152, [11]h; ils. col. – 33 refs.

ABSTRACT

Bioclimatic architecture has historically been integrated into the design and construction process, mainly of houses, through vernacular architecture. Some studies have even found better energy efficiency performance in homes from several centuries ago, in contrast to some modern ones. In 2021, global investment in energy efficiency for buildings increased by 16% compared to 2020 (UNEP, 2022), however, the energy consumption of the sector continues showing an upward trend, suggesting that, worldwide, buildings are built or remodeled with insufficient bioclimatic design, which leads to the waste of high energy amounts.

In Costa Rica, the methods used to implement bioclimatic strategies in design are mostly empirical and, in addition, there are few studies that delve into the effectiveness and correct use of different passive climate control strategies, evaluated in particular climatic conditions of our country.

This Final Graduation Project evaluates the hygrothermal comfort conditions present in a single-family home located in Nosara, in the province of Guanacaste, Costa Rica and determines the energy consumption associated with air conditioning methods, to subsequently propose passive strategies of natural ventilation and shading to determine the effect they have on hygrothermal comfort conditions of the house, and from this, develops an analysis of its contribution to energy savings. For this evaluation, a computational model of the building is developed, which is used to perform simulations with the IES-VE software, considering the climatological profile of the study area.

KEYWORDS: BIOCLIMATIC ARCHITECTURE, NATURAL VENTILATION, SHADE, HYGROTHERMAL COMFORT, ENERGY EFFICIENCY, COSTA RICA.

^a Project to obtain a Master in Sustainable Design and Construction at the Costa Rica Institute of Technology, School of Architecture and Urbanism & School of Construction Engineering. Contact: coti3101@gmail.com

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Cada año la humanidad experimenta, de manera más acentuada, los impactos que el cambio climático está produciendo sobre nuestro planeta. La primera referencia explícita al cambio climático por parte de la Organización de Naciones Unidas (ONU) se dio en 1972, en la Conferencia Científica de la ONU, también conocida como la Primera Cumbre de la Tierra, celebrada en Estocolmo, Suecia.

Posteriormente, La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) ha sido uno de los principales acuerdos sobre este tema a nivel internacional, junto al Protocolo de Kioto de 1997, y más recientemente, el Acuerdo de París de 2015. En ellos se han establecido metas y objetivos para limitar los aumentos globales de temperatura y combatir su impacto negativo promoviendo la mitigación, adaptación y resistencia de los ecosistemas a los efectos del calentamiento global. No obstante, estos esfuerzos parecen no estar dando los frutos esperados; los escenarios globales más actuales así lo muestran. Por ejemplo, el 2023 fue declarado el año más caluroso registrado en la historia y además de eso, según se desprende de un informe del Servicio de Cambio Climático Copernicus, el calentamiento global alcanzó los 1.48 °C y se acercó, como se muestra en la Figura 1, al límite de 1.5 °C que el mundo está tratando de evitar.

Ante este escenario la humanidad debe buscar, además de las acciones necesarias para combatir con mayor ahínco este fenómeno, estrategias efectivas para adaptarse a las variaciones climáticas que, inevitablemente, se están produciendo y que tendrán cada vez mayores repercusiones sobre el estilo de vida en la Tierra. Una de las muchas herramientas que se pueden utilizar para promover dicha adaptación es la arquitectura, y más concretamente, la arquitectura bioclimática.

La arquitectura bioclimática ha estado históricamente integrada al proceso de diseño y construcción, principalmente de viviendas, a través de lo que se denomina arquitectura vernácula. Esta es la arquitectura tradicional que surge con las primeras civilizaciones de las distintas regiones, como respuesta a las necesidades humanas de hábitat, adaptación al medio y búsqueda de confort (Villalobos, 2019). Estas técnicas permitieron tener edificaciones mejor incorporadas al entorno, con altos grados de habitabilidad y eficiencia.

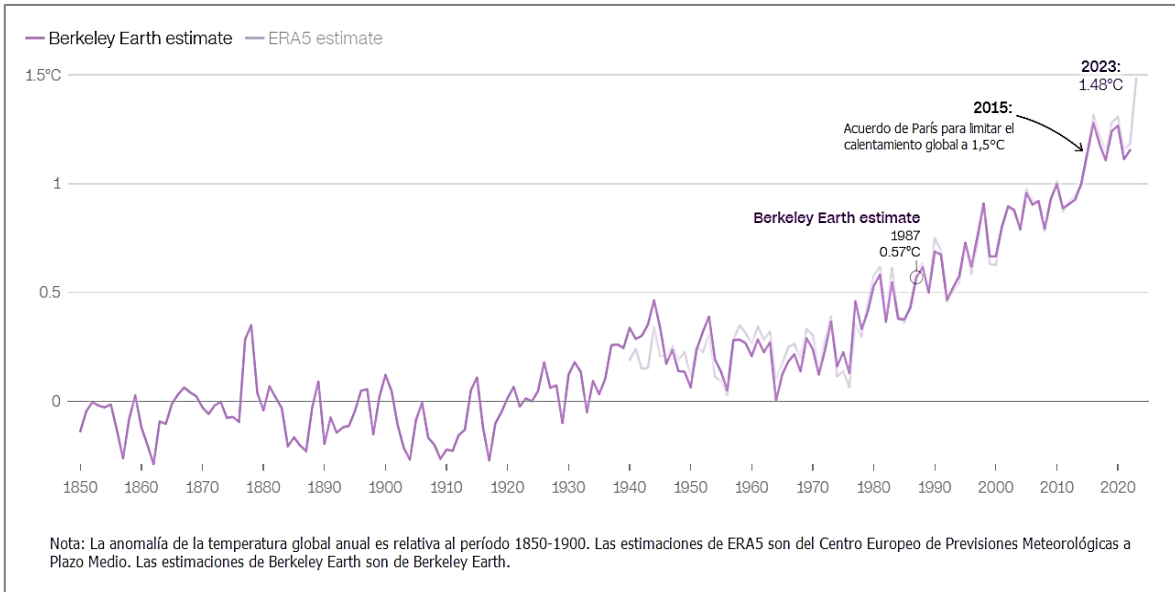


Figura 1. Histórico de aumento de temperatura global promedio anual

Fuente: Servicio de Cambio Climático Copernicus, 2024

Existen estudios realizados internacionalmente, que han hallado un mejor comportamiento desde el punto de vista de eficiencia energética, de algunas viviendas que se remontan a varios siglos atrás, en comparación con algunas modernas (Gron, 2022). Esta es una de las razones por las que, desde finales del siglo XX y principios del XXI, tanto la creciente preocupación por el cambio climático como las presiones del desarrollo sobre los recursos naturales del planeta, han servido para posicionar a la arquitectura vernácula como parte del prevaleciente discurso sobre la sostenibilidad (Mignucci, 2019).

Algunos líderes regionales de la arquitectura bioclimática como Bruno Stagno, incluso han afirmado que no será posible alcanzar las metas establecidas en las distintas convenciones de la ONU sobre cambio climático, sin un cambio significativo en la manera de diseñar y construir en el trópico¹ y que, por ende, la arquitectura en la franja tropical debe enmarcarse en los estándares y metas de sostenibilidad (Mignucci, 2019).

¹ El término trópico se refiere a la franja horizontal en la superficie de la Tierra, enmarcada entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio, y distinguida por ser la región del planeta que recibe la mayor cantidad de luz solar directa. A pesar de su extensión y diversidad cultural, es una zona unida por un clima de temperatura caliente y húmedo con poca variabilidad a través del año, vegetación exuberante y temporadas de lluvia copiosa. (Mignucci, 2019).

La anterior afirmación no parece desproporcionada al considerar que, según el Worldwatch Institute de Washington, las construcciones consumen el 60% de todos los recursos extraídos de la Tierra y, por lo tanto, se plantea como una necesidad el uso de materiales y sistemas constructivos ecológicamente apropiados (Duran, 2013).

Por otro lado, una parte de los actores del sector de la construcción tienen la percepción que las edificaciones diseñadas bioclimáticamente acarrearán un costo más elevado en comparación a las tradicionales. Esta creencia resulta verdadera, por ejemplo, en las denominadas *high performance buildings*, que dependen de un gran arsenal de componentes de alta tecnología, habitualmente controlados por sistemas computarizados, para cumplir sus metas (Mignucci, 2019) y que se impulsan principalmente en países desarrollados. Frente a este panorama, una consideración adicional que requiere especial atención es la relación entre la sostenibilidad en el diseño respecto a la sostenibilidad económica de los proyectos.

Para evitar caer en la contradicción de que la sostenibilidad de la edificación se obtenga a expensas de la sostenibilidad económica, no se debe perder de vista la esencia de la arquitectura bioclimática, en la cual se privilegia el diseño por encima de la tecnología; priorizando la incorporación, desde la concepción del proyecto, de soluciones bioclimáticas pasivas que permitan una adaptación apropiada al contexto natural de cada región en particular. Con esto, se pretende promover una arquitectura que se adapte al clima, recuperando de él sus atributos y recursos renovables, que refuerce la economía local favoreciendo el uso de mano de obra y materiales locales y que fortalezca la cultura que se actualiza y enriquece con la arquitectura contemporánea que surge de las tradiciones (Mignucci, 2019).

En resumen, el objetivo debe ser agotar el potencial de la arquitectura antes de recurrir al uso de las tecnologías y usarlas con moderación cuando son indispensables. De esta manera se conciben las tecnologías como un complemento del diseño y no como un sustituto; y se concibe el diseño de la arquitectura e ingenierías como instrumento para alcanzar la sostenibilidad en sus tres pilares: ambiental, económico y social.

El presente Proyecto Final de Graduación pretende evaluar el desempeño de algunas estrategias bioclimáticas orientadas a la climatización pasiva por medio de ventilación y sombra, y su aporte a la eficiencia energética de una vivienda unifamiliar ubicada en Nosara,

en la provincia de Guanacaste, Costa Rica; buscando demostrar su impacto positivo sobre este aspecto particular, al compararla con una línea base que resuelve sus necesidades de climatización mediante métodos activos. Todo esto mediante el uso de modelos computacionales utilizando el software IES-VE, que permitan generar simulaciones para evaluar el comportamiento, a nivel energético y de confort higrotérmico del inmueble en las condiciones climáticas propias de la zona de estudio y con ello, promover la incorporación de la arquitectura bioclimática a los procesos de diseño.

El desarrollo de la investigación está vinculado a la empresa Sphera Sostenible, consultor nacional en materia de sostenibilidad para el sector construcción. Se buscará generar el modelo digital a partir de un proyecto diseñado por la empresa, con el fin de evaluar la eficiencia de las estrategias de climatización que fueron incorporadas en él y proponer aspectos de mejora desde el punto de vista bioclimático.

El proyecto se divide en 5 capítulos. En el capítulo 1 se presenta la introducción, abarcando el planteamiento del problema específico, la descripción de la importancia de la investigación, el establecimiento de los objetivos general y específicos y el estado del arte.

En el capítulo 2 se detalla la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, profundizando en los aspectos considerados para la selección de elementos como la zona de estudio y su caracterización climática y bioclimática, la unidad arquitectónica por evaluar, las estrategias bioclimáticas recomendadas, así como una descripción de los procesos de modelación y análisis.

El capítulo 3 describe el proceso de generación del modelo computacional utilizado, partiendo de una base en Revit que se obtiene a través de una simplificación del proyecto original; también describe el proceso de simulación e incorporación de las mejoras bioclimáticas.

El capítulo 4 contiene el análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas, evaluando y comparando los gráficos y tablas que se generan con el software IES-VE, así como la factibilidad en la implementación de las estrategias bioclimáticas consideradas.

Finalmente, en el capítulo 5 se detallan las conclusiones de la investigación, las recomendaciones relacionadas al proceso de desarrollo del estudio y se enlistan las fuentes de consulta utilizadas en este Trabajo Final de Graduación.

1.2. JUSTIFICACIÓN

1.2.1. Problema específico

Partiendo de la necesidad que existe, desde el punto de vista de la sostenibilidad, de vincular acertadamente los espacios humanos al entorno natural donde están inmersos, queda claro que la arquitectura bioclimática busca aprovechar la naturaleza a su favor desde la etapa inicial de un proyecto, es decir, desde su diseño, en pos de la adaptación y el confort. Esto al tiempo que hace un uso racional de los recursos y optimiza el consumo energético con la meta de obtener la eficiencia.

Con relación al consumo energético, el Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción, publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP, 2022) señala que la demanda de energía operativa de edificios, que incluye la destinada a calefacción y refrigeración de espacios, calentamiento de agua, iluminación, cocina, entre otros, suma cerca del 34% de la energía consumida globalmente y alcanzó valores cercanos a los 135 EJ² para dicho año, lo que representa un incremento de alrededor de un 4% respecto al año 2020 y supera el nivel máximo anterior de 2019 en más de un 3%. En la Figura 2 se muestra un gráfico del consumo energético total en edificios, donde se observa el comportamiento descrito, así como la distribución por sectores de este.

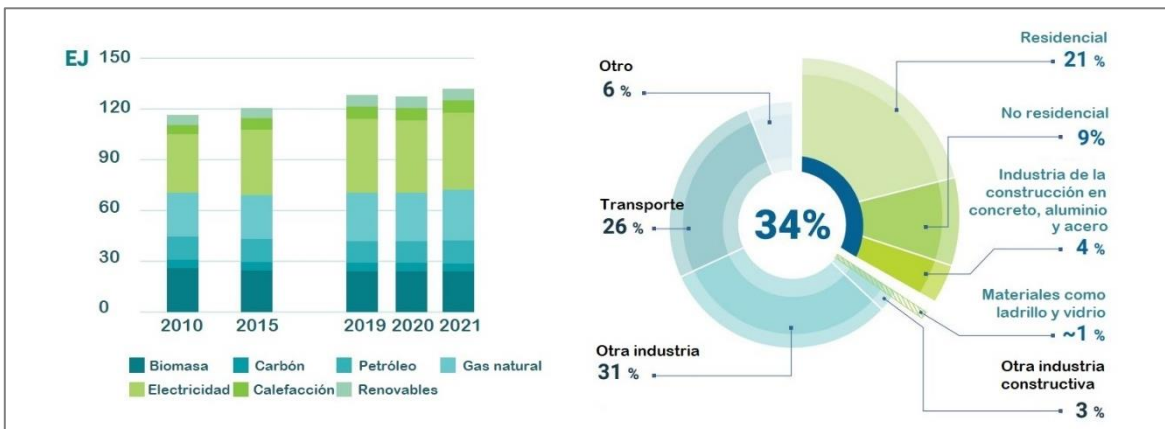


Figura 2. Consumo energético de edificios por combustible y sector en periodo 2010-2021

Fuente: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2022

² EJ significa exajulio y equivale a 10^{18} J. El Julio (J) es una unidad derivada del Sistema Internacional que se utiliza para medir energía, trabajo y calor.

En esta misma línea, de acuerdo con datos de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), de la cual Costa Rica forma parte, el sector edificios contabiliza entre el 25% y el 40% del consumo energético total de los países miembros (Bravo, 2016). Cifra que armoniza con el valor declarado para el ámbito mundial por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP).

Por otra parte, en la región del Caribe y Centro América, se estima que un edificio destina más del 60% de su demanda energética a satisfacer requerimientos de climatización (Bravo, 2016) y nuestro país no escapa de esta realidad. Según datos de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) desprendidos de la encuesta de consumo energético nacional en el sector público, del total de la energía utilizada, un 19.4% corresponde a requerimientos de enfriamiento, mientras que un 12.2% se relacionan con iluminación. Por otra parte, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) afirma que los equipos de climatización activa representan alrededor del 50% del consumo de energía eléctrica en el sector hotelero nacional. Esto representa un gasto económico importante, considerando que Costa Rica se ubica en el puesto 126 de 147 países en el listado más reciente sobre los precios de la electricidad comercial a nivel global publicado por Global Petrol Prices (2023). El precio en nuestro país es de 0.235 USD por kWh mientras el precio promedio en el mundo es 0.151 USD por kWh.

Precisamente, una de las principales ventajas del bioclimatismo radica en que, en algunos casos, el ahorro energético de una edificación que incorpora correctamente técnicas de climatización pasiva puede alcanzar hasta un 60% con respecto a una construcción convencional (Guerra, 2018). Por tanto, es evidente que un buen diseño bioclimático, al generar las condiciones de confort adecuadas, puede reducir significativamente el uso de aparatos de climatización activa dentro de las edificaciones. A pesar de ello, en general aún se tienen dificultades para implementar de manera exitosa algunos métodos bioclimáticos, pues los resultados obtenidos no son siempre satisfactorios.

En el 2021, la inversión global en eficiencia energética para el sector de edificaciones aumentó alrededor de un 16% con respecto al 2020. Asimismo, desde ese último año, ha habido un incremento del 19% en la cantidad de edificaciones que cuentan con algún tipo de certificación ambiental (UNEP, 2022). No obstante, como se mostró anteriormente, el consumo energético en el sector continúa mostrando un comportamiento ascendente, lo

que lleva a pensar que, en muchas partes del mundo, se construyen o remodelan edificaciones con un diseño bioclimático insuficiente, que conduce al malgasto de cantidades elevadas de energía que, en muchos de los casos, podrían haberse evitado con un mejor planteamiento inicial y una mayor verificación técnica mediante instrumentos ingenieriles. En Costa Rica, los métodos utilizados para implementar algunas estrategias bioclimáticas en el diseño son, mayoritariamente, empíricos y, además, si bien es cierto que existen herramientas ingenieriles que facilitan realizar cuantificaciones para el diseño, hay pocos estudios que ahonden en la efectividad y correcta utilización de las distintas estrategias de climatización pasiva, evaluadas en condiciones climáticas particulares de nuestro país.

Un dato facilitado por la empresa Sphera Sostenible (2024) indica que, asociado a ese grado de incertidumbre con el que son aplicadas algunas de estas estrategias, se estima que un alto porcentaje (al menos un 70%) de los proyectos diseñados con ventilación natural no se desempeñan con las condiciones de confort esperadas, generando descontentos con los usuarios finales.

Con base en lo desarrollado anteriormente, se infiere que el problema identificado para el presente trabajo de investigación es que, mundialmente, el consumo energético asociado a climatización artificial en edificaciones ha venido en aumento, lo que tiene una relación directa con la ausencia o implementación insuficiente de técnicas de diseño bioclimático, las cuales tienen el potencial de generar ahorros significativos en este rubro, cuando se incorporan mediante criterios técnicos correctos que consideren la realidad climática, social y cultural de la zona específica en donde se desean aplicar.

Para los profesionales que brindan asesoría de sostenibilidad y regeneración durante el proceso de diseño, construcción, operación y mantenimiento de proyectos, resulta valiosa una investigación que desarrolle modelos digitales para analizar el desempeño de diferentes estrategias de climatización pasiva y ahorro energético en climas específicos de Costa Rica y observar el efecto que tienen al ser aplicadas individualmente o combinadas con otras, sobre una configuración arquitectónica definida previamente.

1.2.2. Importancia

Tal como lo menciona de Luxán (2000), la creciente sensibilidad asociada a temas ecológicos y del medio ambiente, que busca incorporar a los esquemas de pensamiento y prácticas profesionales pautas mínimas que den respuestas a las condicionantes climáticas, del

entorno físico y social, ha hecho que las técnicas de arquitectura y urbanismo vinculadas a los aspectos bioclimáticos y de sostenibilidad hayan ido tomando auge en casi todas las economías mundiales, incluyendo la nuestra. Aunque en Costa Rica no existen registros totales sobre edificaciones que incorporan estas prácticas, se aprecian algunas tendencias generales al analizar la realidad tangible que se vive en la experiencia diaria de los sectores involucrados con el diseño y la construcción, en concordancia con lo expuesto por de Luxán (2000) para el caso de España. Dentro de estas tendencias pueden mencionarse:

- La cantidad de edificaciones que incorporan a su diseño criterios de ecología, sostenibilidad y bioclimatismo está creciendo progresivamente: cada vez son más los proyectos que buscan generar productos que incluyan métodos bioclimáticos que permitan disminuir el consumo energético y la huella de carbono, o bien, que cuenten con alguna de las muchas certificaciones ambientales que se han desarrollado en los últimos años alrededor del mundo. Como muestra de ello, según datos del Green Building Council Costa Rica (GBCCR, 2021) en el país existen más de 130 proyectos con la certificación LEED y alrededor de 40 con la certificación EDGE, sumando entre todos más de 1.300.000 m² de construcción.
- La clase de edificaciones que incorporan a su diseño criterios de ecología, sostenibilidad y bioclimatismo abarca una gran cantidad de tipologías y escalas: este tipo de técnicas no se ven limitadas a un espectro particular del desarrollo constructivo, sino que, como se muestra en el Cuadro 1, han logrado permear en los más diversos usos; desde edificios de oficinas, naves industriales, centros de formación académica, centros de salud y atención hospitalaria, centros de turismo u hotelería hasta, desde luego, viviendas y conjuntos habitacionales de muchas configuraciones.
- La ubicación de edificaciones que incorporan a su diseño criterios de ecología, sostenibilidad y bioclimatismo se reparte por todo el territorio: la aceptación incremental de este tipo de arquitectura ha generado un mercado que se expande a diversas áreas geográficas, como se muestra en el Cuadro 1, generando el desafío de evaluar las particularidades climáticas, económicas, culturales y sociales de cada uno de esos territorios, con el objetivo de desarrollar productos personalizados que resuelvan acertadamente las necesidades propias de cada zona, y no encasillar el bioclimatismo dentro de métodos genéricos que se planteen indistintamente del contexto donde se vayan a aplicar.

El Cuadro 1 muestra la distribución por uso de edificación y ubicación geográfica de una muestra de 74 proyectos con certificaciones LEED y EDGE recopilados de bases de datos publicadas por el Green Building Council Costa Rica (GBCCR, 2021) y la empresa Sphera Sostenible (2023).

Cuadro 1. Distribución de proyectos certificados LEED y EDGE por uso y ubicación geográfica

Provincia	Cantón	Uso	Certificación	Total Proyectos
San José	San José (16) Escazú (2) Curridabat (2) Santa Ana (2) Alajuelita (1) Tibás (1) Montes de Oca (1)	Comercial / Oficinas (19) Educación (3) Residencial (3)	LEED (20) EDGE (5)	25
Alajuela	Alajuela (16) Los Chiles (2)	Industrial / Oficinas (8) Comercial / Oficinas (6) Residencial (2) Hotelería (2)	LEED (14) EDGE (4)	18
Cartago	Cartago (2) Paraíso (1)	Industrial / Oficinas (1) Industrial (1) Residencial (1)	LEED (2) EDGE (1)	3
Heredia	Heredia (3) Belén (2)	Hospitalario (2) Residencial (1) Industrial / Oficinas (1) Convenciones (1)	LEED (1) EDGE (4)	5
Guanacaste	N/A (13) Liberia (1) Nicoya (1) Carrillo (1) La Cruz (1)	Hotelería (13) Comercial / Oficinas (2) Industrial / Oficinas (1) Residencial (1)	LEED (16) EDGE (1)	17
Puntarenas	Puntarenas (2) Corredores (1) Coto Brus (1) Puerto Jiménez (1)	Oficinas (3) Hotelería (2)	LEED (2) EDGE (3)	5
Limón	Limón (1)	Industrial (1)	LEED (1)	1

Fuente: GBCCR, 2021 & Sphera Sostenible, 2023. [Elaboración propia]

A raíz de esta realidad, resulta imperativo que los profesionales en arquitectura e ingeniería asociados con la implementación del bioclimatismo en los proyectos, cuenten con el conocimiento, herramientas y criterio necesario para lograr una adecuada incorporación al

diseño, de los métodos requeridos para cumplir con los resultados deseados. Esto implica acceso a información sobre datos climáticos, recomendaciones medioambientales zonales, metodologías y pautas de diseño adecuadas, comportamiento térmico de materiales de construcción, consumos e impactos de fabricación, caracterización de las condiciones de confort según el hábitat, entre otras (de Luxán, 2000).

Mucha de la información mencionada no existe actualmente para el contexto local, o bien, se encuentra incompleta o resulta difícil de conseguir. Otra se ha desarrollado en latitudes distintas, para escalas y condiciones incompatibles desde la perspectiva climática, cultural, económica o social, dificultando la posibilidad de un diseño bioclimático adecuado. Por ello, resulta necesario el desarrollo de investigaciones enfocadas en condiciones y escenarios específicos y de interés particular, para ir generando a nivel nacional, datos que permitan mejorar la aplicación del bioclimatismo en la arquitectura de nuestro país.

Este Proyecto Final de Graduación, brinda información cuantitativa que permitirá mejorar la forma en que algunas estrategias bioclimáticas son incorporadas en el diseño, disminuyendo el factor empírico y ayudando a determinar las soluciones más efectivas para alcanzar la eficiencia energética y el confort higrotérmico, tomando en cuenta las características climáticas de la zona de ubicación del proyecto y su configuración arquitectónica

Más concretamente, el proyecto evalúa las condiciones de confort higrotérmico presentes en una vivienda unifamiliar ubicada en Nosara, en la provincia de Guanacaste, Costa Rica y determina el consumo energético asociado a métodos de climatización activa, para posteriormente, proponer estrategias de climatización pasiva de ventilación natural y sombra para determinar el efecto que tienen estas sobre las condiciones de confort higrotérmico en los espacios interiores de la vivienda, y a partir de ello, desarrolla un análisis de su contribución al ahorro energético. Para esta evaluación, se recurre al desarrollo de un modelo computacional de la edificación, el cual se utiliza para realizar simulaciones mediante software que consideren el perfil climatológico de la zona en estudio.

Esto, a su vez, pretende resolver de manera más acertada las necesidades de los proyectos en los que intervienen los profesionales relacionados al ámbito del bioclimatismo, proporcionando a los usuarios de las edificaciones mejores condiciones de confort. Además de incrementar la disponibilidad de datos sobre temas bioclimáticos asociados a escenarios propios de nuestro país, lo que puede incentivar que cada vez más diseñadores incorporen

estas estrategias a su trabajo, contribuyendo a la descarbonización del sector y disminuyendo la carga sobre la red eléctrica nacional.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Analizar, mediante el uso de modelos digitales, el efecto de estrategias bioclimáticas de ventilación y sombra en las condiciones de confort higrotérmico y consumo energético de una configuración arquitectónica residencial ubicada en Nosara, Guanacaste, para una mejor incorporación de técnicas de climatización pasiva a los procesos de diseño.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar, a través de bases de datos y herramientas de análisis, las condiciones climáticas del distrito de Nosara, así como la configuración arquitectónica y estrategias bioclimáticas que serán evaluadas, para el mejoramiento de las condiciones de confort higrotérmico en el interior de la edificación.
- Determinar, haciendo uso de simulaciones computacionales, el comportamiento de las estrategias bioclimáticas en estudio, para la evaluación de su aporte al confort higrotérmico y a la disminución del consumo energético del inmueble.
- Cuantificar, por medio de comparaciones, el impacto de las soluciones de ventilación natural y sombra sobre el confort y el desempeño energético de la unidad de estudio, para la generación de diseños bioclimáticos más certeros y accesibles.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Como se ha mostrado en los apartados previos, tanto a nivel mundial como en nuestro país, la incorporación de aspectos bioclimáticos al diseño ha venido en aumento en las últimas décadas. Estas estrategias han experimentado progresivamente una transición de lo empírico a lo técnico, conforme se desarrollan nuevas investigaciones y metodologías que permiten aprovechar al máximo los principios sobre los cuales se fundamentan, al tiempo que se apoyan en nuevas herramientas de software que complementan la labor de los diseñadores y que permiten evaluar elementos naturales y climáticos más complejos.

A continuación, se describen una serie de investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, enfocadas en la evaluación de estrategias bioclimáticas, con el fin de mejorar la forma en la que se incorporan a los procesos de diseño, buscando la optimización de los

recursos, la eficiencia energética y el confort higrotérmico de los usuarios; y reforzando el valor arquitectónico que el bioclimatismo puede potenciar en el sector inmobiliario.

1.4.1. Tesis de maestría realizada en la Universidad de Colima (UCOL), México

Esta investigación fue realizada por Salazar-Ceciliano (2021). En ella se estudió, a través de una evaluación técnica asistida por el software de simulación Design Builder, el desempeño de algunas estrategias bioclimáticas orientadas a la protección solar y a la ventilación natural, que fueron empleadas en un inmueble con características propias de la arquitectura caribeña costarricense, en busca del fortalecimiento y promoción de la tradición constructiva de la zona.

Para el desarrollo del proyecto, Salazar-Ceciliano (2021) utilizó datos climáticos obtenidos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica para definir el perfil bioclimático de la ciudad de Limón, así como para determinar los parámetros de confort que delimitaron la evaluación de los resultados de la simulación. Además, según se describe en la metodología del documento, la investigación siguió principios de la investigación no experimental, pues las variables no se manipularon deliberadamente, sino que solamente se observó el comportamiento del fenómeno en sus condiciones naturales para poder analizarlo.

El análisis se desarrolló en tres fases donde, primeramente, se recopilaron datos que permitieron establecer un perfil histórico y bioclimático de la ciudad de Limón, así como la evolución de la arquitectura caribeña costarricense. Posteriormente, se sintetizó la información recopilada, pasando por un proceso de digitalización de todos los datos recogidos durante la primera fase, con el objetivo de simular, con el uso del software mencionado, las estrategias bioclimáticas a estudiar según el perfil climático del sitio. Finalmente, se analizaron los resultados, con lo cual se obtuvieron algunas conclusiones que resultan valiosas para el planteamiento del presente Trabajo Final de Graduación, como lo son (Salazar-Ceciliano, 2021):

- Elementos de la arquitectura caribeña costarricense como los monitores, entramados sobre ventanas y puertas, y corredores perimetrales con aleros ayudan en gran medida a disminuir los picos de temperatura de los espacios internos durante el día, sin embargo, no son lo suficientemente eficaces para mantener las temperaturas

dentro del rango de la zona de confort, ni son los únicos que se deben considerar en el proceso de diseño arquitectónico bioclimático.

- Individualmente, las estrategias que minimizan las ganancias solares directas en la edificación fueron las que generaron mejores condiciones de confort en los espacios interiores de esta, seguidos por las asociadas a la ventilación natural. Al combinarse, estas estrategias potencian su efecto y mejoran las condiciones de confort que al incorporarse de manera separada. De hecho, la investigación determinó que los dispositivos de ventilación natural no son efectivos para generar condiciones de confort si se utilizan de manera independiente.
- Ninguno de los escenarios evaluados logró mantener el interior del edificio en condiciones de confort durante los picos de calor, sin embargo, se observó que entre más dispositivos se implementen mejores resultados se obtienen. Por lo que el autor concluye que la protección bioclimática debe ser concebida como un sistema de elementos de sombra, viento, ubicación y cubiertas que, solamente trabajando en conjunto, podrán brindar las condiciones de confort deseadas.

1.4.2. Tesis de grado realizada en la Universidad de Costa Rica (UCR)

En el proyecto desarrollado por Zamora (2010), se propuso el diseño de un centro integral para la comunidad de Tortuguero, en la provincia de Limón, Costa Rica, buscando promover el mejoramiento en la calidad de vida de la zona al considerar aspectos sociales, ambientales y económicos. El diseño incorporó estrategias bioclimáticas y lineamientos espaciales orientados al desarrollo sostenible que se busca en el lugar, y se evaluó el desempeño de las estrategias consideradas mediante la aplicación de simulaciones computacionales con los softwares Ecotect y Winair para evaluar ventilación, incidencia solar directa, temperatura e iluminación.

Como parte de los miramientos hechos previo al diseño de la propuesta, Zamora (2010) estableció un perfil del usuario de la edificación, y se apoyó en datos climáticos del IMN para definir el perfil climático de Tortuguero. Con esto, se consideraron recomendaciones desarrolladas por Carl Mahoney (1971) para los países del trópico para incorporarlas al anteproyecto. En la Figura 3 se muestran las estrategias de climatización pasiva que se consideraron en el diseño del centro integral de Tortuguero realizado en esta investigación.

La metodología se basó en un diseño y análisis iterativo, desarrollando un modelo inicial al cual se le realizaron pruebas de comportamiento y se replantearon algunos aspectos con el fin de mejorar su desempeño previo a realizar una nueva simulación, tras la cual se ajustaron

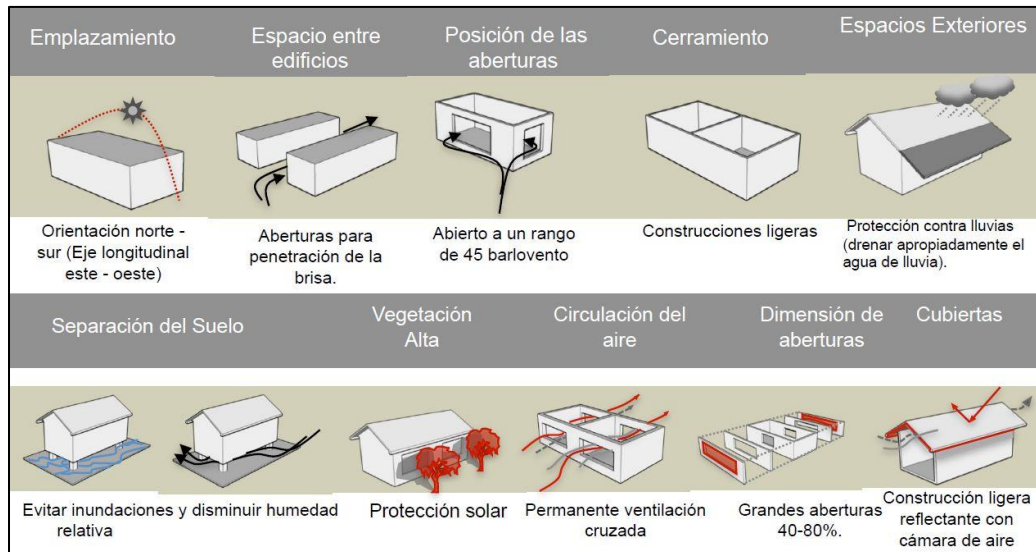


Figura 3. Estrategias bioclimáticas incluidas en el diseño del centro integral en Tortuguero

Fuente: Zamora, 2010

nuevos detalles para, finalmente, evaluar el diseño mediante una tercera iteración. De esta investigación se desprenden algunas conclusiones llamativas como lo son (Zamora, 2010):

- El proceso de simulación tiene limitantes asociadas al software elegido que deben considerarse previamente para conocer el grado de profundidad que se le puede dar a un determinado análisis.
- El diseño del contexto es igualmente importante al diseño del inmueble; la vegetación que rodea los espacios juega un papel fundamental para lograr confort en el trópico, pues esta puede influir en parámetros como la humedad, la temperatura radiante que incide sobre las áreas y la velocidad y dirección de la ventilación.

1.4.3. Tesis de grado realizada en la Universidad de los Andes, Colombia

Este proyecto fue llevado a cabo por Álvarez (2023); en él se realizó una modelación energética del edificio Mario Laserna, perteneciente a la Universidad de los Andes, utilizando el software IES-VE (mismo que se usa en el desarrollo del presente Trabajo Final de

Graduación), con el objetivo de comparar el desempeño de distintas configuraciones de su sistema de climatización activa (HVAC) e identificar la opción más eficiente en términos de consumo energético y analizar la efectividad de cada configuración.

En el proyecto se analizaron tres casos de configuraciones del sistema de climatización, en el primero se realizó la simulación de la geometría original del edificio con un sistema HVAC N°8 según el estándar ASHRAE 90.1-2010 con flujo de aire variable. El segundo caso mantuvo el modelo original con el mismo sistema HVAC, pero con flujo de aire constante. Por último, se consideró una geometría propuesta por el software IES-VE, derivada del apéndice G del estándar ASHRAE 90.1-2010, con el mismo sistema HVAC, pero con flujo de aire variable (Álvarez, 2023).

El desarrollo del modelo computacional se hizo apoyándose en el software Revit, con el uso de los planos originales del edificio como base, sin embargo, Álvarez (2023) aclara que, durante el proceso de modelación, se realizaron algunas simplificaciones a nivel de la geometría de este. Según indica, las simplificaciones fueron necesarias para optimizar el rendimiento del modelo en IES-VE, buscando un balance entre precisión y eficiencia de la simulación. En la Figura 4 se observa el resultado de la modelación realizada en Revit y el traslado posterior al software IES-VE.

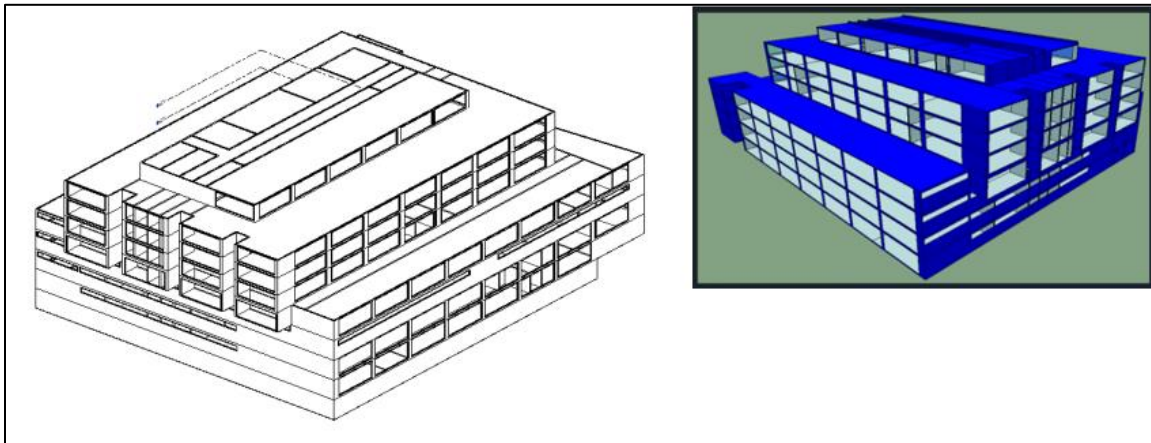


Figura 4. Modelo final en Revit (izquierda) y modelo final en IES-VE (derecha)

Fuente: Álvarez, 2023 [Modificado por el autor]

Posteriormente, se recopilaron datos meteorológicos relacionados con temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar, mediante la herramienta CBE Clima Tool de la Universidad de California, Berkeley. Esto debido a la falta de información climática

local para la ubicación del edificio en estudio. Estos datos alimentaron las condiciones climáticas simuladas por el software. Al finalizar el proceso de simulación, Álvarez (2023) halló los consumos teóricos de kW/h por año ligados a distintos usos dentro del edificio como iluminación, ventilación, calefacción, entre otros. Esto para cada una de las tres configuraciones geométricas analizadas, lo que permitió determinar la combinación de sistema HVAC y geometría que contribuye en mayor medida a la eficiencia energética del inmueble. Algunas conclusiones destacadas de esta investigación son las siguientes:

- El sistema propuesto con flujo de aire constante presenta un aumento del 30% en el consumo de energía en comparación con la línea base. En contraste, con un flujo de aire variable, este incremento se reduce a un 4%. Estos resultados subrayan la importancia de considerar la variabilidad en el flujo de aire para optimizar la eficiencia energética del edificio.
- Las geometrías originales con flujo de aire variable y constante cumplen con la normativa ASHRAE 90.1-2010 al tener un máximo de 300 horas fuera del rango de confort térmico. Sin embargo, la geometría propuesta por IES-VE no cumple con esta normativa, lo que resalta la importancia de validar las simulaciones con estándares reconocidos para garantizar el confort térmico de los ocupantes.

CAPÍTULO 2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto y el cumplimiento de los objetivos planteados en la sección 1.3 se propone una metodología en tres etapas, las cuales se muestran en la Figura 5 y se detallan a continuación.

2.1.1. Fase 1: Recopilación de información y creación de perfiles

Esta etapa contempla la búsqueda y análisis de la información bibliográfica disponible, principalmente, la revisión más detallada de documentos relacionados con el bioclimatismo y la aplicación de simulaciones computacionales asociadas al diseño arquitectónico en aras de alcanzar el confort higrotérmico; estas fuentes se enlistan en la sección 5.3 de este documento.

Además de la información académica y técnica anteriormente mencionada, se hace una recopilación de datos climáticos generados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), así como por otras estaciones meteorológicas privadas cercanas a la zona de estudio, con el fin de contar con los insumos suficientes para generar el perfil bioclimático y los parámetros de confort de Nosara, Guanacaste por medio de la herramienta Bioclimarq, desarrollada por Gómez-Azpeitia (2020).

Finalmente, en esta etapa también se busca información sobre el uso del software utilizado para la generación del modelo y la ejecución de las simulaciones, con el fin de conocer sus capacidades, limitaciones e interfaz de trabajo, aspectos necesarios para llevar a cabo la segunda etapa.

2.1.2. Fase 2: Modelo digital y simulaciones bioclimáticas

Esta etapa inicia con la escogencia, en conjunto con la empresa Sphera Sostenible, del proyecto que será sometido a la evaluación bioclimática por medio de un modelo digital con apoyo de software de simulación. Se elige un proyecto que se ubica en la zona climática de interés, del cual se utilizan planos y fotografías para realizar una valoración de su entorno interior y exterior, aportando información adicional sobre el contexto físico y su interacción con el inmueble, lo que se considera para la creación del modelo.

Posteriormente, se crea un modelo digital que replica el proyecto original, y utilizando el perfil bioclimático generado en la primera etapa, se realizan simulaciones computacionales

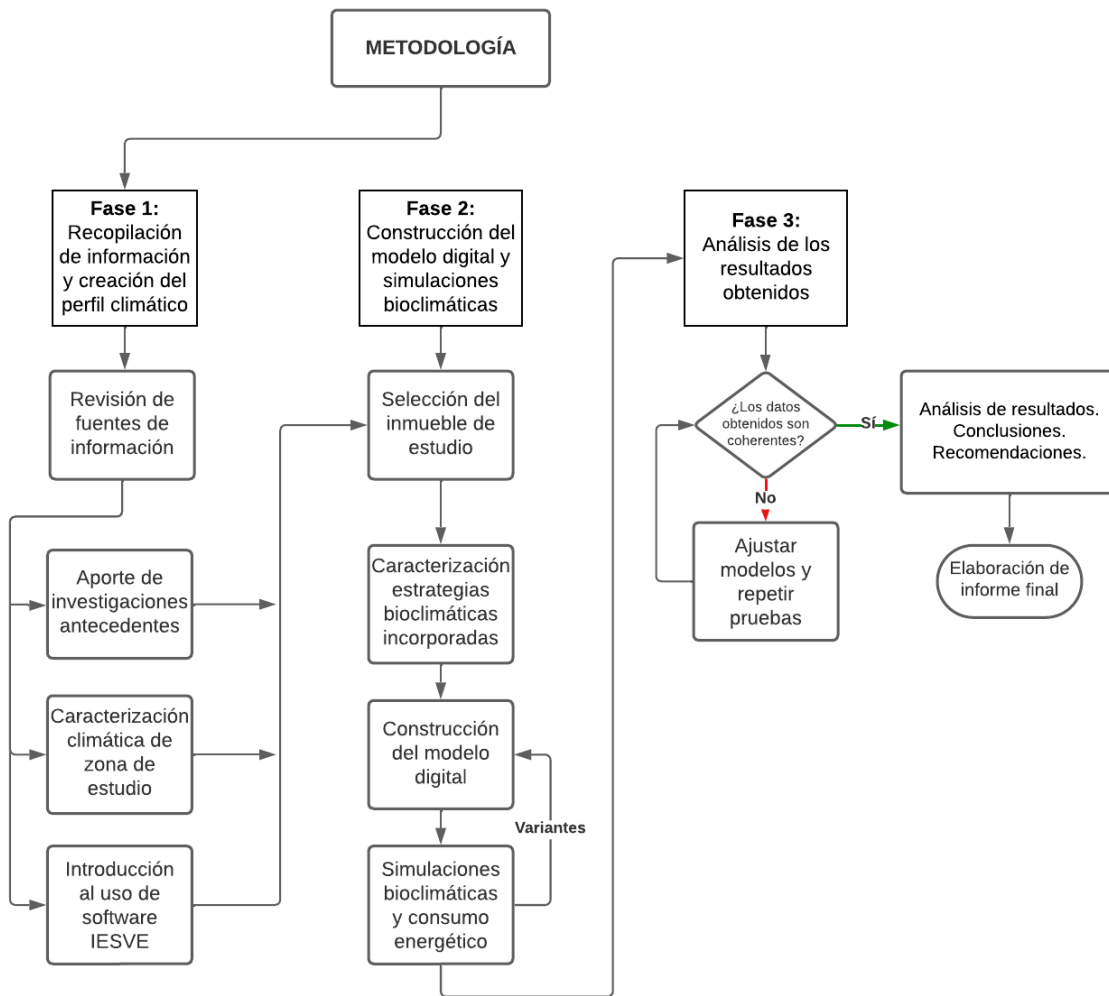


Figura 5. Esquema metodológico para el desarrollo de la investigación

Fuente: Elaboración propia, 2024

para cuantificar las condiciones de confort higrotérmico en los espacios interiores. Seguidamente, se realiza una propuesta de mejora a la configuración arquitectónica, incorporando algunas estrategias bioclimáticas de climatización pasiva orientadas a la ventilación natural y sombra, para determinar el efecto que tienen sobre el confort higrotérmico y la eficiencia energética de la edificación en estudio. En la fase de simulación se realizan variaciones al modelo base, para determinar el efecto de la combinación o separación de las estrategias de climatización pasiva, con el fin de hallar cuales de ellas resultan más efectivas.

Finalmente, se cuantifica el requerimiento energético y monetario necesario para alcanzar, mediante métodos de climatización activa, los niveles de confort higrotérmico desprendidos del mejor desempeño asociado a la incorporación de métodos pasivos, con el fin de realizar una comparativa que permita mostrar el impacto que tienen las estrategias bioclimáticas en la eficiencia energética.

2.1.3. Fase 3: Análisis de los resultados obtenidos

En la tercera y última etapa del proyecto, se analizan con detalle las tablas y gráficos obtenidos de los distintos procesos de simulación y se realizan comparativas entre ellos, con la intención de identificar las soluciones de climatización pasiva más efectivas en cuanto a desempeño energético y condiciones de confort, que permitan la generación de diseños bioclimáticos más certeros, que satisfagan las necesidades higrotérmicas de proyectos con el prototipo arquitectónico aquí evaluado y que, se ubiquen en una zona climática compatible con la definida en esta investigación.

2.2. RESUMEN DEL ALCANCE

En esta sección se presenta, de manera sintetizada, el alcance de esta investigación, con el fin de delimitar los métodos, modelos, softwares, ubicaciones y otros factores importantes para la elaboración del presente documento. El desarrollo de cada punto, así como una explicación más profunda de las consideraciones asociadas se presentan en la siguiente sección.

2.2.1. Zona de análisis

La zona geográfica donde se realiza la investigación corresponde al distrito de Nosara, en el cantón de Nicoya de la provincia de Guanacaste, Costa Rica.

2.2.2. Datos climáticos

La caracterización climatológica de la zona de estudio se realiza partiendo de los datos brindados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de las estaciones automáticas de Barco Quebrado y Cuajiniquil, ubicadas respectivamente en el distrito de Nosara del cantón de Nicoya y en el distrito de Cuajiniquil del cantón de Santa Cruz.

Para el proceso de simulación, se requiere que los datos climatológicos que proporcionan el perfil de entrada sean cargados en un archivo con formato EPW³. Se utiliza un archivo obtenido del sitio web Climate.OneBuilding que contiene información climática del cantón de Nicoya, Guanacaste en el periodo de 2007-2021.

2.2.3. Softwares utilizados

En el desarrollo del presente trabajo final de graduación se emplean una serie de softwares y herramientas informáticas que apoyan diversos procesos de análisis. A continuación, se presenta una breve descripción de ellas y de sus principales características:

- IES-VE

Este software se utiliza para la creación del modelo computacional principal de la investigación; fue desarrollado por Integrated Environmental Solutions (IES). El software permite realizar análisis bioclimáticos de modelos arquitectónicos contemplando una gran variedad de parámetros como la temperatura, humedad relativa, ventilación, ganancias solares, desempeño energético, sistemas de aire acondicionado, entre otras muchas funciones.

- Bioclimarg

Esta herramienta fue desarrollada por Gómez-Azpeitia (2020) y permite obtener una caracterización climática a partir de series de datos de la zona de estudio. Dentro de la información de entrada que requiere se encuentran la temperatura máxima y mínima, la humedad relativa máxima y mínima, la precipitación pluvial, la radiación media y la velocidad del viento, todo ello con valores mensuales.

³ EPW son las siglas para EnergyPlus Weather. Es un formato de datos meteorológicos que se desarrolló originalmente para dos programas de simulación: EnergyPlus y ESP-r y desde entonces ha sido adoptado como formato estándar por la mayor parte de las otras herramientas de simulación de edificios.

De esta información, la herramienta genera resultados de aspectos climáticos como temperaturas y humedades relativas horarias, diagramas de isotermas e isohigras, resúmenes de precipitación y radiación solar; y bioclimáticos como el PPD de Fanger, la carta bioclimática de Olgyay, la carta bioclimática de Szokolay, los triángulos de confort de Evans, entre otros. Además, establece una serie de recomendaciones bioclimáticas basadas en las tablas de Mahoney y los coeficientes de Serra y Coch.

- Autodesk Revit y CFD

Este software se basa en el modelado de información en construcción (BIM, por sus siglas en inglés) y permite generar, a grandes rasgos, modelos tridimensionales de una edificación cuyos elementos pueden almacenar información específica que resulta útil para el proceso constructivo. La extensión CFD permite realizar análisis de dinámica de fluidos computacional sobre un modelo volumétrico y analizar, por ejemplo, el comportamiento de las corrientes de aire en el interior de un espacio.

- Climate Consultant 6.0

Este es un software de uso libre que permite leer información climática contenida en archivos EPW y reinterpretarla para mostrarla de manera gráfica.

2.2.4. Modelo arquitectónico

La edificación usada para generar el modelo computacional es la Residencia Maru, una vivienda unifamiliar ubicada en Playa Guiones, Nosara y que forma parte del portafolio de Loop Studio Design, empresa hermana de Sphera Sostenible.

2.3. CARACTERIZACIÓN DEL ALCANCE

2.3.1. Escogencia de la zona de análisis

El área seleccionada para realizar el estudio es el distrito de Nosara, en el cantón de Nicoya, Guanacaste. Se localiza a una latitud de 9.96778 y una longitud de -85.63167; cuenta con un área de 134,57 km² y una altitud media de 6 msnm. Nosara limita al Norte con los distritos de Cuajiniquil y Nicoya, al Sur y al Oeste con el océano Pacífico y al Este con los distritos de Sámara y Belén de Nosarita. Según estimaciones del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), en 2023 Nosara contaba con un total de 7.378 habitantes, de los cuales el 49.2% corresponde a mujeres y el 50.8% a hombres, siendo así el segundo

distrito más poblado del cantón de Nicoya. En la Figura 6 se muestra un mapa de la ubicación de la zona de estudio en nuestro país.

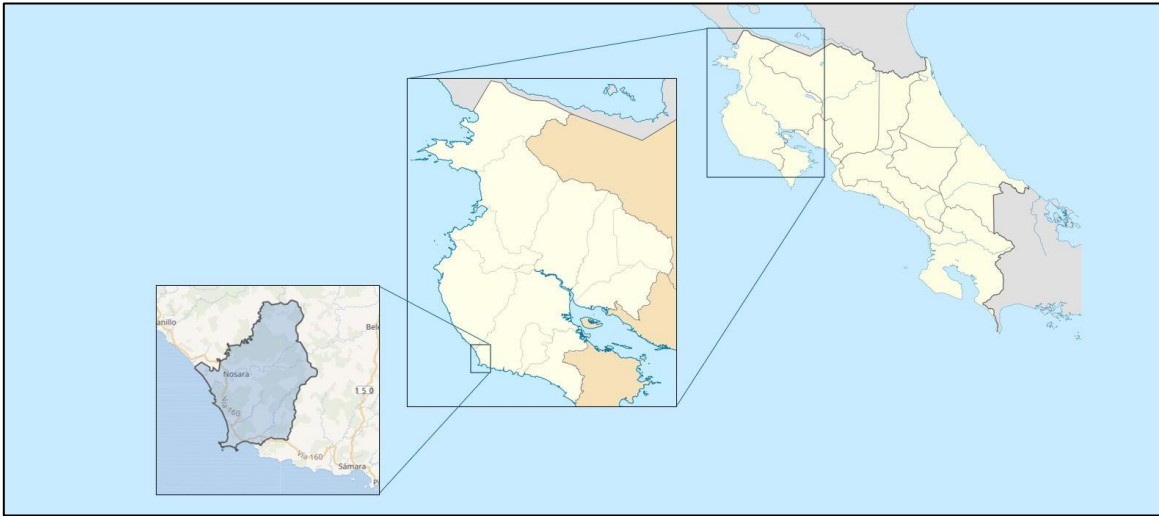


Figura 6. Ubicación del distrito de Nosara en la provincia de Guanacaste, Costa Rica

Fuente: Elaboración propia, 2024

Esta localidad se escogió debido a que, según datos recopilados por el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA), Guanacaste se convirtió en la provincia con la mayor intención de construcción durante el 2023 en Costa Rica. En ese período se tramitaron permisos para la construcción de alrededor de 2.006.200 m², lo que representa el 22,1% del total de metros cuadrados tramitados durante ese año en todo el país (Alvarado, 2024).

Asimismo, según los datos del CFIA mencionados anteriormente, los tipos de obra que lideran las intenciones de construcción a nivel nacional son habitacional, con un 38% y urbanístico, con un 21%. En esta línea, durante el primer semestre de 2023, Guanacaste registró 472.000 m² de obras de tipo habitacional, más que en cualquier otra provincia. Por otra parte, el cantón de Nicoya ocupa el puesto siete entre todos los cantones del país con mayor cantidad de metros cuadrados de construcción registrados (CFIA, 2024).

Adicional a esto, el clima de la zona de estudio también es un punto de interés para esta investigación; de acuerdo con la clasificación de regiones y subregiones climáticas de Costa Rica del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, s.f.) como se muestra en la Figura 7, el distrito de Nosara se ubica en la región climática del Pacífico Norte, dentro de la subregión occidental de la Península de Nicoya (PN1). Esta región comprende la provincia de

Guanacaste y los cantones de Esparza y Montes de Oro de la provincia de Puntarenas; así como los cantones de Orotina y San Mateo de la provincia de Alajuela. La región pertenece al régimen de precipitación del Pacífico, caracterizado por la presencia de un período seco y otro lluvioso bien definidos y se distingue por su temperatura, la cual va de moderada a alta, presentando los valores de temperatura máxima media anual más elevados de nuestro país (IMN, s.f.).

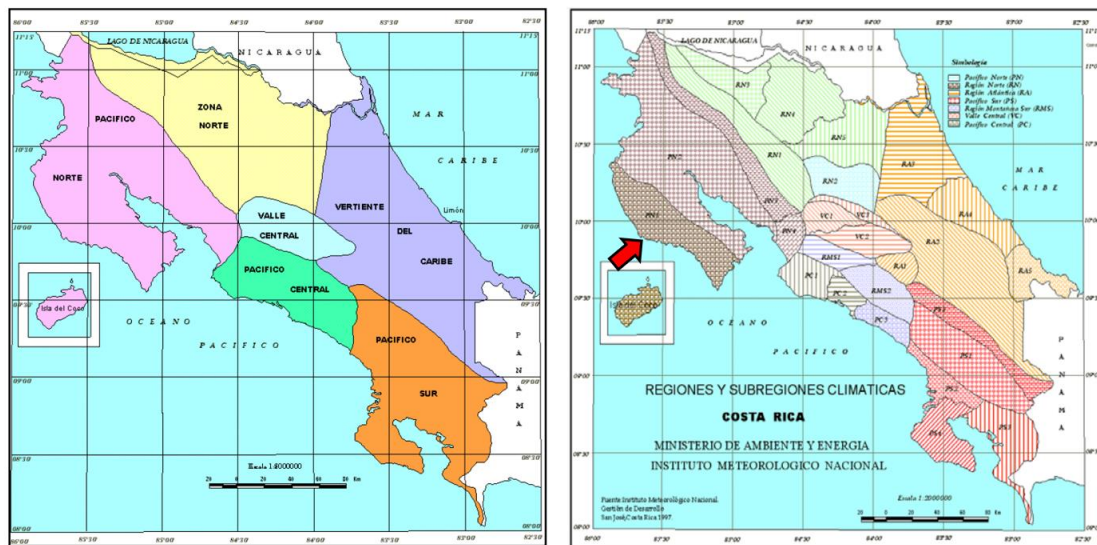


Figura 7. Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), s.f. [Modificado por el autor]

Por otro lado, el documento del IMN presenta una caracterización climática general para la subregión occidental de la Península de Nicoya (PN1), la cual se resume en el Cuadro 2. La subregión comprende la parte costera de la Península de Nicoya, desde Cabo Blanco a Punta Guiones y presenta dos tipos de clima: a) lluvioso con influencia monzónica y b) de sequía.

Cuadro 2. Resumen sinóptico-climático de la subregión occidental de la Península de Nicoya

Subregión	Lluvia media anual (mm)	Temp. máxima media anual (°C)	Temp. Mínima media anual (°C)	Temp. media anual (°C)	Promedio de días con lluvia	Duración del período seco (meses)
PN1	2385	30	23	25 a 30	99	4

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), s.f.

Debido a las particularidades descritas en los párrafos anteriores donde se tiene, por un lado, un marcado incremento de la intención de construcción en la provincia guanacasteca, y por otro, el clima caliente y seco que caracteriza esa región de nuestro país; sumado a los datos de consumo energético por temas relacionados a la climatización activa que se mencionaron en el primer capítulo de este documento, es que se vislumbra esta zona como el escenario propicio para localizar allí el centro de la presente investigación. Adicionalmente, la empresa Sphera Sostenible ha desarrollado varios proyectos habitacionales en esa zona, lo que permite tener distintas opciones para elegir una unidad arquitectónica apropiada para el desarrollo de este estudio.

2.3.2. Perfil socioeconómico del distrito de Nosara

La provincia de Guanacaste, ubicada al Norte del país, ha destacado durante muchos años por sus extensas fincas ganaderas dedicadas a la producción de carne; por ejemplo, de los 1.334 kilómetros cuadrados del cantón de Nicoya, se estima que cerca de un 42% del territorio se utiliza para esta actividad. No obstante, en las últimas décadas, la provincia se ha vuelto clave en el esfuerzo nacional por presentarse ante el mundo como un líder global en ecoturismo de alto valor en torno a los numerosos atractivos naturales con los que cuenta nuestro país. Las regiones costeras, que poseen playas y manglares de gran belleza a lo largo del litoral Pacífico, añaden un valor agregado al desarrollo de actividades socio productivas importantes para la región. En el cantón de Nicoya, las principales atracciones turísticas se concentran alrededor de las zonas costeras de Sámara y Nosara, con una extensión considerable destinada a la conservación de las tortugas marinas, que abarca desde Nosara hasta Ostional (NCA, 2013).

A pesar de este incremento en el desarrollo de la actividad turística, y las proyecciones de crecimiento constructivo que se mencionaron en el apartado anterior, las zonas costeras sufren grandes desigualdades económicas y problemas sociales que afectan a una porción nada despreciable de sus habitantes. Un estudio realizado por el Center for Responsible Travel (CREST) en el 2013, junto a la Asociación Cívica de Nosara (NCA, por sus siglas en inglés), acerca de la realidad económica de los distritos de Nosara y Sámara, revela algunos datos que reflejan la condición de estos territorios en aspectos como pobreza, ingresos, empleo, educación, entre otros. A continuación, se presentan algunas de las conclusiones más relevantes en estos ámbitos, desprendidos del informe mencionado.

- Pobreza

Para el 2011, un 22% del total de la población costarricense se encontraba por debajo de la línea de pobreza, la cual está definida por la capacidad de las familias para adquirir alimentos y servicios básicos que les permitan mantener un estilo de vida digno; por otra parte, el nivel de pobreza extrema registrado era del 6,3% de los habitantes. En la actualidad, de acuerdo con el INEC (2023), esos valores se encuentran en 21,8% y 6,4% respectivamente. La pobreza en Costa Rica también es medida mediante la incapacidad de satisfacer ciertas necesidades básicas (NBI) en una o más de cuatro categorías, a saber: albergue digno, estilo de vida saludable, acceso al conocimiento, y acceso a otros bienes y servicios esenciales. Este tipo de pobreza experimentó una reducción a nivel nacional del 36% en el año 2000 al 24,6% en el 2011.

Al analizar individualmente la zona de estudio, se obtienen indicadores con números menos favorables que el promedio nacional. Por ejemplo, en el 2011 el cantón de Nicoya presentó un 56% de los hogares con al menos una necesidad básica insatisfecha, mientras que específicamente en el distrito de Nosara, este valor alcanzó el 34% de las familias.

- Ingresos

El Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), como parte de la Encuesta Nacional de Hogares (ENAH) de 2010, informó que el promedio del ingreso mensual de los hogares a nivel nacional ronda los 804.366 CRC mensuales, lo que clasifica a Costa Rica como un país de renta media alta, según el Banco Mundial (NCA, 2013). Por otra parte, Nosara es el distrito que más ingresos le genera al cantón de Nicoya pues, solo en el 2021, registró poco más de 200 millones de colones en permisos de construcción (CFIA, 2024). A pesar de estos datos positivos, nuestro país ocupa una posición desfavorable en el Índice de Desigualdad de Ingresos del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) del 2007-2008, ubicándose en la posición número 100 de los 126 países. Para el año 2010, los ingresos del 10% de los hogares costarricenses más ricos eran 24 veces mayores que los ingresos del 10% de los hogares más pobres, lo que marca el nivel de desigualdad más alto de los últimos 20 años (NCA, 2013). La disparidad también se evidencia en Nicoya; según un extracto del borrador de Plan Regulador del Cantón de Nicoya (2010), el sector de la zona marítimo terrestre, los

complejos hoteleros y las actividades relacionadas al turismo, han tenido un fuerte impacto en la economía local. Esto ha provocado que en el cantón convivan varios escenarios de riqueza y pobreza extremos; donde se tienen, por un lado, zonas con viviendas de lujo con vistas al mar, y por otro, poblaciones enteras asentadas en zonas de inundación, con una infraestructura básica incompleta.

- Empleo

En 2012, el porcentaje de desempleo a nivel nacional en Costa Rica se mantuvo alrededor del 7,8%. En el cantón de Nicoya, la mayor parte de las personas que forman parte de la fuerza de trabajo (casi el 69%), son empleados en el sector de servicios, que incluye el gobierno, los bancos, la educación y el turismo (NCA, 2013). En ese año, el distrito de Nosara contaba con un nivel de desempleo del 5.7%, según el borrador del Plan Regulador del 2010, muy por debajo de la media nacional.

A pesar de esto, el borrador del Plan Regulador concluye que, en general, las oportunidades de empleo para el cantón son insuficientes y la creación de más empleos sigue siendo un problema serio (NCA, 2013). Aunque podría pensarse que el turismo representa una fuente importante de empleo y de desarrollo para estas comunidades, la realidad indica que en muchas de las zonas rurales de nuestro país no se ha logrado aprovechar adecuadamente el potencial con el que se cuenta. Como muestra de ello, se pueden mencionar dos datos concretos desprendidos del informe de realidad económica del NCA (2013):

a. Guanacaste, el principal destino turístico de Costa Rica, también es la provincia con la mayor tasa de desempleo. Más de 40.000 adultos en Guanacaste actualmente están sin trabajo, según datos de noviembre de 2013.

b. En 2011, el 12,5% de los trabajadores en el cantón de Nicoya no contaban con el seguro nacional de salud, mientras que, en el distrito de Nosara, donde el turismo es la principal fuente de trabajo, el número llegaba al 23% de los trabajadores.

- Educación

La pobreza y la educación tienen una alta correlación: los hogares con un menor grado de escolaridad suelen tener ingresos más bajos y menos probabilidades de que sus hijos puedan asistir o graduarse del colegio. En el cantón de Nicoya, más de un 43% (cerca

de la media nacional) de los estudiantes de secundaria completan sus estudios. Sin embargo, en los distritos de Nosara y Sámara, el 75% de la fuerza de trabajo no tiene una educación secundaria, lo que representa un problema en una zona donde la mayoría de las fuentes de empleo disponibles se ligan al sector turismo y servicios, trabajos que requieren, en muchos de los casos, de un mayor nivel de educación y conocimiento.

2.3.3. Perfil climático del distrito de Nosara

La caracterización climatológica de la zona de estudio se realiza partiendo de los datos brindados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de las estaciones automáticas de Barco Quebrado y Cuajiniquil, ubicadas respectivamente en el distrito de Nosara del cantón de Nicoya y en el distrito de Cuajiniquil del cantón de Santa Cruz. Se requiere utilizar la información de dos estaciones debido a que, la estación de Barco Quebrado (la más cercana a la zona de estudio), solamente mide datos de temperatura, humedad y precipitación; por lo que, para obtener información sobre radiación y velocidad del viento, se recurrió a otra estación próxima a Nosara. Tomando como referencia Playa Guiones, donde se localiza la unidad habitacional de estudio, que se describe con mayor detalle en el apartado 2.3.6, se tiene que, la estación de Barco Quebrado se localiza, aproximadamente, a 5 km al este de esta playa, mientras que la estación de Cuajiniquil se encuentra a unos 12 km al norte de este emplazamiento.

En el Cuadro 3 se muestra la información general de las estaciones meteorológicas utilizadas y en la Figura 8 se observa la localización de ambas.

Cuadro 3. Datos generales de las estaciones meteorológicas Barco Quebrado y Cuajiniquil

Número	Ubicación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Inicio registro	Final registro
72167	Barco Quebrado, Nosara	10.95972	-85.70139	24	01-01-2014	31-12-2023
72141	Cuajiniquil, Santa Cruz	10.04289	-85.66957	60	01-01-1998	31-12-2003

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024

Para el procesamiento de los datos climáticos de las estaciones meteorológicas se usa la herramienta Bioclimarq, desarrollada por Gómez-Azpeitia (2020), con la cual se obtiene la caracterización de aspectos como la temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación solar y viento. Se utiliza la estación de Barco Quebrado para los valores de precipitación,

temperatura y humedad relativa; mientras que para la radiación media y la velocidad promedio del viento se usa la estación de Cuajiniquil. El resultado del análisis realizado con esta herramienta se detalla a continuación.

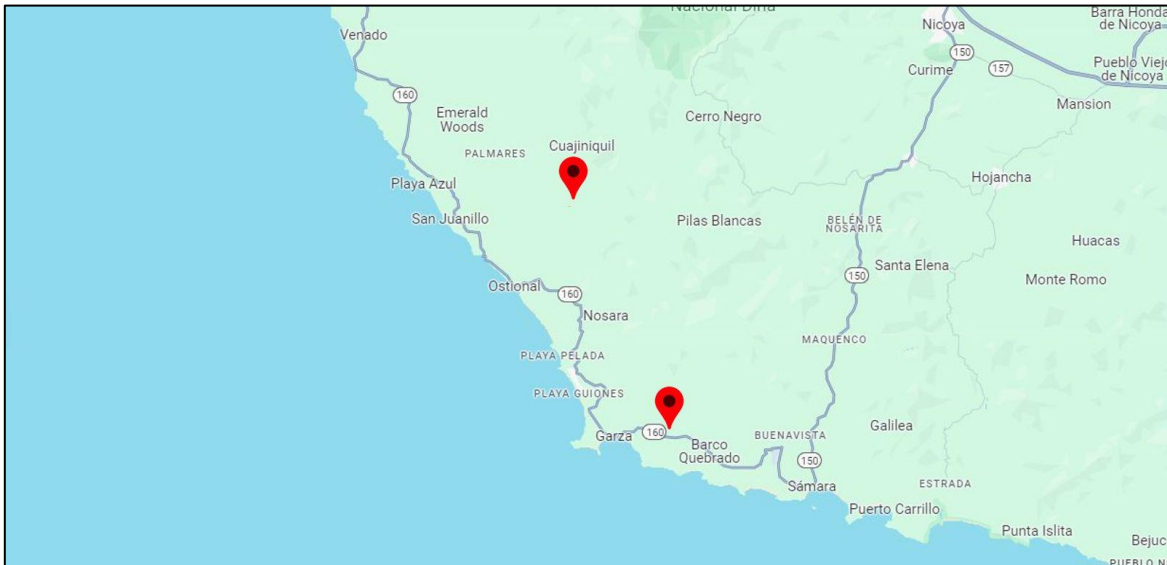


Figura 8. Ubicación de las estaciones meteorológicas Barco Quebrado y Cuajiniquil

Fuente: Google Maps, 2024

- Temperatura

La temperatura en el distrito de Nosara mantiene una estabilidad relativa durante todo el año; el valor máximo promedio anual ronda los 33.2 °C, mientras que el mínimo promedio anual se aproxima a los 21.9 °C. La oscilación de temperaturas es mayor en los meses de diciembre a abril, donde los valores se mueven en una amplitud de entre 12 y 15 °C. Por otra parte, en el resto del año las temperaturas presentan una menor oscilación, con amplitudes inferiores a los 10.5 °C.

Con respecto a la distribución horaria, la herramienta desarrollada por Gómez-Azpeitia (2020), genera un gráfico de isotermas para cada hora del día, para cada mes del año, con lo cual puede observarse que los mayores valores se alcanzan en las horas del mediodía en el periodo comprendido entre los meses de enero y abril, los cuales coinciden con la época seca, como se muestra más adelante. La distribución anual de temperaturas, así como el gráfico de isotermas mencionado pueden observarse en la Figura 9 y la Figura 10 respectivamente.

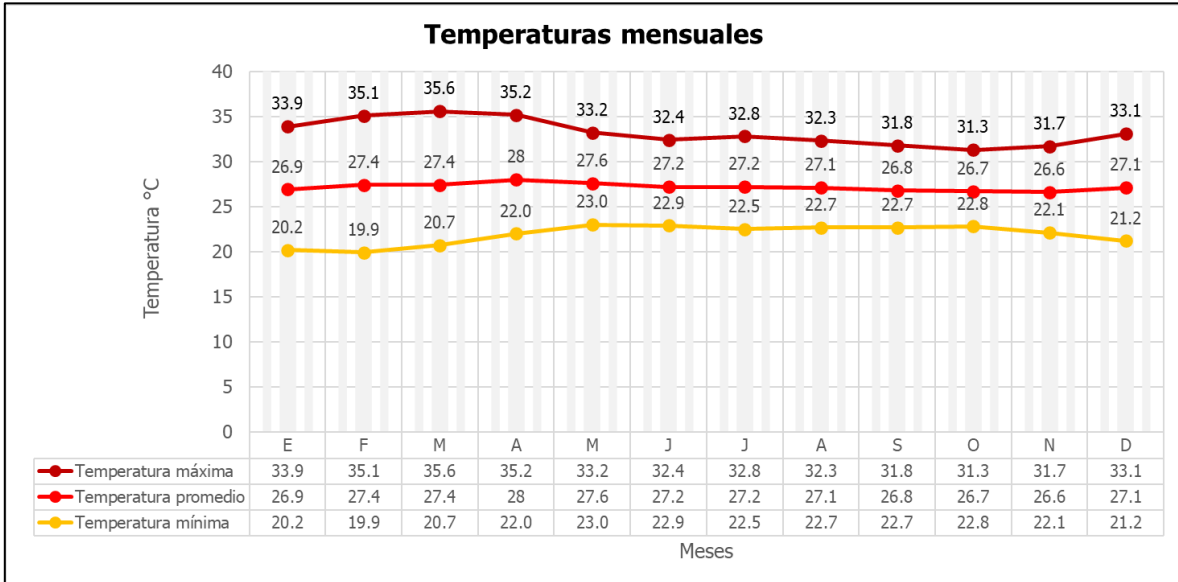


Figura 9. Temperaturas mensuales promedio del distrito de Nosara

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024

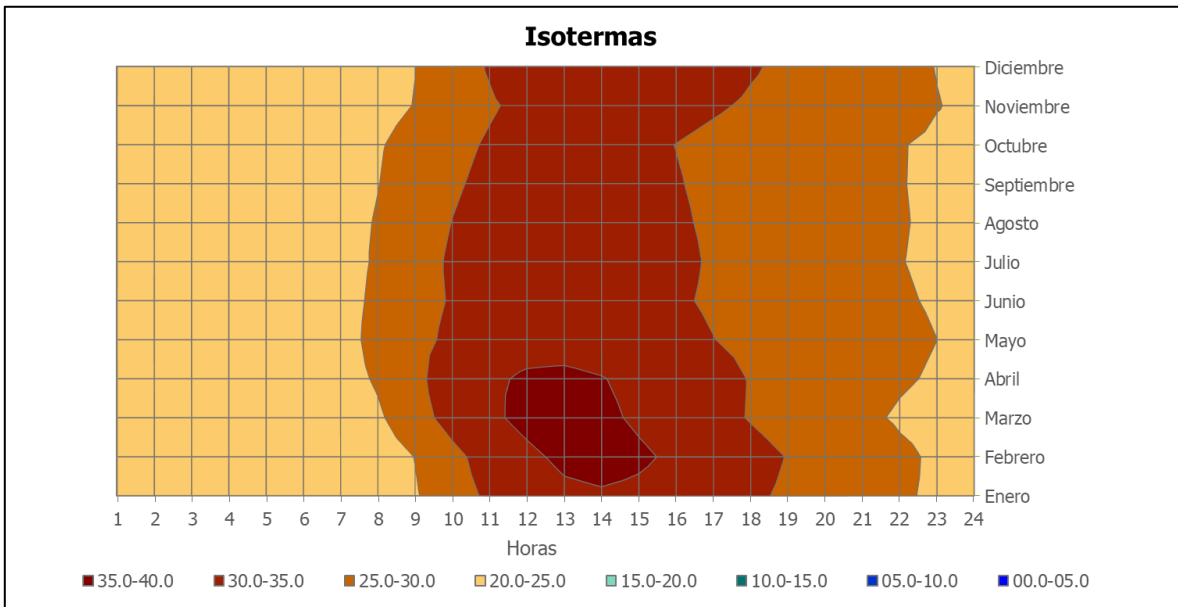


Figura 10. Gráfico de isotermas del distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

Cuadro 4. Temperaturas estimadas para Nosara por hora del día y mes del año

HORA	TEMPERATURA °C											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	22.9	22.8	22.6	23.6	24.2	24.0	23.7	23.9	23.8	23.9	24.0	23.6
2	22.3	22.2	22.1	23.2	23.9	23.7	23.4	23.6	23.6	23.6	23.6	23.1
3	21.9	21.7	21.8	22.9	23.7	23.5	23.2	23.4	23.4	23.4	23.3	22.7
4	21.5	21.3	21.5	22.7	23.5	23.4	23.0	23.2	23.2	23.3	23.0	22.3
5	21.2	21.0	21.3	22.5	23.4	23.3	22.9	23.1	23.1	23.2	22.8	22.1
6	21.0	20.7	21.2	22.4	23.3	23.2	22.8	23.0	23.0	23.1	22.6	21.9
7	20.9	20.7	21.2	22.9	23.8	23.7	23.3	23.4	23.0	23.1	22.6	21.8
8	21.8	22.0	24.3	25.6	26.0	25.7	25.5	25.3	24.9	24.6	23.2	22.6
9	24.6	25.1	28.1	29.0	28.6	28.2	28.2	27.8	27.2	26.7	25.2	24.9
10	27.8	28.7	31.7	32.1	31.0	30.4	30.6	30.1	29.4	28.8	27.5	27.8
11	30.8	32.0	34.4	34.4	32.7	31.9	32.3	31.7	31.1	30.4	29.5	30.4
12	33.0	34.3	35.9	35.5	33.5	32.7	33.1	32.5	32.0	31.4	31.1	32.3
13	34.3	35.6	36.2	35.7	33.6	32.8	33.2	32.7	32.2	31.7	32.0	33.4
14	34.7	36.0	35.7	35.2	33.1	32.3	32.7	32.3	31.8	31.4	32.3	33.8
15	34.3	35.5	34.5	34.1	32.3	31.5	31.8	31.5	31.1	30.8	32.0	33.5
16	33.4	34.5	33.0	32.7	31.2	30.5	30.8	30.5	30.2	29.9	31.4	32.7
17	32.2	33.0	31.4	31.3	30.1	29.5	29.6	29.4	29.2	29.0	30.5	31.6
18	30.8	31.5	29.7	29.8	29.0	28.4	28.5	28.4	28.2	28.1	29.5	30.4
19	29.3	29.8	28.2	28.5	27.9	27.5	27.5	27.4	27.3	27.2	28.5	29.1
20	27.9	28.3	26.8	27.3	27.0	26.6	26.6	26.5	26.4	26.4	27.5	27.9
21	26.6	26.9	25.6	26.2	26.2	25.9	25.8	25.8	25.7	25.7	26.6	26.8
22	25.5	25.6	24.6	25.4	25.6	25.3	25.1	25.1	25.1	25.1	25.8	25.8
23	24.5	24.5	23.8	24.6	25.0	24.8	24.5	24.6	24.6	24.6	25.1	24.9
24	23.6	23.6	23.1	24.1	24.6	24.3	24.1	24.2	24.2	24.2	24.5	24.2
Promedio	26.9	27.4	27.4	28.0	27.6	27.2	27.2	27.1	26.8	26.7	26.8	27.1
Oscilación	13.8	15.3	15.1	13.3	10.3	9.6	10.4	9.7	9.2	8.6	9.7	12.0
Confort	26.2	26.3	26.3	26.5	26.4	26.2	26.2	26.2	26.1	26.1	26.1	26.2

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

En el Cuadro 4 se presentan los valores a partir de los cuales se elaboró el gráfico de isotermas del distrito de Nosara, donde pueden observarse las temperaturas calculadas para la franja horaria de cada mes del año.

De la información presentada en el cuadro anterior, se observa que el Bioclimarq desarrollado por Gómez-Azpeitia (2020) determina la temperatura de confort recomendada en cada mes para los espacios interiores de edificaciones ubicadas en la zona de estudio. En este caso, los valores se encuentran alrededor de los 26.2 °C en promedio; este aspecto se amplía en el apartado 2.3.10 del presente documento.

- Humedad relativa

La humedad relativa es una medida porcentual, que expresa la relación entre la cantidad de vapor de agua que tiene el aire y la máxima que podría tener sin variar su temperatura; diversas normativas y organismos internacionales dan recomendaciones sobre los valores que se deben cumplir en cuanto a humedad relativa para obtener confort higrotérmico y condiciones saludables en los espacios internos.

En España, por ejemplo, el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) aconseja, por razones sanitarias, mantener la humedad relativa dentro del rango del 40% al 60%, pues se ha determinado que esto minimiza el crecimiento de microorganismos. Además, organizaciones internacionales como la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) recomiendan un nivel de humedad entre el 30% y el 50% en el interior de una vivienda, en función de la temperatura exterior, con niveles que no deberían superar el 55% en verano y con valores de entre el 30% y el 40% en los meses de invierno (Soler & Palau, 2018). En contraste, en nuestro país no existen recomendaciones sobre los niveles de humedad relativa deseables para obtener condiciones de confort apropiadas.

La humedad relativa en el distrito de Nosara presenta números elevados durante casi todo el año. Al analizar la Figura 11, se observa que durante los meses de diciembre a abril este parámetro tiene valores promedio entre 70% y 80%; y durante el resto del año los valores promedio tienen un comportamiento más estable, cercano al 91%. Según Salazar-Ceciliano (2021) citando a Sosa y Siem (2014), el cuerpo humano no percibe en gran medida cambios de humedad relativa cuando estos se encuentran en el rango entre

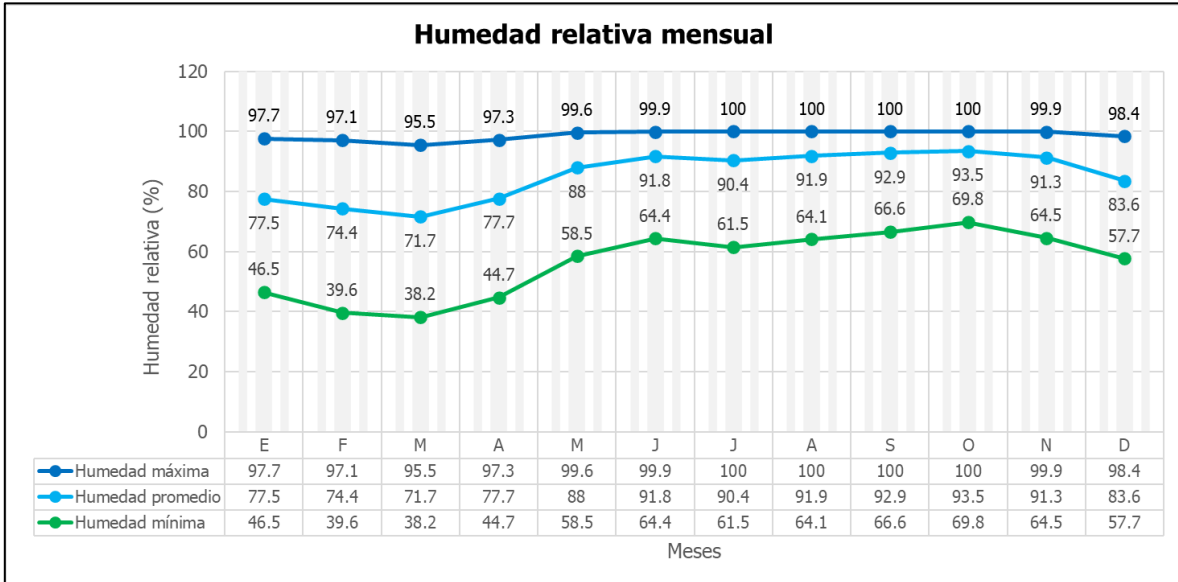


Figura 11. Humedad relativa promedio mensual del distrito de Nosara

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024

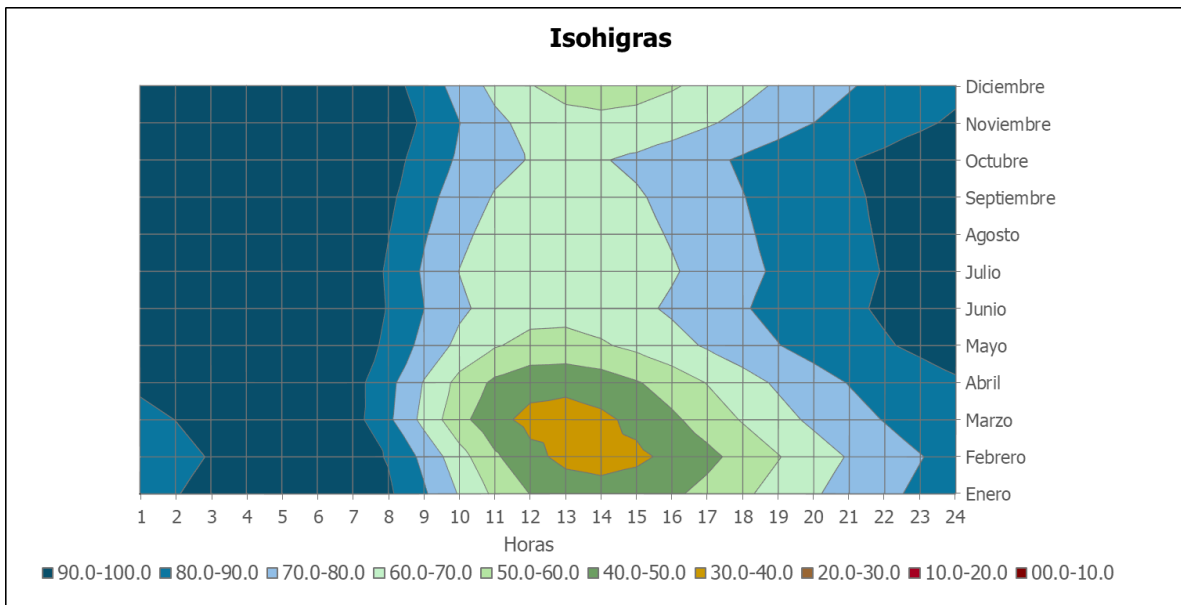


Figura 12. Gráfico de isohigras del distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

el 30% al 70%, por lo que, si se define este espectro como zona de confort, la humedad relativa promedio no se ajusta a lo recomendado, pero al analizar franjas horarias se identifican lapsos donde la humedad relativa sí se halla dentro del rango de confort.

En la Figura 12 se presenta un gráfico de isohigras, que muestra la variación de la humedad relativa para cada mes del año en función de la franja horaria; allí se aprecia que el periodo de mayor humedad durante todo el año corresponde a las horas de la noche y madrugada. Mientras que durante el día se presenta una variabilidad mayor: en los meses de época seca los valores pueden oscilar entre 30% y 70% y durante la época lluviosa el límite inferior se mantiene rondando el 60%.

Salazar-Ceciliano (2021) utiliza una categorización, según los porcentajes de humedad relativa, realizada en 1971 por Koenigsberger et al, donde se plantea que para una humedad relativa superior al 70%, la zona puede ser considerada como húmeda, para un rango del 50% al 70% semihúmedo, del 50% al 30% semiárido, y por debajo del 30% se considera un lugar árido. De acuerdo con esta clasificación, el distrito de Nosara se categoriza principalmente como una zona húmeda y semihúmeda, con algunas épocas específicas donde se pueden tener escenarios semiáridos.

- Precipitación

Según los datos facilitados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), la precipitación promedio anual de la zona de estudio asciende a 3072 mm. En la Figura 13 se muestra la distribución mensual de este valor, presentando una marcada tendencia donde se observa que los meses más lluviosos comprenden el periodo de mayo a noviembre, alcanzando su pico máximo en septiembre y octubre, mientras que el periodo que abarca de diciembre a abril tiene una ausencia casi total de lluvia.

En la Figura 14 se muestra el índice ombrotérmico de la zona en estudio, este parámetro es una relación que se establece entre la precipitación y la temperatura medias, y se utiliza para definir los bioclimas a nivel mundial. En este caso, se observa un valle en la línea de precipitación que se encuentra por debajo de la línea de temperatura media, lo que demuestra la existencia de una estación seca entre los meses de diciembre y marzo, siendo el periodo marzo-abril la transición entre la época seca y la temporada húmeda, la cual se mantiene a lo largo del resto del año.

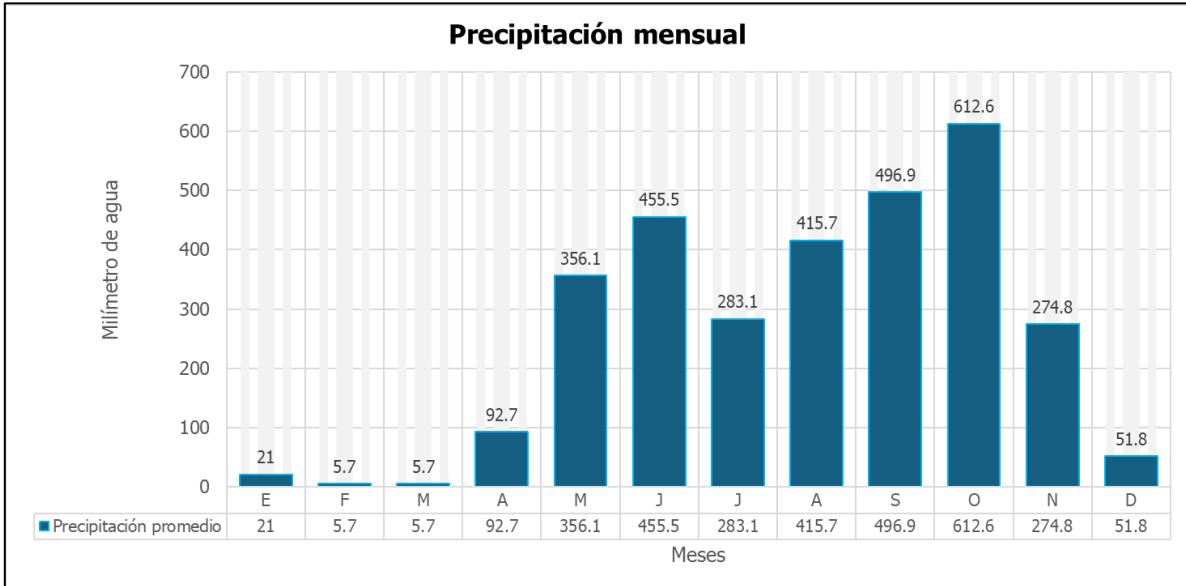


Figura 13. Precipitación mensual promedio del distrito de Nosara

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024

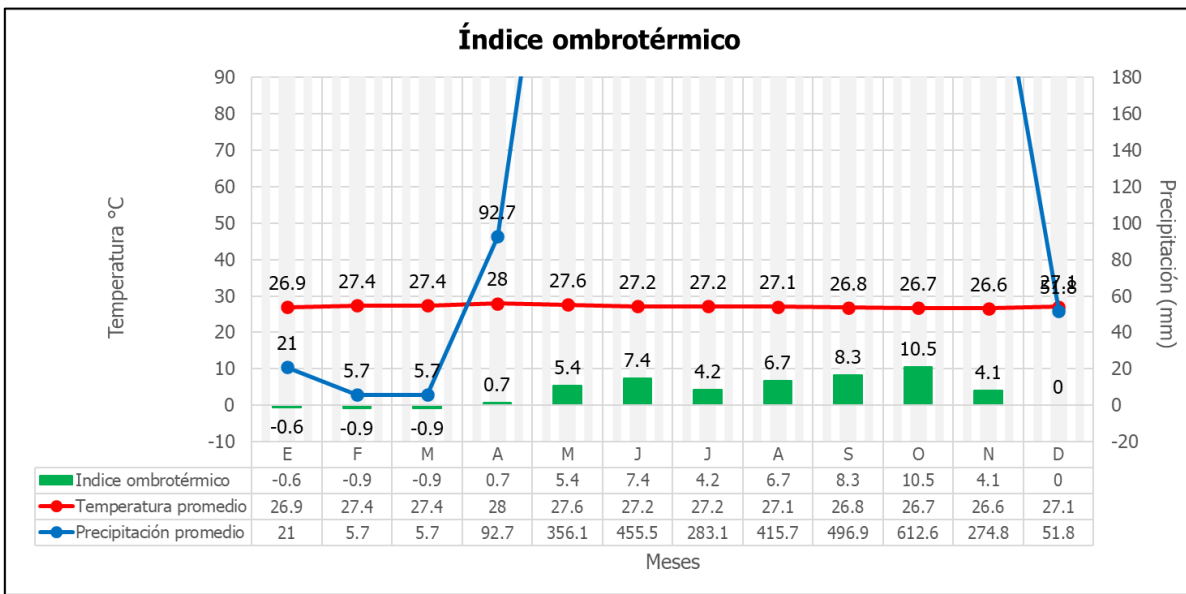


Figura 14. Índice ombrotérmico mensual del distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

- Radiación solar y nubosidad

En la Figura 15 se muestra que, en la zona de estudio, los planos orientados al norte reciben radiación solar durante los meses de marzo a septiembre, alcanzando su pico máximo en junio y quedando a la sombra el resto de los meses del año. Por otra parte, los planos orientados al sur presentan el comportamiento contrario, reciben radiación directa entre los meses de agosto a abril, alcanzando su pico máximo en diciembre y permanecen a la sombra durante los meses de abril a agosto. Finalmente, en las fachadas que se ubican al oeste y al este, la radiación es permanente durante todo el año y las cubiertas de techo y demás elementos horizontales son los que reciben un mayor grado de radiación incidente.

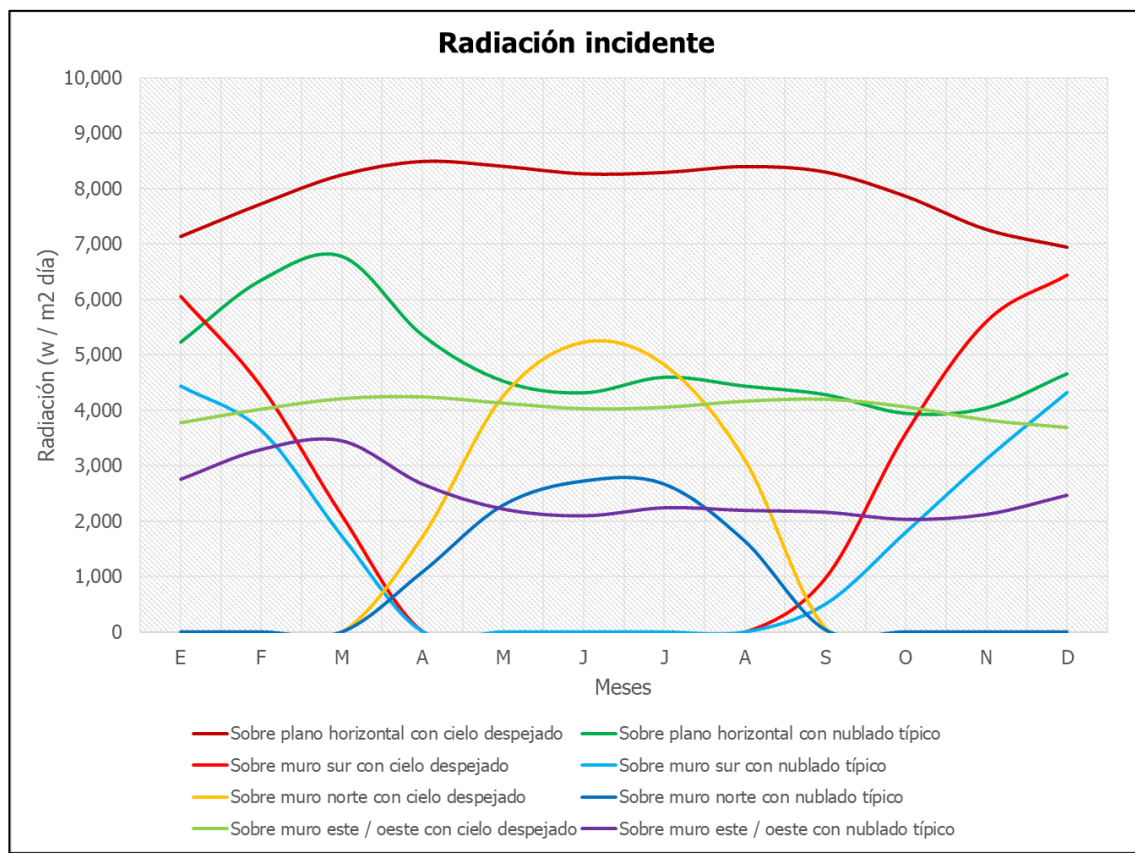


Figura 15. Radiación incidente mensual del distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

En la Figura 16 se muestra el soleamiento efectivo en el distrito de Nosara; este parámetro está relacionado con la nubosidad. En el gráfico se muestra que la nubosidad

es variable a lo largo del año, en los meses de época seca se aprecia que el soleamiento es mayor debido a la baja nubosidad, esto puede ser un factor que contribuye a que los valores de humedad disminuyan y las temperaturas aumenten. Por el contrario, durante los meses de época lluviosa se tiene una mayor nubosidad, lo que provoca que el soleamiento efectivo disminuya y se produzcan temperaturas un poco menores y mayor presencia de humedad.

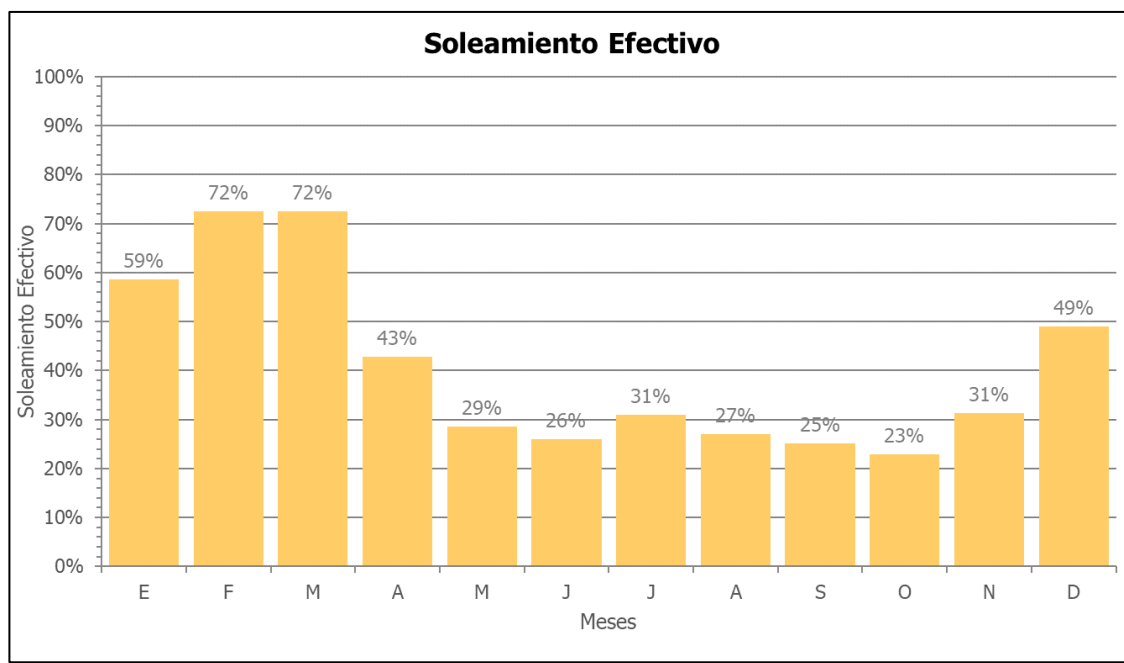


Figura 16. Soleamiento efectivo mensual del distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

- Viento

De acuerdo con los datos facilitados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN), la velocidad promedio anual del viento en la zona de estudio es de 3.8 m/s, esta medición se obtuvo de la estación automática de Cuajiniquil, Santa Cruz ubicada a 60 msnm. Al observar la distribución mensual de las velocidades en la Figura 17, se aprecia que los meses donde se presentan los mayores valores coinciden con los meses de época seca, y también con la época más ventosa a nivel nacional debido a la influencia de los vientos alisios sobre el territorio; concretamente, se muestra a febrero como el mes con mayor velocidad del viento, con un promedio de 6.1 m/s.

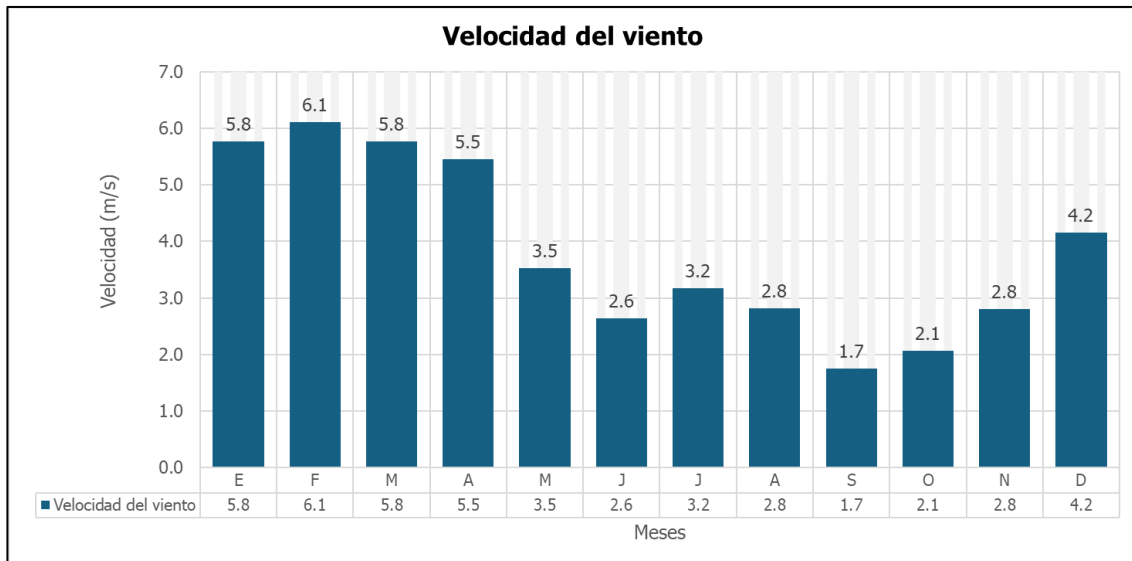


Figura 17. Velocidad media del viento mensual del distrito de Nosara

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024

Con respecto a la dirección del viento, se utiliza la herramienta digital *windfinder.com* para analizar el comportamiento de los vientos en la zona de estudio, mediante los datos recopilados de una estación de monitoreo ubicada en Playa Guiones, en el distrito de Nosara. Tal como se observa en la Figura 18, en la zona se presenta un sistema de brisa y terral, donde las diferencias de temperatura entre las superficies de la tierra y el mar generan áreas de baja y alta presión que mueven el aire en diferentes sentidos, lo que produce corrientes de aire desde el mar hacia la tierra durante el día (brisa) y corrientes

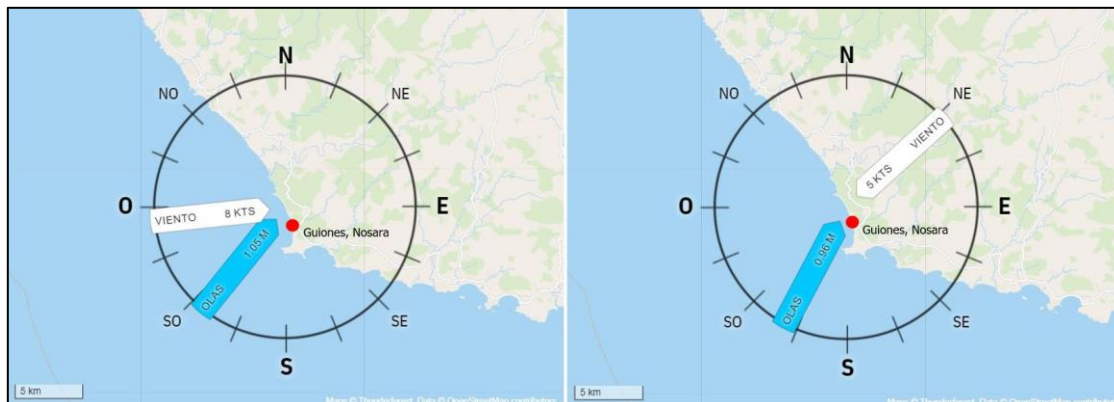


Figura 18. Dirección del viento en el distrito de Nosara durante el día (izquierda) y durante la noche (derecha)

Fuente: windfinder.com, 2024 [modificado por el autor]

de aire desde la tierra hacia el mar durante la noche (terral) (Salazar-Ceciliano, 2023). Este comportamiento de las masas de aire ocurre en los sitios costeros únicamente; al adentrarse en el interior del territorio este efecto desaparece.

En el caso de Nosara, las corrientes de brisa presentan una dirección predominante del suroeste hacia el noreste, mientras que las corrientes de terral presentan una dirección predominante contraria, del noreste hacia el suroeste.

- Resumen climático

A partir de los aspectos analizados en los apartados anteriores, en el Cuadro 5 se presenta un resumen de las principales características climatológicas del distrito de Nosara.

Cuadro 5. Resumen de parámetros climáticos del distrito de Nosara

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	26.9	27.4	27.4	28.0	27.6	27.2	27.2	27.1	26.8	26.7	26.8	27.1
Radiación (w/m2)	5229	6350	6778	5356	4528	4316	4599	4437	4283	3945	4044	4659
Precip. (mm)	21.0	5.7	5.7	92.7	356.1	455.5	283.1	415.7	496.9	612.6	274.8	51.8
I. ombrotérmico	-0.6	-0.9	-0.9	0.7	5.4	7.4	4.2	6.7	8.3	10.5	4.1	0.0
Humedad rel. (%)	72.5	68.8	69.6	73.4	81.0	83.8	82.5	83.7	84.9	86.3	82.5	78.4
Hum. esp. (g/kg)	15.6	14.9	15.2	16.8	18.6	18.9	18.5	18.7	18.7	18.9	18.2	17.4

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

2.3.4. Perfil bioclimático del distrito de Nosara

A partir del perfil climatológico desarrollado en el apartado anterior, y con apoyo de la herramienta Bioclimarq (Gómez-Azpeitia, 2020), se genera un diagnóstico bioclimático del distrito de Nosara, donde se muestran las principales necesidades que deben satisfacerse para alcanzar condiciones de confort higrotérmico en los espacios internos de edificaciones ubicadas en la zona de estudio.

A continuación, se presentan los hallazgos y consideraciones más relevantes del diagnóstico realizado, con el fin de construir el perfil bioclimático de Nosara, que permita definir las estrategias de climatización pasiva más efectivas para solventar los requerimientos encontrados.

- Parámetros bioclimáticos

La herramienta Bioclimarq (Gómez-Azpeitia, 2020), determina la temperatura de confort calculada para la zona de análisis, así como el rango de variación que puede presentar, de esta forma define los límites superior e inferior en los que esta varía sin afectar la sensación térmica de los usuarios del inmueble. Estos valores se presentan a continuación, en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Temperaturas de confort para el distrito de Nosara

Temperaturas de confort	
Temperatura neutra anual (Tn):	26.22 °C
Rango de confort anual (RC):	± 3.5 °C
Límite superior de confort anual (Tn + RC):	29.73 °C
Límite inferior de confort anual (Tn - RC):	22.73 °C
Temperatura base inferior (Tb) establecida según el tipo de clima*:	18 °C

* La temperatura base (Tb) se establece con el fin de evitar sobrestimación tanto de necesidades de calefacción para climas templados y fríos, como de enfriamiento para climas cálidos.

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

Por otra parte, Gómez-Azpeitia (2020) indica que, con base en los anteriores parámetros y en el régimen de temperaturas registrado en la ciudad de Nosara, se plantea la necesidad de enfriamiento durante todo el año. Asimismo, a lo largo del año, las condiciones de temperatura y humedad que se ubican dentro de la zona de confort representan solamente el 5% del tiempo por lo que, para el periodo restante, las estrategias básicas de climatización que mejor aplican a los requerimientos identificados son las mostradas en el Cuadro 7. Estas recomendaciones se originan de la carta bioclimática de Olgay que se muestra más adelante, en la Figura 21.

Cuadro 7. Estrategias de ventilación propuestas para el distrito de Nosara

Estrategias de climatización	
Ventilación natural	78%
Aire acondicionado*	17%

* Para sistemas no pasivos, se recomienda usar fuentes de energía limpia, como la fotovoltaica, a fin de reducir su impacto ambiental.

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

Otro indicador que resulta llamativo es la determinación de las Horas-Grado (Kh) de enfriamiento; este parámetro es un derivado de los datos de temperatura que se define como el superávit de temperatura acumulado por encima de una temperatura base establecida, multiplicado por su duración. En climas con temporada cálida en el año, esta temperatura base se establece como el límite superior de confort. Este concepto es útil para estimar el consumo de energía requerido para enfriamiento anual o mensual, el cual se obtiene al multiplicar las Horas-Grado del periodo de interés por la conductancia del edificio, que es la tasa de pérdida de calor específica (Gómez-Azpeitia, 2020).

Para la zona de estudio, este parámetro tiene un valor acumulado anual de 7246 Kh, distribuidas mensualmente como se muestra en la Figura 19. Allí se aprecia que el mayor excedente térmico se tiene en los meses de época seca, siendo marzo el mes que tiene un mayor requerimiento energético de enfriamiento.

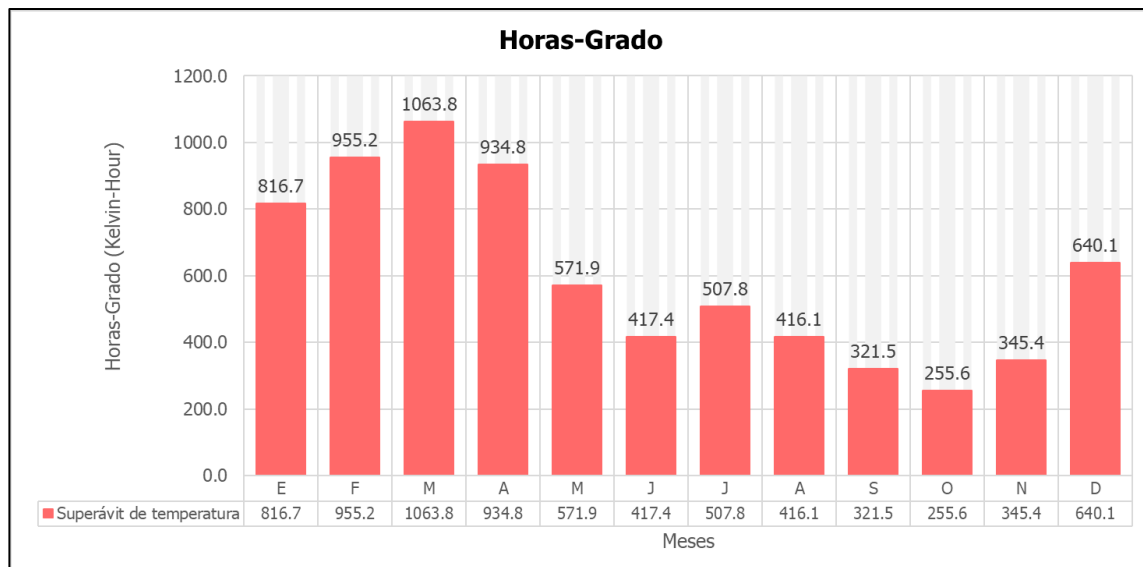


Figura 19. Horas-Grado mensuales del distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

- Porcentaje de personas insatisfechas

El porcentaje de personas insatisfechas (PPD) es un índice propuesto por Fanger (1972) para determinar la probabilidad de que un grupo de personas en un espacio determinado no se sienta cómodo con la temperatura ambiental. Entre más grandes sean los valores

del PPD, mayor será la insatisfacción térmica. La correlación propuesta por Fanger es el resultado de un estudio estadístico realizado a 1.300 personas, las cuales fueron expuestas durante tres horas a un ambiente determinado (Fanger, 1972).

Con la herramienta de Gómez-Azpeitia (2020) se determina el PPD para las condiciones climáticas presentes en el distrito de Nosara y al hacerlo se observa que, tal como se muestra en la Figura 20, durante los meses de febrero, marzo y abril este valor supera el 90%, lo que significa que los altos superávits térmicos, identificados previamente, se traducen en una falta de confort prácticamente para todos los habitantes de la zona de estudio.

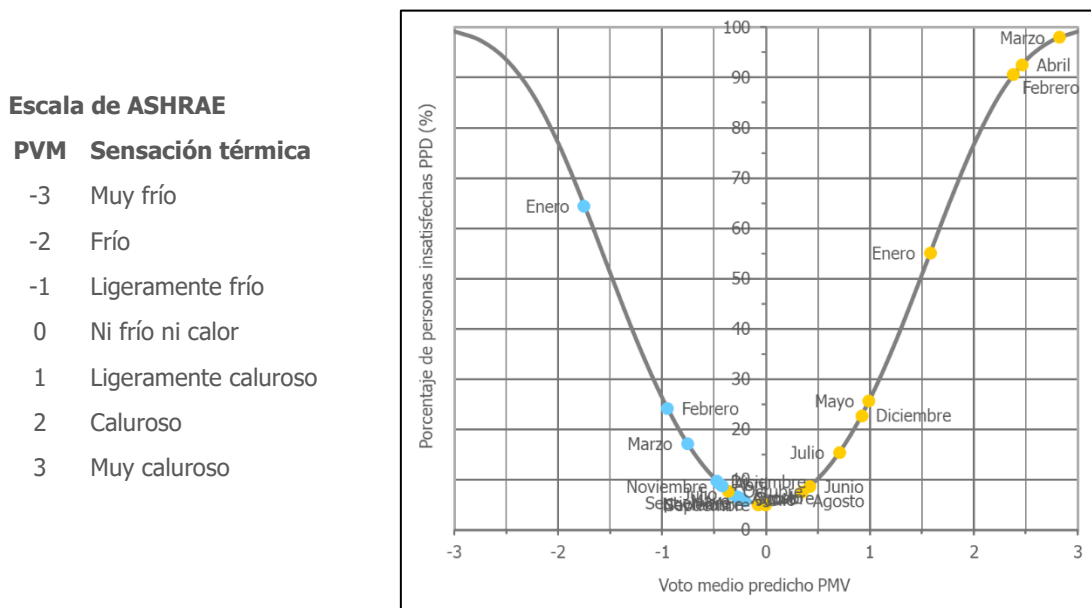
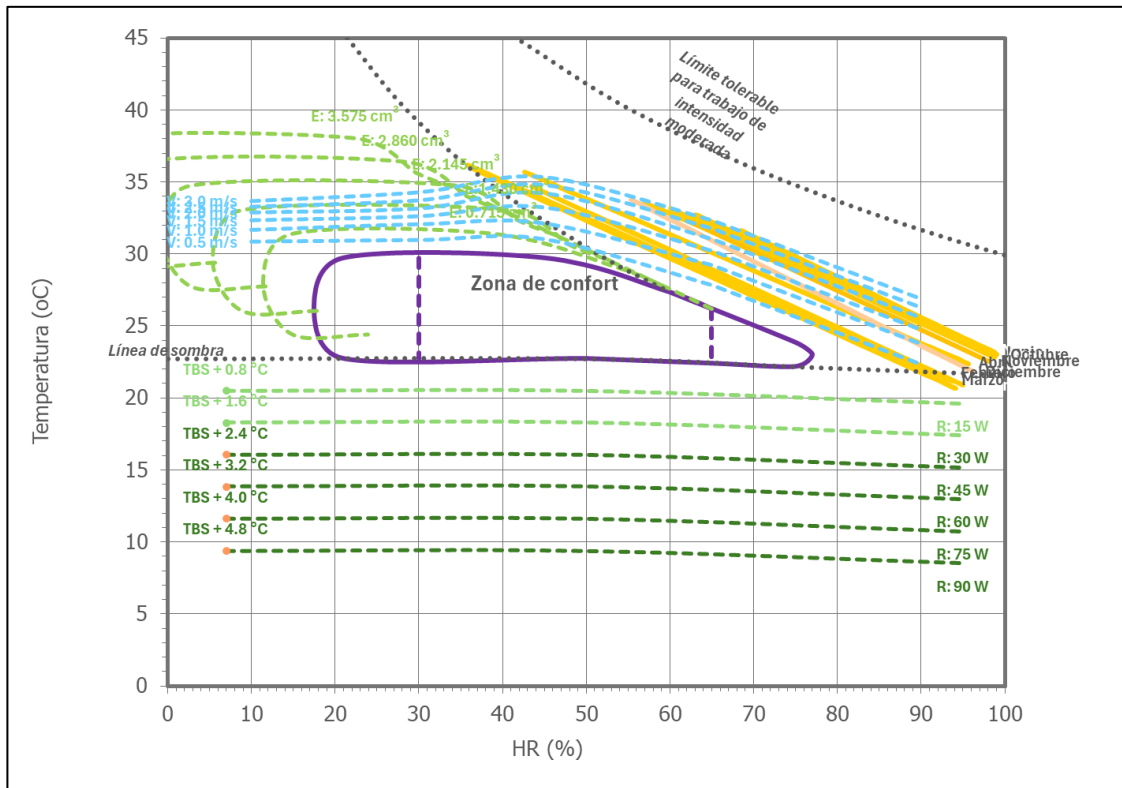


Figura 20. Indicador porcentaje de personas insatisfechas (PPD) del distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

- Carta bioclimática de Olgyay

En la Figura 21 se observa que las condiciones climáticas de la zona de estudio ubican el sitio fuera de la zona de confort. Sin embargo, según las recomendaciones desprendidas de la carta bioclimática de Olgyay, las condiciones pueden mejorarse al implementar técnicas de ventilación utilizando corrientes de aire con velocidades entre los 0.5 y los 3 m/s. No se recomienda el enfriamiento evaporativo debido a la alta humedad de la zona y se indica que, para algunos escenarios, la climatización pasiva no es viable, por lo que se complementa mediante aire acondicionado.



Estrategias adecuadas al clima

- V Ventilación (m/s)
- E Enfriamiento evaporativo (cm³ agua / kg aire)
- R Calentamiento pasivo ligero (wh/m²)
- R Calentamiento pasivo medio a intenso (wh/m²)

Tiempo

Mantener condiciones del clima natural	0%
--- V Ventilación (m/s)	78%
--- E Enfriamiento evaporativo (cm ³ agua / kg aire)	0%
--- R Calentamiento pasivo ligero (wh/m ²)	5%
--- R Calentamiento pasivo medio a intenso (wh/m ²)	0%
<hr/>	
No viable para climatización pasiva	
Aire acondicionado	17%
Calefacción activa	0%

Figura 21. Carta bioclimática de Olgay para el distrito de Nosara

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

2.3.5. Potenciales estrategias bioclimáticas por evaluar

Ahora que se obtuvo el perfil bioclimático de Nosara, se corrobora que la zona de estudio presenta un clima cálido y húmedo, con ambientes calientes durante el día a lo largo de todo el año, y de igual modo por la noche durante casi todos los meses. Gómez-Azpeitia (2020) establece una serie de recomendaciones bioclimáticas basadas en las tablas de Mahoney (1971) y en los coeficientes de Serra y Coch (1995), que pueden ayudar a mejorar las condiciones de confort de los inmuebles localizados en el área de influencia del clima caracterizado. A continuación, se presentan algunas de estas recomendaciones, las cuales son una guía para el establecimiento de las estrategias pasivas que se incorporan como oportunidades de mejora al modelo seleccionado.

Cuadro 8. Estrategias bioclimáticas propuestas por mes según las tablas de Mahoney (1971)

ESTRATEGIAS RECOMENDADAS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ventilación esencial	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ventilación deseable												
Protección contra la lluvia					x	x	x	x	x	x	x	
Inercia térmica		x	x									
Espacios de uso nocturno al exterior												
Protección contra el frío												

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024

Otras estrategias propuestas por Gómez-Azpeitia (2024) basadas en las tablas de Mahoney (1971) son:

- Configuración en planta: Orientación norte-sur, con eje largo este-oeste.
- Configuración espacial: Configuración extendida que facilite la ventilación.
- Organización espacial para efectos de ventilación: Habitaciones de una galería que facilite la ventilación cruzada todo el tiempo.
- Tamaño de los vanos: Medianos, entre el 30 y 50 % de la superficie de fachada.
- Posición de los vanos: A la altura de los ocupantes; frontales a la dirección de los vientos dominantes.
- Protección de vanos: Sombreado total y permanente.
- Muros y pisos: Ligeros y de baja capacidad calorífica.
- Cubiertas: Ligeras, reflejantes, con cámara plena.

- Exteriores: No se recomienda el uso de exteriores como lugares de estancia. Drenajes pluviales de gran capacidad.

Por otra parte, Gómez-Azpeitia (2020) también establece una serie de recomendaciones para la forma y tratamiento de la envolvente de la vivienda, basados en los coeficientes de Serra y Coch (1995). A continuación, se citan las estrategias mencionadas.

- Compacidad: Baja compacidad; configuración espacial y volumétrica lo más extendida posible.
- Porosidad: Porosidad intermedia; se acepta la posibilidad de patios.
- Esbeltez: Baja esbeltez; los edificios altos no son recomendables.
- Asentamiento: Bajo asentamiento; la menor área posible de contacto con el suelo.
- Adosamiento: Bajo adosamiento; se recomienda mantener al edificio exento a otros.
- Pesadez: Baja pesadez; se recomiendan cerramientos ligeros.
- Perforación: Alta perforación; se recomienda tener la mayor área posible de vanos abiertos.
- Transparencia: Baja transparencia; se recomienda la menor área posible de vanos acristalados.
- Aislamiento: Bajo aislamiento; se recomienda dotar a los cerramientos del menor aislamiento térmico posible.
- Tersura: Baja tersura. Considerar fachadas lisas, sin pliegues.
- Textura: Efecto poco relevante.
- Color: Colores claros.
- Variabilidad: Variabilidad poco recomendable.

La cantidad de estrategias bioclimáticas que pueden ser incorporadas y evaluadas es alta, como ya se observó. Debido a que analizarlas todas supondría un alcance muy extenso, se seleccionan aquellas que están orientadas a favorecer la ventilación natural y la sombra, ya que estos aspectos tienen una influencia directa en la variación de las condiciones de confort higrotérmico y al ser estrategias asociadas al diseño, el sobre costo ligado a su incorporación no debería ser significativo, por el contrario, se busca demostrar su aporte en la eficiencia energética de la unidad arquitectónica seleccionada. El resto de las estrategias propuestas por Gómez-Azpeitia (2020) representan futuras líneas de investigación para evaluar el desempeño de otros métodos de climatización pasiva.

2.3.6. Configuración arquitectónica de estudio

Para la determinación de la edificación por evaluar se busca, dentro del portafolio de proyectos diseñados por la empresa Sphera Sostenible y su empresa hermana Loop Design Studio, un proyecto residencial ubicado en el distrito de Nosara y que tenga características arquitectónicas que, por un lado, sean representativas del estilo constructivo tradicional de la industria nacional y por otro, que se pueda percibir, a priori, la posibilidad de tener oportunidades de mejora desde el punto de vista bioclimático. Algunos de los criterios que fueron considerados a la hora de la selección son:

- Se desea que los materiales constructivos de la vivienda sean tradicionales en el ámbito costarricense, ya que la materialidad es un parámetro que no se modifica dentro del proceso de simulación, es decir, es una constante dentro de la investigación. Esto hace que resulte interesante evaluar estrategias bioclimáticas que mejoren el confort de los espacios internos para un sistema constructivo que es el más abundante en el mercado nacional y, por ende, su alcance pueda ser aplicado de manera válida a una mayor gama de proyectos.
- Se busca también que las características geométricas de la vivienda difieran en parte con las recomendaciones dadas por Mahoney (1971) y por Serra y Coch (1995) que se exponen en el apartado 2.3.5. Esto con el fin de contar con escenarios no recomendados en cuanto a configuración arquitectónica y evaluar el perjuicio que pueden tener al confort higrotérmico, a la vez que se permite tener posibilidades de mejora. Se buscan principalmente aspectos relacionados a las variables independientes de la simulación, las cuales se mencionan en el apartado 2.3.10.

Considerando estos aspectos, y luego de revisar las opciones disponibles en la zona de estudio relacionadas con la empresa Sphera Sostenible, se elige la Residencia Maru como el objeto de estudio en esta investigación. La vivienda fue construida en el año 2020 y se encuentra localizada en el sector de Playa Guiones de Nosara, aproximadamente a 300 m de la línea de costa. Con respecto a las estaciones meteorológicas de las cuales se obtuvieron los datos climatológicos para el desarrollo del perfil climático del distrito de Nosara, esta residencia se ubica a 5 kilómetros al oeste de la estación Barco Quebrado y a 12 kilómetros al sur de la estación de Cuajiniquil. En la Figura 22 se muestra la ubicación del proyecto seleccionado, mientras que en la Figura 23 se muestran unas fotografías de la vivienda y su localización respecto al litoral.

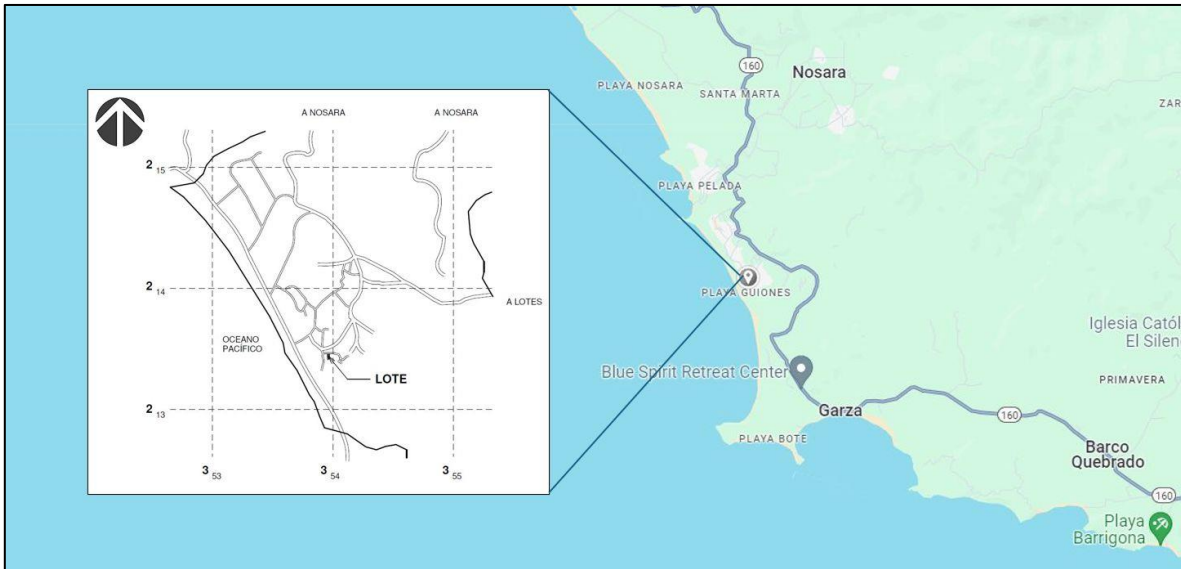


Figura 22. Ubicación de Residencia Maru en Playa Guiones de Nosara

Fuente: Loop Studio Design, 2020 [Modificado por el autor]



Figura 23. Fotografías del proyecto Residencia Maru

Fuente: Loop Studio Design, 2020

Arquitectónicamente, la edificación tiene muros de mampostería y concreto en el primer nivel y paredes livianas confinadas con marcos de concreto en el segundo; los cielos son de madera y los pisos de concreto lujado. Consta de dos niveles. En el primer nivel se ubica una bodega, un baño y una sala-estudio, mientras que en el segundo nivel se encuentra el dormitorio principal, una oficina, dos baños, la sala-cocina, el cuarto de pilas, una bodega y un balcón exterior. Estas distribuciones se muestran en la Figura 24 y Figura 25.

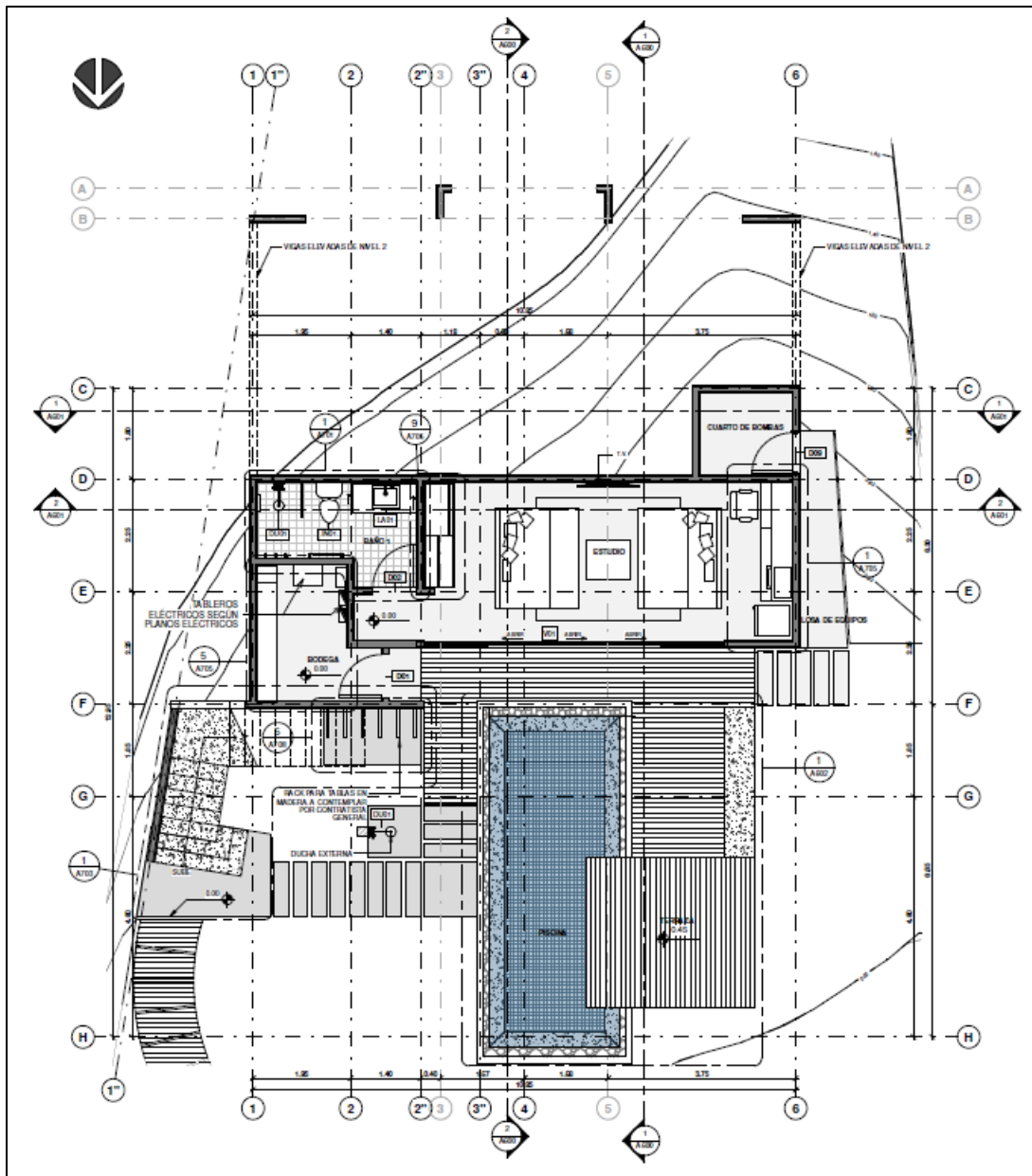


Figura 24. Distribución arquitectónica del primer nivel de la Residencia Maru

Fuente: Loop Studio Design, 2020

Las principales características arquitectónicas que se consideraron para la selección de la vivienda son su alta compacidad y su organización espacial, pues estas pueden dificultar la ventilación. Los espacios de estancia del segundo nivel, como habitación, oficina y baños, cuentan con una única ventana, lo que resulta de interés para evaluar el comportamiento de esos espacios. Otros elementos significativos son que la vivienda no posee porosidad, tiene una esbeltez intermedia, al igual que su nivel de perforación; la fachada principal de

la casa se encuentra hacia el norte, presenta una transparencia de gran tamaño en el acceso de la sala al balcón, el dormitorio principal se encuentra en el costado suroeste y tiene una única ventana que ve hacia el sur, los aleros o elementos que producen sombra son pocos y de un tamaño en apariencia pequeño, y el acceso al segundo nivel se da mediante un conjunto de escaleras que se encuentra en el exterior de la vivienda.

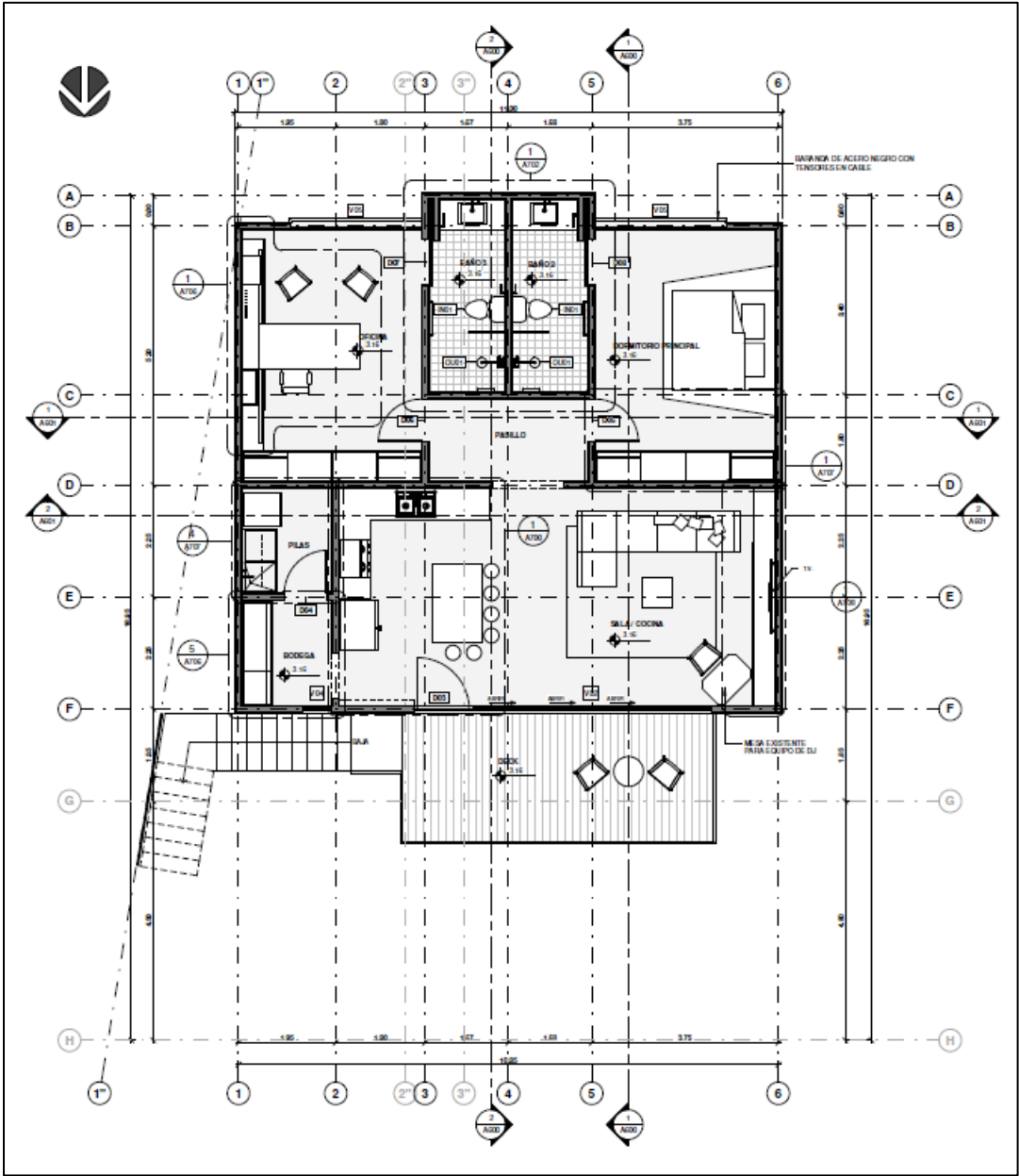


Figura 25. Distribución arquitectónica del segundo nivel de la Residencia Maru

Fuente: Loop Studio Design, 2020



Figura 26. Estudio primer nivel (izquierda) y gradas hacia segundo nivel (derecha)

Fuente: Loop Studio Design, 2020



Figura 27. Sala-cocina segundo nivel (izquierda) y dormitorio principal (derecha)

Fuente: Loop Studio Design, 2020

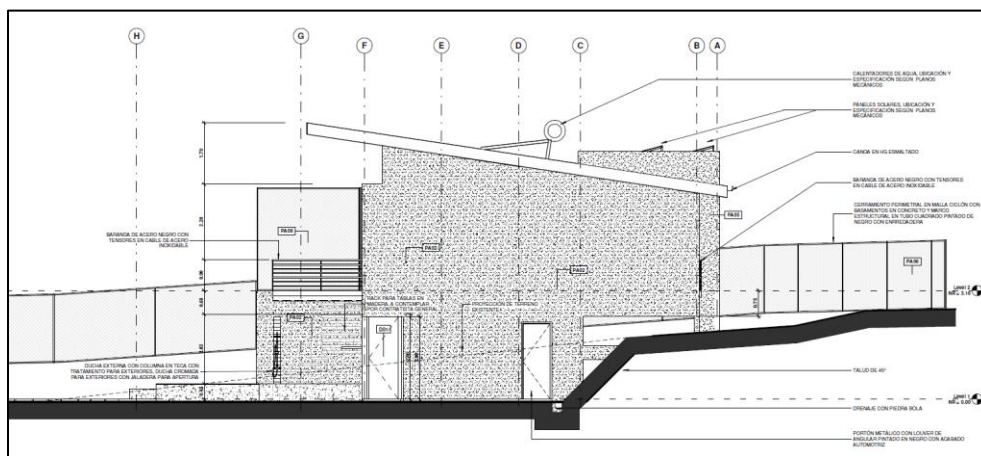


Figura 28. Elevación lateral este de la Residencia Maru

Fuente: Loop Studio Design, 2020

2.3.7. Características térmicas de los materiales

Como se mencionó en el apartado anterior, la Residencia Maru está construida con un sistema de paredes de mampostería y muros de concreto en el primer nivel, mientras que en el segundo nivel se tienen paneles livianos confinados por marcos de concreto. Los muros formados de bloques de mampostería tienen un espesor de 15 cm y existen variantes con refuerzo de acero vertical #3 cada 60 cm con celda rellena de concreto y muro de retención de 15 cm de espesor con refuerzo de acero vertical #4 cada 40 cm y todas las celdas rellenas. Adicionalmente, se tienen muros de concreto reforzado con acero vertical #5 cada 20 cm y horizontal #4 cada 30 cm. Todas las columnas y vigas son de concreto reforzado y el entrepiso está conformado por viguetas pretensadas de 20 cm de peralte con torones de acero de 9.5 mm de diámetro con bloques tipo A de PC. Algunos de los detalles constructivos extraídos de los planos estructurales de la vivienda se muestran en la Figura 29.

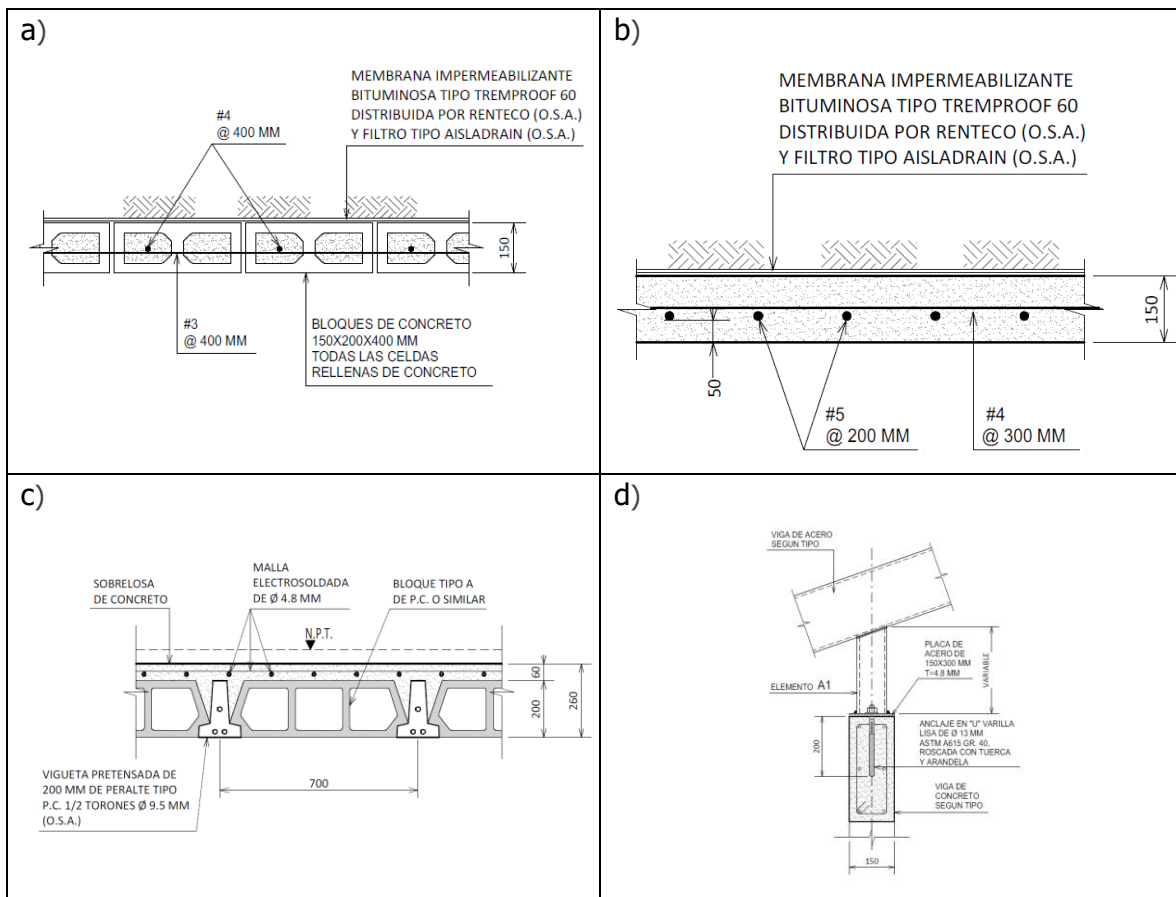


Figura 29. a) Muro de retención de mampostería. b) Muro de concreto. c) Losa de entrepiso. d) Unión entre viga corona y estructura de techo

Fuente: Loop Studio Design, 2020

A pesar de que, como se mencionó anteriormente, la materialidad de la vivienda seleccionada no se va a variar en el proceso de simulación y propuestas de mejora, es importante contar con algunas características térmicas de los principales materiales empleados, esto debido a que para la simulación sí se requiere introducir al software este tipo de información para que este sea capaz de determinar parámetros de carga térmica de los espacios internos.

En el Cuadro 9 se presenta una lista de los principales materiales que conforman la envolvente de la Residencia Maru, así como algunos valores térmicos típicos asociados a dichos materiales, los cuales se obtuvieron a partir de consultas bibliográficas.

Cuadro 9. Propiedades térmicas de algunos materiales constructivos de la Residencia Maru

Material	Código	Grosor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad (W/m ² °C)	Calor específico (J/kg°K)	Resistencia al vapor (GN·s/kg·m)
Mampostería @20	MB2	0.15	2083	1.12	1000	15-150
Mampostería @60	MB1	0.15	1730	0.48	1000	15-150
Concreto reforzado	MC1	0.15	2200-2400	1.50	920	100-150
Panel liviano	PL	0.15	1125	0.20	1500	30-60
Losa entrepiso	LE	0.26	590-760	1.58	1000	100-150
Acero galvanizado	AG	0.00053	7200	110	380	∞
Madera ligera	ML	0.013	435-565	0.14	1600	50-250
Vidrio	VI	0.03	2500	1.00	750	∞

Fuente: Salazar-Ceciliano, 2021; Navas, 2015; Medina, 2021 & ICCL, 2007

2.3.8. Proceso de análisis

Para la creación del modelo computacional se utiliza el software IES-VE, desarrollado por Integrated Environmental Solutions (IES), una compañía global que genera herramientas tecnológicas para la descarbonización del sector constructivo. Este es un software basado en aplicaciones, que contiene herramientas aplicables a un modelo geométrico en distintos campos de análisis, los cuales se mencionan en la Figura 30.

En esta investigación se consideran las aplicaciones de Flujo de aire, Solar y HVAC para realizar simulaciones de ventilación natural y ganancias solares directas, que permitan determinar valores de temperatura y humedad relativa en los espacios interiores de la vivienda seleccionada, así como cuantificar el gasto energético y la carga térmica asociados

a sistemas de climatización activa que complementen o sustituyan las estrategias bioclimáticas analizadas.

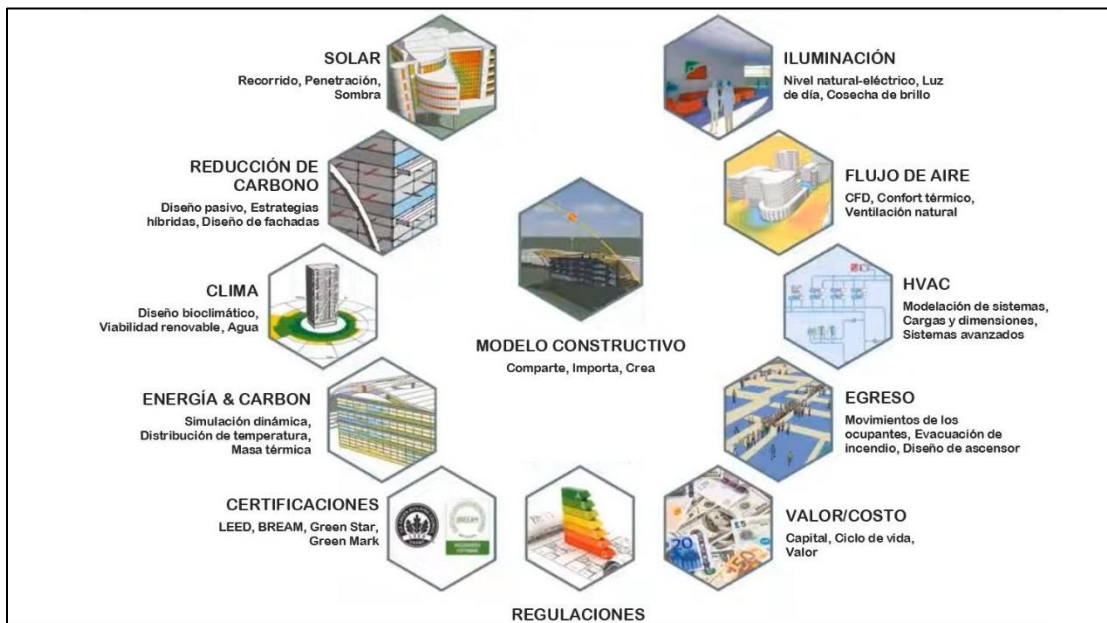


Figura 30. Campos de aplicación de las herramientas de análisis del software IES-VE

Fuente: Integrated Environmental Solutions (IES), 2024 [Modificado por el autor]

Queda fuera del alcance de esta investigación la modificación de los materiales constructivos, así como análisis de ciclo de vida del proyecto y la determinación de la huella de carbono asociada a la edificación.

Entrando en detalle, se parte de la elaboración de un modelo computacional de la vivienda seleccionada, que se somete a una simulación climática que permite determinar los valores de carga térmica y humedad relativa ya mencionados. Al compararlos con los valores obtenidos para la zona de confort higrotérmico calculada para el distrito de Nosara, es posible definir si la configuración arquitectónica evaluada hace que los ocupantes de la edificación permanezcan dentro del rango definido en dicha zona de confort y a partir de esto, identificar posibilidades de mejora. Luego, se plantean las estrategias de climatización pasiva, orientadas a ventilación y sombra, derivadas a partir del perfil bioclimático elaborado y se realiza una nueva simulación para evaluar el efecto que tienen estas sobre las condiciones de confort higrotérmico. El proceso descrito anteriormente se muestra de forma gráfica en la Figura 31.

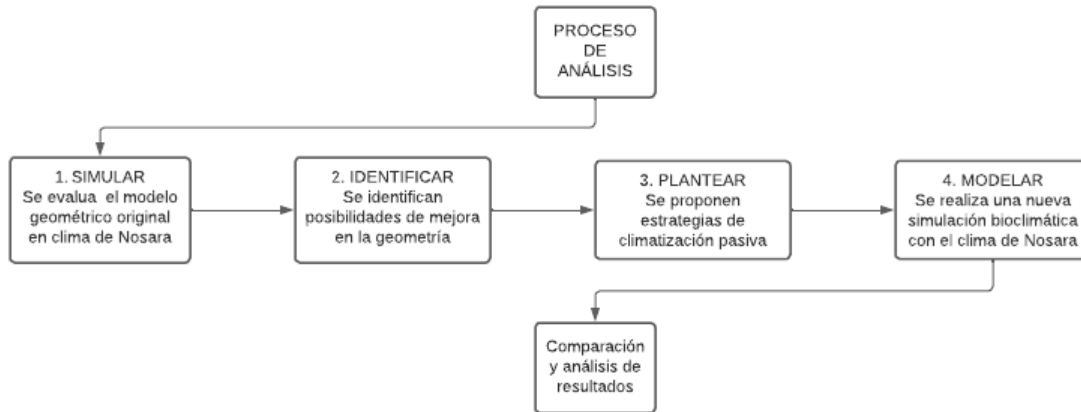


Figura 31. Esquema del proceso de análisis para el desarrollo de la investigación

Fuente: Elaboración propia, 2024

Para el proceso de simulación, el software requiere que los datos climatológicos que proporcionan el perfil de entrada para la simulación sean cargados en un archivo con formato EPW. En el caso de Costa Rica este tipo de archivos son escasos, pues los existentes provienen, en su mayoría, de sitios web internacionales dedicados a la recopilación de información climática mundial. Por lo general, estos archivos se generan a partir de interpolación de datos que se obtienen de algunas estaciones con registros históricos que no necesariamente se encuentran cerca de la zona requerida.

Luego de realizar una búsqueda en distintas páginas web, se propone el uso de un archivo obtenido de Climate.OneBuiding que contiene información climática del cantón de Nicoya, Guanacaste en el periodo de 2007-2021. En el siguiente apartado se detalla un análisis comparativo entre los datos contenidos de este archivo y el perfil climático desarrollado para el distrito de Nosara, con el fin de determinar la viabilidad de su uso para el desarrollo de las simulaciones computacionales.

2.3.9. Validación climática del archivo EPW utilizado

El archivo EPW con el que se cuenta para realizar la simulación en el software IES-VE se obtiene del sitio web Climate.OneBuiding y contiene datos climáticos del distrito de Nicoya, ubicado a 44 km al noroeste de la zona de estudio en Nosara. Cerca de este punto se ubica la estación meteorológica del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de La Ceiba, localizada en la latitud 10.11667 y en la longitud -85.31639, a una altitud de 58 msnm. En la Figura 32 se muestra la estación mencionada, la cual se encuentra en la zona límite entre las

subregiones climáticas PN1 y PN2 que se presentaron en la Figura 7. Esto hace que, debido a la distancia y a la variación climática que pueda existir entre Nosara y el centro de Nicoya, resulte importante comparar los datos contenidos en el archivo EPW con el perfil climático elaborado del distrito de Nosara, para validar su utilización y establecer las limitaciones y consideraciones asociadas.

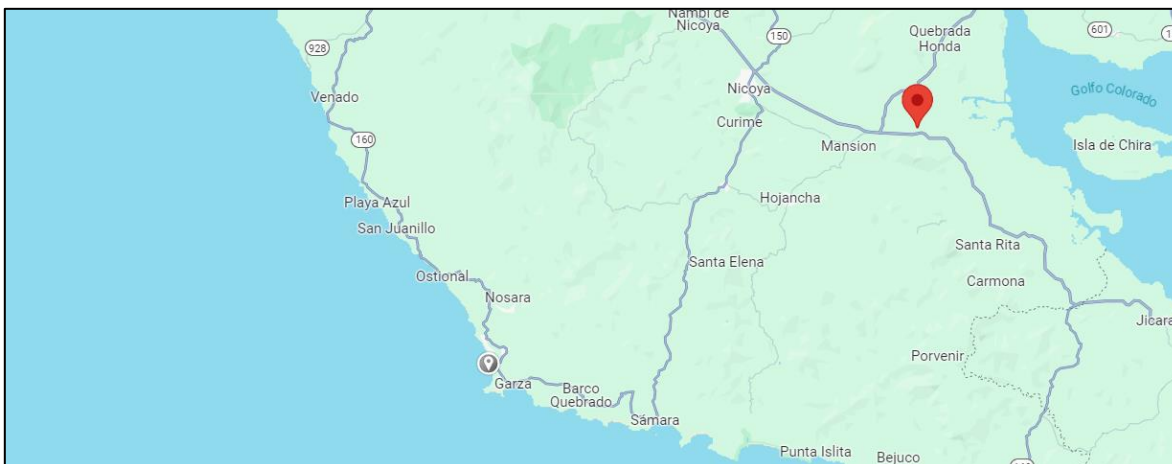


Figura 32. Ubicación de la estación meteorológica La Ceiba en Nicoya, Guanacaste

Fuente: Google Maps, 2024

Para realizar este análisis, primeramente, se hace uso del software Climate Consultant 6.0 para leer los datos del archivo EPW y extraer los valores asociados a parámetros como temperatura, humedad relativa, precipitación, radiación solar y velocidad y dirección del viento; posteriormente, se realizan gráficos comparativos entre estos datos y los valores de los parámetros climáticos mencionados provenientes del perfil climático construido en el apartado 2.3.3. Finalmente, para efectuar un control cruzado, se emplean los datos provenientes de la estación La Ceiba, perteneciente al IMN para observar la fidelidad de los datos del archivo EPW, el cual, al ser obtenido de un sitio web de datos climáticos globales, está construido con valores e interpolaciones de diversas fuentes climáticas internacionales.

A continuación, se presentan los hallazgos más importantes relacionados a los distintos parámetros climáticos.

- Temperatura

En la Figura 33 se muestra un gráfico comparativo de las temperaturas promedio de los distritos de Nosara y Nicoya, tanto de los datos del IMN como del archivo EPW que se

utiliza para las simulaciones. Aquí se observa que los valores de Nicoya del archivo EPW presentan un comportamiento anual similar al del distrito de Nosara, aunque existen diferencias en su magnitud que rondan entre 0.5 °C y 1 °C. Se destaca que, en los meses de época lluviosa, que comprenden de abril a diciembre, los valores de Nicoya son menores a los del perfil climático obtenido de Nosara.

Por otra parte, los valores de la estación meteorológica La Ceiba tienen un comportamiento similar al resto, sin embargo, poseen magnitudes más elevadas que las de Nosara y de las del archivo EPW. Estas diferencias ascienden a 2 °C en los mayores casos, lo cual coincide con el hecho de que Nicoya se encuentra en una subregión climática más severa que Nosara.

Al ver este comportamiento se concluye que los datos climáticos de temperatura contenidos en el archivo EPW se ajustan mejor a los valores del Instituto Meteorológico Nacional pertenecientes a la estación Barco Quebrado en Nosara que a la estación La Ceiba en Nicoya.

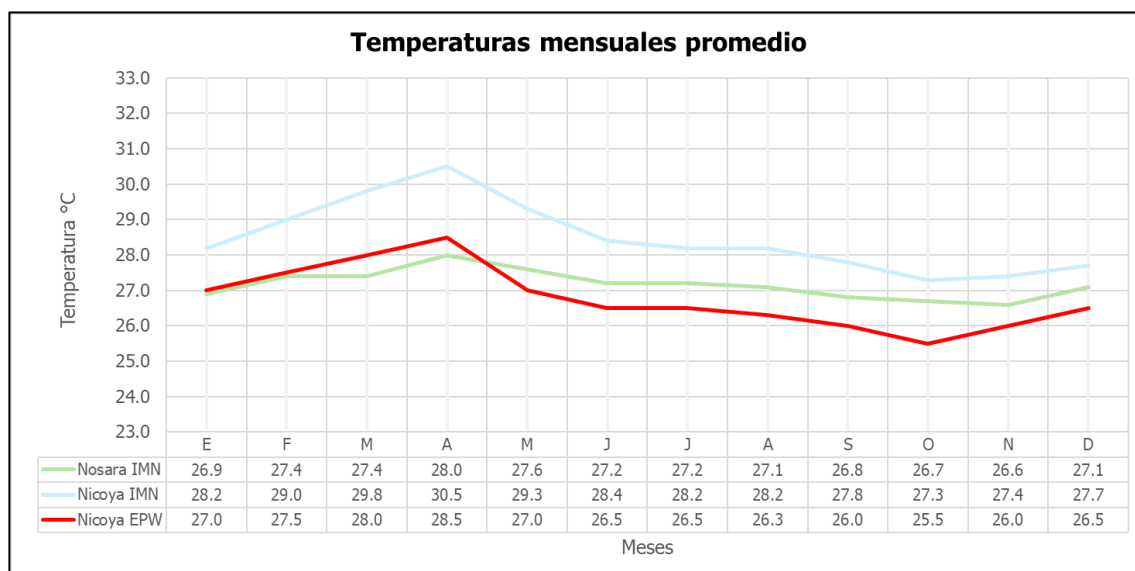


Figura 33. Comparación de temperaturas promedio de Nosara y Nicoya

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024 & Climate.OneBuiding, 2024

- Humedad relativa

En la Figura 34 se compara mediante un gráfico la humedad relativa promedio de los distritos de Nosara y Nicoya, tanto de los datos del IMN como del archivo EPW que se

utiliza para las simulaciones. En este caso, los valores de humedad relativa reportados en Nosara son mayores que los de Nicoya, lo que puede deberse a que los valores de temperatura en Nicoya son superiores, y esto disminuye el porcentaje de humedad; además, la cercanía de Nosara con el océano también influye en este punto.

El comportamiento de este parámetro a lo largo del año es similar para todas las fuentes de datos, presentando valores menores en época seca y mayores en época lluviosa. Por otra parte, los datos del archivo EPW de Nicoya son prácticamente iguales a los pertenecientes a la estación de La Ceiba.

La magnitud de las diferencias entre los valores de humedad de Nosara y Nicoya son menores a un 15%, sin embargo, esto influye en la simulación, ya que se usan valores de humedad relativa menores a los del perfil climático desarrollado con la información proveniente de la estación Barco Quebrado. Esta diferencia debe tenerse presente al interpretar los porcentajes de humedad de los espacios interiores que se obtengan luego del análisis con IES-VE.

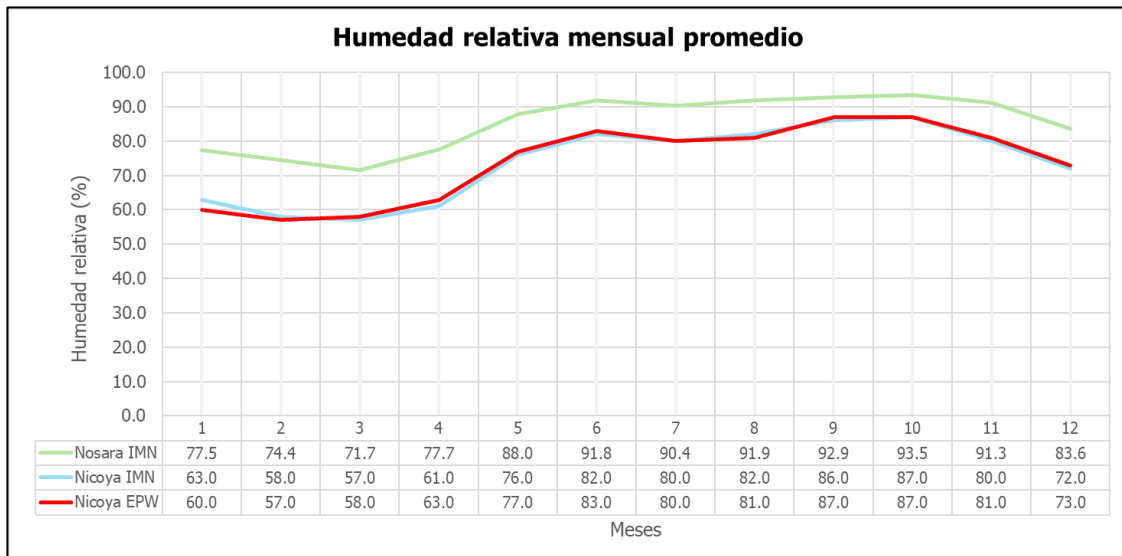


Figura 34. Comparación de humedad relativa promedio de Nosara y Nicoya

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024 & Climate.OneBuiding, 2024

- Precipitación

Respecto a la precipitación, el archivo EPW no contiene valores sobre ella, por lo que la comparativa se hace entre las estaciones de Barco Quebrado y La Ceiba, ambas del

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Aquí se evidencia la condición más seca de Nicoya respecto a Nosara, pues las épocas seca y lluviosa de ambos distritos coincide en comportamiento, pero Nicoya presenta aproximadamente un 40% menos de lluvia mensual a lo largo del año. Solamente en los meses de mayor sequía, febrero y marzo, ambos distritos tienen valores prácticamente iguales de este parámetro.

La simulación bioclimática no involucra la influencia de la lluvia, pues no se analizan aspectos hidrológicos o hidráulicos, por lo que esta diferencia no genera problema alguno en los resultados obtenidos, pero se debe tener presente para comprender los comportamientos de otros parámetros climáticos, como la humedad relativa o la temperatura, pues la precipitación si tiene influencia en ellos.

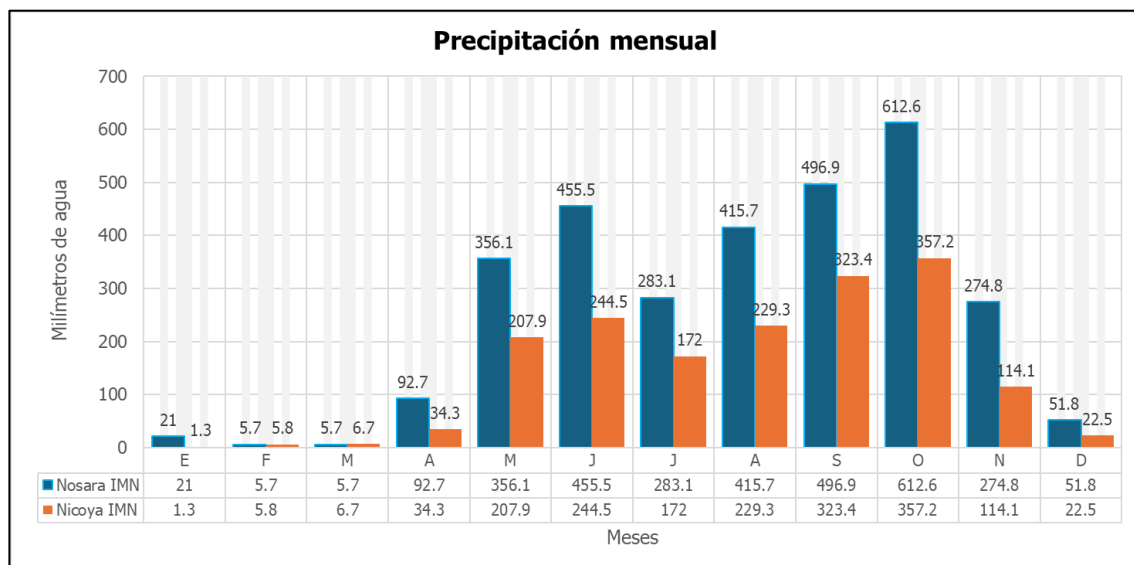


Figura 35. Comparación de precipitación promedio de Nosara y Nicoya

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024 & Climate.OneBuilding, 2024

- Soleamiento efectivo

El soleamiento efectivo es el parámetro que presenta una mayor similitud entre los datos contenidos en el archivo EPW de Nicoya y el perfil climático de Nosara. En la Figura 36 se muestra que tanto el comportamiento como la magnitud de los valores coincide en buena forma. La estación meteorológica de La Ceiba no contiene datos de soleamiento ni radiación, por lo que no se puede comparar con los valores analizados.

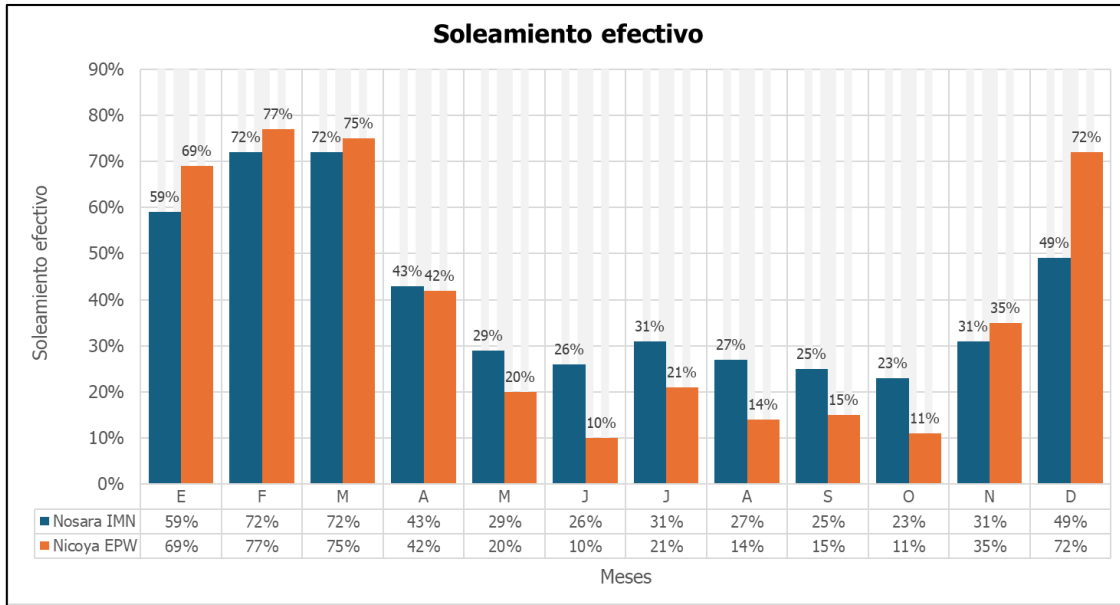


Figura 36. Comparación de soleamiento efectivo promedio de Nosara y Nicoya

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024 & Climate.OneBuiding, 2024

- Viento

La velocidad promedio del viento presenta diferencias importantes, principalmente en los primeros cuatro meses del año, los cuales son meses muy ventosos en la zona de análisis; mientras que en el distrito de Nosara los valores se encuentran por encima de los 5.5 m/s, los valores contemplados en el archivo EPW de Nicoya presentan valores promedio alrededor de los 3.5 m/s, como se muestra en la Figura 37.

Esta diferencia sí puede generar sesgos en los resultados de la simulación, ya que la ventilación es uno de los principales aspectos a evaluar. Debe tenerse presente que, al simular con valores de velocidad menores a los del perfil climático de Nosara, se debe vigilar la velocidad en los espacios interiores. Una velocidad de 0.1 m/s es el mínimo aceptable a nivel doméstico, y para zonas cálidas como la evaluada, un buen valor puede rondar 1.0 m/s (Salazar-Ceciliano, 2023). Sin embargo, obtener este valor utilizando el archivo EPW de Nicoya, genera el riesgo de que los vientos reales de Nosara propicien condiciones de no confort en el interior de la vivienda, por lo que en el proceso de simulación de mejoras bioclimáticas sería aceptable tener resultados menores a 1.0 m/s.

Con respecto a la dirección del viento, el archivo EPW de Nicoya reporta que la dirección predominante del viento es de noreste hacia el suroeste, lo que coincide con el fenómeno de terral descrito en Nosara. Esto permitirá evaluar adecuadamente la orientación de la configuración arquitectónica seleccionada y la ubicación de las perforaciones.

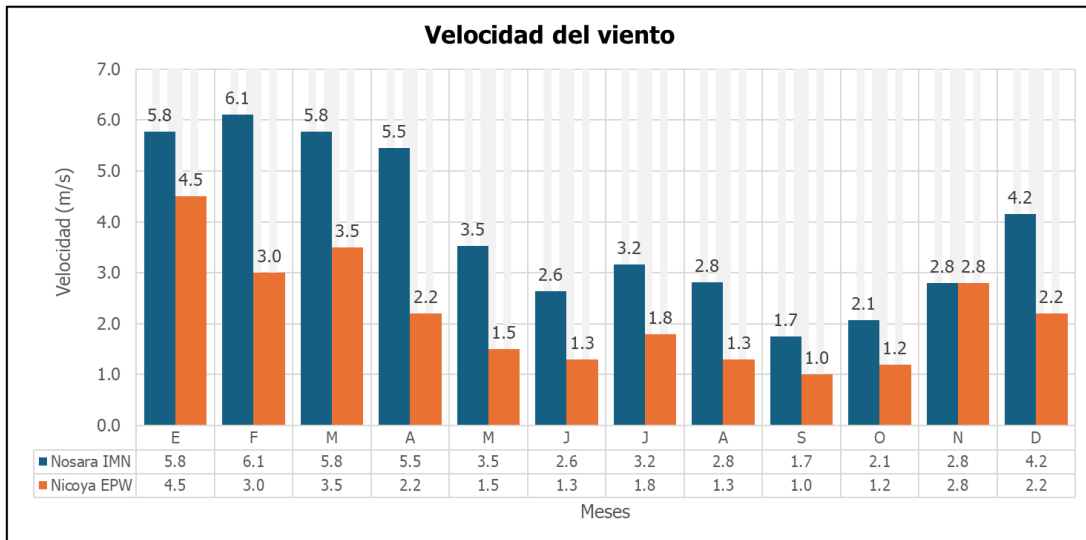


Figura 37. Comparación de velocidad del viento promedio de Nosara y Nicoya

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024 & Climate.OneBuilding, 2024

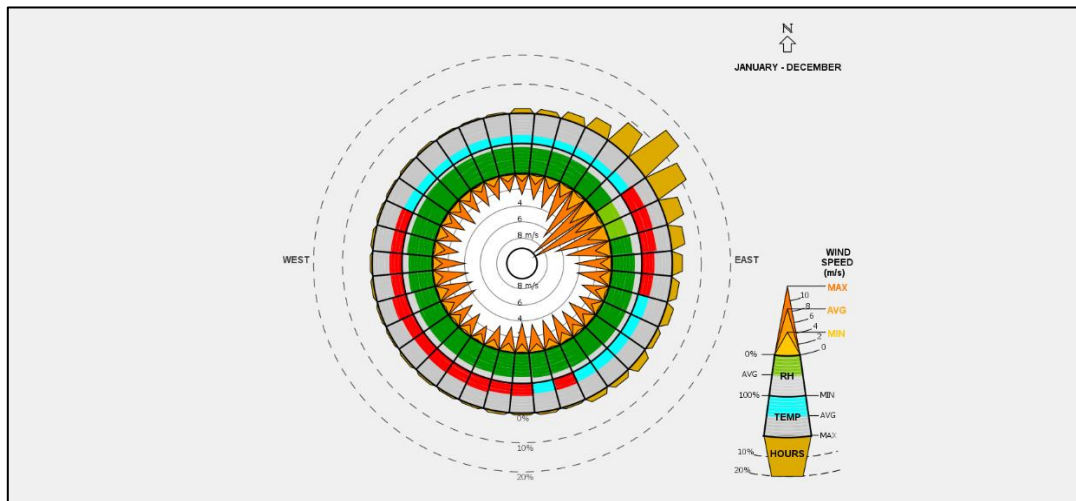


Figura 38. Rosa de los vientos del distrito de Nicoya obtenida de archivo EPW

Fuente: Climate Consultant 6.0, 2024

Adicionalmente a este análisis comparativo realizado, se utiliza la herramienta Meteonorm 8.0 para generar una interpolación climática del distrito de Nosara, con el objetivo de

determinar si es factible generar un archivo EPW de la zona de estudio que emule de mejor manera las condiciones del perfil climático desarrollado. Esta es una herramienta que se alimenta de bases de datos y estaciones meteorológicas globales a las cuales tiene acceso, para generar compilados de cualquier punto de interés partiendo de su ubicación geográfica.

Luego de aplicar una triangulación de las fuentes de datos cercanas, la herramienta genera un perfil climático de la zona partiendo de los datos contenidos en las estaciones de: Liberia (ubicada a 77 km de Nosara), Rivas (ubicada a 168 km de Nosara), Limón (ubicada a 286 km de Nosara), San José (ubicada a 158 km de Nosara), Aeropuerto Tobías Bolaños (ubicada a 156 km de Nosara) y Juigalpa (ubicada a 245 km de Nosara). A continuación, se presentan algunos datos y gráficos generados por este software que muestran el perfil propuesto.

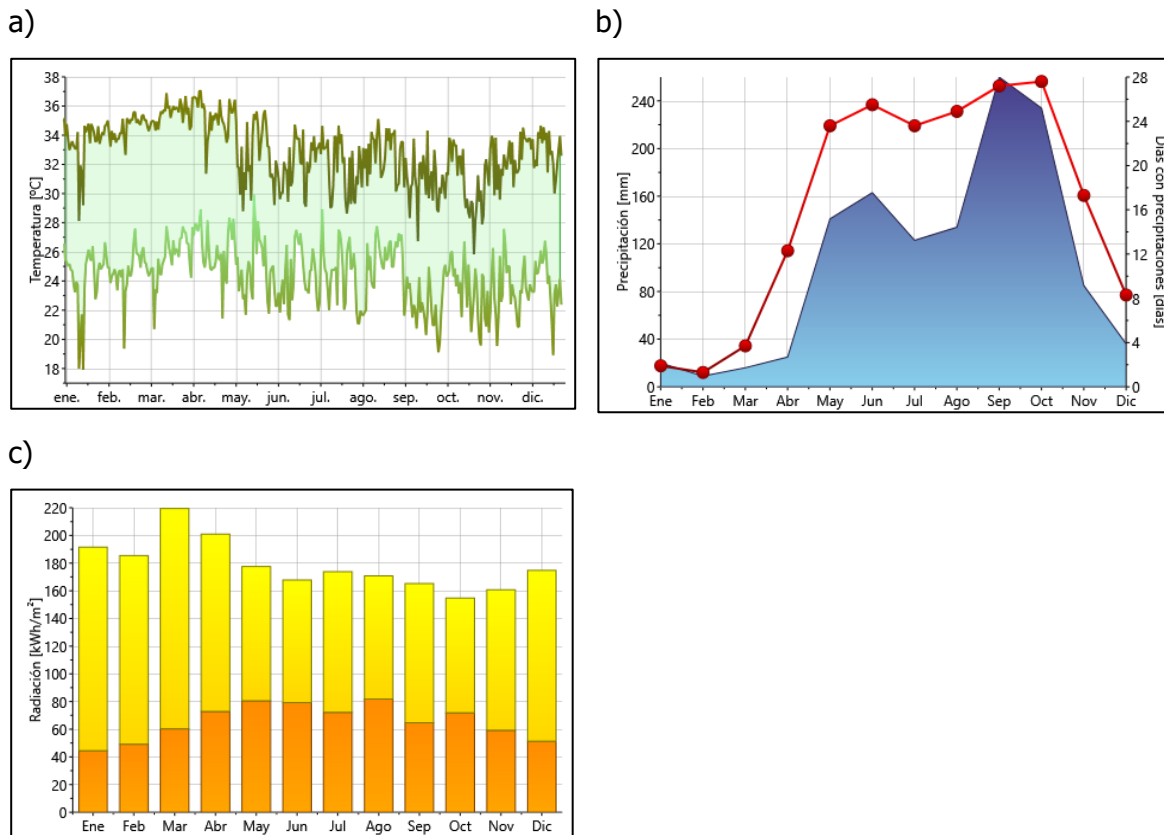


Figura 39. a) Temperatura máxima, mínima y promedio, b) precipitación mensual promedio y c) radiación solar mensual promedio

Fuente: Meteonorm 8.0, 2024

Al comparar los datos del archivo EPW dado por Meteonorm 8.0 para Nosara con los del archivo EPW de Nicoya, se tiene que el ajuste con los valores del perfil climático de Nosara

es mejor en el caso del segundo. Los valores promedio de temperatura muestran que el archivo EPW de Nosara generado con Meteonorm 8.0 tiene valores que se aproximan más a los datos de la estación La Ceiba, y que son superiores a los del perfil climático de Nosara y a los del archivo EPW de Nicoya, tal como se muestra en la Figura 40.

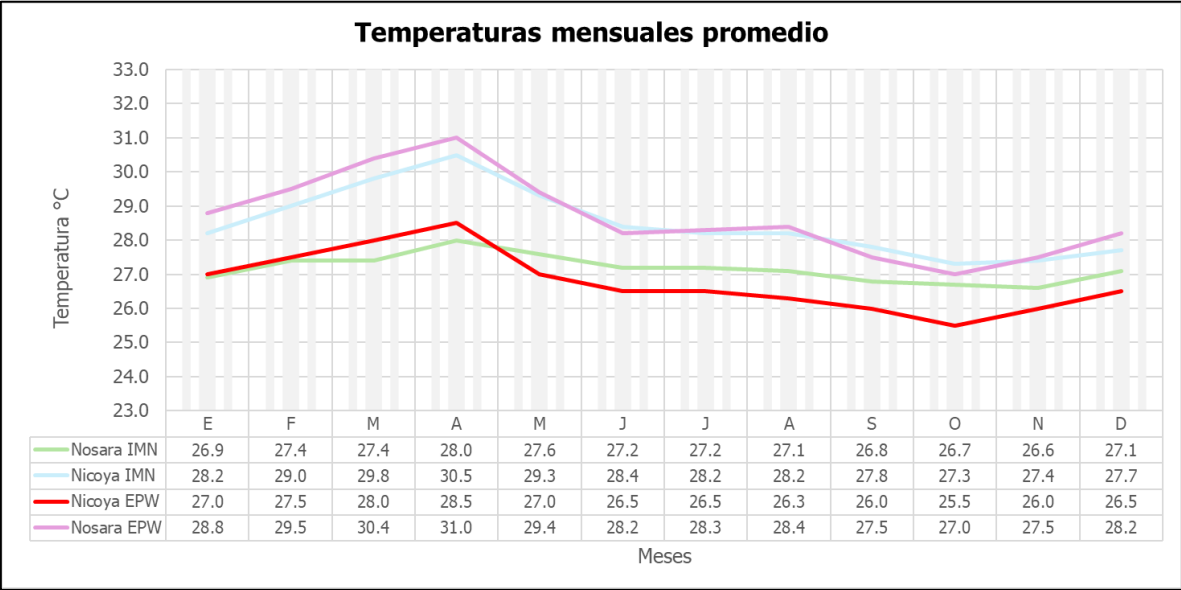


Figura 40. Comparación de temperaturas promedio de archivos EPW de Nosara y Nicoya

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2024 & Climate.OneBuiding, 2024

Por otra parte, el archivo EPW de Nosara no contiene datos de humedad relativa, por lo que no se puede comparar; la ausencia de esta información es sensible y dificulta que la modelación dé los resultados deseados. Finalmente, el archivo EPW de Nosara reporta velocidades del viento mayores a las del perfil climático en aproximadamente 1.5 m/s, lo que podría generar el efecto contrario al descrito en la sección de viento del apartado anterior.

Con el análisis realizado se concluye que, dentro de las opciones de datos disponibles para alimentar la simulación del IES-VE, el archivo EPW de Nicoya es la opción más completa, aunque se debe tener precaución al obtener los resultados, considerando las diferencias climáticas explicadas en este apartado.

2.3.10. Variables

El desarrollo de las simulaciones computacionales involucra una gran cantidad de variables, de las cuales, algunas resultan de interés para el objetivo que se busca alcanzar y otras serán obviadas, pues de lo contrario, se tendría un sistema cuya complejidad excede los alcances definidos para esta investigación. A continuación, se mencionan las variables dependientes, independientes y de control que se tomarán en cuenta para llevar a cabo las simulaciones.

- Variables dependientes

Las variables dependientes de esta investigación son los valores de carga térmica y humedad relativa de los espacios interiores de la configuración arquitectónica en estudio.

- Variables independientes

Las variables independientes son aquellas características que se modifican en los modelos computacionales para producir cambios en las variables dependientes. En este caso, las variables independientes de esta investigación son aquellas relacionadas con la geometría de la unidad de estudio, como pueden ser la ventilación, la compacidad, la porosidad, la perforación, las transparencias y las sombras.

- Variables de control

Las variables de control se refieren a las condiciones climáticas que alimentan las simulaciones computacionales para observar el cambio de las variables dependientes en cada uno de los modelos evaluados. Estas se definen a partir del perfil climático construido en el apartado 2.3.3.

Una de las variables de control más importantes asociadas con el confort térmico es la zona de confort, la cual se define como el rango de las condiciones microclimáticas que proporciona confort a un individuo (Salazar-Ceciliano, 2023); al igual que la amplitud de la zona de confort, que representa la oscilación de la temperatura media del aire, marcando los límites del confort higrotérmico. En la construcción del perfil bioclimático, la herramienta Bioclimarq de Gómez-Azpeitia (2020) calculó estos parámetros, sin embargo, para una verificación en la determinación de la zona de confort (Z_c) del distrito de Nosara se emplea el método de Auliciems y Szokolay, revisado por de Dear (2017),

para lo cual, se requiere obtener la temperatura de confort (T_c) mediante la siguiente ecuación:

$$T_c = 17.8 + 0.31 \cdot T_p \quad (1)$$

Donde T_p representa la temperatura promedio anual del distrito de Nosara, la cual se obtuvo de los datos meteorológicos de la estación Barco Quebrado del IMN y que tiene un valor de 27.16 °C, por lo tanto, la temperatura de confort es:

$$T_c = 17.8 + 0.31 \cdot 27.16 = 26.21 \text{ } ^\circ\text{C}$$

El valor obtenido coincide con el dado por Gómez-Azpeitia (2020). El rango de oscilación de la zona de confort es de ± 2.5 °C (Salazar Ceciliano, 2021), por lo tanto, los límites superior e inferior se establecen en 28.71 °C y 23.71 °C respectivamente. En el Cuadro 10 se muestra gráficamente el comportamiento diario de las temperaturas a lo largo del año en cada franja horaria; aquí se observa que los valores marcados en azul son aquellos que se encuentran por debajo del límite inferior de la zona de confort, mientras que los marcados en rojo son los que se ubican por encima del límite superior. Los valores en amarillo son los que se encuentran por dentro de la zona de confort.

Según este cuadro, las madrugadas y las primeras horas de la mañana presentan temperaturas frescas durante todo el año, mientras que los valores que sobrepasan la zona de confort se dan entre las 10:00 am y las 5:00 pm durante todo el año, ampliándose hasta más de las 7:00 pm en los meses de época seca.

- Constantes

Existen parámetros que no se van a variar durante la ejecución de las simulaciones y, por ende, permanecerán constantes tanto para el modelo original como para el modelo que incorpora las estrategias de mejora. Estos elementos quedan fuera del alcance de este Trabajo Final de Graduación y representan posibles líneas de investigación para posteriores evaluaciones. Dentro de las constantes se encuentran la orientación, la distribución espacial, la esbeltez, el asentamiento, el adosamiento, el aislamiento, la protección, las pendientes de cubierta, la tersura, textura y color de los materiales; así como los materiales en sí mismos.

Cuadro 10. Comportamiento de la zona de confort en Nosara por hora del día y mes del año

HORA	TEMPERATURA °C											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	22.9	22.8	22.6	23.6	24.2	24.0	23.7	23.9	23.8	23.9	24.0	23.6
2	22.3	22.2	22.1	23.2	23.9	23.7	23.4	23.6	23.6	23.6	23.6	23.1
3	21.9	21.7	21.8	22.9	23.7	23.5	23.2	23.4	23.4	23.4	23.3	22.7
4	21.5	21.3	21.5	22.7	23.5	23.4	23.0	23.2	23.2	23.3	23.0	22.3
5	21.2	21.0	21.3	22.5	23.4	23.3	22.9	23.1	23.1	23.2	22.8	22.1
6	21.0	20.7	21.2	22.4	23.3	23.2	22.8	23.0	23.0	23.1	22.6	21.9
7	20.9	20.7	21.2	22.9	23.8	23.7	23.3	23.4	23.0	23.1	22.6	21.8
8	21.8	22.0	24.3	25.6	26.0	25.7	25.5	25.3	24.9	24.6	23.2	22.6
9	24.6	25.1	28.1	29.0	28.6	28.2	28.2	27.8	27.2	26.7	25.2	24.9
10	27.8	28.7	31.7	32.1	31.0	30.4	30.6	30.1	29.4	28.8	27.5	27.8
11	30.8	32.0	34.4	34.4	32.7	31.9	32.3	31.7	31.1	30.4	29.5	30.4
12	33.0	34.3	35.9	35.5	33.5	32.7	33.1	32.5	32.0	31.4	31.1	32.3
13	34.3	35.6	36.2	35.7	33.6	32.8	33.2	32.7	32.2	31.7	32.0	33.4
14	34.7	36.0	35.7	35.2	33.1	32.3	32.7	32.3	31.8	31.4	32.3	33.8
15	34.3	35.5	34.5	34.1	32.3	31.5	31.8	31.5	31.1	30.8	32.0	33.5
16	33.4	34.5	33.0	32.7	31.2	30.5	30.8	30.5	30.2	29.9	31.4	32.7
17	32.2	33.0	31.4	31.3	30.1	29.5	29.6	29.4	29.2	29.0	30.5	31.6
18	30.8	31.5	29.7	29.8	29.0	28.4	28.5	28.4	28.2	28.1	29.5	30.4
19	29.3	29.8	28.2	28.5	27.9	27.5	27.5	27.4	27.3	27.2	28.5	29.1
20	27.9	28.3	26.8	27.3	27.0	26.6	26.6	26.5	26.4	26.4	27.5	27.9
21	26.6	26.9	25.6	26.2	26.2	25.9	25.8	25.8	25.7	25.7	26.6	26.8
22	25.5	25.6	24.6	25.4	25.6	25.3	25.1	25.1	25.1	25.1	25.8	25.8
23	24.5	24.5	23.8	24.6	25.0	24.8	24.5	24.6	24.6	24.6	25.1	24.9
24	23.6	23.6	23.1	24.1	24.6	24.3	24.1	24.2	24.2	24.2	24.5	24.2

$T < 23.71\text{ °C}$ $23.71\text{ °C} < T < 28.71\text{ °C}$ $T > 28.71\text{ °C}$

Fuente: Gómez-Azpeitia, 2024 [modificado por el autor]

2.4. CONFIGURACIÓN DEL SOFTWARE

Para llevar a cabo con éxito el proceso de simulación del modelo computacional creado es necesario atender algunas condicionantes requeridas por parte del software IES-VE, para la correcta interpretación de los datos y la asignación de las condiciones de entrada.

2.4.1. Consideraciones para la construcción del modelo

El modelo en sí debe contar con algunas características básicas sin las cuales, debido al método de análisis que utiliza el software, se pueden generar errores en el proceso de simulación. Algunas de ellas son las siguientes:

- Para la generación del modelo, el software admite el uso de algunos métodos distintos; uno de ellos es la herramienta Model-IT, que permite construirlo desde cero en el espacio de modelación del programa. También es posible importar un modelo generado en otro software de modelación como Revit o Sketch Up en formato gbXML⁴.
- El modelo debe estar conformado por espacios, es decir, zonas delimitadas por paredes, las cuales tienen un comportamiento térmico independiente al resto; así, a cada uno de esos espacios es posible asignarle parámetros particulares de acuerdo con su uso. Las ventanas y puertas deben estar señaladas en cada uno de los espacios.
- El modelo debe presentarse de una manera geométrica simplificada, incluyendo los espacios necesarios con sus características dimensionales, pero excluyendo elementos innecesarios para la simulación. Este punto se profundiza en el Capítulo 3.

2.4.2. Consideraciones para la asignación de parámetros

Al contar con un modelo que cumple con las características mencionadas, se utiliza la aplicación Apache, que es el ambiente de caracterización y asignación de parámetros propios de la unidad de estudio. Esto se hace a través de la herramienta Building Template Manager (BTM), mediante la cual se establecen características térmicas de la envolvente, así como la tasa de ocupación del espacio, el tipo de ventilación, condiciones de confort, entre otras.

Para una mejor comprensión de la estructura de división de las plantillas del BTM que se mencionan en este apartado, se presenta la Figura 41.

⁴ Green building XML (gbXML) es un esquema abierto desarrollado para facilitar la transferencia de datos de construcción almacenados en modelos de información de construcción (BIM) a diversas herramientas de análisis de ingeniería.

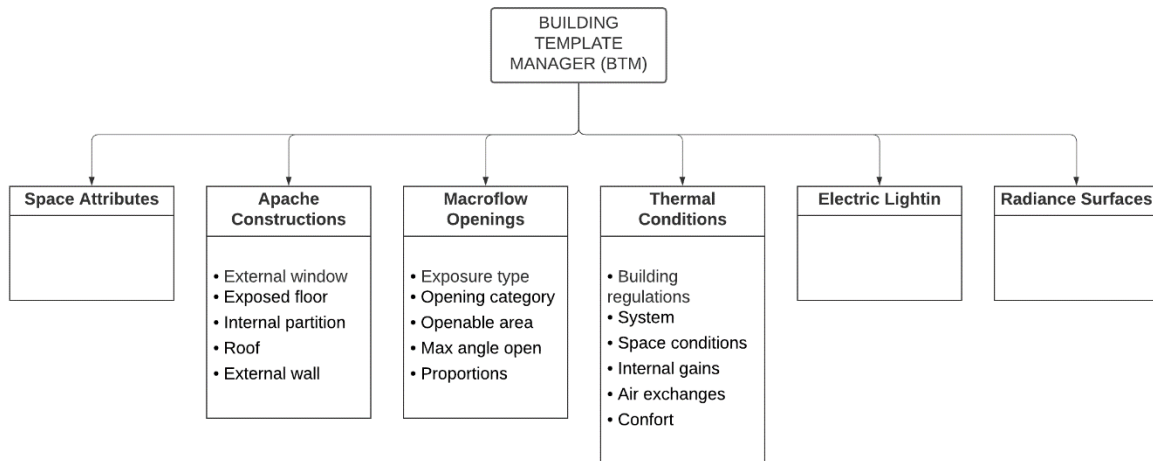


Figura 41. Estructura de la herramienta BTM dentro de la aplicación Apache en IES-VE

Fuente: Elaboración propia, 2024

De las opciones de la herramienta BTM, en esta investigación se utilizan las características de los materiales constructivos (Apache Constructions), la configuración de las aperturas (MacroFlo Openings) y las condiciones térmicas (Thermal Conditions). A continuación, se brindan algunas de las consideraciones necesarias para asignar la información previa a la simulación.

- Propiedades térmicas de los materiales

Con el grupo de opciones Apache Constructions se definen las características térmicas de la envolvente de la edificación; para elementos como paredes, ventanas, pisos y techos se requiere introducir el espesor (mm), la conductividad térmica ($W/m \cdot K$), la densidad (kg/m^3), el calor específico ($J/kg \cdot K$) y la resistencia ($m^2 \cdot K/W$). A partir de estos valores el programa calcula parámetros como la transmitancia térmica ($W/m^2 \cdot K$), resistencia térmica global ($m^2 \cdot K/W$), y en el caso de las transparencias, el porcentaje de ganancias solares (SHGC). Adicionalmente, esta opción contiene una base de datos de materiales típicos que pueden ser utilizados en caso de que no se cuente con la información específica de los elementos propios del proyecto en análisis.

- Grado de ventilación y apertura de las ventanas

Con el grupo de opciones MacroFlo Openings se configuran las condiciones de ventilación natural; aquí se definen características como Exposure Type, que contempla el tipo de exposición al viento que tiene una ventana. Por ejemplo, si está totalmente

expuesta o expuesta parcialmente por efecto de construcciones cercanas o vegetación circundante; existe una amplia lista de posibles escenarios entre los cuales se puede escoger. Además, se debe especificar el tipo de apertura de la que se trata (ventana con apertura superior, inferior o central, celosías, puerta corrediza, louveres, ductos, entre otros), así como el porcentaje de área que permite abrir y su máximo ángulo de apertura. Esta herramienta incluso da la opción de configurar el periodo de apertura en función de una temperatura interior o de una franja horaria.

- Sistemas y ganancias térmicas

Se debe generar, en primera instancia, un perfil de ocupación de la edificación mediante la opción Apache Profiles Database. Esto se hace al construir gráficos de ocupación horaria, semanal y anual que permiten asignarle una dinámica al uso del espacio en la simulación bioclimática.

Con el grupo de opciones Thermal Conditions se asignan las consideraciones térmicas en la unidad de estudio. Con la característica System se definen los escenarios de ventilación natural o aire acondicionado que se utilizan en la simulación. La característica Space Conditions permanece inactiva si se trabaja solamente con ventilación natural, pero, si se contempla aire acondicionado, se utiliza para definir la temperatura a partir de la cual se encienden los aparatos de climatización activa definidos en System. Con la característica Internal Gains se configuran las ganancias energéticas y térmicas que se generan por efecto de equipos de cómputo, cocinas, iluminación y por los ocupantes de la vivienda. Con Air Exchanges y Confort se definen algunos parámetros de temperatura y recambio de aire que se hayan definido como metas para alcanzar el confort en los espacios interiores.

2.4.3. Consideraciones para la simulación

Una vez que se han configurado todos los parámetros térmicos de la materialidad, los espacios, la ventilación y el enfriamiento, se puede realizar la simulación de dos maneras: la primera es mediante la opción ASHRAE Loads, que calcula, con base en los datos climáticos del archivo EPW utilizado, un día de diseño para cada mes, es decir, el día más drástico de cada mes que va a recibir el sistema; esta opción se utiliza para evaluar los sistemas de aire acondicionado. La segunda opción es con ApacheSim que realiza la simulación para todas las horas del año y genera un consecutivo diario de resultados.

2.5. RESULTADOS POR ANALIZAR

Se presentan los resultados generales obtenidos del proceso de simulación por medio de los gráficos y tablas que proporciona el software IES-VE. Debido a la gran cantidad de información que se genera en esta etapa, se buscan los promedios diarios de temperatura del aire y humedad relativa del periodo de estudio. Con el fin de simplificar el análisis de los datos, se establece, mediante la metodología desarrollada por Esparza-López (2015) y aplicada por Salazar-Ceciliano (2021), un día representativo que será el escenario de análisis de los parámetros de interés. Este día representativo se obtiene aplicando la ecuación (2), y como se amplía en el apartado 3.1.4, corresponde al 3 de marzo en época seca y al 19 de junio en época lluviosa.

$$D_R = (T_{mdiaría} - T_{mtemp}) + (O_{Tmdiaría} - O_{Tmtemp}) = 0 \quad (2)$$

Donde: $D_R =$ Día representativo; $T_{mdiaría} =$ Temperatura media diaria; $T_{mtemp} =$ Temperatura media temporada; $O_{Tmdiaría} =$ Oscilación $T_{mdiaría}$; $O_{Tmtemp} =$ Oscilación T_{mtemp}

2.6. LIMITACIONES

- Para el desarrollo de esta investigación no se consideró la comparación de los resultados obtenidos de los procesos de simulación con mediciones reales tomadas en el inmueble estudiado. Esto debido a que, para que las mediciones puedan considerarse significativas, se requiere un periodo de recopilación de datos de al menos un año, para abarcar el espectro climatológico completo al que se ve sometido el proyecto en todas las épocas de un ciclo anual.
- No fue posible realizar una visita al sitio para evaluar los espacios interiores y exteriores de la vivienda, pues por tratarse de un inmueble privado y por la disponibilidad de horarios para viajar a Guanacaste, no se logró coincidir con el propietario. Por lo que el análisis realizado en esta investigación se hizo con la información disponible del modelo.
- La información climática usada para los procesos de simulación proviene de bases de datos internacionales, por lo que no se ajusta totalmente a las condiciones propias de la zona de estudio. A pesar de que se realizó un análisis comparativo para validar su uso, se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos poseen cierto grado de error y son la mejor aproximación que se puede conseguir con los datos disponibles, sin llegar a ser completamente exactos.

CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN Y PROPUESTA DE MEJORA

3.1. ANÁLISIS DEL PROYECTO ORIGINAL

Como primera etapa de análisis, se evalúa el nivel de confort higrotérmico del objeto de estudio en su estado original, es decir, sin realizar ninguna modificación a su configuración arquitectónica. Para ello, se parte de un modelo computacional de la Residencia Maru desarrollado por Loop Studio Design en el software Revit, al cual se le realiza un proceso de simplificación con el fin de eliminar los elementos que no resultan necesarios para llevar a cabo la simulación bioclimática por medio del software IES-VE.

El modelo utilizado para realizar las simulaciones debe ser, por un lado, lo suficientemente simple para optimizar el rendimiento del proceso en IES-VE y evitar que la inclusión de detalles no esenciales genere distorsiones en los resultados; y por otro, lo suficientemente completo para representar con la mayor fidelidad posible la geometría de la vivienda, de manera que se obtenga un balance entre precisión y eficiencia de la simulación. Una vez que el modelo de partida ha sido simplificado, de manera que se alcance el balance mencionado, se realiza un traslado desde Revit hasta IES-VE, permitiendo al segundo utilizar la información del diseño original contenida en el primero.

Este proceso descrito se amplía con más detalle en los siguientes apartados, en los cuales se describen las consideraciones tomadas computacionalmente para llegar a obtener todo lo necesario para realizar la evaluación bioclimática de la vivienda seleccionada.

3.1.1. Modelo computacional en Revit

La empresa Loop Studio Design proporciona un modelo arquitectónico digital realizado en el software Revit que muestra la geometría interior del objeto de estudio, así como la ubicación de elementos exteriores como la escalera de acceso al segundo nivel, la piscina, las plataformas para equipos sobre la cubierta de techo, entre otras. Además, contempla la ubicación de la vivienda dentro del lote, que contiene información topográfica, pues se muestra su relieve y también contiene la localización de la cerca perimetral que delimita la propiedad. Una vista tridimensional de este modelo digital se observa en la Figura 42.

Un elemento particular contenido en el modelo proporcionado es la localización, en forma de volumen conceptual, de una edificación vecina que, por su cercanía y altura, genera una influencia sobre la ventilación y la sombra que resulta significativa y que se contempla en el



Figura 42. Modelo 3D original en software Revit de la Residencia Maru

Fuente: Loop Studio Design, 2020

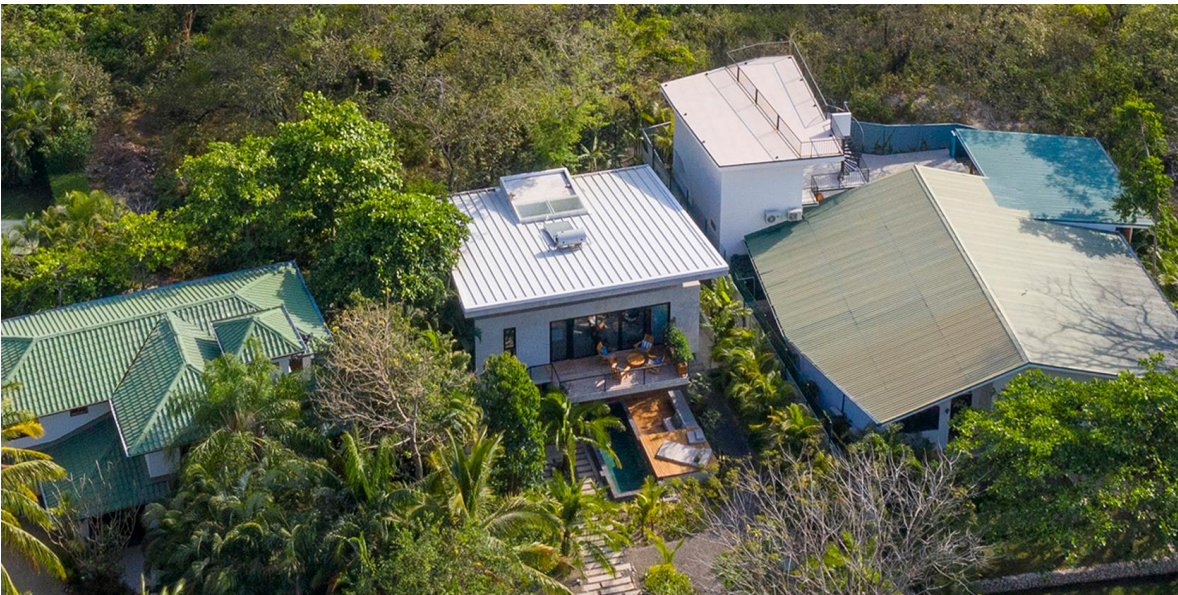


Figura 43. Fotografía de los elementos aledaños al objeto de estudio

Fuente: Loop Studio Design, 2021

desarrollo de las simulaciones. En contraste, el modelo no incluye elementos relacionados con la vegetación, ni del lote propiamente donde se ubica el objeto de estudio ni de los circundantes a este; aspecto al que se le presta especial atención pues, como se observa en la Figura 43, la Residencia Maru está rodeada por una cantidad importante de árboles de una altura superior a la vivienda y que, además, se encuentran a pocos metros de distancia de ella, por lo que su influencia sobre los parámetros bioclimáticos de interés también resulta significativa.

En relación con este aspecto, la vegetación como tal no es un elemento que se incluye en el modelo digital con el que se realizan las simulaciones en el software IES-VE. Sin embargo, su efecto se toma en cuenta en la configuración de los parámetros base para la ejecución de este y, además, en el proceso de análisis de los resultados obtenidos.

Por otro lado, el modelo de partida incluye una gran cantidad de elementos que, para propósitos de evaluar el comportamiento de la geometría de la vivienda en términos de confort higrotérmico, no presentan un efecto significativo. Por lo tanto, se lleva a cabo un proceso de simplificación para contar con un modelo que priorice la geometría y conserve la configuración arquitectónica original. Esto se hace mediante varias intervenciones de reducción, dentro de las cuales, las más importantes se mencionan a continuación:

- Todas las ventanas y puertas se simplifican a una transparencia conceptual que abarca el área por donde pueden penetrar el aire y/o la luz solar. Al transportar el modelo simplificado a IES-VE, los parámetros de transparencias y perforaciones asociados con las características del material y el tipo de ventana o puerta instalada, así como los horarios de cierres y aperturas, se configuran en las opciones del software previo a realizar las simulaciones.
- Todo el mobiliario interior de la vivienda se elimina; los bloques de Revit que representan muebles, electrónicos, repisas, alacenas, etc., no son de utilidad para el proceso de simulación y su presencia puede generar errores en el proceso o distorsiones en la interpretación que el software le da a los volúmenes, por lo que se dejan por fuera del modelo.
- La cubierta de techo, así como la estructura que la soporta, se redujo a un volumen sólido que cubre la vivienda. Debido a que el objeto de estudio posee cielo raso, la cubierta se dividió en dos secciones: una plana sobre las habitaciones y los baños y otra

inclinada sobre la sala-comedor para no alterar el efecto del alero frontal. Este cambio es solamente estético, pues las propiedades de la cubierta se mantienen en la configuración de los materiales del software.

- Todos los elementos exteriores como la piscina, las escaleras de acceso al segundo nivel, los equipos colocados en cubierta, las duchas, el terreno y la cerca perimetral se eliminaron del modelo original, ya que al igual que el mobiliario interno, no tienen influencia activa en los parámetros de interés para la simulación.

Al finalizar este proceso de simplificación se obtiene un modelo volumétrico de la Residencia Maru, el cual representa la base del proceso de simulación con el software IES-VE. Este modelo presenta los espacios interiores de la vivienda de una forma geométrica y simple, sin comprometer la distribución arquitectónica original del proyecto. En la Figura 44 se muestra una comparativa entre las vistas tomadas en Revit del modelo proporcionado por la empresa Loop Studio Design y el mismo modelo luego del proceso de reducción y simplificación descrito anteriormente.

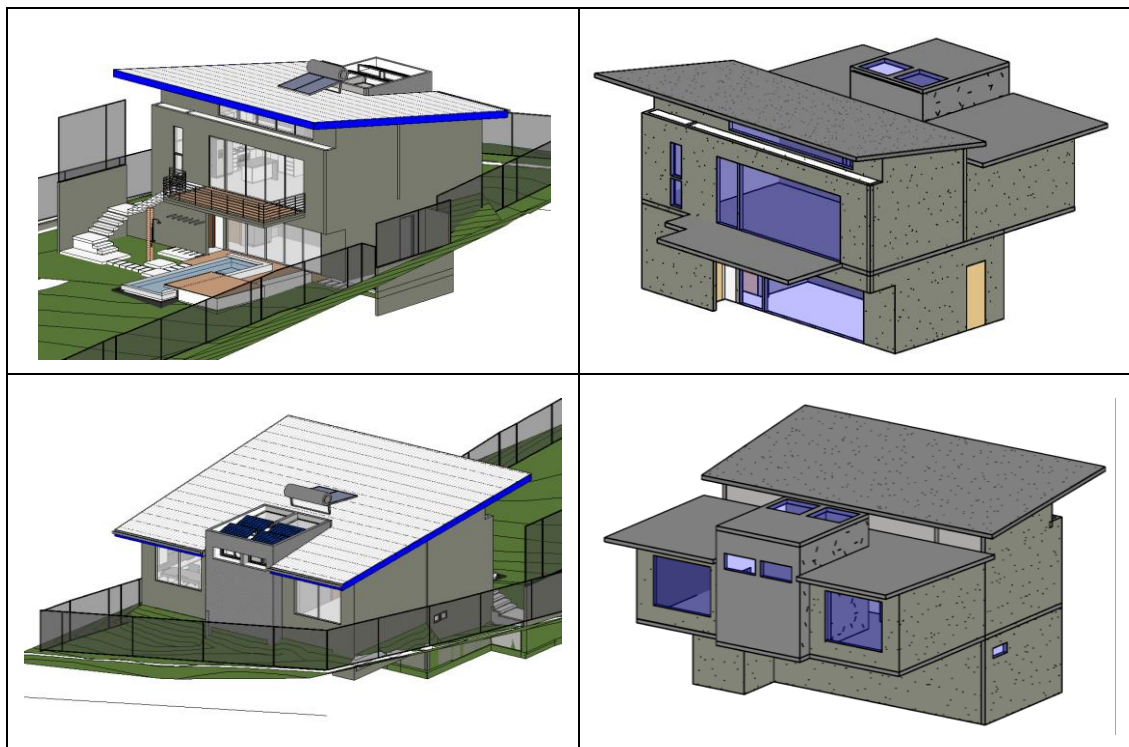


Figura 44. Modelo Revit de Residencia Maru; original (izquierda) y simplificado (derecha)

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.1.2. Modelo computacional en IES-VE

El modelo simplificado en Revit es la base para la generación del modelo computacional en IES-VE. En esta investigación, el segundo se construye en el espacio de modelación del software utilizando la aplicación Model-IT, replicando la geometría reducida elaborada en el primero. No obstante, se realizan algunas variantes adicionales al modelo IES-VE, debido a la metodología de simulación que utiliza este. Estas variantes son:

- Las habitaciones en IES-VE deben ser espacios volumétricos cerrados, por lo tanto, el techo de la vivienda se elimina, y este queda conformado por el cierre superior de cada uno de los prismas que componen el modelo tridimensional. El efecto de sombra que genera la cubierta es homologado con la inserción de masas sin propiedades (Local Shade) haciendo la función de aleros. Esta opción está disponible en la pestaña de dibujo Shape Settings; estas masas pueden apreciarse en color verde en la Figura 45.
- La sección trasera de la vivienda se encuentra asentada en el terreno de la propiedad, lo que se puede obviar en el modelo en Revit, sin embargo, debido a que IES-VE utiliza las propiedades térmicas de los materiales para incorporar ganancias térmicas por convección y radiación, se agrega un Local Shade que emule el efecto del suelo bajo la sección que comprende el dormitorio, la oficina y los baños del segundo nivel.
- El modelo IES-VE no posee espesor en los espacios, ya que el espesor de paredes, piso y techo se introduce de forma numérica en la configuración previa al proceso de simulación, por lo que todos los espacios constructivos (azul en Figura 45), así como puertas y ventanas son planos en dos dimensiones.
- Los elementos que tienen unas secciones que pueden abrirse y otras que no, como es el caso de las puertas corredizas de vidrio del primer y segundo nivel de la fachada Norte, se modelaron como ventanas independientes según el tipo mencionado. Esto debido a que al configurar las ventanas puede definirse el porcentaje de apertura que poseen, y de esta manera se puede indicar de forma más precisa cuales secciones son solamente transparencias y cuales permiten el paso del aire.

Como se ha mencionado anteriormente, cada habitación de la vivienda se modela como un espacio independiente. El modelo IES-VE de la Residencia Maru cuenta con un total de 12 espacios distribuidos entre el primer y segundo nivel; cada uno de ellos con sus respectivas puertas y ventanas. Los espacios definidos, su codificación y ubicación se muestran en el Cuadro 11 y Figura 46 respectivamente.

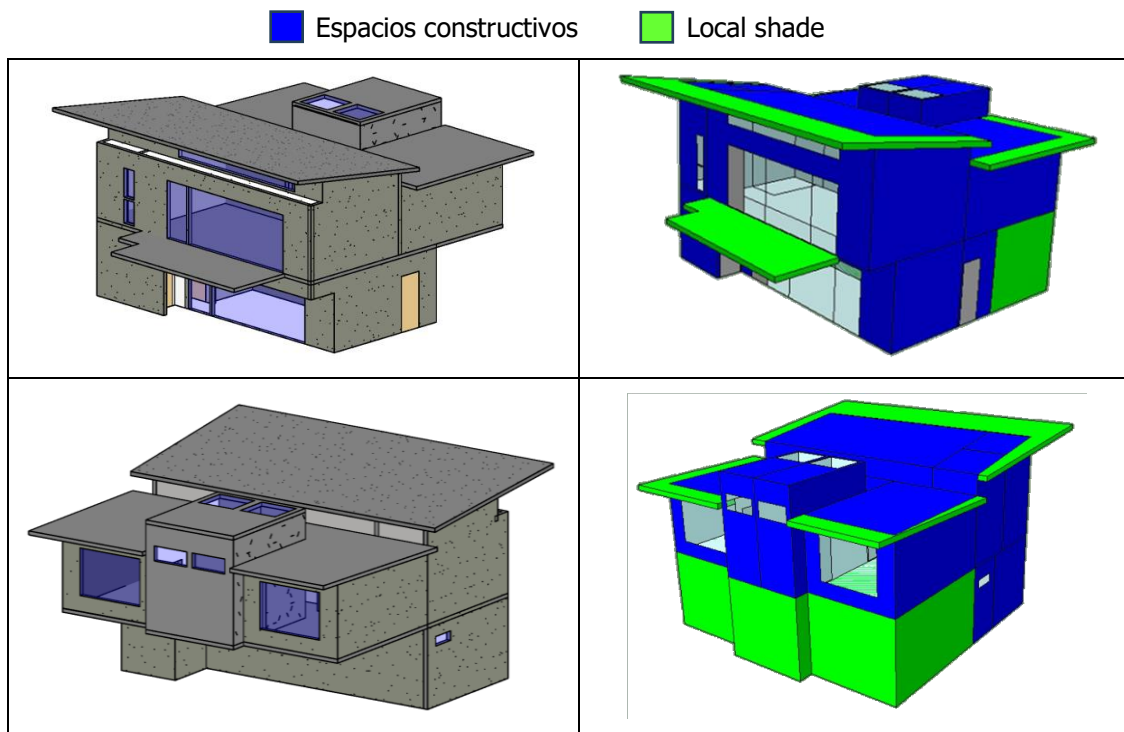


Figura 45. Modelo simplificado en Revit (izquierda) y modelo en IES-VE (derecha)

Fuente: Elaboración propia, 2024

Cuadro 11. Características de los espacios en el modelo IES-VE de la Residencia Maru

Nº	Descripción	Código	Área (m ²)	Volumen (m ³)
1	Bodega uno	N01-01	3.60	11.60
2	Sala estudio	N01-02	26.22	84.43
3	Baño uno	N01-03	6.40	20.50
4	Bodega dos	N01-04	6.40	20.50
5	Dormitorio	N02-01	19.50	55.58
6	Oficina	N02-02	19.50	55.58
7	Pasillo	N02-03	6.00	17.19
8	Baño dos	N02-04	6.80	27.20
9	Baño tres	N02-05	6.80	27.20
10	Sala comedor	N02-06	40.05	159.20
11	Bodega tres	N02-07	4.40	18.15
12	Cuarto de pilas	N02-08	4.40	16.73

Fuente: Elaboración propia, 2024

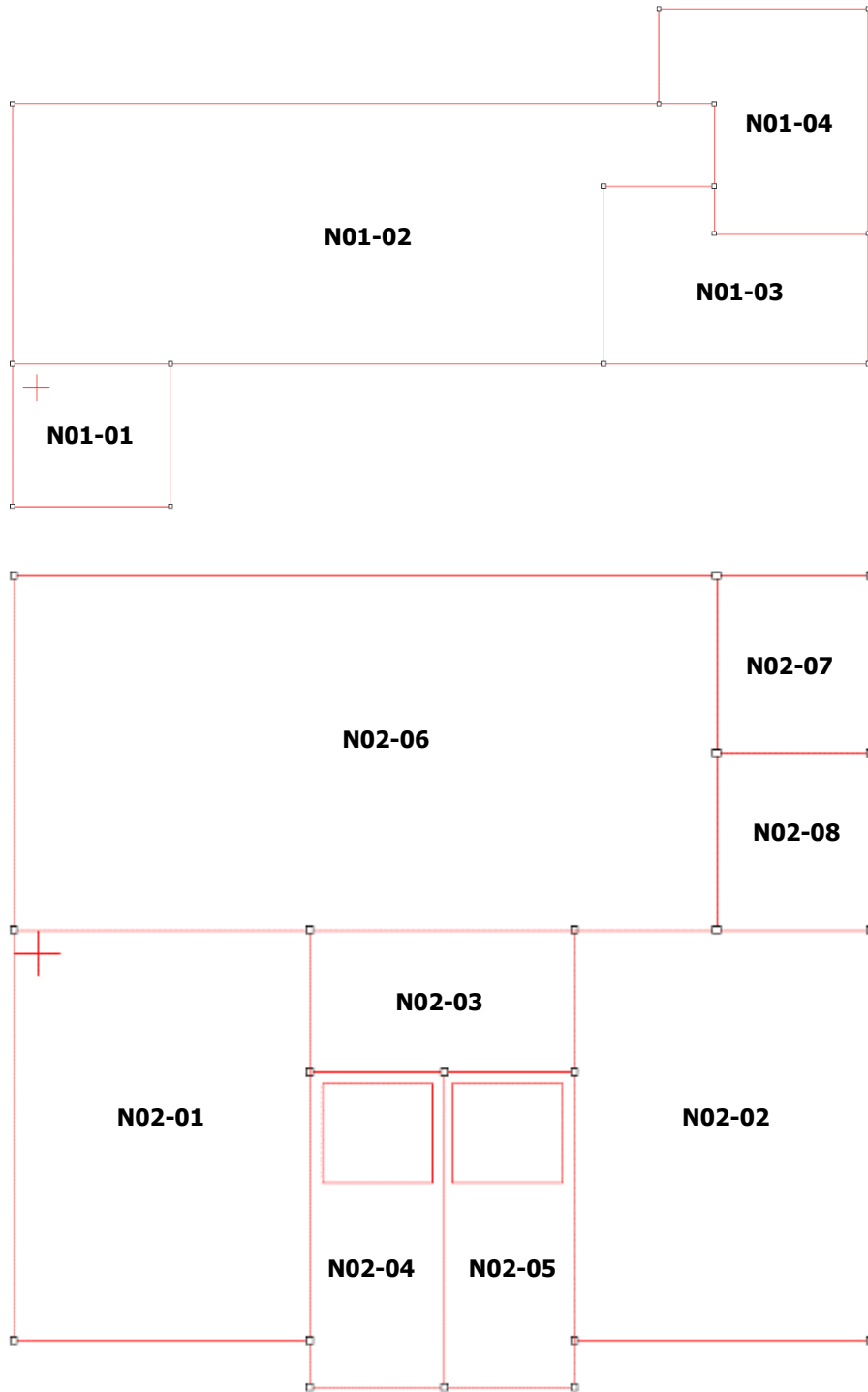


Figura 46. Vista en planta de la ubicación de los espacios en el modelo IES-VE

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.1.3. Asignación de parámetros al modelo computacional en IES-VE

Una vez que el modelo simplificado en Revit ha sido trasladado con éxito al software IES-VE, se inicia el proceso de simulación bioclimática para obtener el desempeño de la unidad de estudio en términos de confort higrotérmico. Para ello, primeramente, deben asignarse todos los parámetros térmicos y características de los elementos que componen los espacios de análisis, según se detalla en el apartado 2.4.2 del capítulo anterior.

- Perfiles de ocupación

Mediante la herramienta Apache Profiles Database se crean perfiles de ocupación diaria, semanal y anual para los distintos espacios que componen el modelo, para esto se toma en cuenta un comportamiento de los usuarios basado en hábitos típicos supuestos de la dinámica diaria de un hogar unifamiliar compuesto por dos personas. Los perfiles diarios son gráficos que muestran, en el eje de las abscisas, las horas del día, mientras que, en el eje de las ordenadas, presentan la fracción de la ocupación máxima que tiene el espacio en un horario determinado. En la Figura 47 se ven estos perfiles.

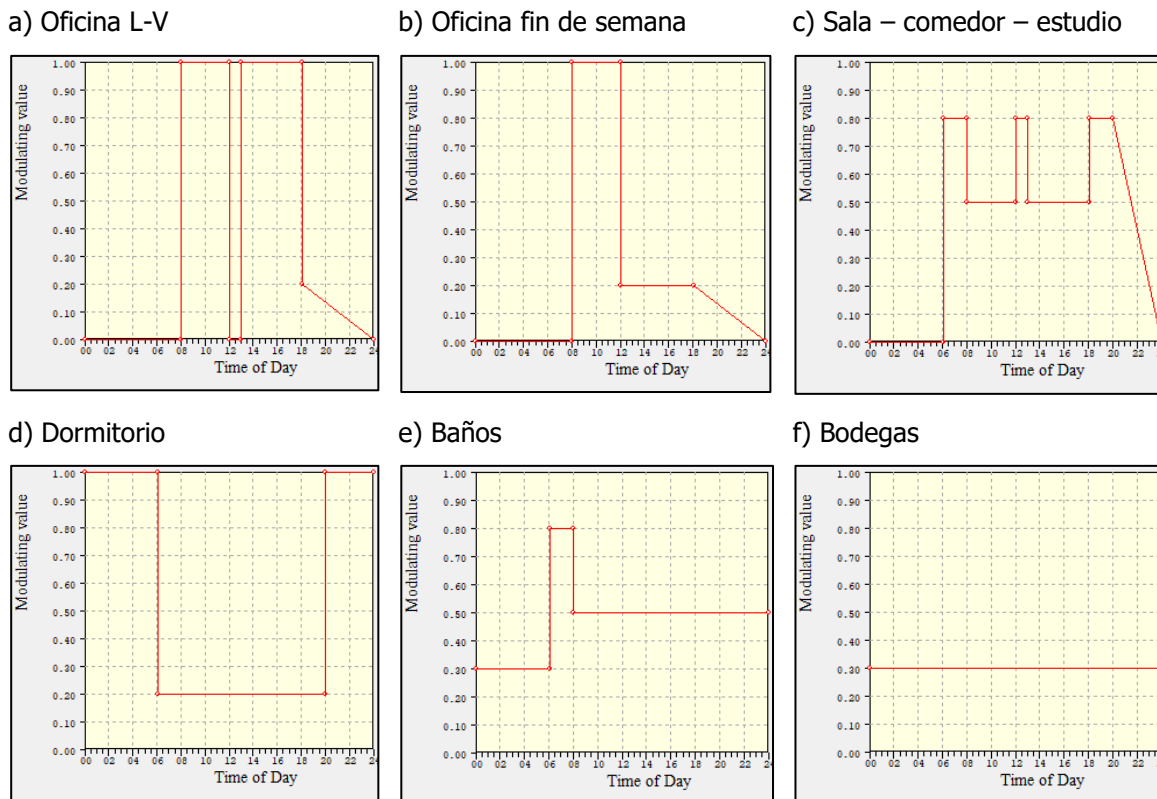


Figura 47. Perfiles de ocupación diaria de la Residencia Maru

Fuente: IES-VE, 2024

Lo anterior significa que, cuando el gráfico toma un valor de uno, el espacio se encuentra ocupado plenamente, mientras que un valor de cero implica una desocupación del espacio. Existen valores intermedios que buscan reflejar una ocupación parcial o intermitente, según la dinámica de las actividades que allí se realicen.

- Sistemas y ganancias térmicas de los espacios

Con la herramienta Apache Systems se definen dos perfiles de climatización: uno para ventilación natural (VN), donde las opciones de enfriamiento y calefacción se deshabilitan, y otro para aire acondicionado (AC). Para el perfil con aire acondicionado se requiere definir el valor para el EER⁵ y el SEER⁶ del equipo que se utiliza. En este caso, a partir de la revisión de estas características en aparatos disponibles en el mercado nacional, se estableció un valor de 2.98 para el EER y 5.24 para el SEER.

Por otra parte, dentro del Building Template Manager (BTM) se establece mediante la opción Space Conditions, los límites de temperatura que activan la climatización artificial; partiendo de los límites de la zona de confort calculados en el apartado 2.3.10 se establece que la temperatura de encendido del enfriamiento es de 28.71 °C. Esta configuración se asigna a cada espacio mediante el uso de plantillas, las cuales contienen los perfiles de ocupación particulares que se diseñaron.

Con respecto a las ganancias térmicas, el software incluye la posibilidad de introducir el aporte térmico de aparatos electrónicos, así como de los propios ocupantes de la edificación. Para ello, se pueden introducir ganancias térmicas específicas en cada uno de los espacios, considerando, en el caso de artefactos, el consumo energético total y la máxima ganancia de calor sensible asociada; mientras que, en el caso de las personas, el software contempla un valor por defecto de 90 W, el cual no se modificó. Este valor se acerca al reportado por Stephenson (1968) en un artículo sobre requerimientos de calefacción y enfriamiento en edificaciones; en el cual se menciona que, el calor sensible

⁵ EER (Energy Efficiency Ratio) es la relación de eficiencia energética de un sistema de refrigeración. Se calcula dividiendo la potencia de salida (BTU por hora) entre la entrada de potencia, normalmente en vatios. Un EER más alto significa mayor eficiencia energética y menores costos de electricidad (Hitachi, 2024).

⁶ SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) mide la eficiencia energética estacional. Mientras que el EER da la eficiencia en un punto determinado, el SEER tiene en cuenta que la demanda de refrigeración cambiará a lo largo del año y reproduce el uso estacional (Hitachi, 2024).

producido por una persona realizando trabajo normal de oficina es cercano a los 75 W y produce un incremento en la temperatura de la habitación en donde se encuentra.

En el Cuadro 12 se muestra el detalle de las ganancias térmicas que se consideran en la construcción del modelo de la unidad de estudio. Los valores se obtuvieron de una ficha de consumo de aparatos eléctricos generada por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), mientras que, para la definición del porcentaje de consumo que se transforma en ganancia de calor sensible, se consultan algunas tablas contenidas en el ASHRAE Handbook (2013) donde este valor ronda entre un 40% y 45%, por lo que para el establecimiento de los parámetros del modelo se definió este en el límite superior.

Cuadro 12. Ganancias térmicas contempladas en el modelo IES-VE de la Residencia Maru

Elemento	Código	Consumo (W)	Ganancia sensible (W)
Computadora	CP	40	18
Personas	PE	-	90
Iluminación	IL	200	90
Cocina	CO	1800	810
Refrigeradora	RE	450	203
Coffee Maker	CF	1100	495
Pantalla	PA	150	68
Lavadora	LV	1200	540
Secadora	SE	1500	675

Fuente: Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), s.f.

- Propiedades térmicas de los materiales

Mediante la herramienta Apache Constructions, se definen las características térmicas de los materiales que componen los espacios. Los elementos que se caracterizan son las paredes externas e internas, el piso, el techo, el cielo raso, las ventanas y las puertas. Para esto se usan los valores mostrados en el Cuadro 9 del capítulo anterior.

El software permite considerar el hecho que componentes de un mismo espacio posean materiales distintos, de manera que se asignan las características correspondientes a una pared, ventana o puerta en particular; en la Figura 48 se muestra, a modo de ejemplo y mediante un código de colores, la distribución de la materialidad asignada al modelo IES-VE de la Residencia Maru.

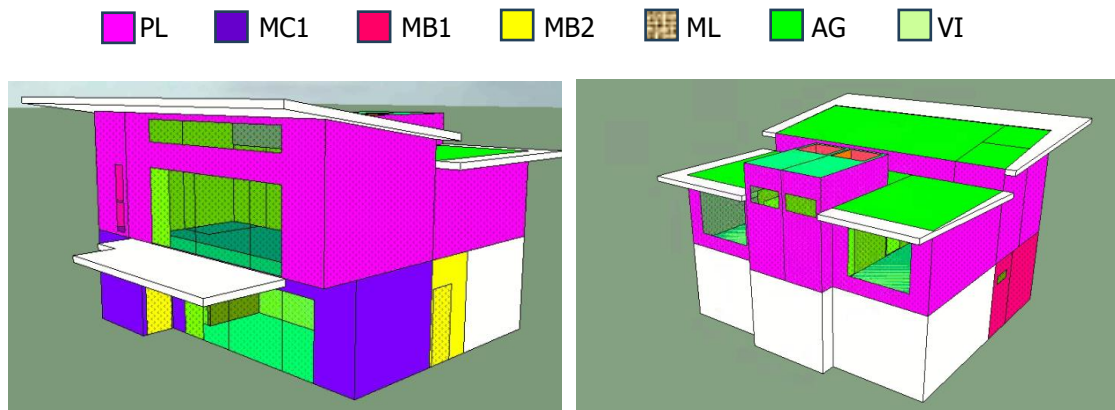


Figura 48. Ejemplo de asignación de materiales a la envolvente del modelo en IES-VE

Fuente: IES-VE, 2024

- Configuración de las ventanas y puertas

Finalmente, se utiliza la herramienta MacroFlo, que permite analizar la infiltración de aire y la ventilación natural en edificaciones. Esta emplea un modelo de flujo de aire zonal para calcular el movimiento de las masas de aire dentro y a través del modelo, el cual es inducido por el viento y la presión (IES, 2024).

Mediante esta herramienta se configuran las aberturas del modelo, es decir, tanto las ventanas como las puertas. A cada una se le asignan los parámetros que caracterizan su nivel de exposición al viento, el cual está condicionado por la cercanía a otras edificaciones o la presencia de obstáculos circundantes. También su grado de apertura, obteniendo así, la lista de elementos que se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Aberturas contempladas en el modelo IES-VE de la Residencia Maru

Elemento	Código	Exposic.	Tipo Ap.	% Ap.	°Ap.	L/H	C. Flow	C. Length
Ventana	V1	Semi-exp	N/A	0	0	N/A	0.15	0
Ventana	V2	Semi-exp	Top	100	45	<0.5	0.74	100
Ventana	V3	Semi-exp	Sliding	50	N/A	N/A	0.23	100
Ventana	V4	Semi-exp	Top	100	45	>2	0.23	100
Puerta	P1	Semi-exp	Sliding	100	N/A	N/A	0.20	0
Puerta	P2	Semi-exp	Lateral	100	90	<0.5	1.20	0
Puerta	P3	Interna	Lateral	100	90	<0.5	1.30	0

Fuente: Elaboración propia, 2024

En el cuadro anterior, las últimas dos columnas se refieren al crack flow y crack length; que se utilizan para calcular las tasas de infiltración y fuga de aire en puertas y ventanas cerradas. Los valores mostrados se obtienen de un estudio realizado por el Air Infiltration and Ventilation Centre (AIVC) de la Universidad de Warwick en 1994, y cuyos resultados se incluyen en la guía de usuario de los tipos de aberturas de MacroFlo (IES, s.f.).

La apertura de las ventanas puede ser controlada en función de la temperatura del aire interior de las habitaciones; para ello, el software establece dos métodos: el establecimiento de un umbral de temperatura y la definición de un perfil. En el caso del primer método, se define una temperatura a partir de la cual la ventana se abre, sin embargo, este método tiene la desventaja que, si la temperatura de la habitación varía nuevamente por debajo del punto de control establecido, la ventana no vuelve a cerrarse, sino que permanece abierta. Es decir, este comando abre las ventanas una sola vez a partir de una temperatura definida previamente.

En el caso del método de perfil de apertura, se crea un perfil que utiliza una fórmula o comando que, abre las ventanas a partir de ciertas condiciones. De acuerdo con la guía de usuario de los tipos de aberturas de MacroFlo (IES, s.f.), una fórmula común que se usa para este propósito es $t_a \geq 26.21 \text{ }^\circ\text{C}$. Este comando abre las ventanas cuando la temperatura del aire en el espacio excede $26.21 \text{ }^\circ\text{C}$, que es la temperatura de confort determinada en el apartado 2.3.10. A diferencia del umbral de temperatura, en el momento en que la temperatura descienda por debajo de este valor, la ventana se cierra inmediatamente. Si este método de apertura es utilizado, el umbral de temperatura debe deshabilitarse, o configurarlo con un valor de temperatura muy bajo, en comparación con los rangos que se manejen en la zona de estudio. En el modelo de la Residencia Maru, se utilizó este segundo método descrito para configurar las aperturas de las ventanas, con un umbral de temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la Figura 49 se muestra cómo a cada una de las puertas y ventanas del modelo se le asignan características particulares. Por ejemplo, las aperturas marcadas con color rojo corresponden a aquellas que no se abren, sino que solamente representan transparencias, pero no permiten el flujo de aire hacia el interior de la vivienda o viceversa, excepto por las infiltraciones perimetrales contempladas mediante el crack flow y crack length. Otro ejemplo son las aperturas marcadas con verde, que

corresponden a las puertas con apertura a 90°; en este caso a pesar de que unas son de vidrio y otras de madera, se incluyen en el mismo grupo, pues el efecto de la materialidad se contempla al asignar las propiedades térmicas, según el punto anterior.

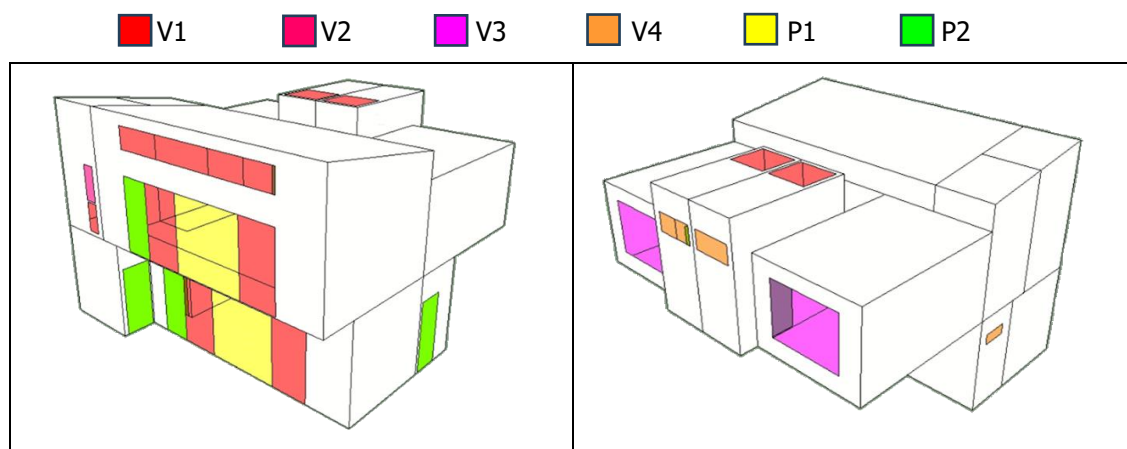


Figura 49. Ejemplo de asignación de propiedades a las aperturas del modelo en IES-VE

Fuente: IES-VE, 2024

Al finalizar la asignación de estos parámetros, el modelo se encuentra listo para realizar la simulación bioclimática. Un resumen de los parámetros asignados a cada espacio y de la configuración establecida se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Resumen de parámetros en el modelo IES-VE de la Residencia Maru

Espacio	Perfil	Ganancias	Paredes	Piso	Techo	Cielo	Ventanas	Puertas
N01-01	f	-	MC1	MC1	LE	-	-	P2
N01-02	c	IL, PE, PA	MC1, MB2	MC1	LE	-	V1	P1, P2
N01-03	e	IL, PE	MB2	MC1	LE	-	V4	P3
N01-04	f	-	MB1	MC1	LE	-	-	P2
N02-01	d	IL, PE, PA	PL	LE	AG	ML	V3	P3
N02-02	a, b	IL, PE, CP	PL	LE	AG	ML	V3	P3
N02-03	c	IL, PE	PL	LE	AG	ML	-	P3
N02-04	e	IL, PE	PL	LE	AG	ML	V1, V4	P3
N02-05	e	IL, PE	PL	LE	AG	ML	V1, V4	P3
N02-06	c	IL, PE, CO, RE, CF	PL	LE	AG	ML	V1	P1, P2
N02-07	f	-	PL	LE	AG	ML	V1, V2	P3
N02-08	f	IL, PE, LV, SE	PL	LE	AG	ML	-	P3

Fuente: Elaboración propia, 2024

Nota: el significado de las siglas puede consultarse en Figura 47 y Cuadro 9, Cuadro 12 y Cuadro 13

3.1.4. Simulación bioclimática del proyecto original

Para la evaluación bioclimática de la configuración arquitectónica de la Residencia Maru, se analizan dos escenarios distintos, uno para cada uno de los perfiles de climatización creados con Apache Systems: en primer lugar, se realiza una simulación utilizando el perfil de ventilación natural (VN) y posteriormente se utiliza el perfil de aire acondicionado (AC).

Con el perfil de ventilación natural, se obtiene el desempeño bioclimático de la vivienda en condiciones originales de diseño; permitiendo que esta interactúe con el ambiente en el que se encuentra inmersa, sin realizar ninguna intervención correctiva. En este escenario, no se contempla ningún tipo de climatización activa y el único control que se ejecuta es la apertura de las ventanas, una vez que la temperatura interior de los espacios excede el valor de la zona de confort, el cual se estableció en 26.21 °C. Cabe mencionar que cada espacio se maneja de manera independiente, por lo que las aperturas de las ventanas y puertas se dan en función del espacio donde se encuentran, sin contemplar lo que suceda en el resto de los espacios, así pues, se cuenta con un sistema dinámico en donde, en cada habitación, las ventanas se abren y cierran dependiendo solamente de la temperatura del aire interior, el cual interactúa con el aire de los otros espacios una vez que se abren las puertas o ventanas correspondientes.

Posteriormente, se realiza una segunda simulación con el perfil de aire acondicionado, donde lo que se determina es la carga térmica requerida para mantener, mediante el uso de climatización activa, las condiciones de confort térmico dentro de la vivienda a lo largo de todo el año. Esto permite realizar un diagnóstico preliminar del desempeño bioclimático de la vivienda, desde el punto de vista del confort higrotérmico, considerando condiciones térmicas y de humedad relativa. En los siguientes apartados, se muestran los resultados más significativos de cada una de estas simulaciones descritas.

- Escenario con solamente ventilación natural

a) Temperatura del aire: Haciendo uso del método de simulación ApacheSim, el primer parámetro que se evalúa es la temperatura del aire en el interior de los espacios que conforman la unidad de estudio. En la Figura 50 se muestra un gráfico con los valores de temperatura calculados para cada hora del año en el interior del modelo. Se observa que la temperatura presenta una oscilación en el rango aproximado que va de los 22 °C a los 36 °C, aunque existen días donde la temperatura máxima alcanza incluso 40 °C.

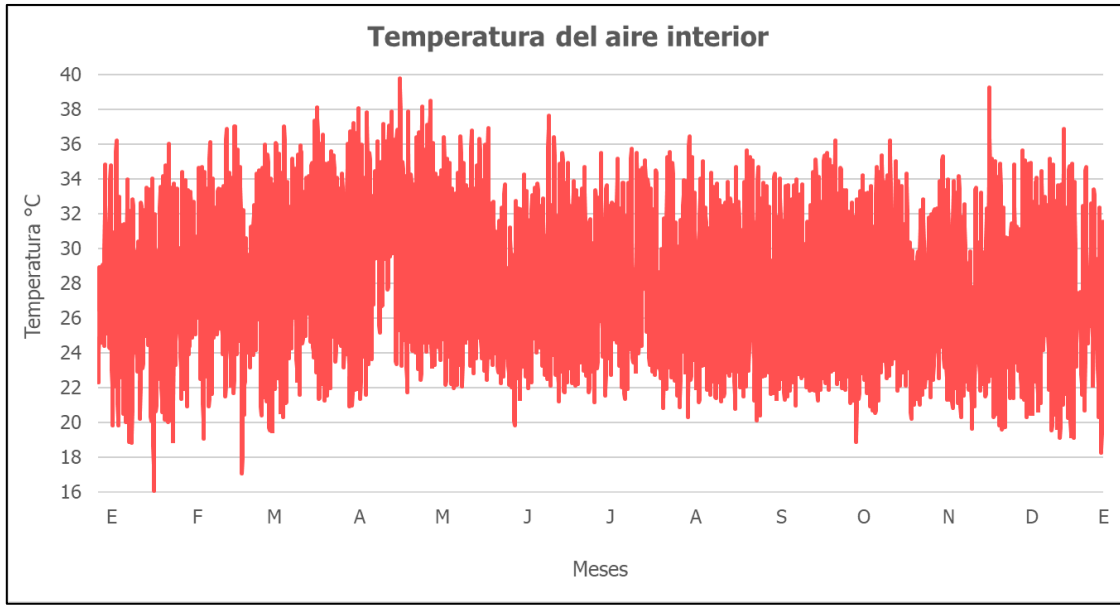


Figura 50. Temperatura del aire interior en el modelo original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

Para comprender mejor estos datos, el software posee la opción de comprobar la cantidad de horas anuales donde un determinado parámetro se encuentra dentro de un cierto rango, esto permite cuantificar el total de horas donde la temperatura se halla dentro y fuera de la zona de confort térmica, tal como se muestra en la Figura 51. En dicha figura se observa que, el 39% de las horas anuales alcanzan temperaturas que se ubican por arriba del límite superior de la zona de confort; mientras que un 20% se ubica por debajo del límite inferior de esta. En la vivienda en general, solamente el 42% de las horas anuales poseen una temperatura dentro del rango de la zona de confort.

Adicional a esto, también se pueden fraccionar estos porcentajes de manera que se aprecie la distribución de temperaturas por cada espacio del modelo, permitiendo ver el comportamiento general de las habitaciones; para ello se presenta la Figura 52, donde se observa que los espacios que conforman el primer nivel tienen un mayor porcentaje anual de horas ubicadas dentro de la zona de confort térmica que los espacios del segundo nivel. Al observar el comportamiento de las habitaciones del segundo nivel, sobresale el hecho de que, anualmente, el porcentaje de horas donde la temperatura interior excede el límite superior de la zona de confort es incluso mayor al porcentaje

que se encuentra dentro de dicho rango, siendo los baños (N02-04 y N02-05) y las bodegas (N02-07 y N02-08) los espacios donde esta situación es más notoria.

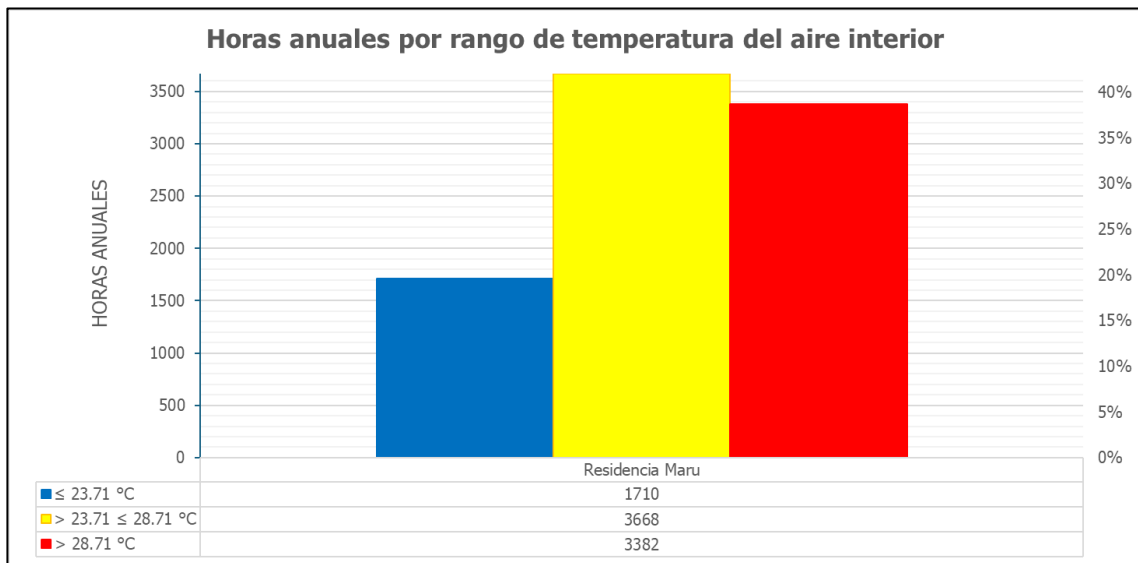


Figura 51. Horas anuales por rango de temperatura interior original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

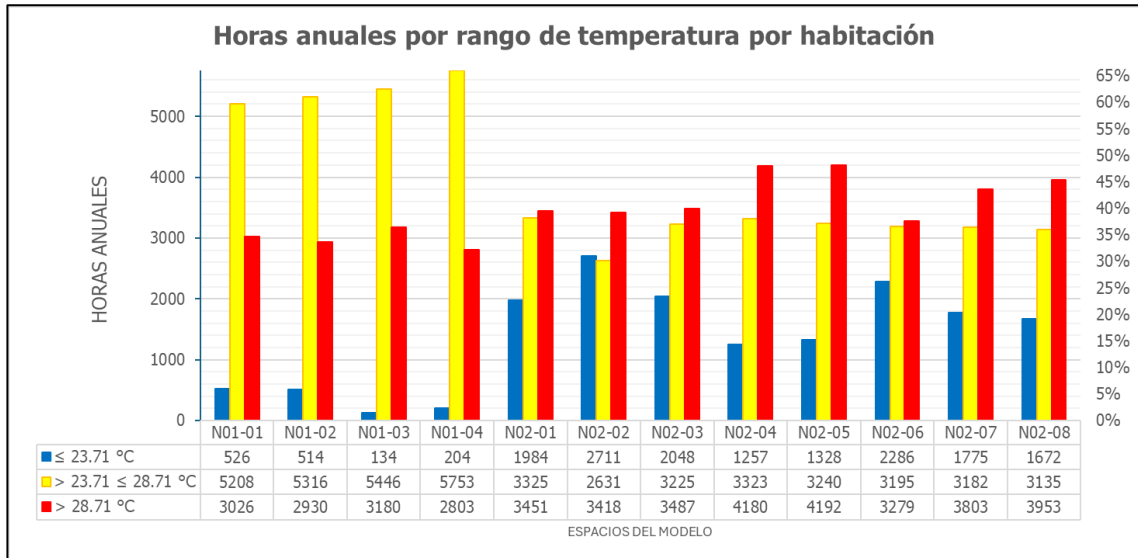


Figura 52. Horas anuales por rango de temperatura por habitación original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

Además de esto, en varios espacios del segundo nivel se tiene también un porcentaje considerable de horas donde los valores se hallan por debajo de la zona de confort, lo

que sugiere que se presentan temperaturas que podrían resultar frías para ciertos habitantes de la zona de estudio, las cuales se presentan durante las noches y madrugadas.

Por otra parte, y en vista de la gran cantidad de información que contienen las figuras presentadas anteriormente, se aplica el método descrito en el apartado 2.5 para obtener un día representativo, a partir del cual, se consigue una simplificación de las condiciones bioclimáticas de la unidad de estudio. En este caso, se obtiene el día representativo de dos temporadas específicas del año: la época seca y la época lluviosa; ambas se definen con base en el índice ombrotérmico mostrado en la Figura 14 y desarrollado con apoyo de la herramienta de Gómez-Azpeitia (2020). En dicha figura, la época seca se establece entre los meses de diciembre a abril, mientras que la época lluviosa entre abril y diciembre. Así pues, el día representativo para la época seca corresponde al 3 de marzo, mientras que para la época lluviosa este corresponde al 19 de junio. El detalle de los valores que respaldan esta escogencia se encuentra en el Anexo A, mientras que los gráficos asociados a estos días se presentan en la Figura 53.

Al analizar el comportamiento de la temperatura del aire interior de la vivienda en ambos días, se observa que, en la época seca, el día representativo presenta una temperatura mínima de 21.22 °C y una máxima de 35.54 °C; mientras que para la época lluviosa estos valores son de 21.74 °C y 33.80 °C respectivamente.

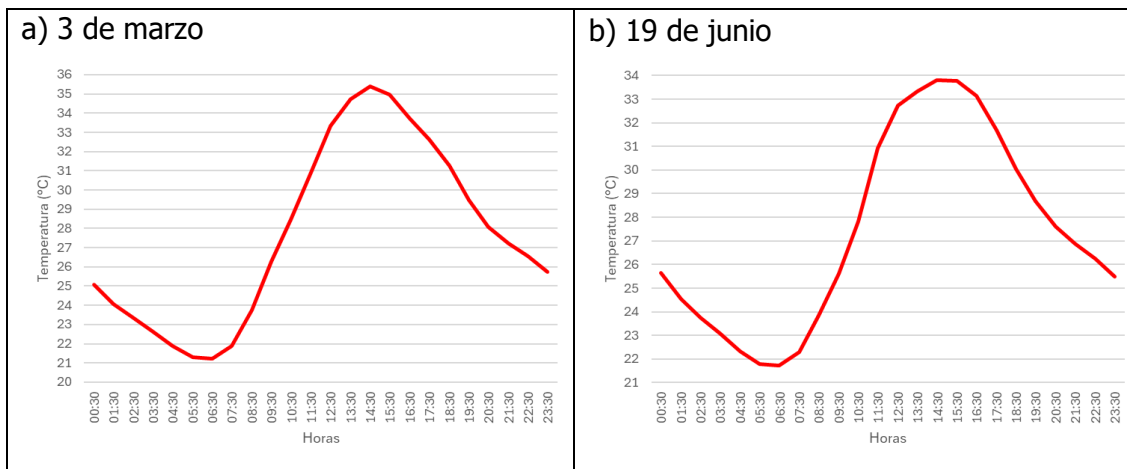


Figura 53. Temperatura del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en modelo original

Fuente: IES-VE, 2024

b) Humedad relativa: Otro parámetro que resulta de interés es la humedad relativa, la cual, tal como se mostró en el perfil climático de la zona de estudio, es elevada en el distrito de Nosara. En la Figura 54 se muestra un gráfico con los valores de humedad relativa calculados para cada hora del año en el interior del modelo, allí se muestra que los valores promedio rondan entre el 70% y 80%. Durante los meses de la época seca, se tienen valores ligeramente menores que durante los meses de la época lluviosa, esto puede deberse a que, en el periodo entre diciembre y mayo, se tienen en la zona mayores temperaturas, mayor velocidad del viento y una ausencia casi total de precipitaciones, factores que tienen incidencia sobre la humedad relativa. Este comportamiento dentro de la vivienda coincide con el comportamiento general del perfil climático de Nosara, y al igual que lo explicado al analizar la Figura 11, donde se definió el rango de 30% a 70% como zona de confort, la humedad relativa promedio no se ajusta a lo recomendado, lo que también genera insatisfacción en los usuarios de la vivienda.

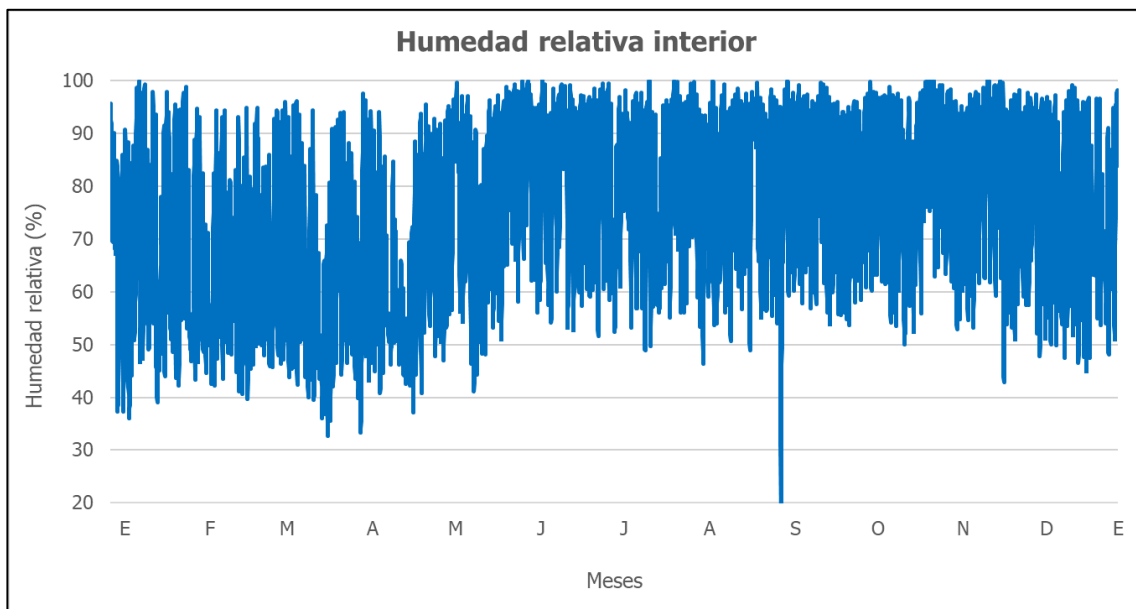


Figura 54. Humedad relativa en el modelo original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

Para observar más detenidamente el comportamiento de este parámetro, se muestra la Figura 55, donde las horas del año se agrupan en aquellas que se encuentran por debajo, dentro y por arriba de la zona de confort mencionada. En la figura es claro que la mayoría

de las horas anuales presentan valores por encima del límite superior del 70% de humedad relativa y solamente un 43% de todas las horas del año se mantienen dentro del rango recomendado.

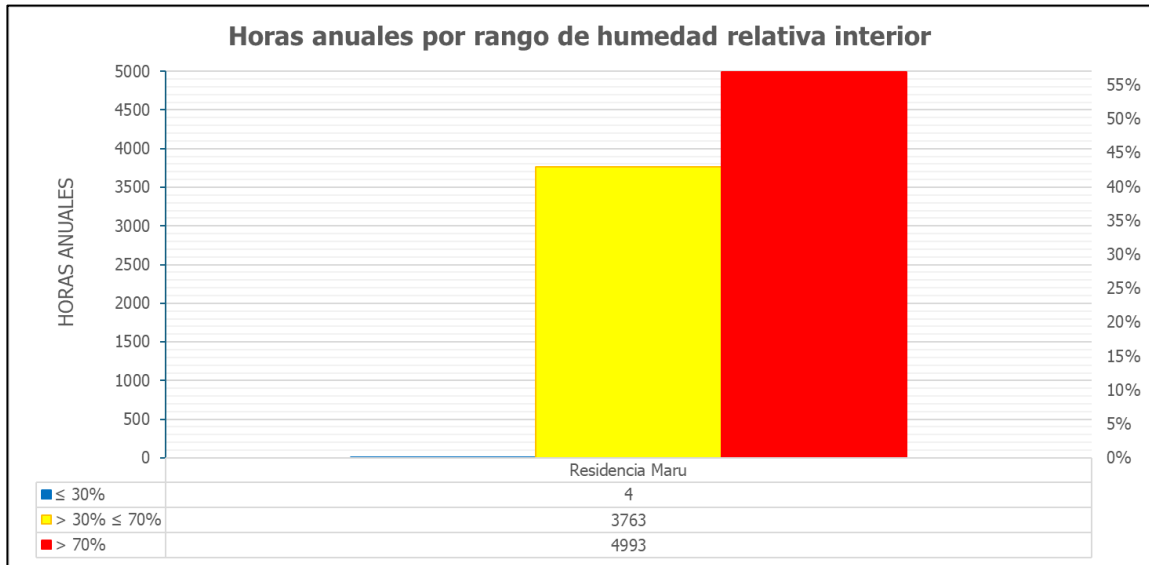


Figura 55. Horas anuales por rango de humedad relativa interior original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

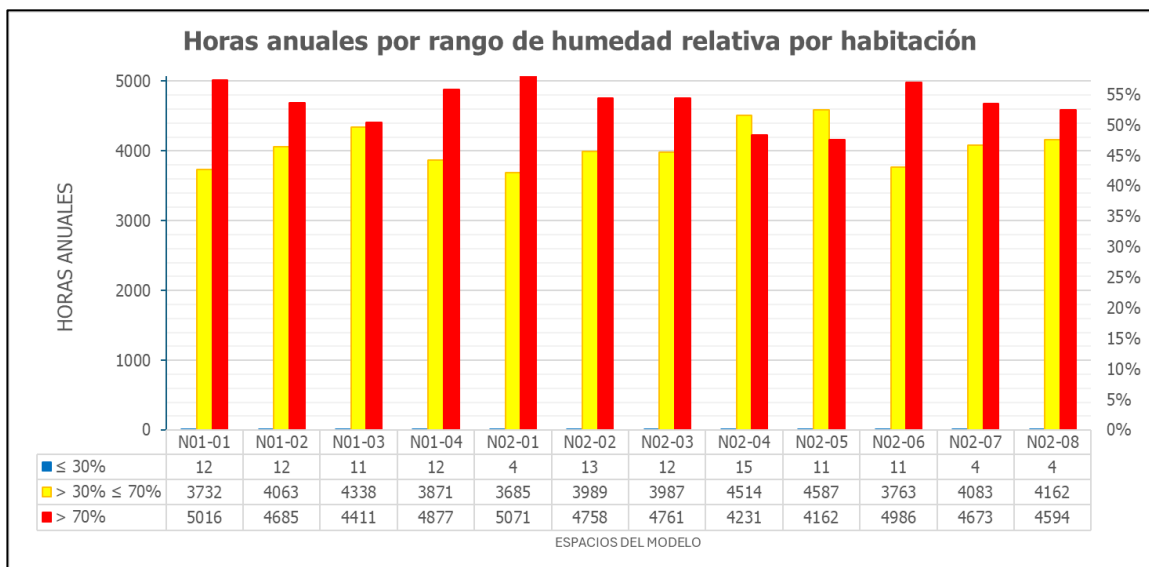


Figura 56. Horas anuales por rango de humedad relativa por habitación original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

De manera similar a lo realizado con la temperatura, se fraccionan las horas dentro de cada rango para observar el comportamiento de cada uno de los espacios, como se ve en la Figura 56. Ahí se muestra que todos los espacios de la vivienda tienen entre un 45% y un 55% de las horas anuales fuera del rango de la zona de confort.

Además, también se presentan en la Figura 57 los gráficos correspondientes a los días representativos de la época seca y lluviosa, donde se observa que en época seca la humedad relativa oscila entre el 46% y el 91% y en época lluviosa entre 60% y 94%.

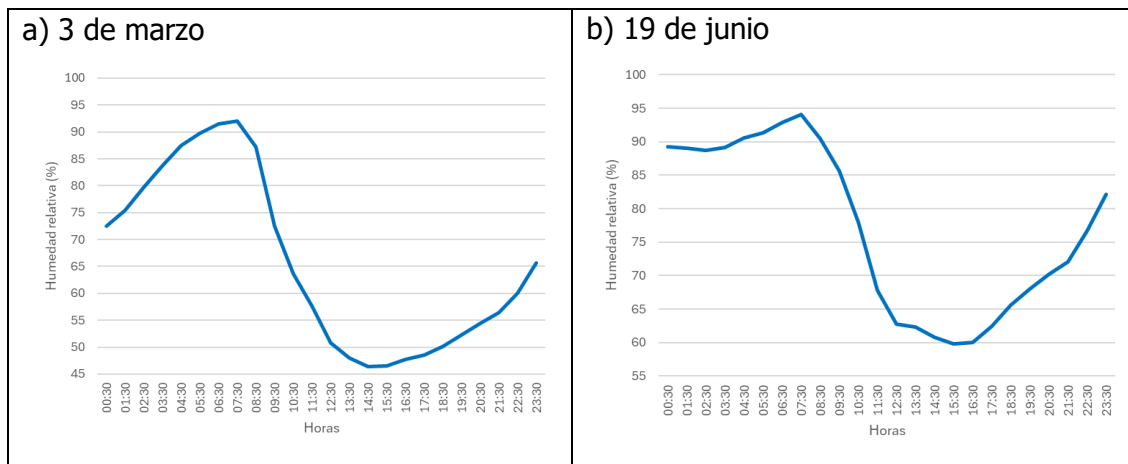


Figura 57. Humedad relativa del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en modelo original

Fuente: IES-VE, 2024

c) Porcentaje de personas insatisfechas: Dentro de los resultados proporcionados por el software se encuentra el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) asociado a las condiciones bioclimáticas del modelo. Para la configuración arquitectónica de la unidad de estudio, y utilizando como método de evaluación el ASHRAE Standard 55 Adaptive Comfort Model (ACM) para edificios ventilados naturalmente, se encuentra que la insatisfacción es alta en el día; pues durante casi todo el año, este valor alcanza el 100% durante las horas comprendidas entre las 11:00 am y 6:00 pm, y se mantiene por debajo del 15% en los periodos nocturnos. Esto último indica que, las temperaturas que se ubican por debajo de la zona de confort, mencionadas anteriormente, no representan un malestar significativo para los ocupantes de la vivienda, y no necesariamente generan sensación de frío, sino que se encuentran en un nivel donde son percibidas como frescas, y son aceptadas por la mayor parte de los usuarios modelo.

Para observar el comportamiento de la insatisfacción de los usuarios, se muestra la Figura 58 y Figura 59, donde se presentan los gráficos de temperatura del aire y humedad relativa de cada día representativo, en conjunto con el gráfico de personas insatisfechas (PPD).

En el caso de la época seca, se observa que el porcentaje de personas insatisfechas alcanza un máximo de 94% entre las 2:00 pm y las 4:00 pm, donde también la temperatura alcanza sus valores máximos. Al seguir el comportamiento de los gráficos se observa que el PPD se mantiene con valores por debajo al 10% hasta cerca de las 8:30 am, donde la temperatura se encuentra, prácticamente, en el límite inferior de la zona de confort, es decir, 23.71 °C y la humedad relativa está en alrededor del 87%.

Posteriormente, alrededor de las 9:30 am, cuando la temperatura se acerca a los 26.21 °C que corresponden a la temperatura de confort, la humedad relativa ha disminuido a 72% y el porcentaje de personas insatisfechas se encuentra en 17%; estas son las condiciones bioclimáticas ideales de servicio de la vivienda. Finalmente, una hora más tarde, a las 10:30 am, la temperatura se aproxima al límite superior de la zona de confort, al ubicarse en 28.45 °C, con una humedad relativa de 63% y un PPD de 39%; estas son las condiciones máximas que, según el perfil bioclimático, son aceptables dentro de la unidad de estudio.

En el escenario actual, la insatisfacción continúa aumentando a lo largo del día, y recupera valores como los mencionados anteriormente hasta cerca de las 8:30 de la noche. Un resumen de los datos explicados en los párrafos anteriores se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Resumen de confort higrotérmico D_R de época seca con sistema VN

Hora	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	PPD (%)
8:30 am	23.76	87.18	7.28
9:30 am	26.29	72.52	17.37
10:30 am	28.45	63.64	38.71
8:30 pm	28.08	54.42	28.42

Fuente: IES-VE, 2024

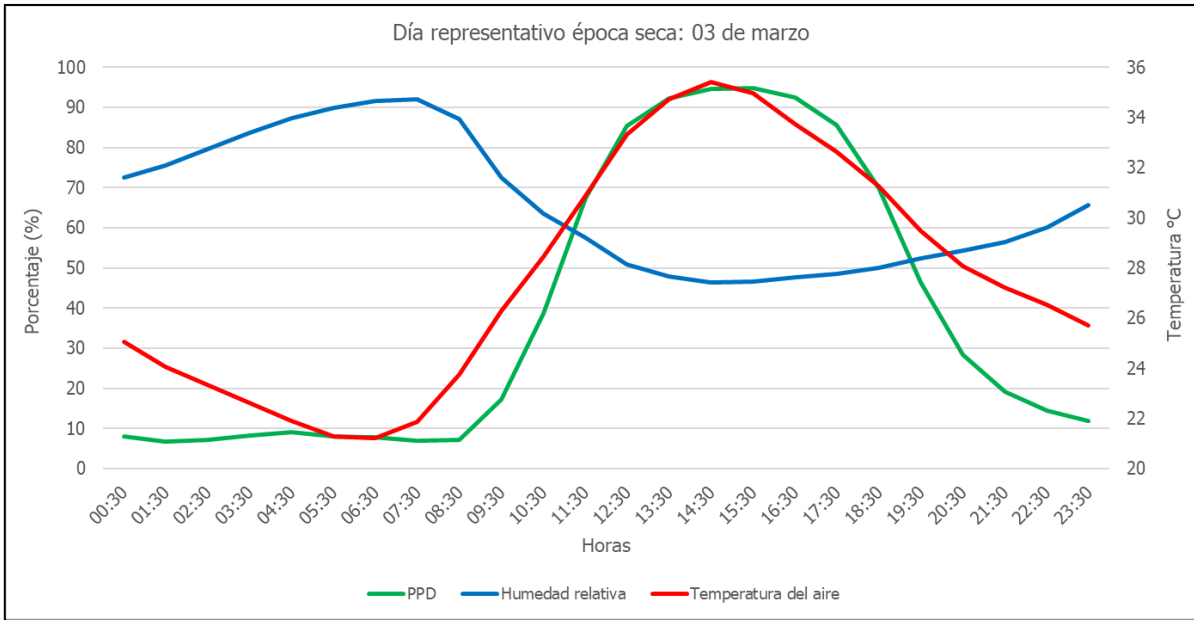


Figura 58. Porcentaje de personas insatisfechas en D_R época seca original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

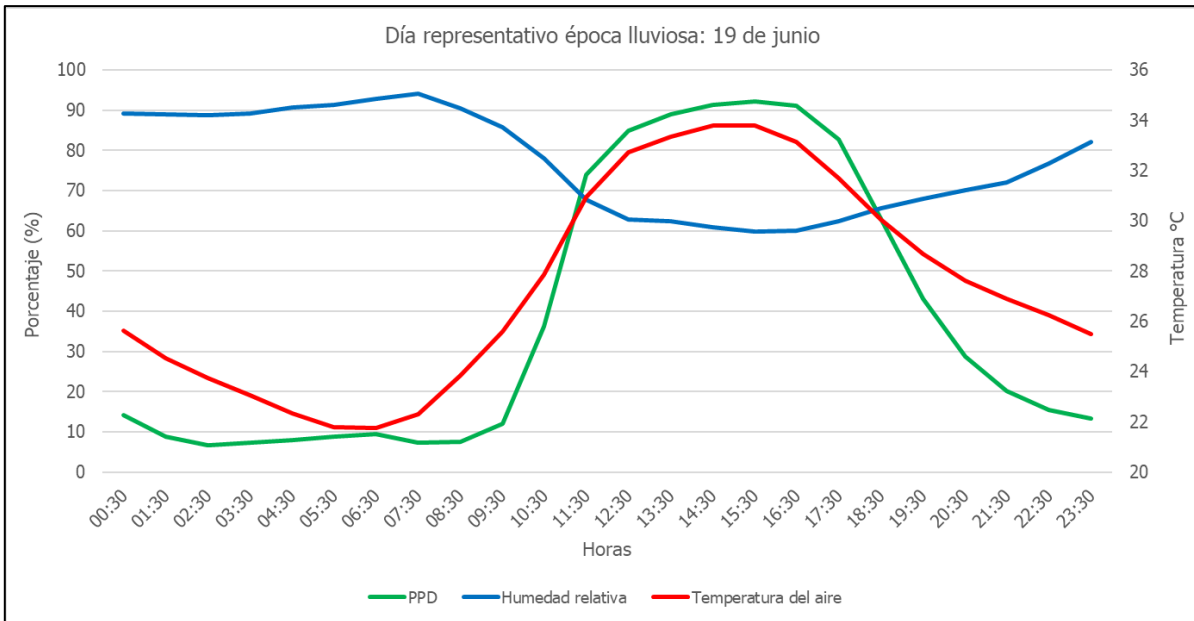


Figura 59. Porcentaje personas insatisfechas en D_R época lluviosa original con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

En el caso de la época lluviosa, el comportamiento es prácticamente el mismo que el descrito anteriormente para la época seca, con la diferencia que los valores de humedad relativa son más elevados, precisamente por el efecto producido por las precipitaciones de la temporada. En el Cuadro 16 se muestra el resumen de los parámetros bioclimáticos para este día representativo.

Cuadro 16. Resumen de confort higrotérmico D_R de época lluviosa con sistema VN

Hora	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	PPD (%)
8:30 am	23.84	90.46	7.44
9:30 am	25.60	85.63	11.95
10:30 am	27.84	77.95	36.33
8:30 pm	28.68	67.97	43.02

Fuente: IES-VE, 2024

Cabe mencionar y hacer la aclaración que, el ASHRAE 55 ACM no evalúa el confort basándose solamente en temperatura y humedad relativa, sino también en otros parámetros bioclimáticos que el software IES-VE determina, a partir de los cuales se calculan, mediante algoritmos incorporados para realizar una evaluación integral, esos valores de PPD. Por dicha razón, sería un sesgo atribuir la insatisfacción mostrada solamente a las condiciones térmicas y de humedad obtenidas, aunque estas tienen un alto impacto en el confort de los usuarios.

- Escenario con incorporación de climatización activa

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior, se evidencia que la ventilación natural no es suficiente para mantener los espacios interiores de la unidad de estudio dentro de la zona de confort. En condiciones de operación, esto hará que los usuarios recurran a sistemas de climatización activa para disminuir la temperatura de las habitaciones y alcanzar el confort térmico. Por ello, se realiza una segunda simulación, pero esta vez utilizando la opción ASHRAE Loads que, como se mencionó en el apartado 2.4.3, es la opción que se utiliza para evaluar los sistemas de aire acondicionado a partir de un día de diseño para cada mes; el más drástico que debe cubrir el sistema. De esta manera, tal como se muestra en la Figura 60, se configura el sistema para cerrar las ventanas y accionar el aire acondicionado cuando la temperatura interna de cada espacio alcance los 28.71 °C, es decir, el límite superior de la zona de

confort; posteriormente, cuando la temperatura disminuye, el sistema de aire acondicionado se apaga y las ventanas se abren nuevamente. De esta manera se asegura artificialmente que los ocupantes de la vivienda se encuentren permanentemente en condiciones de confort térmico. No se marcó ningún límite de temperatura inferior, ya que como se explicó anteriormente, aunque la temperatura descienda bajo los 23.71 °C esto no genera una afectación o malestar a los usuarios desde el punto de vista del confort higrotérmico.

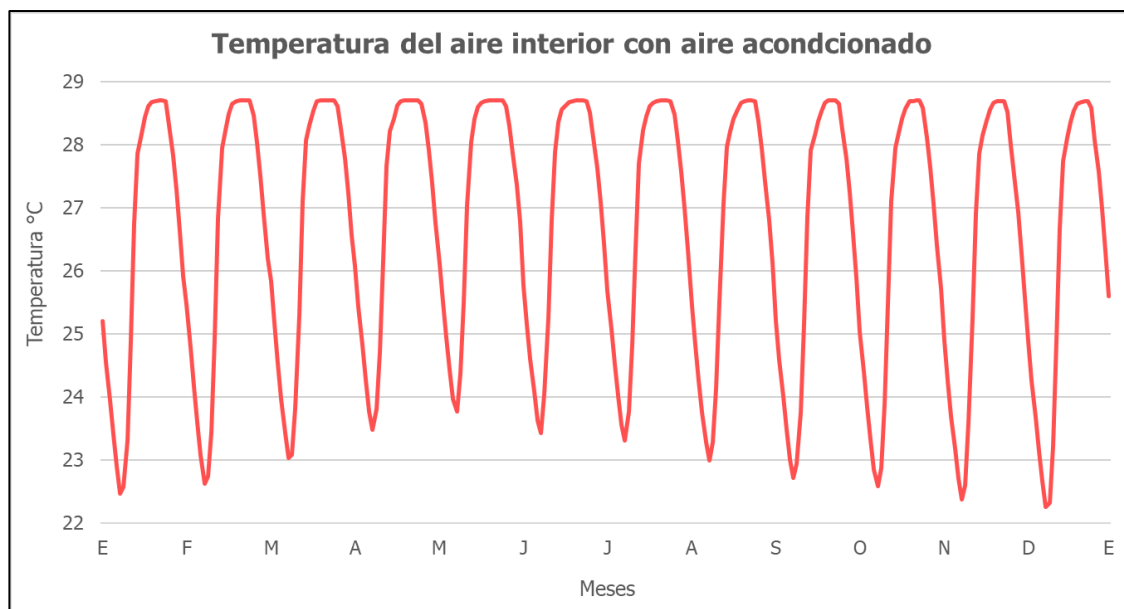


Figura 60. Temperatura del aire interior del modelo original con sistema AC

Fuente: IES-VE, 2024

Esta climatización artificial consiste en disipar de los espacios el exceso de energía en forma de calor que se tiene presente; para ello, el aparato de aire acondicionado consume electricidad e introduce una carga de enfriamiento que mantiene la temperatura del aire interior en el límite fijado. Este consumo energético se determina por medio del software, y se muestra en la Figura 61.

En esta figura se muestra, bajo la línea del cero, la cantidad de energía que debe ser disipada de los espacios para mantener la temperatura dentro de la zona de confort. Por otro lado, sobre la línea del cero, se observa el consumo energético mensual en kilowatts que requiere la unidad de aire acondicionado asignada al modelo para introducir las respectivas cargas de enfriamiento a los espacios.

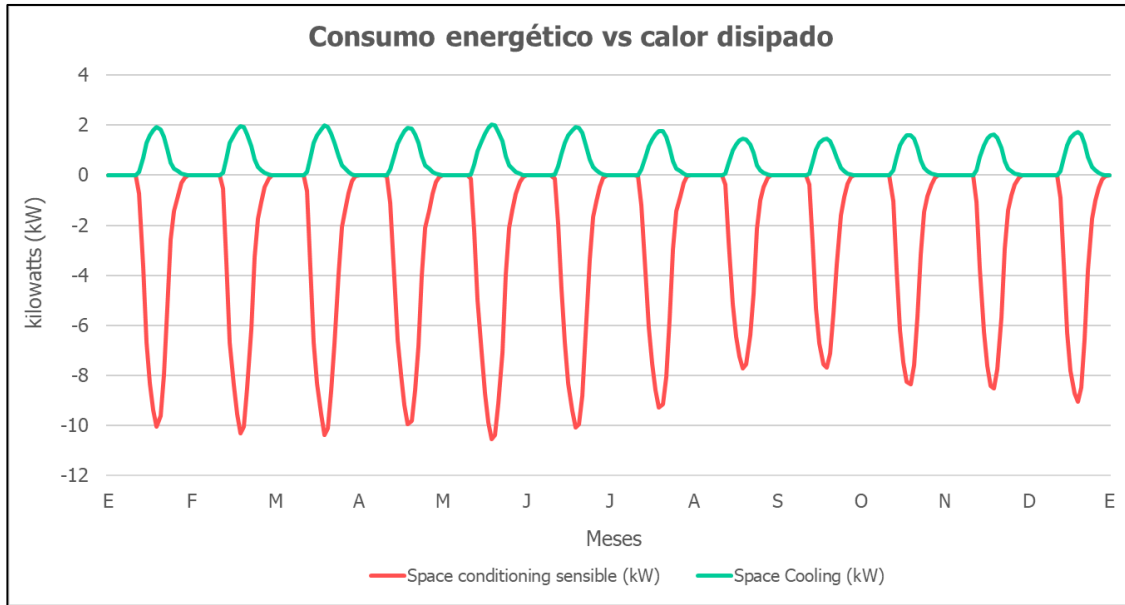


Figura 61. Cargas de enfriamiento y consumo energético modelo original con sistema AC

Fuente: IES-VE, 2024

De la Figura 61 se extraen los valores totales de energía disipada y consumo energético, ambos en kW del sistema de aire acondicionado de la vivienda; estos valores se muestran en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Cargas térmicas y consumo energético mensual por climatización activa

Mes	Calor disipado (kW)	Consumo (kW)
Enero	66.85	12.76
Febrero	70.34	13.42
Marzo	72.98	13.93
Abril	72.63	13.86
Mayo	78.59	15.00
Junio	72.91	13.91
Julio	65.12	12.43
Agosto	52.01	9.93
Septiembre	49.45	9.44
Octubre	54.28	10.36
Noviembre	54.63	10.43
Diciembre	58.53	11.17
Total	768.33	146.63

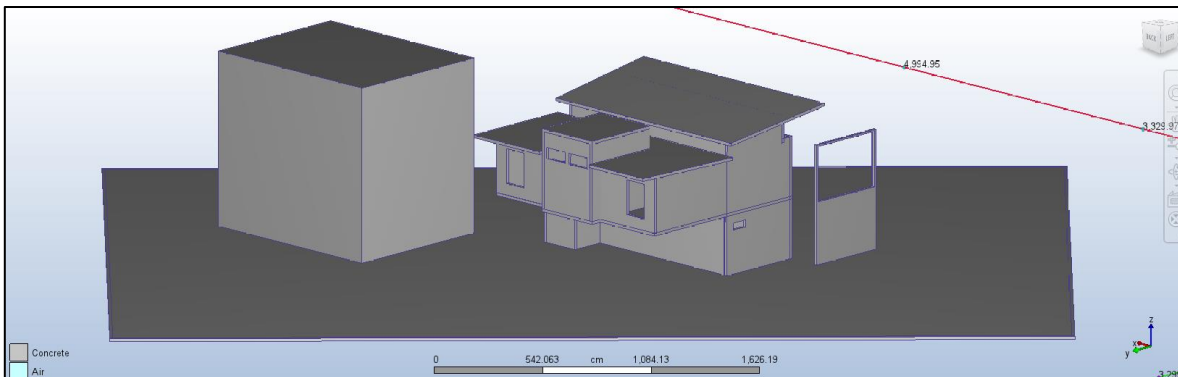
Fuente: IES-VE, 2024

Al calcular el costo económico asociado a este consumo energético, utilizando las tarifas residenciales vigentes publicadas en el Alcance N° 257 de la Gaceta N° 237 del 21 de diciembre del 2023 (CNFL, 2024), se tiene que, anualmente, los usuarios de la vivienda deberán cancelar un monto aproximado de $\$319.368,94$ por concepto de enfriamiento de los espacios.

3.1.5. Simulación de dinámica de fluidos computacional para ventilación

Adicional al proceso de evaluación bioclimática realizado con el software IES-VE, se aprovecha el modelo simplificado generado en Revit para realizar una simulación de ventilación con la herramienta CFD⁷ de Autodesk, con el fin de aumentar la cantidad de información disponible para el análisis de los resultados. Esta herramienta utiliza los principios de la dinámica de fluidos para aproximar el comportamiento de las corrientes de aire en el interior de la vivienda mediante iteraciones.

Para realizar este proceso se tomó en consideración el modelo geométrico simplificado en Revit de la Residencia Maru, al cual se le realizan algunas modificaciones para contemplar las perforaciones como espacios vacíos y las transparencias como espacios sólidos. Además, se consideran dos volúmenes conceptuales en el exterior de la vivienda que influyen con la dirección y velocidad del viento: la edificación aladaña en la colindancia oeste y el muro de apoyo para las gradas de acceso al segundo nivel. En la Figura 62 se muestran dos vistas del modelo utilizado en la herramienta CFD de Autodesk.



⁷ La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es una rama de la dinámica de fluidos que utiliza computadoras y algoritmos numéricos para obtener soluciones aproximadas a las ecuaciones de flujo de fluidos.

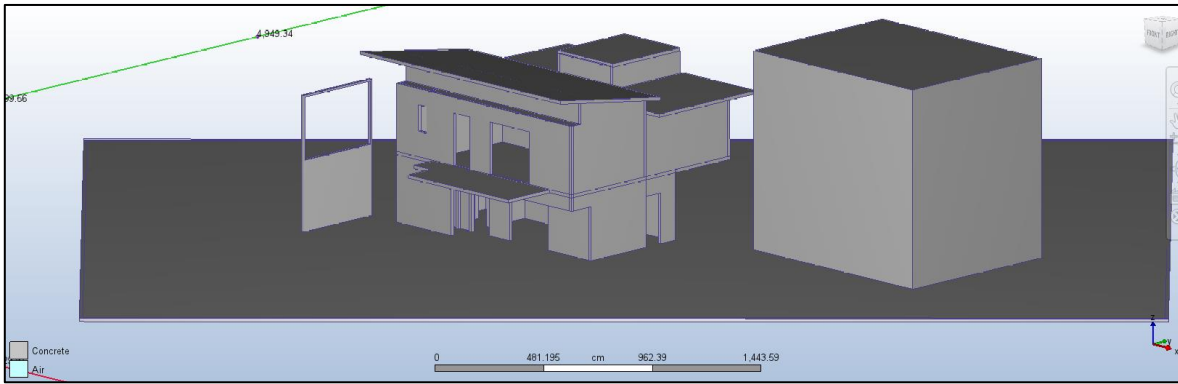


Figura 62. Modelo computacional original utilizado en la herramienta Autodesk CFD

Fuente: Elaboración propia, 2024

Con respecto a los valores de entrada para el programa, se utilizó una dirección del viento de noreste hacia el suroeste, para coincidir con la dirección del viento contenida en el archivo EPW del distrito de Nicoya visto en el apartado 2.3.9; y se le dio al viento una magnitud de 3.0 m/s, obtenido mediante las ecuaciones de ajuste por rugosidad y altura (Salazar-Ceciliano, 2023) partiendo del valor anual promedio de 3.8 m/s dado por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) para la estación de Cuajiniquil en el Cantón de Santa Cruz, emplazada a 60 msnm. A continuación, se presenta el desarrollo de estos cálculos:

$$V_H = V_{met} \cdot \left(\frac{\delta_{met}}{H_{met}} \right)^{\alpha_{met}} \cdot \left(\frac{H}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (3)$$

$$V_H = 3.8 \frac{m}{s} \cdot \left(\frac{350 m}{60 m} \right)^{0.20} \cdot \left(\frac{6 m}{300 m} \right)^{0.15} = 3.00 \frac{m}{s}$$

En la Figura 63 y Figura 64 se muestra la distribución de la velocidad del viento en el interior de los espacios del primer y segundo nivel de la unidad de análisis, respectivamente. Como se observa, existen muchas zonas que cuentan con valores inferiores a los 0.4 m/s, incluso llegando prácticamente a cero; principalmente en habitaciones del segundo nivel como la bodega y cuarto de pilas, así como los baños, los cuales son sitios que por su uso tienen grados altos de humedad y requieren un mayor nivel de ventilación.

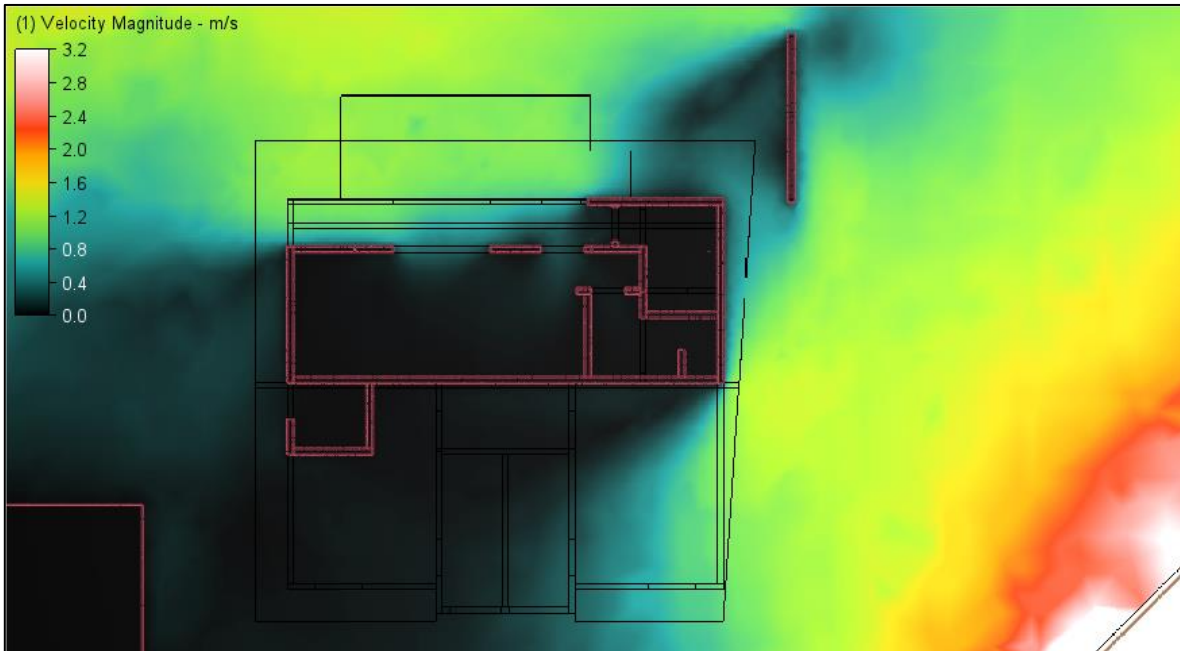


Figura 63. Distribución de velocidad del viento en el primer nivel del modelo original

Fuente: Autodesk CFD, 2024

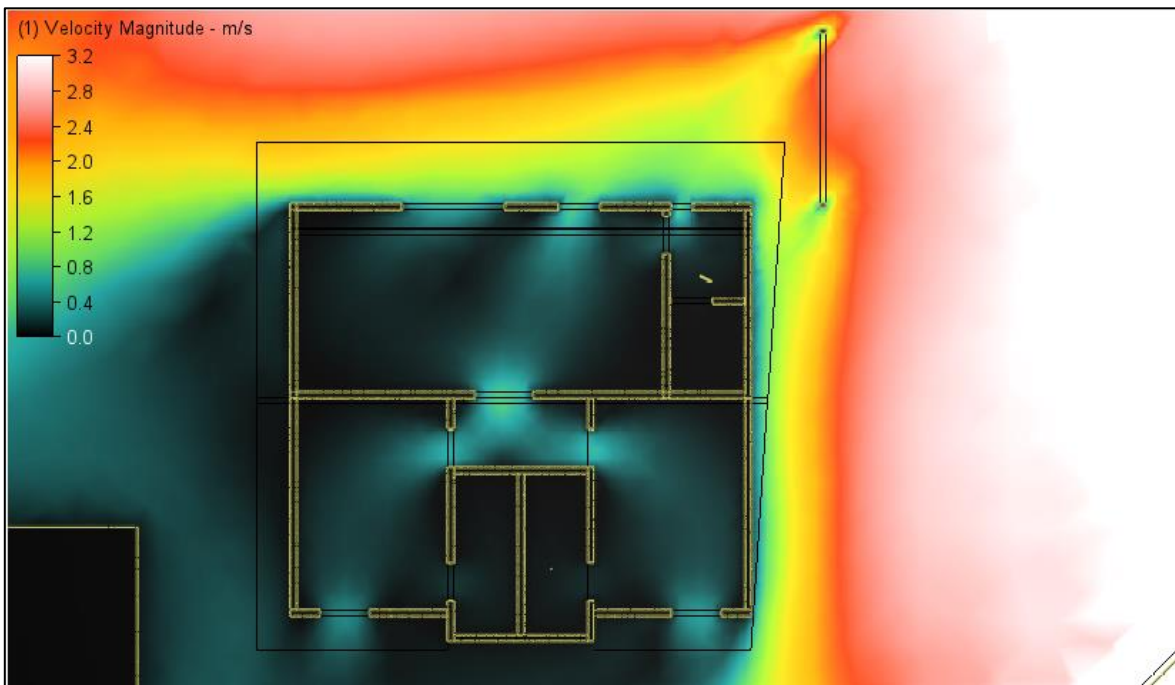


Figura 64. Distribución de velocidad del viento en el segundo nivel del modelo original

Fuente: Autodesk CFD, 2024

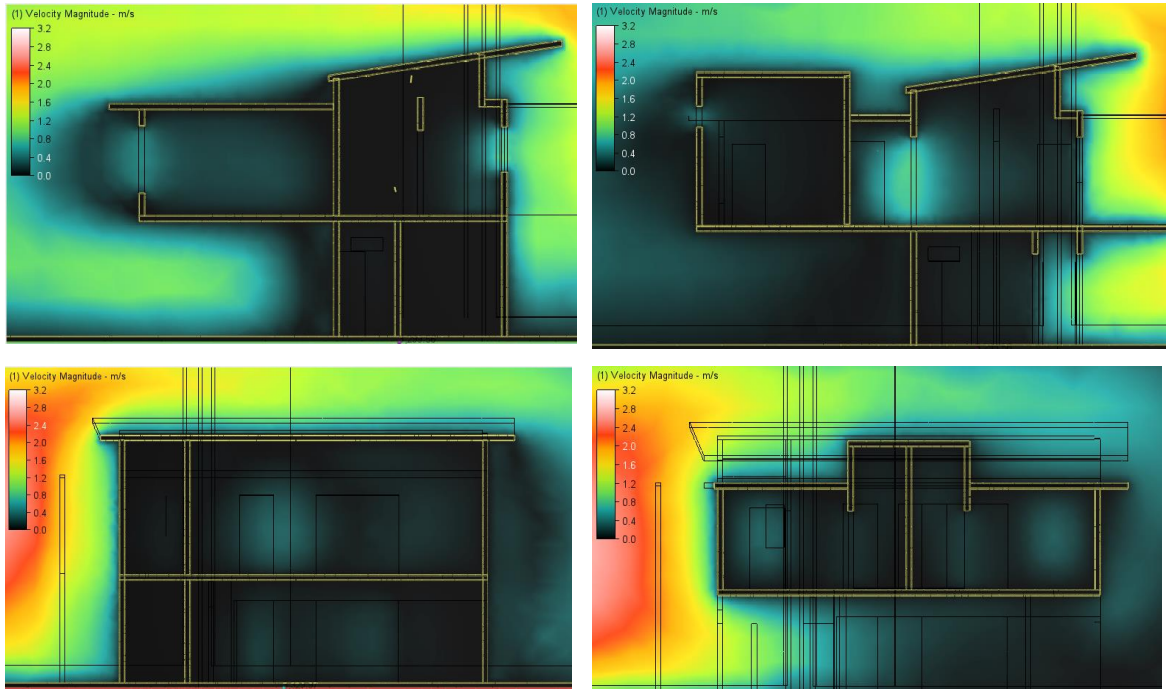


Figura 65. Secciones de distribución de velocidad del viento en el modelo original

Fuente: Autodesk CFD, 2024

Adicionalmente se observa que, en general, los espacios que se encuentran ventilados en el segundo nivel poseen magnitudes entre 0.4 m/s y 0.8 m/s, las cuales se hallan por debajo de los valores recomendados por Salazar-Ceciliano (2023) para zonas cálidas como Nosara. Además, en estos espacios la ventilación no se distribuye de manera uniforme, y como se mencionó anteriormente, deja zonas con una baja influencia de las corrientes de aire.

De la Figura 64 se desprende también que, en el pasillo central, se genera un efecto Venturi debido al estrangulamiento que se tiene por la única puerta de acceso al bloque trasero de la vivienda. En este caso, el viento alcanza velocidades cercanas a los 1.2 m/s, las cuales son recomendables para el escenario de estudio, sin embargo, es el único punto de la vivienda donde se tiene esta condición.

En el primer nivel se tiene una situación menos favorable que en el segundo, ya que, por un lado, el muro de escaleras se encuentra en el extremo noreste, generando una sombra de viento que disminuye la velocidad con la que este llega a la sala-estudio, y por otro, las puertas de acceso a las bodegas y a al baño quedan cubiertas del viento por la pared norte de la edificación. Estos factores hacen que el primer nivel no se encuentre ventilado

adecuadamente, y en casi todos los espacios se tengan valores menores a los 0.4 m/s e incluso llegando a cero.

Como complemento, en la Figura 65 se muestran secciones transversales en sentido Norte-Sur y Este-Oeste que muestran la distribución del viento en la altura de los espacios. Aquí también se observa la presencia de espacios que no cuentan con adecuada ventilación en ambos niveles.

3.2. PROPUESTA DE MEJORA CON MODIFICACIONES BIOCLIMÁTICAS

Como segunda etapa de análisis, en vista que la configuración arquitectónica original no ofrece condiciones apropiadas de confort higrotérmico, se realiza una intervención a esta, enfocada en la modificación e implementación de estrategias bioclimáticas orientadas a favorecer la ventilación natural y la sombra de los espacios, y evaluar el efecto que esto tiene sobre los parámetros analizados en la sección anterior.

3.2.1. Estrategias bioclimáticas incorporadas

Para la modificación del modelo original de la Residencia Maru, se parte de las estrategias bioclimáticas sugeridas por Gómez-Azpeitia (2020) en el apartado 2.3.5, basadas en las tablas de Mahoney (1971) y en los coeficientes de Serra y Coch (1995). Entre las estrategias sugeridas, este análisis se enfoca en aquellas ligadas a la ventilación natural y a la sombra, principalmente enfatizando lo siguiente:

- Se busca generar un alto nivel de perforación en la envolvente, de manera que se tenga la mayor área posible con vanos abiertos. Esto favorece una ventilación continua y una mejor distribución del aire dentro de los espacios.
- Se desea que los vanos cuenten con una sombra total y permanente, con lo cual se minimicen las ganancias solares directas. De esta forma, se favorece la ventilación sin aumentar la temperatura interior por efecto de la radiación.
- Se evitan las transparencias, es decir, vanos acristalados que no permiten el ingreso de aire; esto debido a que las transparencias favorecen el efecto invernadero dentro de los espacios y generan un aumento de la temperatura interior.

A partir de lo descrito anteriormente, se realiza la siguiente serie de modificaciones al modelo original:

- Se agregan nuevas aperturas en las caras Este y Oeste de la envolvente de la edificación; la fachada Este se encuentra en presión positiva, lo que significa que está de frente a la dirección del viento, por lo que las ventanas permiten el ingreso de las corrientes de aire a los espacios, por su parte, la fachada Oeste se encuentra en presión negativa, por lo que permite la salida del aire que ingresa por el Norte, que se encuentra en presión positiva. De esta manera, se sustituye la ventilación unilateral por ventilación cruzada en los espacios N01-01, N01-02, N01-04, N02-01, N02-02, N02-05, N02-06, N02-07 y N02-08.
- Se aumenta el tamaño del alero de la cubierta de techo en todo su perímetro, con el objetivo de proveerle sombra a las ventanas del segundo nivel de la vivienda y evitar el ingreso directo de los rayos del sol en el periodo comprendido entre las 8:30 am y las 4:00 pm durante todo el año.
- A las ventanas del primer nivel se les coloca un alero que, al igual que el alero principal de la cubierta, evite las ganancias solares directas a través de las perforaciones y también provea protección contra la lluvia.
- Se eliminan las transparencias del modelo original. En el caso de la transparencia ubicada en el segundo nivel de la fachada Norte, por encima de las puertas de vidrio principales, esta se transforma en perforación, al sustituir el acristalamiento por ventanas que permitan un cierto grado de apertura; esto favorece el ingreso de aire y minimiza el efecto invernadero que se genera en la sala (N02-06). En el caso de las transparencias localizadas en la cubierta de los baños del segundo nivel, se eliminan por completo para evitar las ganancias solares y el efecto invernadero.
- Para contrarrestar las ganancias solares directas que ingresan por las puertas de vidrio de las salas del primer y segundo nivel durante las tardes del mes de julio, se genera un volumen conceptual en la fachada Norte que cumple la función de parasol, y provee sombra al interior.
- En el interior de la vivienda se generan perforaciones entre espacios para facilitar el movimiento de las corrientes de aire entre ellos. Se realiza una apertura entre la sala-comedor (N02-06) y la oficina (N02-02), otra entre la sala-comedor y las pilas (N02-08) y otra de menor tamaño entre el pasillo (N02-03) y los baños (N02-04 y N02-05).
- Se coloca sobre la cubierta metálica del techo una capa de aislamiento térmico que consiste en placas de poliisocianurato (PIR), que es un plástico termoestable que se

produce normalmente como espuma y se utiliza como aislamiento térmico rígido y es comúnmente utilizado en techos. Adicionalmente, el aislante se cubre con una membrana de poliolefina termoplástica flexible (TPO), que es una membrana termoplástica ligera, con gran resistencia al calor y a la humedad, a los microorganismos y a las sustancias químicas más comunes en cubiertas y es la encargada de garantizar la impermeabilidad del techo (AIFIM, s.f.). Este ensamble se realiza debido a que la cubierta recibe la mayor cantidad de radiación solar anual y se busca minimizar las transferencias térmicas a los espacios del segundo nivel.

En la Figura 66 se muestra el resultado de las modificaciones realizadas al modelo original en el software IES-VE.

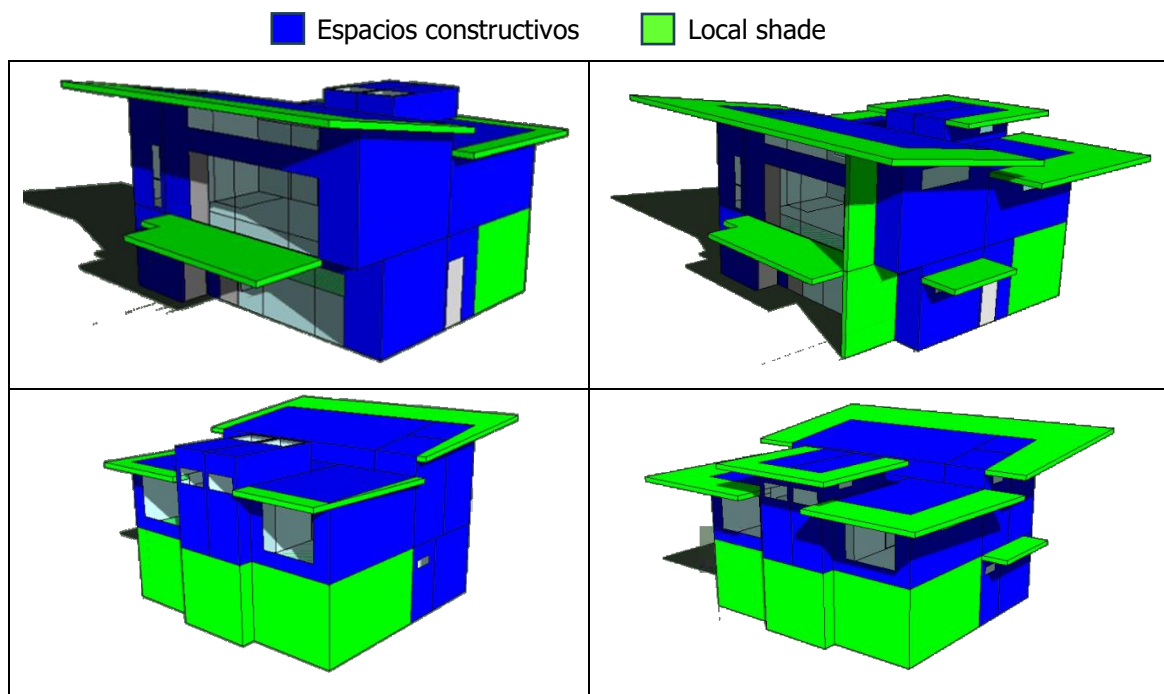


Figura 66. Modelo IES-VE original (izquierda) y con modificaciones bioclimáticas (derecha)

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.2. Proceso de simulación del modelo modificado bioclimáticamente

Con la incorporación de las modificaciones bioclimáticas orientadas a favorecer la ventilación natural y la sombra en la vivienda, se procede a realizar una nueva simulación en el software IES-VE, utilizando el perfil de ventilación natural (VN) creado con Apache Systems. En esta nueva simulación se mantiene constante la configuración que se utilizó en el caso del modelo original, garantizando que la única variación son los cambios en la geometría mencionados.

- Escenario con solamente ventilación natural

a) Temperatura del aire: Se evalúa nuevamente la temperatura del aire en el interior de los espacios que conforman la unidad de estudio. En la Figura 67 se muestra un gráfico con los valores de temperatura calculados para cada hora del año en el interior del modelo. Se observa que, en esta ocasión, la temperatura presenta una oscilación en el rango aproximado que va de los 20 °C a los 34 °C, lo que representa cerca de 2 °C por debajo de los valores generales observados para el caso de la configuración original. La comparación más detallada entre los resultados de ambos casos se presenta en el capítulo siguiente; en esta sección se muestran solamente los resultados correspondientes a la simulación del modelo modificado.

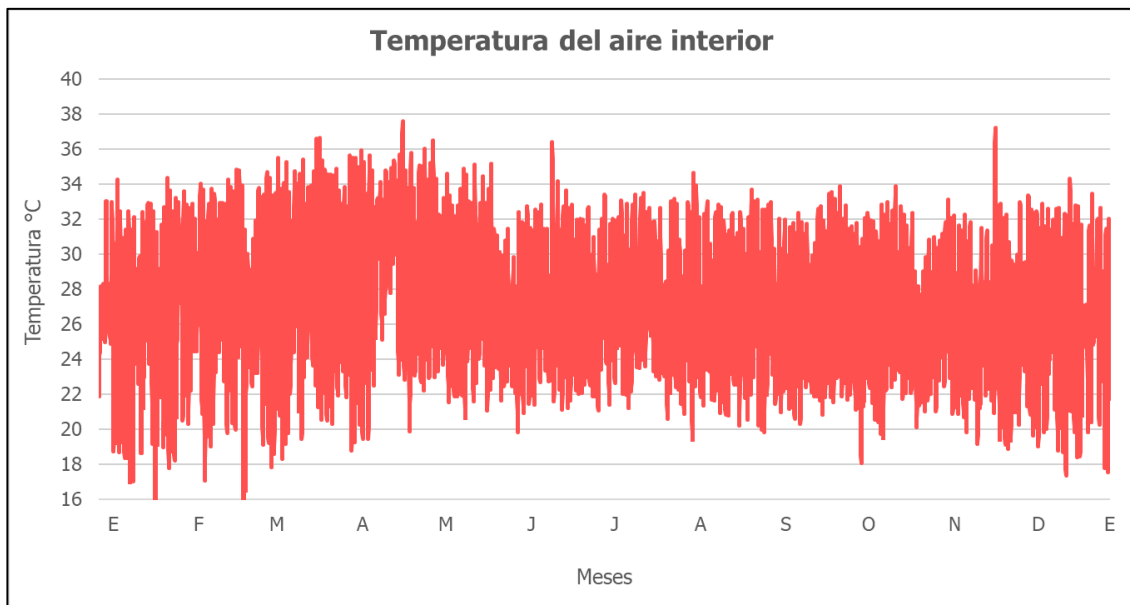


Figura 67. Temperatura del aire interior en el modelo modificado con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

De la misma forma que se hizo con el caso original, se cuantifica el total de horas donde la temperatura se halla dentro y fuera de la zona de confort térmica, tal como se muestra en la Figura 68. En dicha figura se observa que el 26% de las horas anuales se ubica por debajo del límite inferior de la zona de confort, mientras que el 32% se ubican por arriba del límite superior. Dentro del rango de la zona de confort se encuentran el 42% de las horas anuales. Adicional a esto, también se genera la distribución de temperaturas por cada espacio del modelo, permitiendo ver el comportamiento general de las

habitaciones; para ello se presenta la Figura 69. Aquí se muestra que los espacios del segundo nivel poseen una distribución casi equitativa entre horas por debajo, dentro y por arriba de la zona de confort, presentando valores entre 30% y 35% para cada una de las categorías. El dormitorio (N02-01) es la habitación con mayor cantidad de horas dentro de la zona de confort en el segundo nivel.

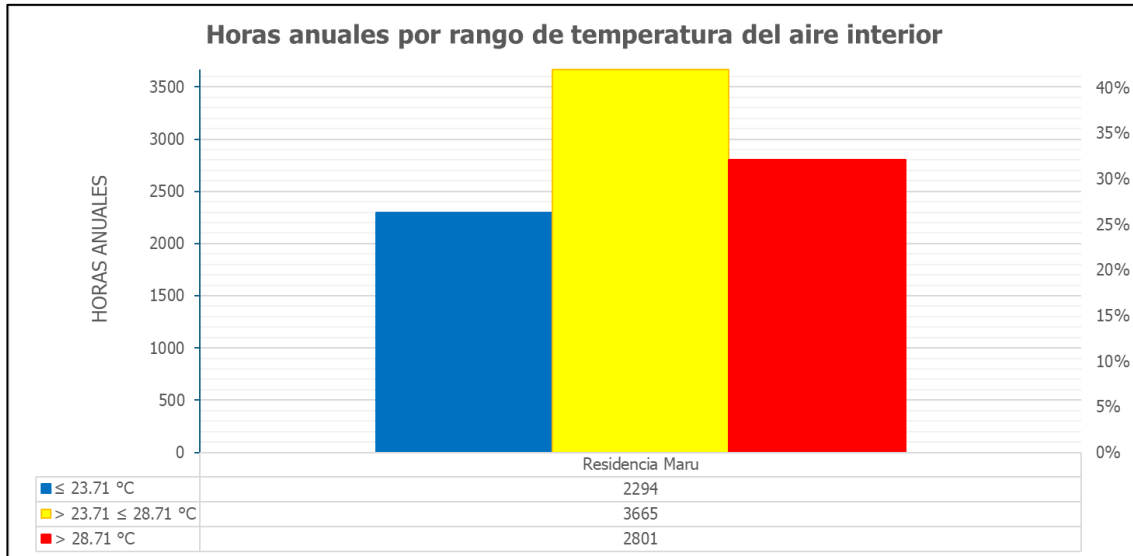


Figura 68. Horas anuales por rango de temperatura interior en el modelo modificado

Fuente: IES-VE, 2024

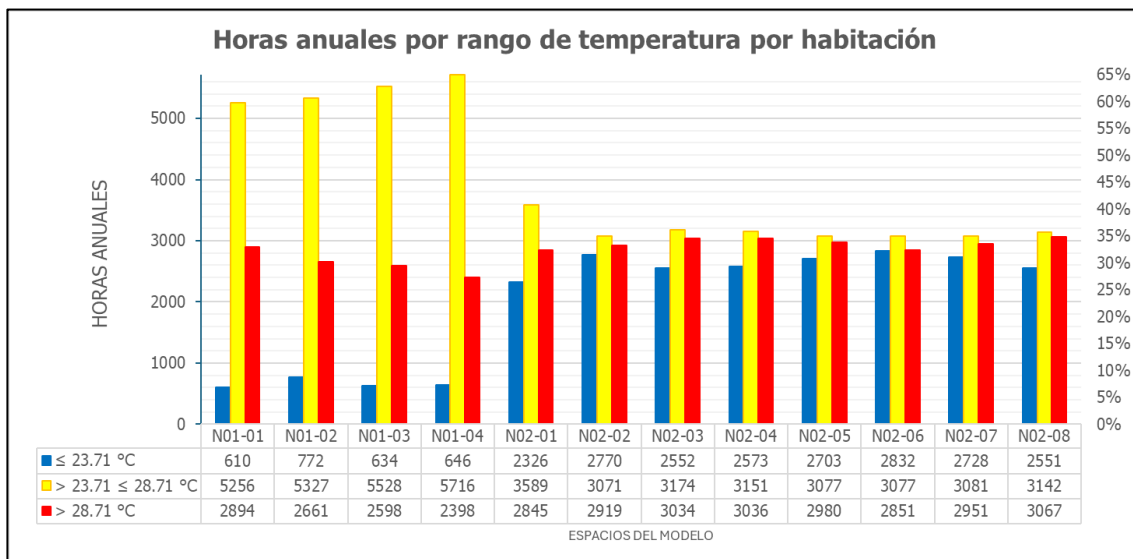


Figura 69. Horas anuales por rango de temperatura por habitación en modelo modificado

Fuente: IES-VE, 2024

Por otra parte, al analizar la magnitud de la temperatura en los días representativos de la época seca y lluviosa, según se observa en la Figura 70, se tiene que, en época seca la temperatura mínima es de 19.20 °C y la máxima de 34.37 °C; mientras que durante la época lluviosa estos valores alcanzan los 21.18 °C y 32.63 °C respectivamente.

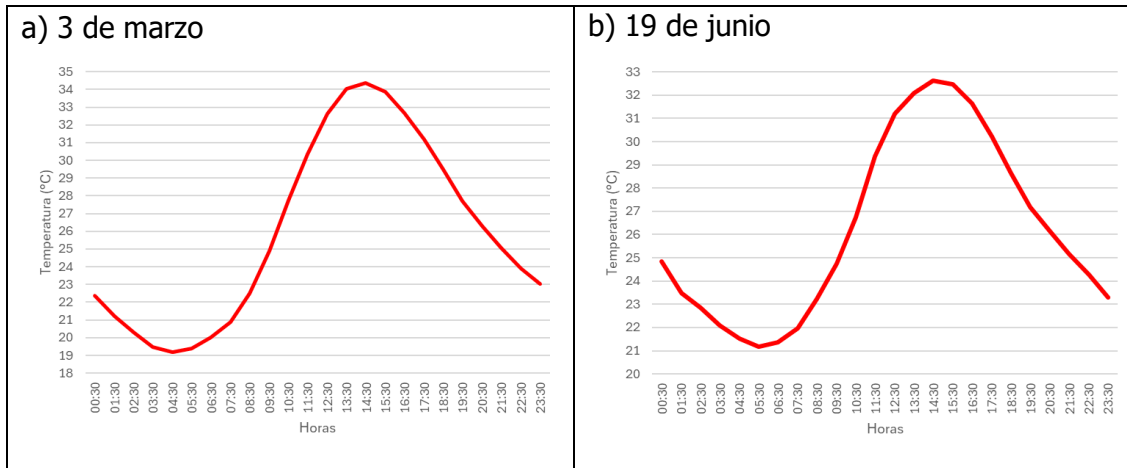


Figura 70. Temperatura del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en el modelo modificado

Fuente: IES-VE, 2024

b) Humedad relativa: Se evalúa nuevamente la humedad relativa en el interior de los espacios que conforman la unidad de estudio. En la Figura 71 se muestra un gráfico con los valores de humedad relativa calculados para cada hora del año en el interior del modelo, allí se muestra que los valores promedio rondan entre el 65% y 80%. Además, se mantiene la tendencia vista en la simulación del modelo original de tener cifras menores durante la época seca en comparación a la época lluviosa.

Previamente, se había definido la zona de confort en el rango entre 30% y 70%, por lo que, tal como se muestra en la Figura 72, se continúan teniendo valores que sobrepasan dicho límite durante todo el año. Para observar el comportamiento de este parámetro en cada uno de los espacios de la Residencia Maru, se presenta la Figura 73. De acuerdo con lo mostrado en ella, los valores de humedad relativa ubicados dentro de la zona de confort se encuentran entre el 40% y el 45% del total anual, siendo superados por los valores que exceden el 70% de humedad relativa, los cuales llegan a ser de hasta un 60% de las horas anuales.

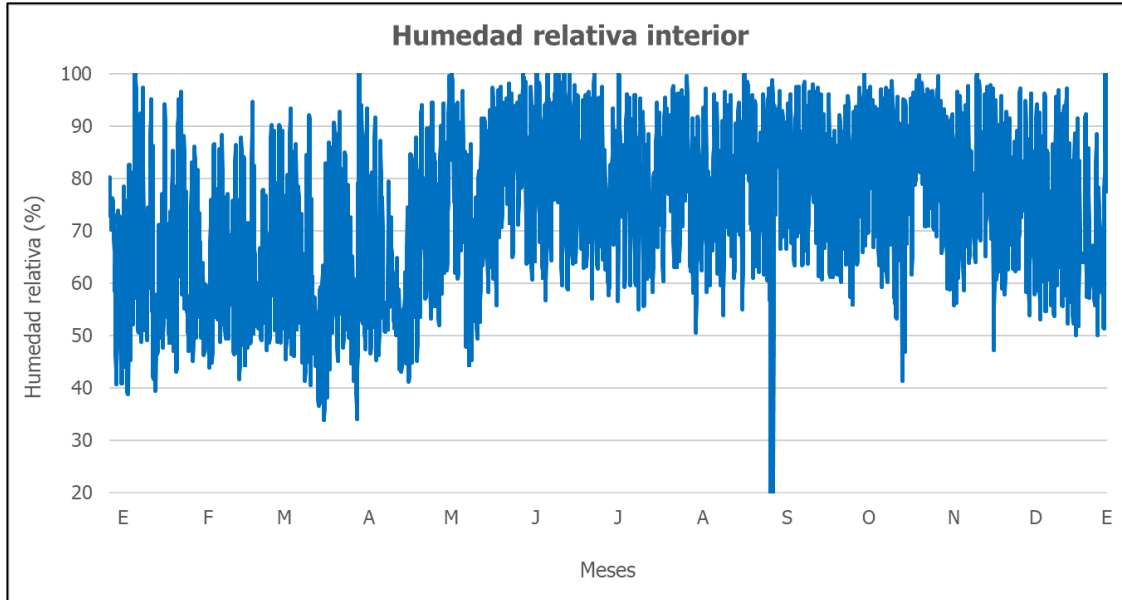


Figura 71. Humedad relativa en el modelo modificado con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

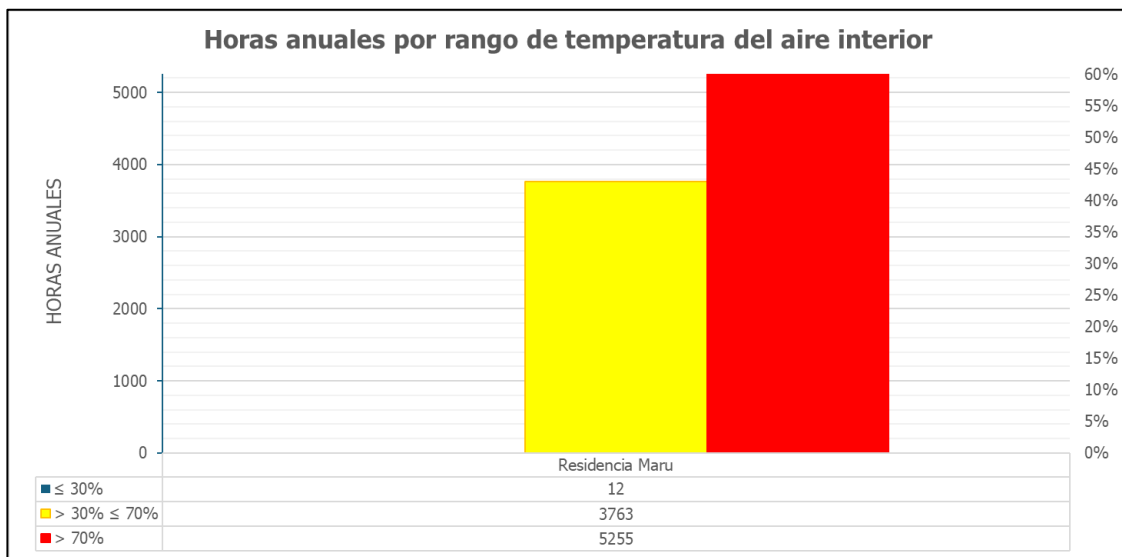


Figura 72. Horas anuales por rango de humedad relativa interior en modelo modificado

Fuente: IES-VE, 2024

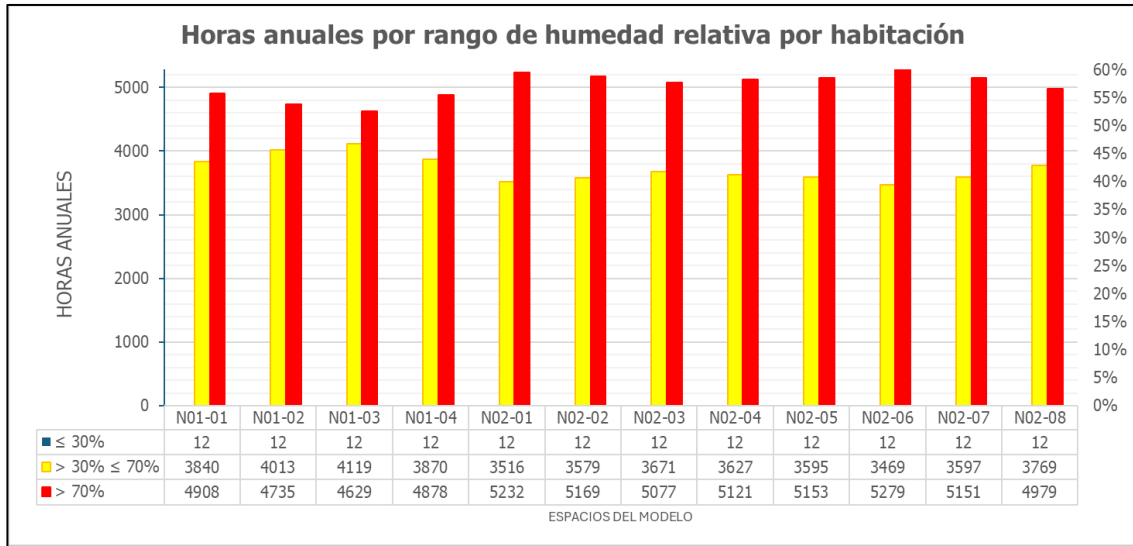


Figura 73. Horas anuales por rango de humedad relativa por habitación en el modelo modificado

Fuente: IES-VE, 2024

Además, también se presentan en la Figura 74 los gráficos correspondientes a los días representativos de la época seca y lluviosa, donde se observa que en época seca la humedad relativa oscila entre el 50% y el 80%, a la vez que durante la época lluviosa los valores se mueven entre 63% y 92%. Destaca el hecho que, durante la época seca, la humedad relativa se mantiene casi por completo dentro de la zona de confort.

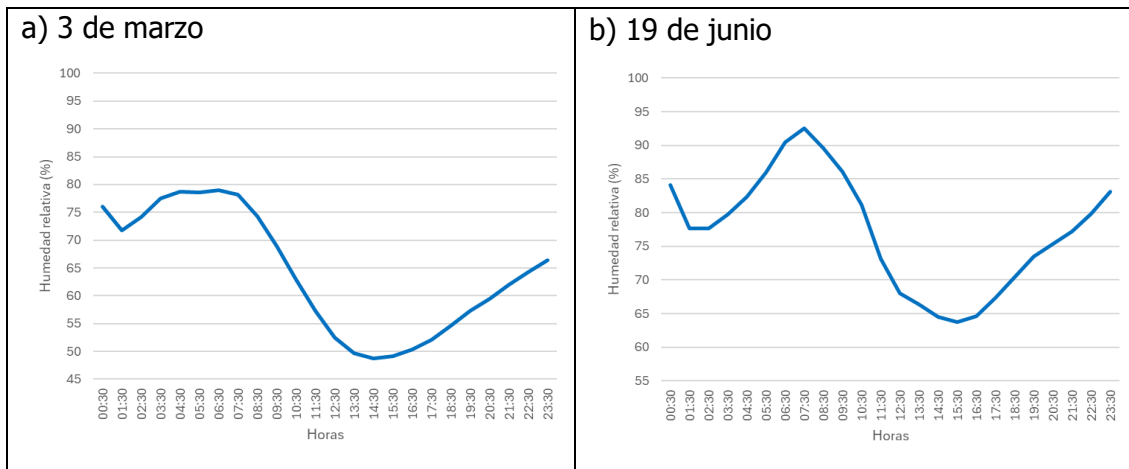


Figura 74. Humedad relativa del aire interior en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha) en modelo original

Fuente: IES-VE, 2024

c) Ventilación de los espacios: Las modificaciones hechas al modelo original también se plasmaron en el modelo computacional realizado en el software Revit, para realizar una nueva simulación con la aplicación CFD y observar el efecto que las aperturas agregadas tienen sobre el comportamiento de las corrientes de aire a través de la geometría de la vivienda. El resultado de la simulación se aprecia en la Figura 75, Figura 76 y Figura 77.

En la Figura 75 se muestra el flujo de aire en las habitaciones del primer nivel de la casa, donde el mayor efecto se nota en la sala-estudio (N01-02) con la incorporación de una ventana en la pared Oeste la cual, al encontrarse en presión negativa, permite la salida del aire que ingresa por las puertas de cristal de la fachada Norte, generando una corriente. Además, el parasol vertical añadido en el Norte, a la izquierda de las puertas de cristal, genera una barrera al viento del Noreste que redirecciona parte de este al interior de la vivienda, potenciando el ingreso de aire; esto hace que la sala-estudio pase de tener una velocidad prácticamente de cero (Figura 63) a cerca de 0.8 m/s.

También se destaca que la bodega (N01-04) genera una sombra de viento sobre la sala-estudio, y a pesar de que existe una corriente menor que ingresa por el baño (N01-03), esta no es suficiente para ventilar adecuadamente la mitad oriental de dicho espacio.

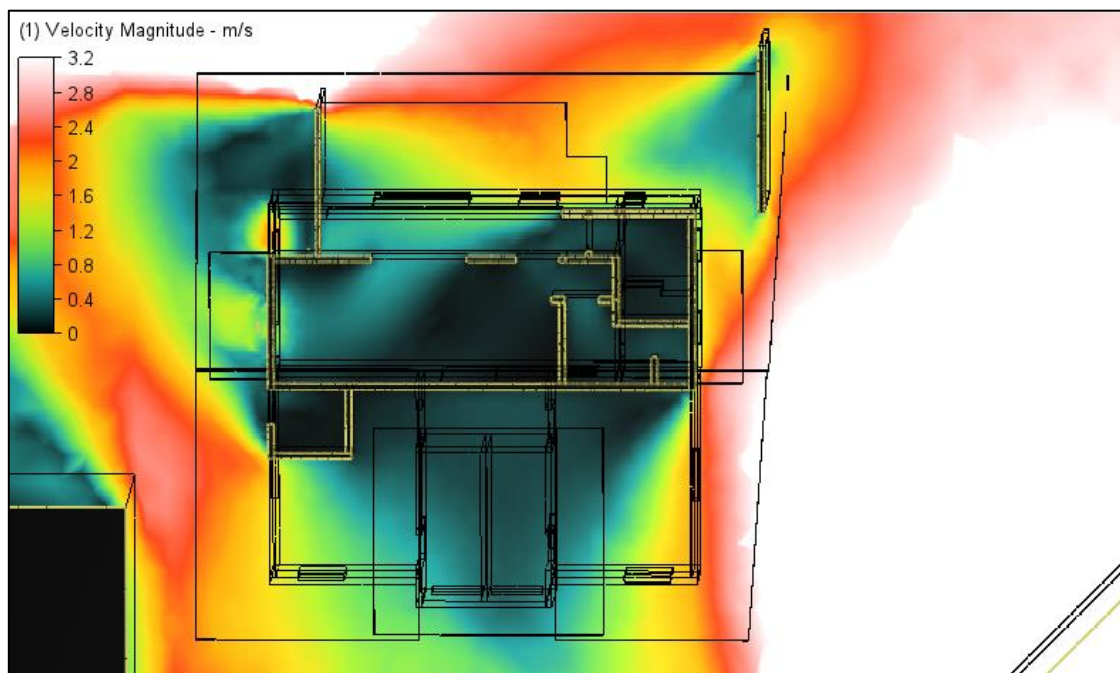


Figura 75. Distribución de velocidad del viento en el primer nivel del modelo modificado

Fuente: Autodesk CFD, 2024

La bodega N01-04 mantiene una ventilación escasa, a pesar de que se le agrega una ventana en la pared Este, que recibe velocidades de cerca de 1.6 m/s, ya que, por su geometría, la salida que tiene en la puerta Oeste no favorece la circulación; ciertamente se genera una corriente, pero con velocidad de cerca de 0.4 m/s. Sin embargo, esto no se considera un problema al no ser este un espacio crítico, pues no es habitado con frecuencia y por periodos prolongados.

Por otra parte, en la Figura 76 se muestra el flujo de aire en las habitaciones del segundo nivel de la casa; al igual que en el primer nivel, las aperturas añadidas en la fachada Oeste favorecen la generación de corrientes dentro de la vivienda que, como se ve en la sala-comedor (N02-06), ahora tienen flujos con velocidades de cerca de 1.8 m/s, mientras que el bloque trasero conformado por el dormitorio (N02-01), la oficina (N02-02), y los baños (N02-04 y N02-05) tienen velocidades de entre 0.8 m/s y 1.0 m/s distribuidas de manera más uniforme en el volumen.

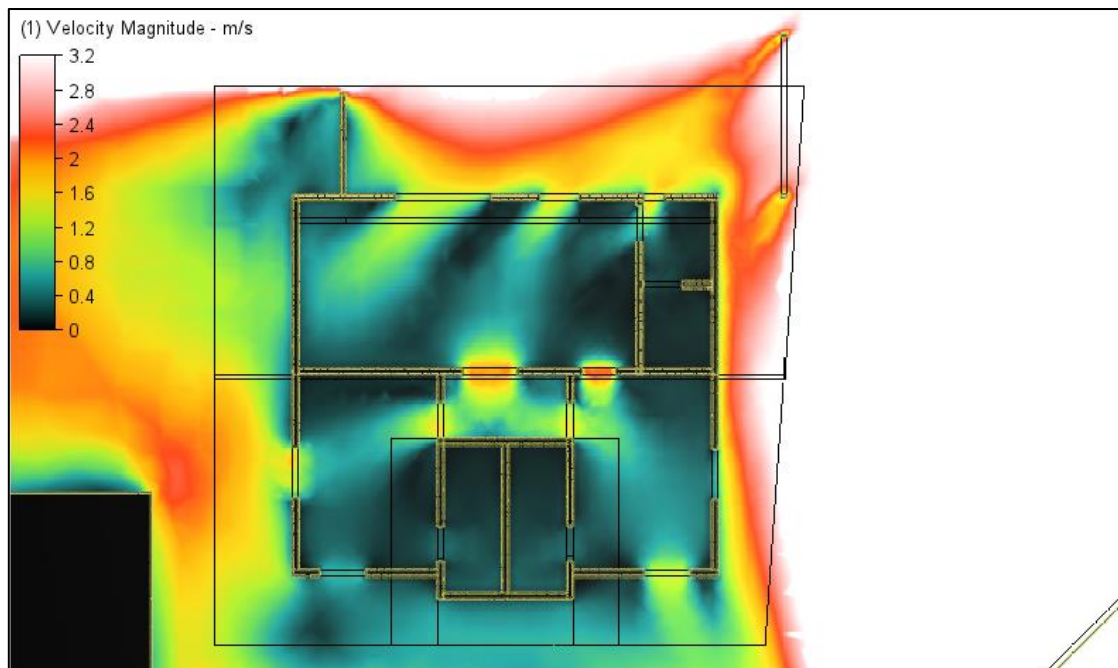


Figura 76. Distribución de velocidad del viento en el segundo nivel del modelo modificado

Fuente: Autodesk CFD, 2024

Finalmente, en la Figura 77 se muestran secciones en corte en sentido Norte-Sur y Este-Oeste de distintos espacios de la vivienda, en los que puede observarse la distribución más homogénea que tiene el aire en los distintos espacios de la unidad de estudio.

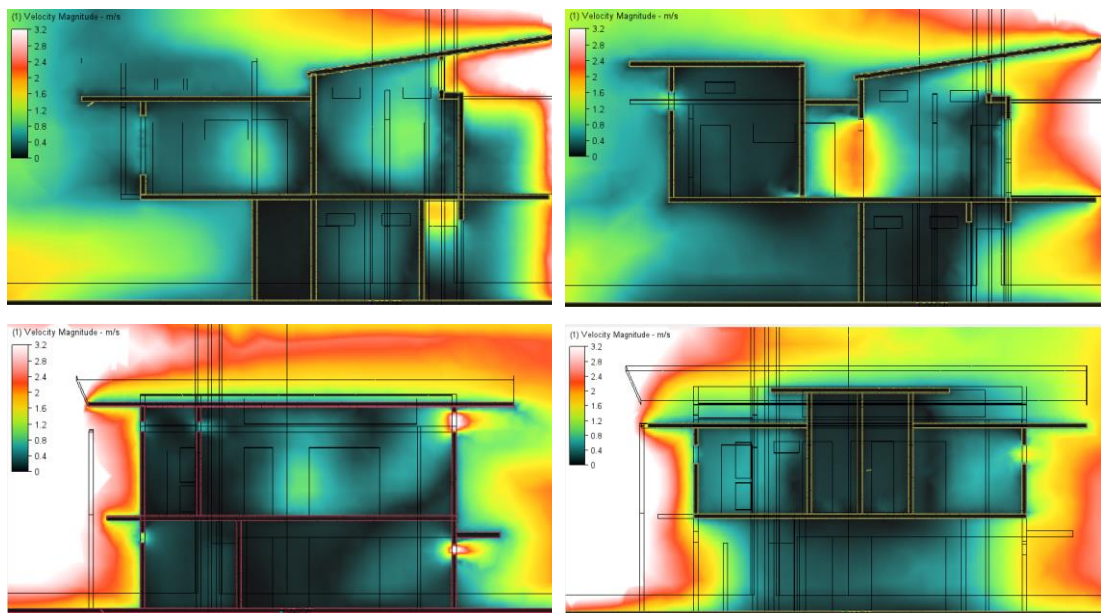


Figura 77. Secciones de distribución de velocidad del viento en el modelo modificado

Fuente: Autodesk CFD, 2024

d) Porcentaje de personas insatisfechas: A partir de los parámetros bioclimáticos presentados previamente, se analiza nuevamente el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) con las condiciones higrotérmicas de la vivienda. Para observar el comportamiento de la insatisfacción de los usuarios, se muestra la Figura 78 y Figura 79, donde se presentan los gráficos de temperatura del aire y humedad relativa de cada día representativo, en conjunto con el gráfico de porcentaje de personas insatisfechas.

Tanto para la época seca como para la época lluviosa, el comportamiento de estos gráficos es muy similar al obtenido en el caso del modelo original, a pesar de que en el escenario con mejoras bioclimáticas todos los valores se reducen respecto a los originales. La comparativa más detallada entre los parámetros de ambos casos se plantea en el siguiente capítulo; no obstante, con los resultados presentados hasta el momento, es evidente que la vivienda continúa teniendo un requerimiento de enfriamiento en las horas críticas del día, comprendidas entre las 11:30 am y las 6:00 pm. Dicho enfriamiento, debido a que el alcance de esta investigación contempla solamente estrategias de ventilación y sombra, debe alcanzarse mediante climatización activa. La siguiente sección del documento describe los requerimientos de enfriamiento y consumo energético que siguen estando presentes en el modelo modificado de la Residencia Maru.

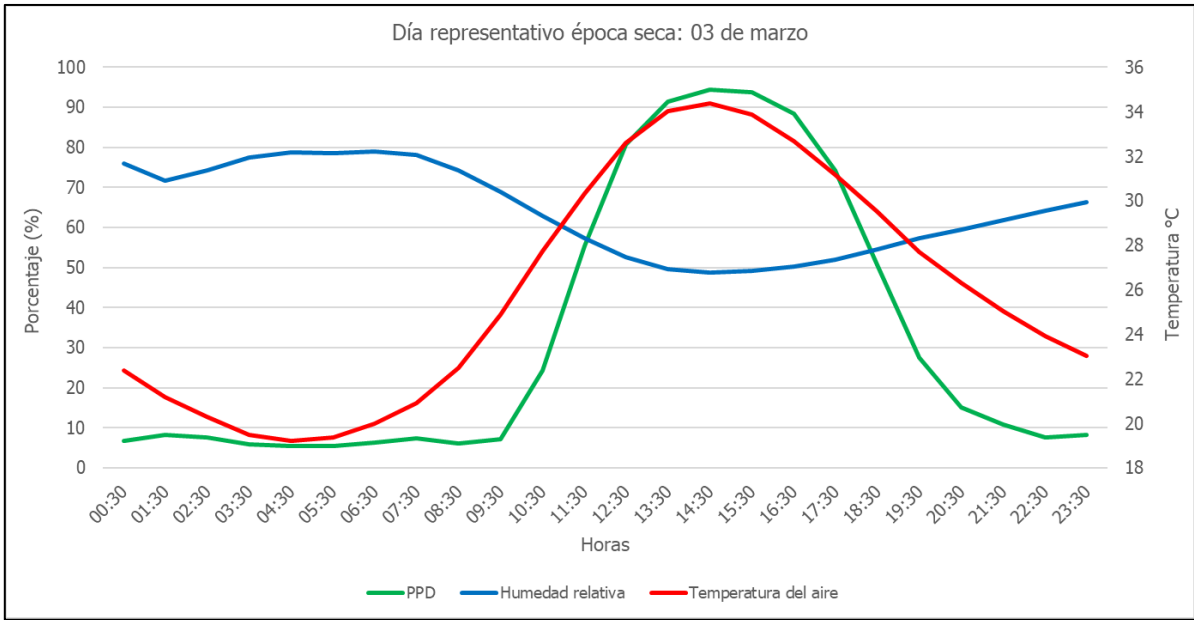


Figura 78. Porcentaje de personas insatisfechas D_R época seca modificado con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

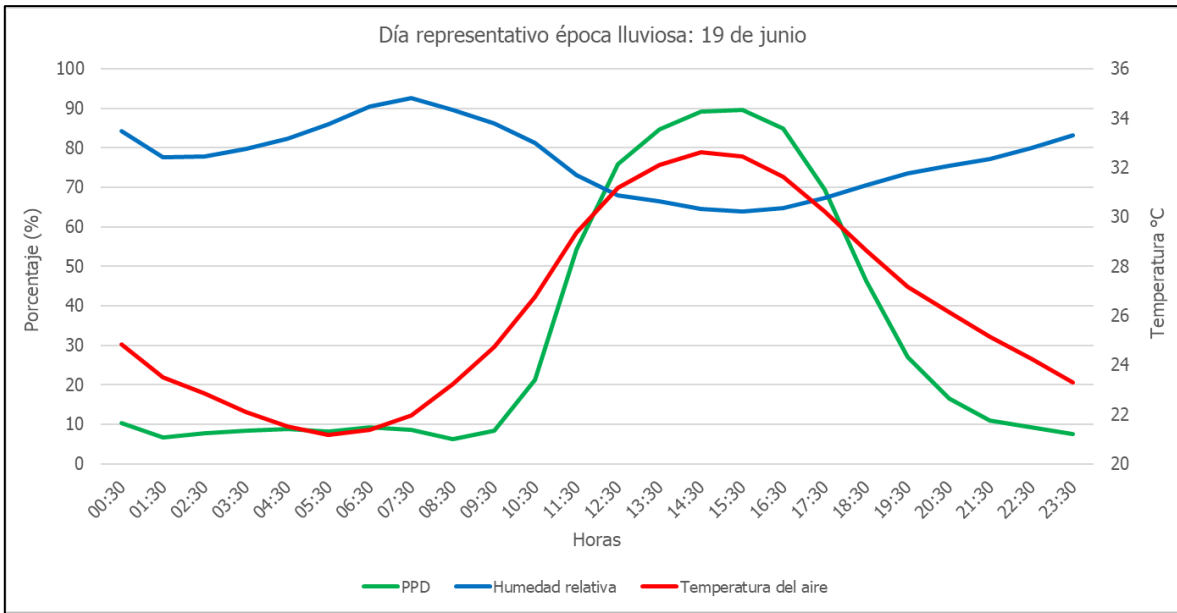


Figura 79. Porcentaje personas insatisfechas D_R época lluviosa modificado con sistema VN

Fuente: IES-VE, 2024

- Escenario con incorporación de climatización activa

Luego de configurar el software IES-VE para realizar una nueva simulación del modelo modificado con sistema AC, se obtiene el gráfico mostrado en la Figura 80, donde se presenta la cantidad de energía por disipar para mantener la temperatura dentro de la zona de confort (space conditioning sensible) y el consumo energético mensual en kilowatts (space cooling) requerido para introducir las respectivas cargas de enfriamiento a los espacios.

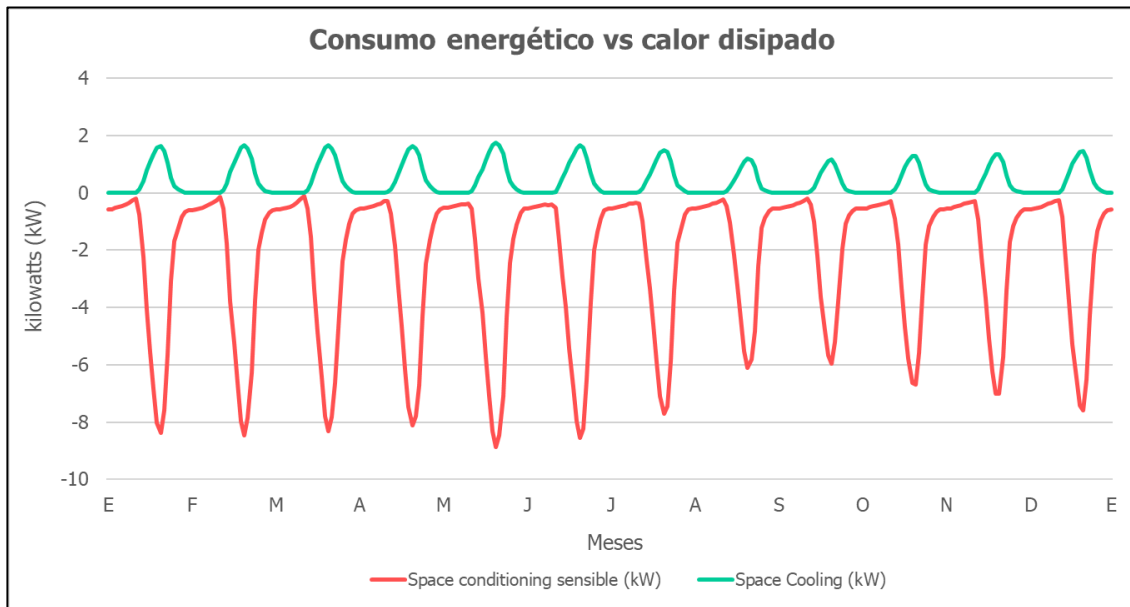


Figura 80. Carga de enfriamiento y consumo energético modelo modificado sistema AC

Fuente: IES-VE, 2024

En este escenario, el calor disipado anual alcanza un valor de 678.08 kW, mientras que el consumo energético anual utilizado para este fin es de 115.57 kW. Al comparar estos valores con los obtenidos del proceso de enfriamiento del modelo original, los cuales son de 768.33 kW y 146.63 kW respectivamente, se puede concluir que el ahorro energético asociado a las mejoras bioclimáticas implementadas es de 31.06 kW, y tiene un valor monetario de \$67.655,12 lo que representa aproximadamente un 21% de la factura anual por concepto de climatización activa para el modelo de aire acondicionado planteado para la vivienda.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y FACTIBILIDAD

4.1. COMPARATIVA ENTRE MODELO ORIGINAL Y MODELO MODIFICADO

En este apartado se analizan los valores obtenidos de los procesos de simulación realizados para el modelo original y el modificado, con respecto a los parámetros bioclimáticos en estudio y, mediante una comparativa, se cuantifica el efecto que tienen sobre ellos las estrategias de ventilación y sombra implementadas.

4.1.1. Temperatura

En lo concerniente a este parámetro, para ambos modelos se calcula, de manera anual, la temperatura del aire en el interior de la vivienda. En la Figura 81 se presenta una superposición de los dos escenarios, y puede observarse que el comportamiento es prácticamente el mismo a lo largo del año, sin embargo, se aprecia una disminución en la magnitud de los valores de entre 2 °C y 4 °C del modelo con mejoras bioclimáticas respecto al modelo original.

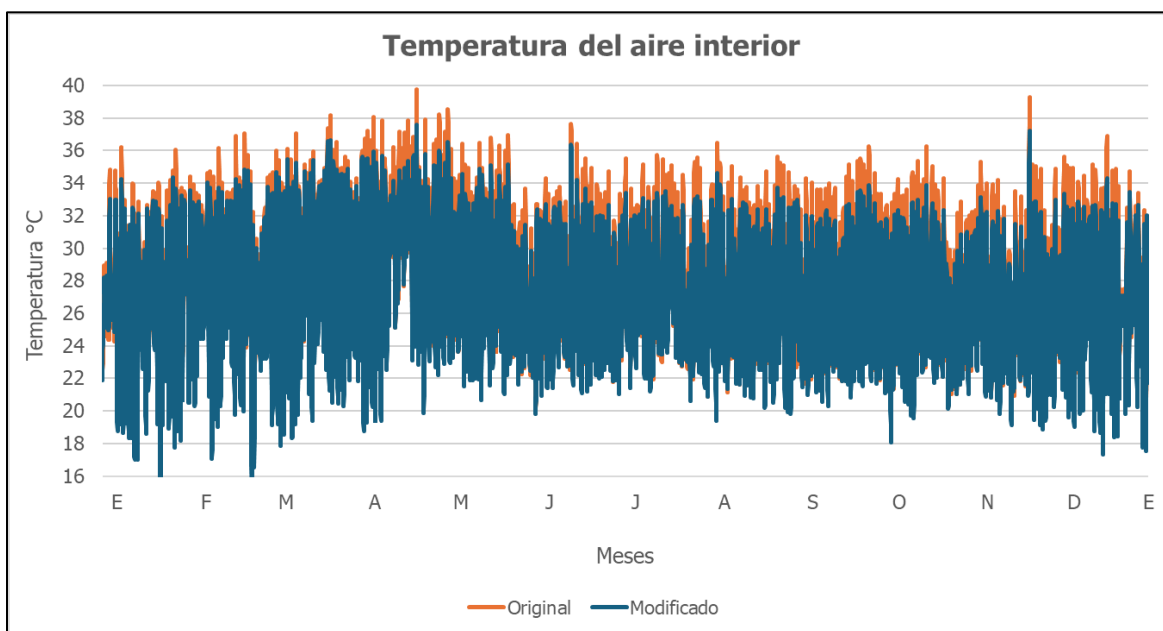


Figura 81. Comparación de la temperatura del aire entre modelo original y modificado

Fuente: IES-VE, 2024

Por otra parte, al comparar la cantidad de horas anuales contenidas en cada uno de los rangos de temperatura definidos, tal como se presenta en la Figura 82, puede observarse que, entre ambos modelos, la cantidad de horas donde este parámetro se ubica dentro de

la zona de confort térmica no presenta una variación significativa entre el modelo original y el modificado. Sin embargo, sí se observa que las modificaciones bioclimáticas generan una disminución de aproximadamente siete puntos porcentuales en la cantidad de horas que exceden el límite superior de la zona de confort, esto significa que cerca de 580 horas que antes superaban los 28.71 °C ahora se encuentran por debajo de esa cifra.

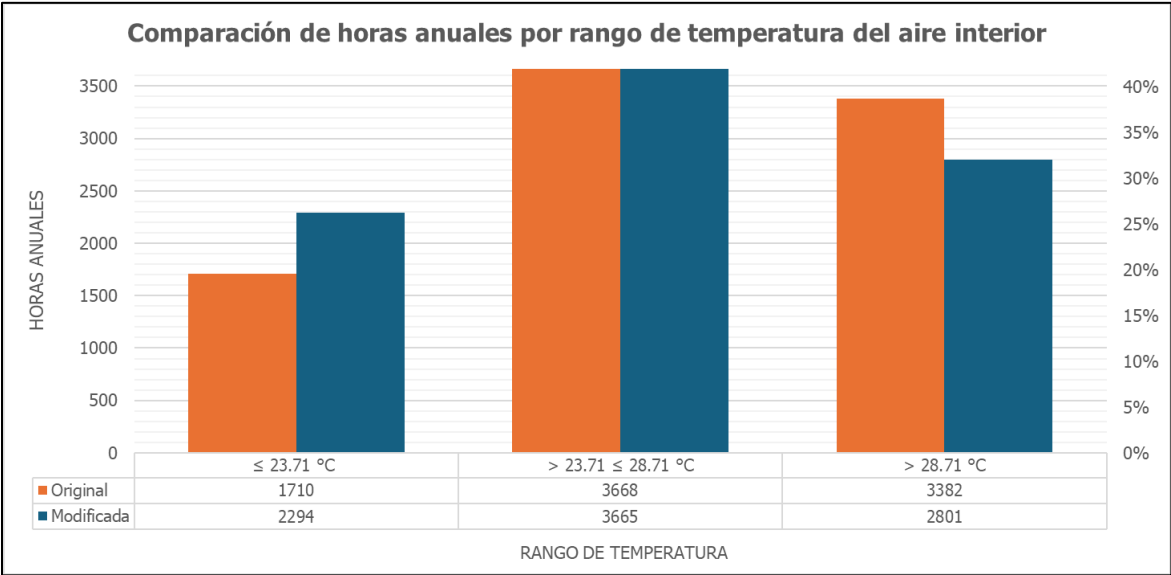


Figura 82. Comparación de las horas anuales por rango de temperatura del aire

Fuente: IES-VE, 2024

Prácticamente la misma cantidad de horas mencionadas se transformaron en horas donde la temperatura del aire se ubica por debajo del límite inferior de la zona de confort, que corresponde a 23.71 °C. No obstante, como se explicó en el capítulo anterior, al observar los porcentajes de personas insatisfechas (PPD), las temperaturas localizadas bajo este límite no representan un malestar significativo para los ocupantes de la vivienda, y no necesariamente generan sensación de frío, sino que se encuentran en un nivel donde son percibidas como frescas, y son aceptadas por la mayor parte de los usuarios modelo.

De esta forma, considerando que las únicas temperaturas que no son aceptables dentro de la vivienda son aquellas que superan los 28.71 °C, la unidad de estudio en general pasa de tener un 39% de disconformidad térmica anual un 32% al incorporar las estrategias bioclimáticas de ventilación y sombra.

Para analizar la temperatura interior diaria de una manera más simplificada, se compara el comportamiento de esta en los días representativos (D_R) determinados en el capítulo anterior. En la Figura 83 se muestra la comparativa entre los gráficos correspondientes al modelo original y el modificado para el D_R de la época seca y lluviosa.

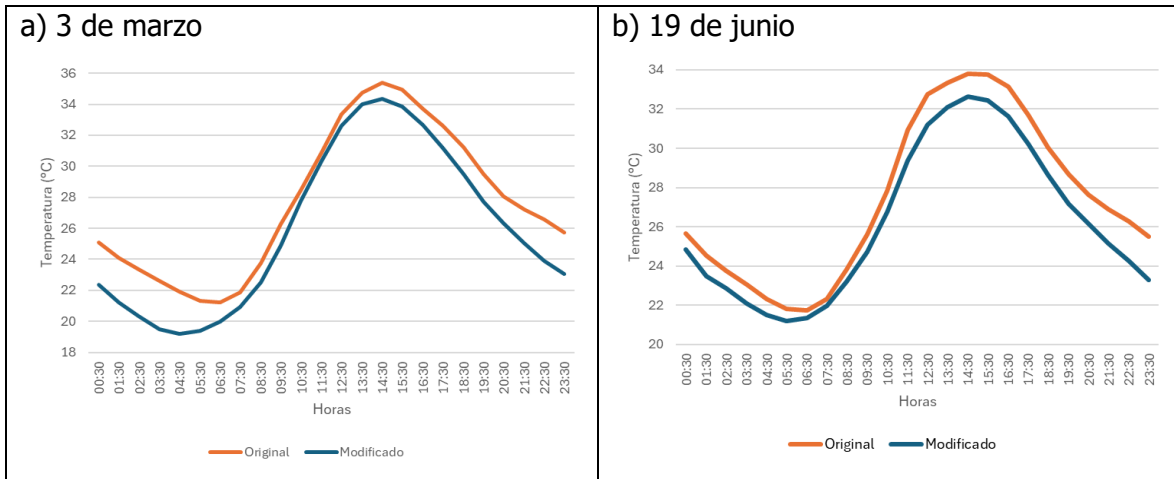


Figura 83. Comparación de la temperatura del aire en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha)

Fuente: IES-VE, 2024

Para ambos casos se observa una disminución de la temperatura del aire para cada hora del día. En época seca se aprecia que la magnitud de dicha disminución es más pequeña en el periodo que comprende entre las 9:30 am y las 12:30 pm, donde los gráficos casi coinciden, mientras que es más marcada en horas de la noche, principalmente durante las madrugadas; similar ocurre en época lluviosa, donde en las horas de la mañana la temperatura presenta una menor variación con respecto a las restantes horas del día. En general, estas disminuciones oscilan entre los 0.5 °C y los 4°C.

También resulta esclarecedor comparar la temperatura del aire interior del modelo modificado con la temperatura de bulbo seco (TBS); esta última se define como la temperatura que registra un termómetro cuando el bulbo está en contacto con el aire del ambiente, pero protegido de la radiación directa de la fuente que genera la condición térmica, es decir, a la sombra (Abascal, 2002). Esta comparación, mostrada en la Figura 84, permite observar que, durante el día, el aire en el exterior de la vivienda ya posee valores elevados, muy cercanos a la temperatura del aire interior; es por ello que, las estrategias de ventilación natural y de sombra no generan una mayor disminución de la temperatura

del aire, pues, a pesar de que las mejoras bioclimáticas favorecen la circulación de las corrientes de viento y minimizan la entrada de radiación directa a los espacios, el aire proveniente del exterior ya posee una temperatura severa.

En el caso de las noches, resalta el hecho de que la temperatura de bulbo seco disminuye hasta a 15 °C en época seca, sin embargo, se observa el efecto de regulación que tiene la vivienda, al mantener los valores en el interior rondando los 20 °C, de manera que se tienen temperaturas frescas, mas no frías.

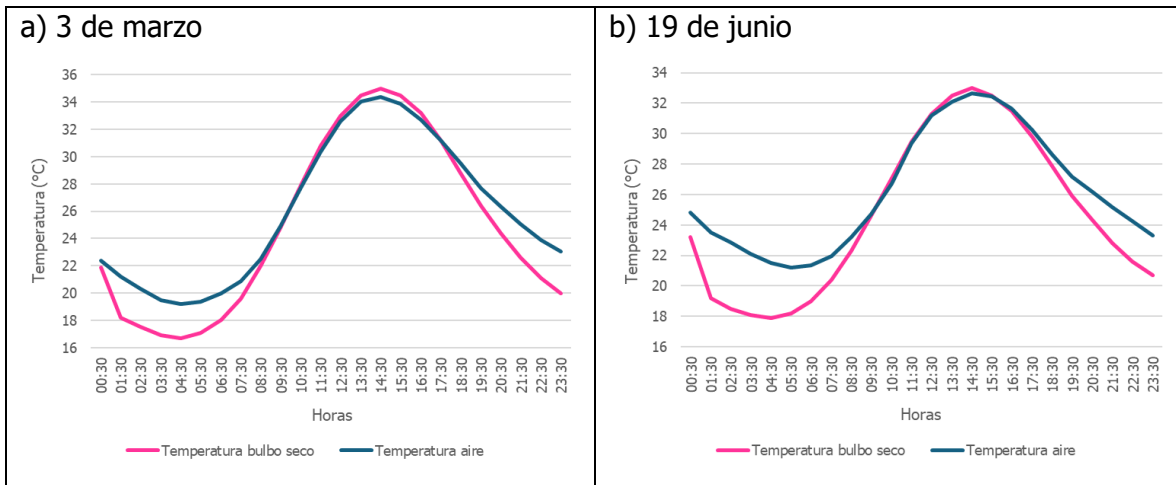


Figura 84. Comparación de temperatura del aire con la temperatura de bulbo seco (TBS)

Fuente: IES-VE, 2024

4.1.2. Humedad relativa

Respecto a la humedad relativa, también se evalúa el comportamiento anual de los casos estudiados, mostrando en la Figura 85 ambos gráficos superpuestos. Puede apreciarse que la humedad relativa en el modelo modificado oscila en un rango de menor amplitud que el modelo original, en la mayoría de las horas anuales. Los cambios más notorios son que en los meses de época seca, entre enero y abril, se ven disminuciones en el porcentaje de humedad de entre 5% y 10%; mientras que en época lluviosa se ven aumentos en el valor inferior de la humedad de alrededor de 5%.

Recordando que la zona de confort de este parámetro se define entre el 30% y 70%, se ve que en ninguno de los casos se alcanza el límite inferior y que en ambos se sobrepasa el superior; esto mismo se nota en la Figura 86, donde se presenta la comparación de los días representativos analizados. En el caso de la época seca se ve que, durante la madrugada y

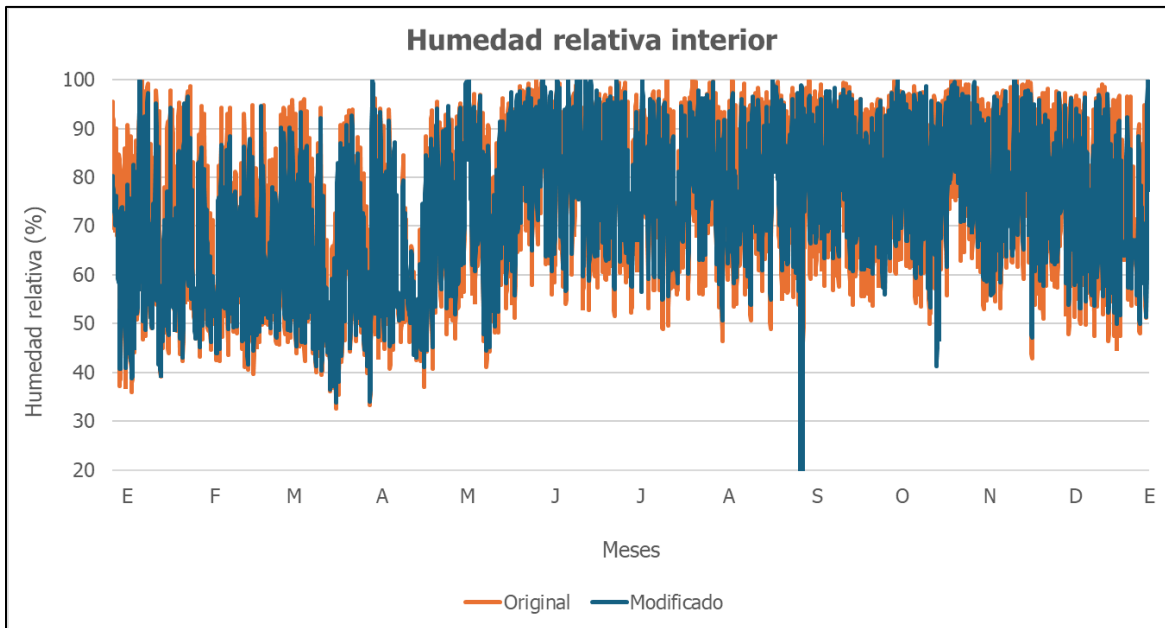


Figura 85. Comparación de la humedad relativa entre modelo original y modificado

Fuente: IES-VE, 2024

primeras horas de la mañana, los valores del modelo modificado se encuentran entre el 70% y el 80%, estando levemente por arriba de la zona de confort, y presentando una disminución considerable con respecto al modelo original, mientras que el resto de las horas del día este parámetro se encuentra en confort. En este escenario se ve la influencia del mejoramiento de la ventilación en los espacios, pues debido a que el aire exterior posee una menor humedad por tratarse de la época seca, una mayor circulación de aire baja considerablemente la humedad relativa en el interior de la casa.

Adicionalmente, también se observa que, en ambos casos, en horas del mediodía y la tarde, el modelo modificado tiene valores más elevados de humedad relativa que el modelo original. Esto puede deberse a varias razones, dentro de las cuales, una de ellas puede ser la disminución en los valores de temperatura, ya que la temperatura y la humedad se encuentran relacionadas y una mayor temperatura tiende a disminuir, en circunstancias donde el aire no se encuentra saturado, el porcentaje de humedad y viceversa. En la época lluviosa destaca más este aumento en la humedad relativa y esto puede ser el efecto de las precipitaciones propias de la temporada, pues el aire exterior estará más cargado de vapor de agua y la ventilación que se propicia mediante las modificaciones bioclimáticas favorece el ingreso de humedad a la vivienda.

Cabe mencionar que este incremento en la humedad relativa que se describe no representa desmejoras en las condiciones de confort higrotérmico, pues a partir de las horas de media mañana tanto el modelo original como el modificado presentan valores aceptables que se ubican dentro de la zona de confort.

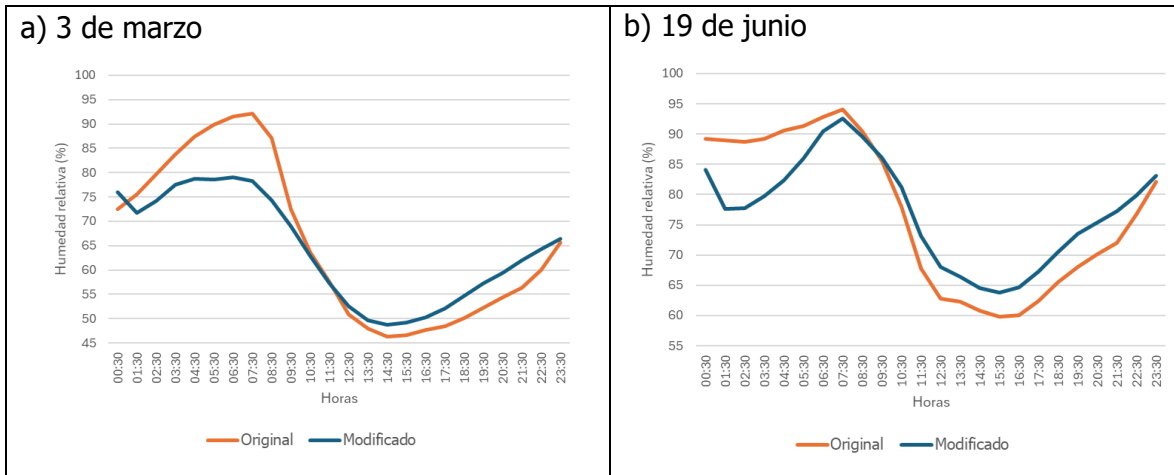


Figura 86. Comparación de la humedad relativa en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha)

Fuente: IES-VE, 2024

4.1.3. Ganancias solares directas

El principal efecto que tienen las estrategias orientadas a la sombra sobre las condiciones higrotérmicas de la vivienda es la reducción de la radiación solar directa que incide tanto en las fachadas exteriores como a través de las perforaciones y transparencias. Esta radiación incrementa la temperatura en el interior de los espacios ya que, por un lado, las ganancias solares que se dan por los cristales de la edificación generan efecto invernadero al aumentar la energía de las moléculas del aire en el interior, mientras que, por otro, la radiación que incide directamente sobre las paredes es transferida al interior por el fenómeno de conducción térmica.

Para analizar el impacto de las estrategias incorporadas sobre los dos fenómenos descritos, en primera instancia, se realiza el gráfico mostrado en la Figura 87, donde se comparan las ganancias solares directas anuales producto de la radiación que incide a través de los cristales, tanto para el modelo original como para el modificado. Aquí se observa que, en todos los meses del año, las sombras añadidas a la vivienda reducen la cantidad de MWh que ingresan a la vivienda. Al obtener la sumatoria total, se determina que las ganancias

solares anuales pasan de 14.15 MWh en el modelo original a 10.14 MWh en el modelo modificado; esto representa una disminución de un 28.34% de la energía transferida a la vivienda y que se transforma en calor en el interior de los espacios.

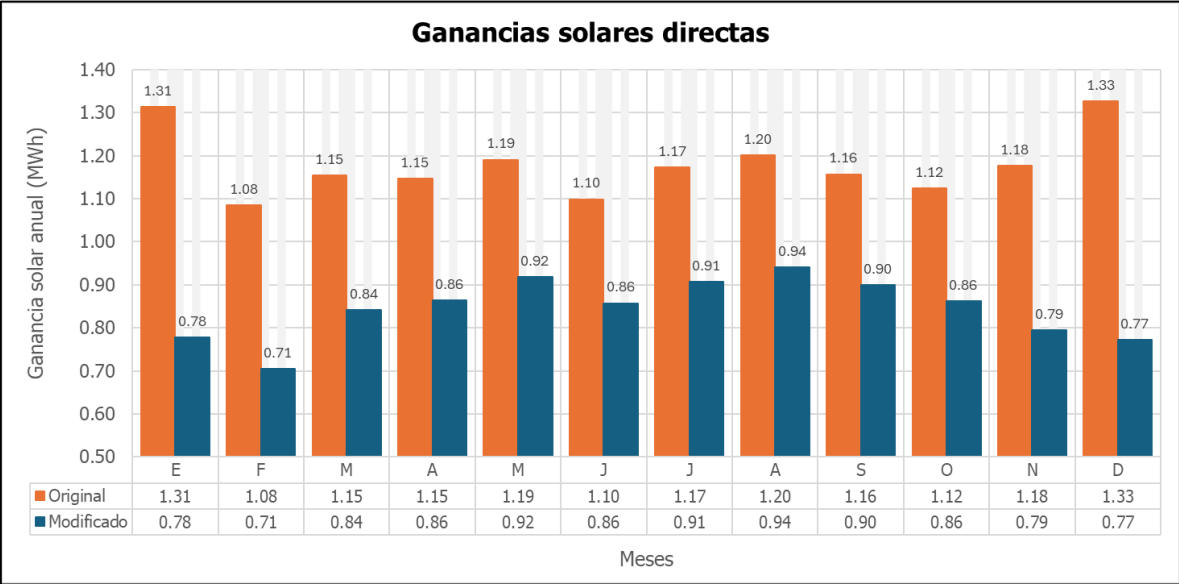


Figura 87. Comparación de la radiación solar incidente entre modelo original y modificado

Fuente: IES-VE, 2024

Por otra parte, mediante la herramienta de Solar Analysis del software IES-VE, se mide la cantidad de energía incidente sobre las fachadas de la Residencia Maru. La comparativa se presenta mediante la Figura 88 y Figura 89, donde la primera de ellas corresponde a la condición original, mientras que la segunda a la configuración con modificaciones bioclimáticas.

Se observa que existe una reducción de valores que originalmente rondaban los 968 kWh/m² en las fachadas del modelo original, a cifras cercanas a los 670 kWh/m² en el modelo modificado; esto representa alrededor de un 31% menos radiación solar incidente en las paredes de la unidad de estudio. También se ve que hay zonas de la cubierta sobre el bloque Sur de habitaciones que presenta una disminución en la radiación, debido al alero colocado sobre el volumen de los baños del segundo nivel. A pesar de ello, la cubierta de techo es la superficie que recibe la mayor cantidad de radiación anual, rondando los 2000 kWh/m² y es por eso que una de las estrategias incorporadas consistió en la colocación de una capa de aislamiento por encima del cerramiento de lámina metálica.

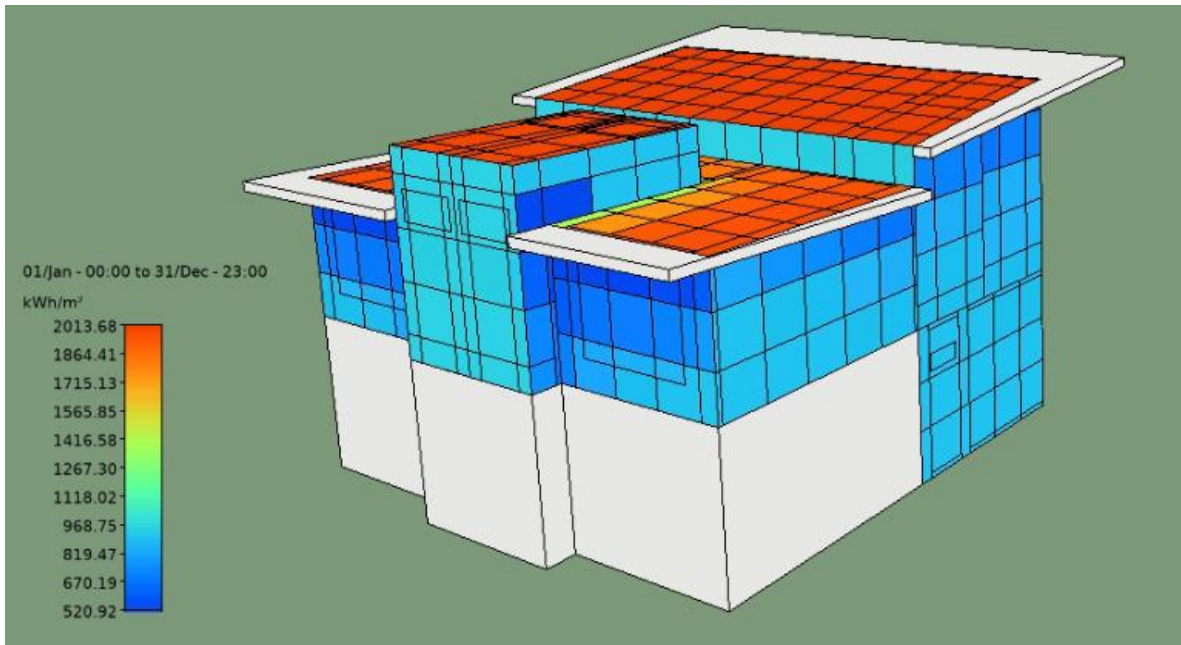


Figura 88. Radiación solar anual incidente sobre la envolvente del modelo original

Fuente: IES-VE, 2024

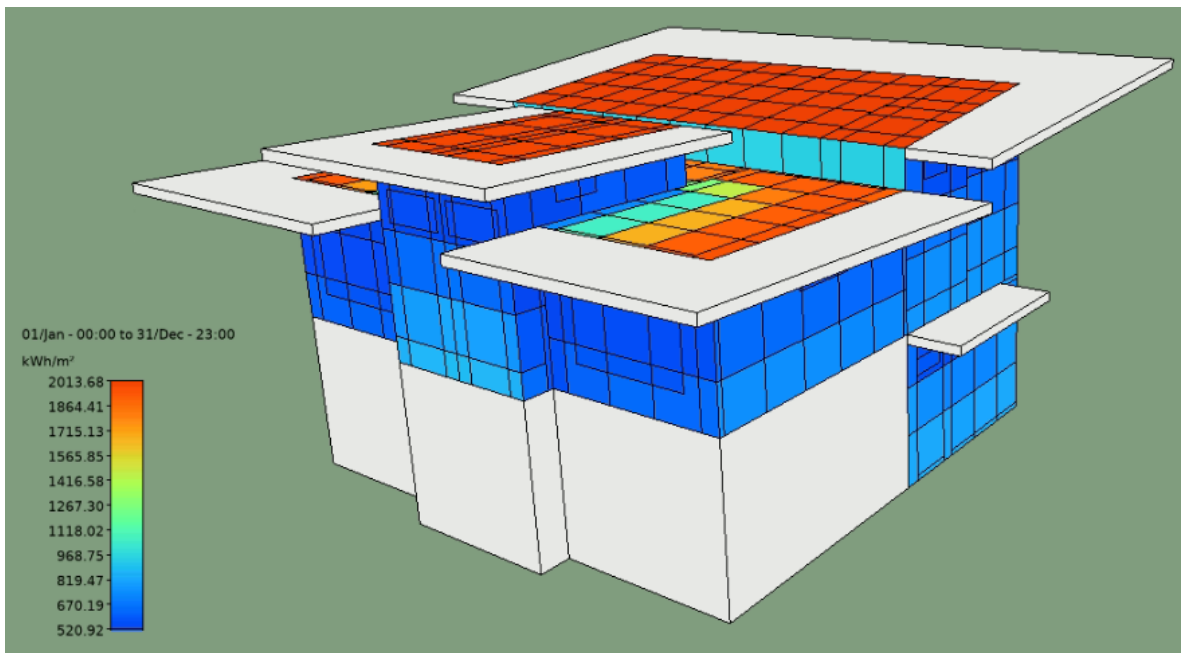


Figura 89. Radiación solar anual incidente sobre la envolvente del modelo modificado

Fuente: IES-VE, 2024

4.1.4. Calidad del aire

La tasa de ventilación natural no solamente tiene influencia sobre la variación de la temperatura interior, sino que también es un parámetro determinante en la calidad del aire y, por consiguiente, en el bienestar de los ocupantes. En espacios habitados, la producción de dióxido de carbono (CO_2) es un proceso continuo, originado por la respiración de las personas, por lo que es necesario que dichos espacios cuenten con una circulación que permita un constante recambio de aire y evite que este gas se acumule.

En aras de analizar la calidad del aire dentro de la unidad de estudio, se realiza una comparativa, la cual también facilita el software IES-VE, entre las concentraciones de dióxido de carbono de la configuración original y la modificada. Como parámetro de control, se establece el límite de confort olfativo definido por el ASHRAE Handbook (2013) para fijar en un valor de 700 ppm la concentración máxima de CO_2 permitida dentro de la vivienda. En la Figura 90 se presentan los valores determinados para los días representativos de la época seca y lluviosa.

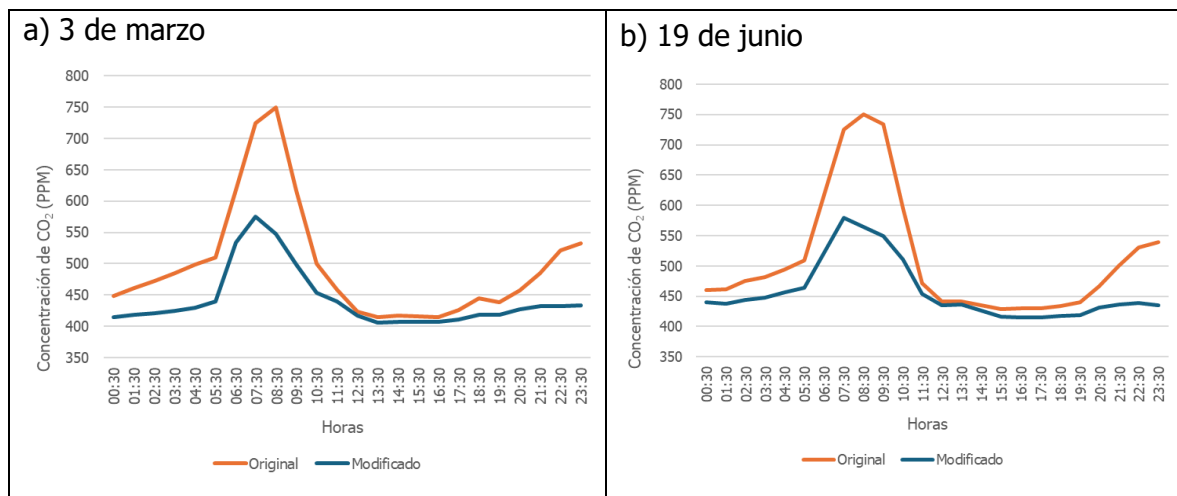


Figura 90. Comparación de la concentración de CO_2 en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha)

Fuente: IES-VE, 2024

En los gráficos presentados, se observa que las modificaciones bioclimáticas tienen un efecto significativo sobre la calidad del aire interior de la Residencia Maru pues, en las condiciones originales, el valor promedio de la concentración de CO_2 sobrepasa 700 ppm durante las horas de más actividad del día, que corresponden a las mañanas, esto de acuerdo con los

patrones de ocupación definidos en la Figura 47. Puede observarse que hay un incremento en la producción de CO₂ entre las 5:30 am y las 11:30 am, donde la cantidad acumulada de este compuesto sobrepasa el límite fijado. Sin embargo, al observar el gráfico resultante del modelo con estrategias de ventilación natural, se evidencia que los valores se mantienen por debajo de 600 ppm durante todas las horas del día, en ambas épocas del año, lo que representa una disminución superior al 20% en su valor pico. Esto significa que las aperturas añadidas al modelo sí favorecen una mejor circulación dentro de la vivienda y un constante recambio de aire.

4.1.5. Porcentaje de personas insatisfechas (PPD)

Con respecto a la cantidad de personas insatisfechas, se presenta la Figura 91 para mostrar la comparativa entre los dos escenarios en estudio, para cada época considerada. Se observa que el modelo modificado presenta una disminución de cinco a diez puntos porcentuales en la magnitud de PPD con respecto al modelo original para una misma hora observada. No obstante, durante las horas del mediodía e inicios de la tarde, ambos escenarios alcanzan un valor prácticamente igual de personas insatisfechas; esto indica que, en las horas críticas del día, donde la temperatura interior excede la zona de confort, las estrategias de ventilación y sombra no son suficientes para mantener un ambiente agradable para los usuarios. El principal efecto que tienen los cambios bioclimáticos incorporados es reducir la duración de los periodos de insatisfacción diaria.

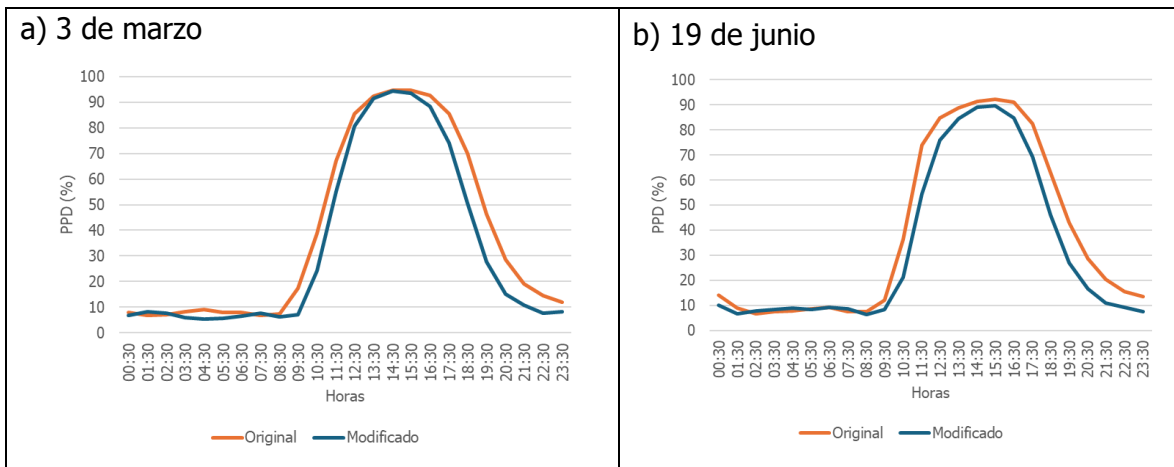


Figura 91. Comparación del porcentaje de personas insatisfechas en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha)

Fuente: IES-VE, 2024

Por otra parte, asociado a este mismo parámetro se analiza el índice de confort, que consiste en un valor predictivo que genera el software IES-VE para calificar las condiciones de confort dentro de los espacios, basado en la escala que se muestra en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Escala de índice de confort según el software IES-VE

1: Muy frío, peligroso	6: Confortable, placentero/fresco	11: Cálido desagradable
2: Frío, estremecimiento	7: Confortable, placentero	12: Caliente, muy desagradable
3: Frío, desagradable	8: Confortable, placentero/tibio	13: Muy caliente, peligroso
4: Frío, aceptable	9: Tibio, aceptable	14: No habitable
5: Fresco, aceptable	10: Cálido, aceptable	15: Non-sedentary*

* El significado en el original es incierto, una traducción literal sería "no sedentario"

Fuente: IES-VE, 2024 [traducido por el autor]

En la Figura 92 se muestra el resultado de esta categorización, donde se presenta el comportamiento de ambos modelos en el día representativo de la época seca y la época lluviosa. Se observa que, para la época seca, la configuración arquitectónica original genera condiciones que son catalogadas desde tibias, confortables y placenteras hasta peligrosamente muy calientes, mientras que el modelo modificado hace que el extremo superior de la calificación se reduzca a caliente y muy desagradable, y además se tengan temperaturas más placenteras y frescas en horas de la madrugada. En época lluviosa los modelos tienen iguales límites superior e inferior, sin embargo, en el modelo modificado se

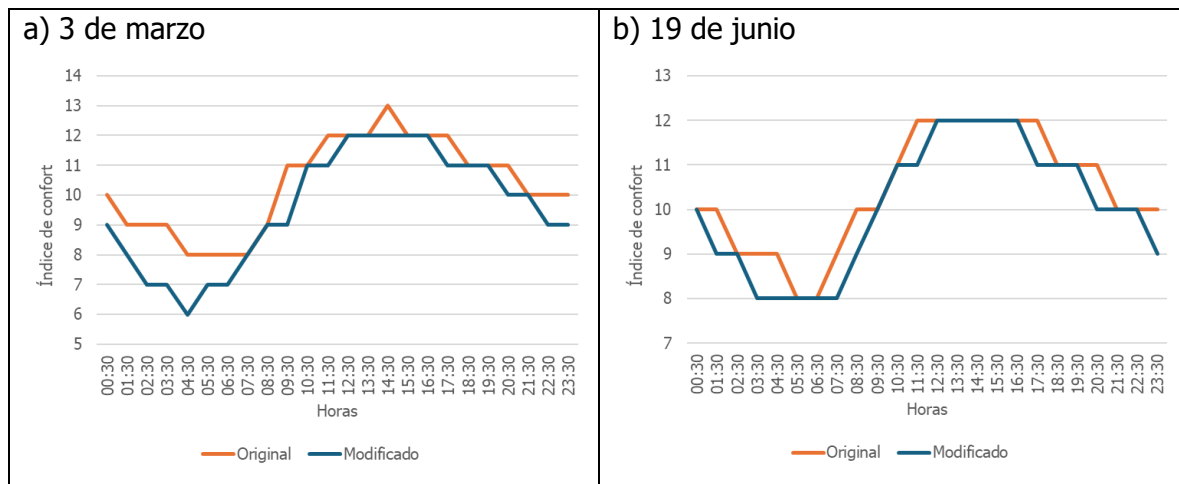


Figura 92. Comparación del índice de confort en el día representativo de la época seca (izquierda) y de la época lluviosa (derecha)

Fuente: IES-VE, 2024

amplía el período de clasificación 8 de una hora a cuatro horas durante la madrugada, y se reduce el período de clasificación 12 de seis horas a cuatro horas durante el mediodía.

4.1.6. Requerimientos de aire acondicionado y consumo energético

En la sección 3.2.2 se cuantifica la diferencia que existe, en el consumo energético de la vivienda por el uso de climatización activa, entre la configuración original y la que incorpora estrategias de ventilación natural y sombra; sin embargo, se debe considerar que los resultados mencionados se encuentran en función de un tipo de aire acondicionado en particular, usado para simular ambos modelos. Es por ello, que con el fin de ampliar estos datos y no limitarse a un único modelo de aparato, se realiza un análisis adicional, cambiando el tipo de aire acondicionado implementado en las simulaciones.

De acuerdo con el Reglamento de la Unión Europea sobre el etiquetado energético de los acondicionadores de aire (2011), donde se establecen categorías para la eficiencia energética, basadas en los valores del SEER y el EER explicados en las notas al pie ⁵ y ⁶ del apartado 3.1.3, se tiene la información contenida en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Clases de eficiencia energética relativas a los acondicionadores de aire

Eficiencia energética	SEER	ERR
A+++	≥8.5	≥4.10
A++	6.10 ≤ SEER <8.50	3.60 ≤ EER <4.10
A+	5.60 ≤ SEER <6.10	3.10 ≤ EER <3.60
A	5.10 ≤ SEER <5.60	2.60 ≤ EER <3.10
B	4.60 ≤ SEER <5.10	2.40 ≤ EER <2.60
C	4.10 ≤ SEER <4.60	2.10 ≤ EER <2.40
D	3.60 ≤ SEER <4.10	1.80 ≤ EER <2.10
E	3.10 ≤ SEER <3.60	1.60 ≤ EER <1.80
F	2.60 ≤ SEER <3.10	1.40 ≤ EER <1.60
G	<2.60	<1.40

Fuente: Unión Europea, 2011

Para el desarrollo de la presente investigación, el acondicionador de aire utilizado cuenta con un valor SEER de 5.24 y un valor EER de 2.98 por lo que, según la clasificación anterior, este aparato posee una eficiencia energética clase A. Se repitieron las simulaciones tanto del modelo original como del modificado, pero colocando un tipo de acondicionador de aire de cada una de las categorías mostradas, para determinar rangos de consumo y ahorro para

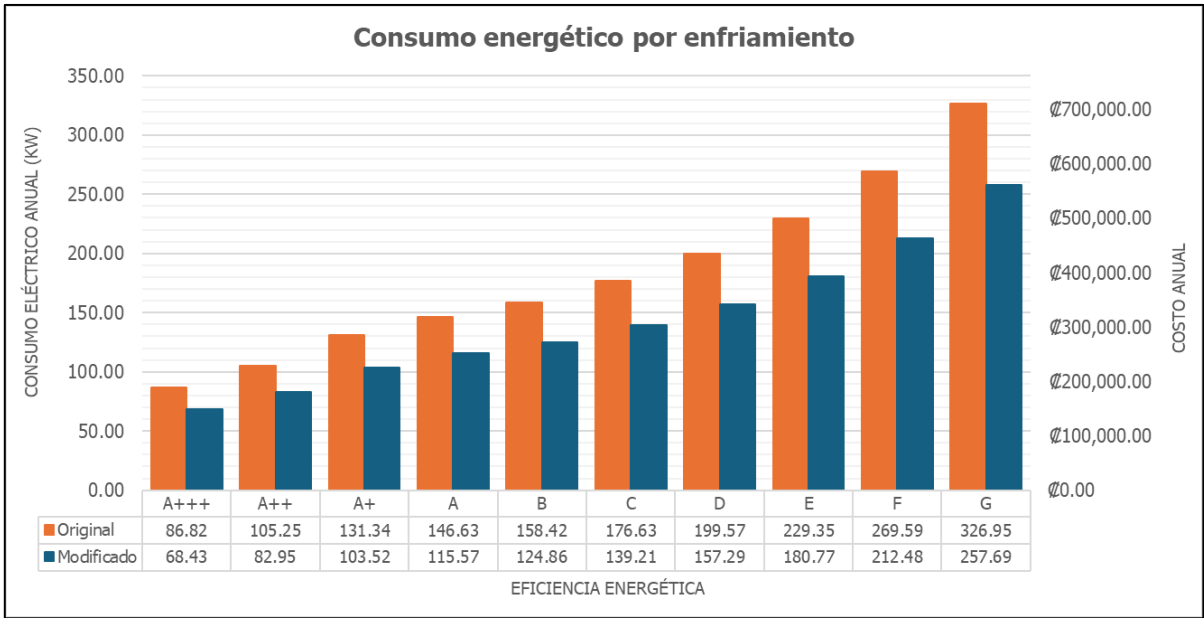


Figura 93. Comparación del consumo energético anual por uso de aire acondicionado entre modelo original y modificado según eficiencia

Fuente: IES-VE, 2024

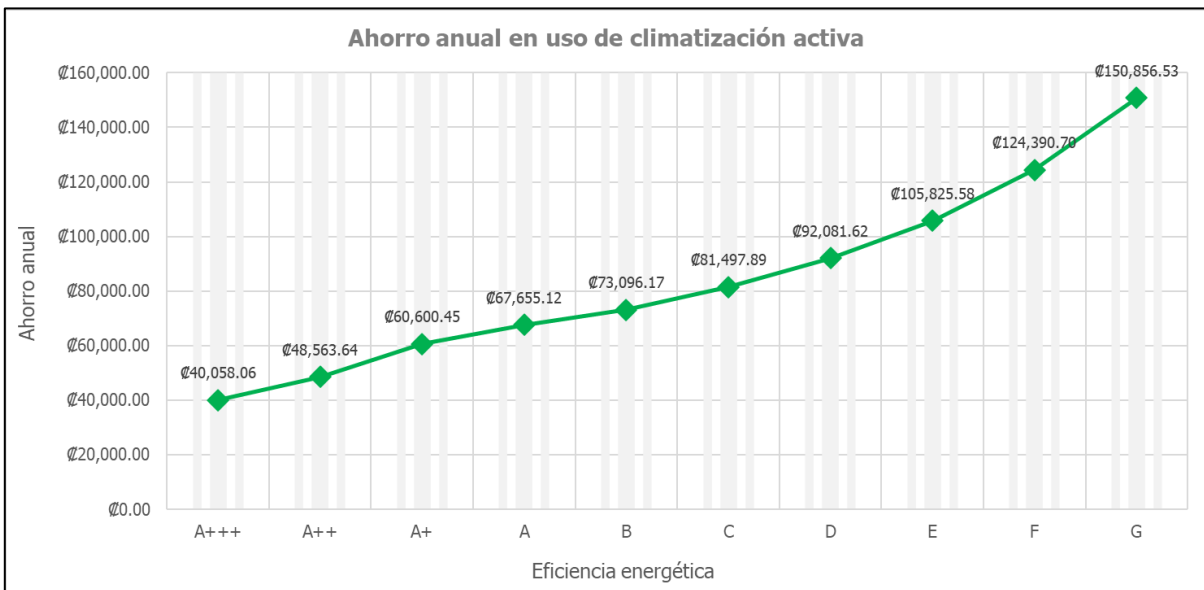


Figura 94. Ahorro energético anual en uso de aire acondicionado entre modelo original y modificado según eficiencia

Fuente: Elaboración propia, 2024

una gama más amplia de equipos; los resultados obtenidos se resumen en la Figura 93 y Figura 94. En la Figura 93 se presenta la comparativa, para cada categoría de eficiencia energética, del consumo eléctrico de cada modelo en estudio; se observa que los aires acondicionados con la menor clasificación de rendimiento (clase G), generan un costo monetario anual asociado a climatización activa que supera los \$700.000,00 para la configuración original de la vivienda, y al implementar las estrategias bioclimáticas, el ahorro energético anual que se produce equivale a \$150.856.53, tal como se ve en la Figura 94, lo que representa cerca de un 21% del costo original, similar al caso analizado para la investigación.

En general, el porcentaje de ahorro para cada categoría es de 21% del consumo respectivo al simular el modelo original, sin embargo, entre menor es la eficiencia del aparato acondicionador de aire que se utilice, el dinero ahorrado será mayor, aunque también lo será la factura pagada. En el caso de aparatos clase A+++, que poseen la mejor clasificación posible en el Reglamento de la Unión Europea, el ahorro es de sólo \$40.058,06 anuales, sin embargo, estos equipos consumen un 73% menos electricidad que los modelos de menor eficiencia, es decir, los de clase G, por lo que la factura eléctrica anual de uno de estos equipos en el escenario con mejoras bioclimáticas es de \$149.035,06.

Con respecto a este factor, resulta pertinente mencionar que, a pesar de que los montos ahorrados podrían parecer pequeños al compararlos con la escala de un proyecto constructivo, es importante vincularlos al perfil socioeconómico de los habitantes de la zona en análisis. Previamente se expuso que los indicadores de pobreza del cantón de Nicoya y aún del distrito de Nosara son menos favorables que el promedio nacional, por lo que para la mayoría de las familias de estas zonas, que posiblemente cuenten con equipos de una menor eficiencia, y por lo tanto, que generan un mayor consumo eléctrico, los montos determinados si pueden generar un impacto significativo en su economía.

4.2. FACTIBILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN

Previo al análisis de la factibilidad de implementación de las estrategias bioclimáticas propuestas debe recordarse, tal como se mencionó en la sección introductoria de este documento, que la esencia de la arquitectura bioclimática es priorizar el diseño por encima de la tecnología; priorizando la incorporación, desde la concepción del proyecto, de soluciones bioclimáticas pasivas que permitan una adaptación apropiada al contexto natural

de cada región en particular. Esto resulta importante, porque las estrategias de ventilación natural y sombra evaluadas, no generan un sobre costo significativo si se introducen en la etapa de diseño de la vivienda, donde las modificaciones pueden realizarse a nivel conceptual y computacional, sin que esto implique retrabajos en la obra concluida. Desde este punto de vista, se destaca la necesidad de incorporar análisis bioclimáticos a los procesos de diseño de las obras de ingeniería, para detectar puntos de mejora en su vinculación al medio que las circunscribe y aprovechar este a su favor, y así, optimizar el consumo energético y las condiciones de confort para sus ocupantes.

Una vez aclarado este punto, se presenta el análisis de factibilidad de incorporar las modificaciones bioclimáticas a la vivienda construida. Este análisis es de carácter simplificado, y su principal objetivo es sondear los pros y contras de implementar los cambios modelados desde un punto de vista de servicio y económico.

4.2.1. Descripción de las modificaciones

Una vez que se determina que la configuración arquitectónica original no satisface las condiciones de confort higrotérmico requeridas para la zona de ubicación de la unidad de estudio, se incorporan una serie de estrategias bioclimáticas orientadas a favorecer la ventilación natural y la sombra de los espacios, según se explica en el apartado 3.2.1 del capítulo anterior.

Al ahondar más en cada una de estas modificaciones, se tiene que se incorporaron un total de 19 cambios a la configuración arquitectónica, de los cuales 12 están enfocados a ventilación natural y 7 a incrementar las condiciones de sombreado dentro de la vivienda; en el Cuadro 20 se enumeran dichas estrategias y se presenta una descripción de la ubicación donde se implementaron y un detalle de su naturaleza, así como la indicación del tipo al que pertenece.

Para los posteriores análisis FODA y evaluación económica no se analizará cada una de estas estrategias individualmente, sino que se evaluarán en su conjunto, ya que el efecto obtenido en la mejora del confort higrotérmico dentro de la unidad de estudio es el resultado holístico de todas las modificaciones implementadas, sin embargo, se considera adecuado presentar el detalle de estas para una mejor comprensión y dimensionamiento de los cambios propuestos. Únicamente se presenta una agrupación por tipo en algunos de los análisis presentados a continuación, para mostrar ciertas consideraciones pertinentes.

Cuadro 20. Lista de estrategias bioclimáticas incorporadas al modelo original

Mejora	Descripción	Tipo de estrategia
1	Extensión del alero de la cubierta de techo	Sombra
2	Cambio de transparencia en N02-06 por perforación con ventanas V4	Ventilación
3	Se añade ventana V4 adicional en N02-06	Ventilación
4	Se añade ventana V4 adicional en N02-08	Ventilación
5	Se añade perforación entre N02-06 y N02-08	Ventilación
6	Se añade ventana V3 lateral en N02-02	Ventilación
7	Se añade ventana V4 ente N02-02 y N02-06	Ventilación
8	Se añade ventana V4 lateral en N02-01	Ventilación
9	Aislamiento sobre cubierta metálica de techo	Sombra
10	Se añade ventana V4 lateral en N02-03	Ventilación
11	Se añade ventana V4 lateral en N02-04	Ventilación
12	Se cambia en N02-07 la ventana V1 por V2	Ventilación
13	Se añade ventana V4 en N01-04	Ventilación
14	Se añade ventana V3 adicional en N01-02	Ventilación
15	Se añade alero a ventana lateral en N01-02	Sombra
16	Se eliminan los tragaluces de N02-03 y N02-04	Sombra
17	Se añaden aleros al volumen que contiene N02-03 y N02-04	Sombra
18	Se añade alero a ventanas laterales de N01-03 y N01-04	Sombra
19	Se coloca un parasol al Oeste del balcón tanto en primer como segundo nivel	Sombra

Fuente: Elaboración propia, 2024

4.2.2. Análisis FODA

El análisis FODA es una metodología para estudiar la situación de una empresa o un proyecto particular, donde se definen sus características internas (fortalezas y debilidades) y su situación externa (oportunidades y amenazas); con las iniciales de cada uno de estos parámetros se forma el nombre de esta herramienta. El objetivo del FODA es que la empresa, o en este caso, los encargados del proyecto, a partir de la información que se obtenga sobre su situación, puedan tomar las decisiones o implementar los cambios que mejor se adapten a las exigencias del mercado y del entorno económico y ayudar a definir si el planteamiento propuesto cuenta con condiciones favorables para su ejecución.

Este análisis se complementa con los aspectos económicos analizados en el siguiente apartado de esta sección, para evaluar viabilidad de las mejoras propuestas; seguidamente, en el Cuadro 21 se presenta el FODA mencionado, donde se exploran las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de implementar los cambios bioclimáticos.

Cuadro 21. Análisis FODA de las modificaciones bioclimáticas propuestas en Residencia Maru

<p>Fortalezas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se disminuye en 7% la cantidad de horas totales al año que la temperatura del aire se encuentra por encima de la zona de confort térmica. • Se estabiliza la humedad relativa en época seca, alcanzando valores máximos de 80% en las horas de madrugada. • Se reduce en 28.34% la energía anual introducida a la vivienda en forma de ganancias solares directas. • Se reduce la concentración de CO₂ en los espacios interiores, pasando de 750 ppm a cerca de 575 ppm. • Se reduce la duración de los periodos de insatisfacción diaria de los usuarios de la vivienda. • Se genera un ahorro de 21% en la factura eléctrica por concepto de climatización activa, independiente de la eficiencia del aparato utilizado. 	<p>Debilidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • No se logran mantener la totalidad de las horas anuales dentro de la zona de confort higrotérmica; aún queda un 32% del tiempo donde las temperaturas no son aceptables. • El porcentaje de personas insatisfechas (PPD) sigue alcanzando el 90% en los picos de calor diarios durante todo el año. • No se logra eliminar la dependencia de climatización activa para mantener el confort térmico dentro de la vivienda. • La configuración arquitectónica original no favorece la circulación del aire, por lo que es difícil mejorar el confort sin implementar estrategias bioclimáticas enfocadas en otros aspectos como, por ejemplo, la distribución espacial y la materialidad.
<p>Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las condiciones de confort higrotérmico pueden mejorarse aún más implementando estrategias bioclimáticas no contempladas en el alcance de esta investigación. • Una correcta implementación de las mejoras puede promover que se tome en cuenta con mayor interés el bioclimatismo en el diseño de proyectos en la zona de estudio. 	<p>Amenazas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Las modificaciones de ventilación natural requieren intervenciones destructivas en la edificación ya construida, esto puede comprometer el diseño estructural y requiere estudios adicionales. • Los usuarios de la vivienda o los vecinos de los lotes aledaños pueden presentar incomodidad durante la ejecución de las modificaciones.

Fuente: Elaboración propia, 2024

4.2.3. Análisis MECA

Este análisis es una herramienta que funciona como complemento al FODA y que permite definir, a partir de los aspectos hallados en él, un plan estratégico para que la empresa, o en este caso, el proyecto, pueda desarrollarse adecuadamente. Supone profundizar en cada uno de los puntos del FODA, tomando acciones específicas orientadas a: Mantener las fortalezas, Explorar las oportunidades, Corregir las debilidades y Afrontar las amenazas; de manera que se cuente con un escenario más favorable para su ejecución. De las acciones mencionadas se toman las siglas que le dan nombre a la metodología (iebschool.com, 2024).

Para realizar este análisis existen cuatro estrategias principales, cada una con un enfoque particular dependiendo de lo que se busque lograr, a continuación, se explican brevemente cada una de ellas (iebschool.com, 2024):

- Estrategia ofensiva

Se trata de unir las fortalezas y las oportunidades, a fin de explotar las opciones con las que se cuenta para generar un efecto diferenciador; en otras palabras, la clave para ello está en centrarse en las fortalezas, a la vez que se explotan las nuevas oportunidades.

- Estrategia defensiva

Surge de juntar las fortalezas y amenazas a las que se ve enfrentada la empresa o proyecto, de manera que se afrontan las amenazas haciendo uso de las fortalezas para que estas se vuelvan aún mayores.

- Estrategia de reorientación

Consiste en unir las debilidades y las oportunidades para maximizarlas en el mismo mercado. En este caso, esta estrategia está pensada para explotar las oportunidades en caso de no poder corregir las debilidades.

- Estrategia de supervivencia

Se trata de averiguar cuáles son las debilidades y cómo pueden corregirse para afrontar las amenazas y así evitar que dichas debilidades crezcan, haciendo disminuir los aspectos negativos que perjudican al negocio o proyecto.

A partir de lo anterior, y tomando en cuenta los aspectos descritos en el FODA, se determina que la estrategia más adecuada para el objeto de estudio es la reorientación, ya que las debilidades no pueden corregirse únicamente utilizando estrategias de climatización pasiva orientadas a ventilación y sombra. No obstante, como lo mencionan las oportunidades, existen una serie de estrategias bioclimáticas que no se contemplaron en el alcance de esta investigación que pueden potenciar el efecto de las que sí se analizaron, por lo que se deben analizar más estrategias combinadas para evaluar su efecto integral.

4.2.4. Aspectos económicos

Posterior a estos análisis expuestos, se procede a realizar una valoración de los principales aspectos económicos del proyecto, donde se considera un presupuesto resumido de los principales trabajos a realizar y un análisis de retorno de inversión considerando una vida útil de 50 años para la Residencia Maru.

Con respecto al presupuesto de implementación, no se incluye el costo que podría tener un eventual reforzamiento estructural de las zonas donde se colocarían las nuevas aperturas, ni el estudio que se requiere para determinar esto. Se parte de los costos directos e indirectos asociados a generar las perforaciones en las distintas paredes, así como de las ventanas que se colocarán. De igual manera para las estrategias de sombra, se incluye un valor ligado a los alcances puntuales requeridos. En ambos casos, se agrupan todas las modificaciones en un conjunto, para sintetizar la información, la cual se presenta en el Cuadro 22, mostrado a continuación.

Cuadro 22. Presupuesto resumido de implementación de mejoras bioclimáticas

Modificaciones bioclimáticas	Costo
Estrategias de ventilación	
Apertura de perforaciones en paredes	¢2.408.065,57
Cambio y colocación de nueva ventanería	¢2.889.678,68
Estrategias de sombra	
Extensión y aislamiento de cubierta principal	¢7.224.196,70
Aleros secundarios en fachadas y parasol	¢3.531.829,50
Total	¢16.053.770,45

Fuente: Elaboración propia, 2024

A partir de este presupuesto se realiza un análisis del retorno de inversión, para comparar el gasto inicial de implementar las estrategias propuestas con el ahorro energético obtenido por la mejora en las condiciones de confort de la vivienda; este se muestra en la Figura 96, donde se incluye el ahorro anual en la factura eléctrica de tres tipos de acondicionador de aire: a) los de clase A+++, que representan los aparatos de mayor eficiencia y, como se muestra en el apartado 4.1.6, generan el menor consumo energético y también los menores márgenes de ahorro. b) los de clase A, que fue el modelo utilizado en el desarrollo de las simulaciones de la presente investigación y c) los de clase G, que son los aparatos de menor eficiencia y que, aunque nominalmente generan los mayores montos ahorrados, también generan facturas eléctricas elevadas debido al mayor consumo eléctrico que presentan.

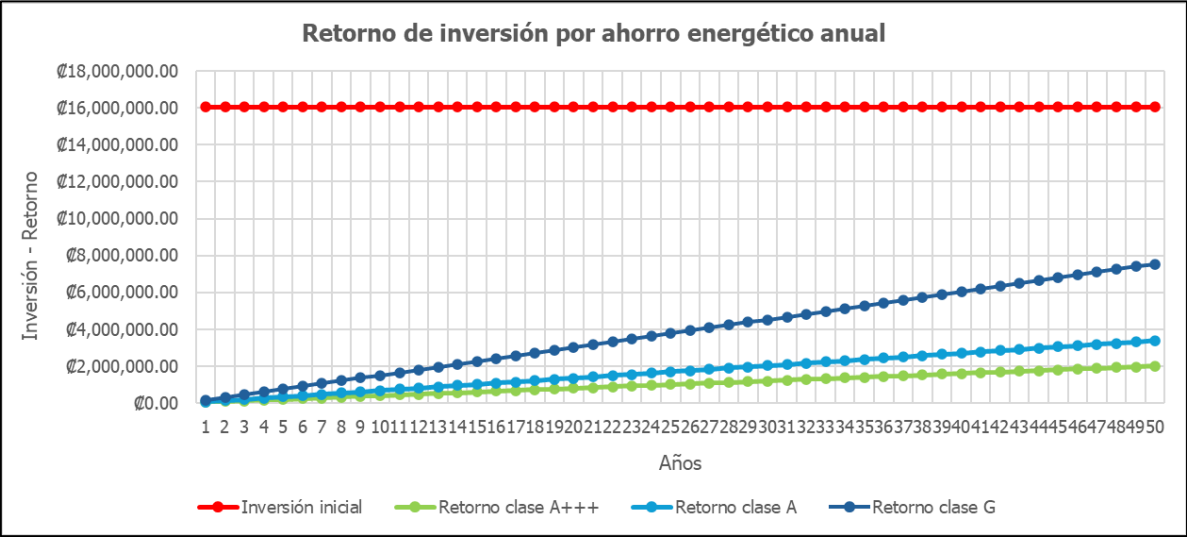


Figura 95. Retorno de inversión por concepto de ahorro energético anual a 50 años

Fuente: Elaboración propia, 2024

Al observar el gráfico anterior queda claro que, aún con los mayores montos de ahorro anual, la inversión inicial requerida para implementar las mejoras bioclimáticas no se recupera en el periodo definido como vida útil de la edificación, dejando un porcentaje de retorno de inversión (ROI) de:

$$ROI = \frac{Ingresos - Inversión}{Inversión} \cdot 100 \tag{4}$$

$$ROI_{A+++} = -87.52\%$$

$$ROI_A = -78.93\%$$

$$ROI_G = -53.02\%$$

Estos valores negativos indican que los costos totales de la inversión son mayores que los retornos, por lo tanto, se tienen pérdidas en el periodo en estudio. En el caso de los acondicionadores de aire tipo G, por ejemplo, el valor de -53.02% significa que, con los retornos obtenidos hasta ese momento, aún falta por recuperar más de la mitad de la inversión inicial, mientras que en el caso de los aparatos con eficiencia A+++, luego del periodo de vida útil definido, aún queda pendiente por recuperar el 87.52% de lo invertido. Este escenario hace que se concluya que la incorporación de las estrategias bioclimáticas no es viable desde el punto de vista económico una vez que se tiene el proyecto construido.

4.2.5. Veredicto de factibilidad y planteamiento alternativo

Con base en los aspectos analizados en apartados anteriores, se llega a la conclusión que, a pesar del beneficio demostrado sobre las condiciones de confort higrotérmico en el interior de los espacios de la Residencia Maru y su contribución al ahorro energético, implementar las modificaciones bioclimáticas a la vivienda ya construida supone un costo que no se recupera con los ahorros en la factura eléctrica durante el periodo de vida útil definido, por lo que no se recomienda su ejecución. Como se menciona anteriormente, el escenario ideal es incorporar los conceptos de arquitectura bioclimática desde la etapa de diseño, donde las modificaciones pueden realizarse sin que suponga sobre costos excesivos y se puede tener un proceso iterativo para equilibrar los aspectos económicos y los de confort higrotérmico y eficiencia energética.

Por otra parte, pese a que analizar de manera diferenciada el efecto de las estrategias de ventilación natural y las de sombra no forma parte del alcance de este proyecto, sino que se considera su efecto trabajando en conjunto, se desea mostrar, como una línea alternativa de estudio, la Figura 96, donde se presenta la forma en que cada tipo de estrategia genera cambios en la distribución de horas por rango de temperatura de la zona de confort. Allí se observa que el mayor cambio térmico se asocia a las estrategias de ventilación natural, que producen el 64% de las horas anuales que dejan de exceder el límite superior de la zona de confort y producen el 100% de las temperaturas con valores inferiores a los 23.71 °C, las cuales son frescas y agradables para los ocupantes. Esto no significa que se plantee implementar solamente las estrategias de ventilación natural, las cuales tienen un costo menor en comparación con las de sombra, como muestra el presupuesto elaborado. Pues, aunque el efecto de las estrategias de sombra es menor, sigue siendo significativo e impacta aspectos relevantes como las ganancias solares directas, y eliminar este efecto repercute

en la disminución del ahorro energético, ya que, inherentemente, se tendrá un mayor consumo eléctrico y por ende, un menor retorno de inversión que, aunque no se calcula en este documento, se prevé que produzca una conclusión similar acerca de la factibilidad de implementación a la que ya se llegó en este apartado.

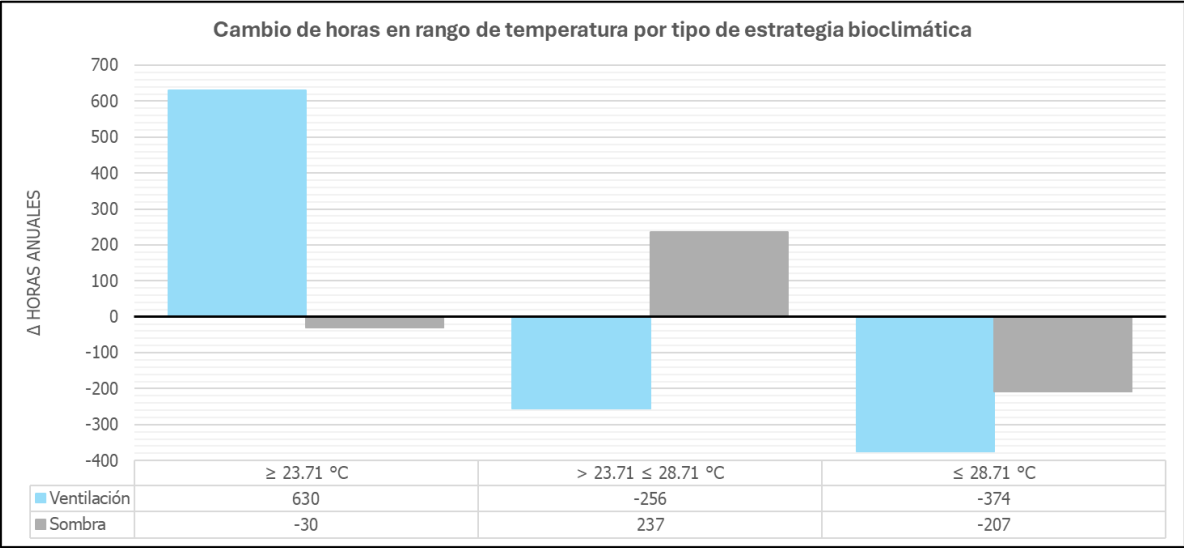


Figura 96. Efecto de las estrategias de ventilación y sombra analizadas por separado

Fuente: IES-VE, 2024

4.2.6. Costo de implementación en etapa de diseño

Finalmente, enfatizando que el momento idóneo para desarrollar estudios bioclimáticos es la etapa de diseño, se realiza un breve cálculo de costos adicionales que, en el ámbito profesional, tendría la aplicación de este tipo de análisis en diseños de proyectos similares a los cubiertos dentro de este alcance. Se contempla la licencia del software IES-VE y un recuento de las horas profesionales requeridas para desarrollar el análisis.

Así pues, la inversión en la licencia anual del software es de \$667.427,33 mientras que, según el monto publicado en La Gaceta N°224 del miércoles 23 de noviembre del 2022, el costo mínimo de la hora profesional definido por el CFIA es de \$37.700,00. Contemplando el tiempo usado en el desarrollo de las simulaciones de esta investigación se obtiene un monto de \$4.750.200,00 con lo cual el monto total suma \$5.417.627,33. No obstante, se debe considerar que este monto contempla la curva de aprendizaje en el uso del software, por lo que, en la práctica, una vez que se maneje con más dominio, el tiempo invertido será menor; asimismo, el costo de la licencia se puede diluir entre varios proyectos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas de la investigación realizada son las siguientes:

- Las estrategias bioclimáticas de ventilación natural y sombra, que se incorporan al modelo original de la Residencia Maru, generan un efecto positivo en el mejoramiento de las condiciones de confort higrotérmico en el interior de la vivienda. En cuanto a temperatura del aire, se produce una disminución de siete puntos porcentuales en la cantidad de horas anuales que exceden el límite superior de la zona de confort térmica, fijado en 28.71 °C. Mientras que, en cuanto a humedad relativa, el rango de oscilación disminuye y en época seca se logra estar dentro de la zona de confort casi durante todo el día, excediendo levemente el límite superior en horas de la madrugada.
- Tanto la configuración arquitectónica original como la modificada no cumplen con la normativa ASHRAE 90.1-2010, pues para ello, según lo mencionado por Álvarez (2023), se establece que deben tener un máximo de 300 horas fuera del rango de confort térmico. En esta línea, aun considerando que las únicas horas que se salen de este rango son aquellas que superan los 28.71 °C, el modelo modificado presenta un total de 2.801 horas anuales que exceden dicho valor.
- El modelo que incluye las estrategias bioclimáticas de ventilación natural y sombra posee un 32% de las horas anuales por encima de la zona de confort térmica. Al compararlo con la recomendación derivada de la herramienta de Gómez-Azpeitia (2020) mostrada en el Cuadro 7 se observa que, para el distrito de Nosara, el valor deseable para el uso de ventilación natural es de 78% del tiempo, mientras que para uso de aire acondicionado es de 17%. Por lo tanto, la unidad de estudio, aún con las mejoras bioclimáticas, tiene requerimientos de climatización activa de casi el doble de lo recomendado.
- Aunque las estrategias incorporadas ayudan a disminuir la carga térmica dentro de la vivienda, las mejoras bioclimáticas de ventilación natural y sombra resultan insuficientes para mantener los espacios interiores en condiciones de confort durante los picos de calor diarios, por lo que el uso de aire acondicionado se mantiene durante ciertas horas del día, aunque en menor escala. Esto puede tener su causa en dos factores principales:

- a) El diseño arquitectónico original de la vivienda no favorece la circulación del aire, pues la vivienda tiene una configuración muy compacta, donde no existe disgregación de las masas y se tienen sombras de viento producidas por los mismos volúmenes que la componen. Esto genera que las velocidades del viento dentro de los espacios no sean las recomendables para sitios cálidos como Nosara y no se tenga homogeneidad en el flujo.
- b) A pesar de que el modelo modificado cuenta con elementos que le brindan sombra durante prácticamente todas las horas del día a lo largo del año, lo que disminuye considerablemente las ganancias solares directas, la temperatura de bulbo seco en la zona de ubicación presenta valores altos, lo que ocasiona que en el interior de la vivienda la temperatura del aire sea prácticamente igual a la temperatura en el exterior a la sombra y no sea posible disminuirla por estos métodos.
- Costa Rica es un país que posee climas con temperaturas severas; tanto en la presente investigación, desarrollada en Guanacaste, como en la realizada por Salazar-Ceciliano (2021) en Limón, los resultados muestran que las estrategias bioclimáticas orientadas únicamente a favorecer la ventilación natural y la sombra resultan insuficientes para mantener las condiciones de confort higrotérmico durante la totalidad del día. Para generalizar esta afirmación a zonas con perfiles climáticos similares a las mencionadas se requieren más investigaciones, sin embargo, se tiene que entender que el confort higrotérmico debe lograrse a través de la inclusión integral de distintos tipos de estrategias bioclimáticas que abarcan otros aspectos como la materialidad, la configuración espacial y el aprovechamiento del entorno natural propio de cada proyecto.
 - Para la unidad de estudio, el ahorro energético en climatización activa asociado a la implementación de estrategias bioclimáticas orientadas a favorecer la ventilación natural y la sombra es del 21% del valor en el modelo original. Este ahorro se traduce en montos que van, aproximadamente, de los ₡40.000,00 a los ₡150.000,00 anuales, dependiendo de la eficiencia del equipo acondicionador de aire que se utilice. En el Capítulo 1 de este documento se menciona que, de acuerdo con Guerri (2018), el ahorro energético global de una edificación que incorpora correctamente técnicas de climatización pasiva puede alcanzar hasta un 60% con respecto a una construcción convencional, lo que significa que, para este caso, las estrategias incorporadas contribuyen en más de un tercio de los

mejoramientos potenciales en materia de eficiencia que puede tener la vivienda, dejando aún un margen de mejora que puede lograrse con la incorporación de otro tipo de estrategias bioclimáticas orientadas no solo a confort higrotérmico, sino también a otros aspectos como iluminación.

- A pesar del beneficio demostrado sobre las condiciones de confort higrotérmico en el interior de los espacios de la Residencia Maru y su contribución al ahorro energético, implementar las modificaciones bioclimáticas a la vivienda ya construida supone un costo que no se recupera con los ahorros en la factura eléctrica durante el periodo de vida útil definido, por lo que no se recomienda su ejecución.

5.2. Recomendaciones y futuras líneas de investigación

Al finalizar esta investigación, se aclararon algunas de las interrogantes que se tenían a nivel nacional sobre el efecto de las estrategias bioclimáticas de ventilación natural y sombra en el confort higrotérmico y ahorro energético de una configuración arquitectónica residencial ubicada en Nosara, en la provincia de Guanacaste; se demostró que estas técnicas intervienen significativamente en la regulación de la temperatura y la humedad relativa interna, sin llegar a lograr mantener por sí solas las condiciones de confort durante la totalidad del día a lo largo del año, por lo que el uso de climatización activa sigue siendo necesaria en la unidad de estudio analizada. Sin embargo, existen áreas que pueden explorarse en busca de mejorar aún más las condiciones higrotérmicas de la vivienda y con ello, la eficiencia energética del inmueble; estas pueden representar futuros trabajos de investigación para la Maestría en Diseño y Construcción Sostenible o para alguna otra línea académica afín. Se proponen los siguientes puntos:

- Analizar el efecto que tiene la materialidad de la unidad de estudio, explorando el impacto de cambiar el concreto como material principal del sistema constructivo por alguno que resulte de interés como podría ser, por ejemplo, la madera. También se puede analizar la implementación de materiales aislantes adicionales en las paredes o los cristales, así como en la cubierta, donde se podría implementar un sistema que incorpore elementos naturales como, por ejemplo, un techo verde; pues es sabido que estos ayudan a regular la temperatura interna de los edificios.
- Estudiar el efecto de implementar modificaciones arquitectónicas más severas en el diseño, analizando lo que sucede al cambiar la organización interna de la vivienda

disgregando las masas. En esta investigación se determinó que la unidad de estudios posee una alta compacidad, lo que dificulta la circulación del viento; implementar estrategias de acuerdo con los coeficientes de Serra y Coch (1995) como contar con una configuración espacial y volumétrica lo más extendida posible o incorporar una porosidad intermedia mediante la inclusión de un patio interno, por ejemplo, podría mejorar las condiciones de confort higrotérmico.

- De acuerdo con la carta bioclimática de Olgay, desprendida de la herramienta de Gómez-Azpeitia (2020) no se recomienda el enfriamiento evaporativo debido a la alta humedad de la zona, por lo que considera que esta opción pueda generar resultados positivos en los parámetros de interés.
- Recordando lo concluido por Zamora (2010) la vegetación que rodea los espacios juega un papel fundamental para lograr confort en el trópico, pues esta puede influir en parámetros como la humedad, la temperatura radiante que incide sobre las áreas y la velocidad y dirección de la ventilación. En esta investigación no se tomó en cuenta, totalmente, el efecto que tiene la vegetación circundante a la Residencia Maru sobre estos aspectos; solamente se contempló en la configuración de las aperturas en el software. Sin embargo, la medición en sitio durante un periodo representativo de las condiciones de temperatura y humedad alrededor de la edificación y en los espacios internos podría permitir determinar el efecto real de la vegetación al contrastar dichas mediciones con los resultados simulados para el modelo original en este documento.

5.3. Fuentes de consulta

Abascal, C. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-015-STPS-2001, Condiciones Térmicas Elevadas o Abatidas Condiciones de Seguridad e Higiene*. Secretaría del Trabajo y Prevención Social. Distrito Federal, México.

Alvarado, J. (2024). *Por primera vez Guanacaste es la provincia con la mayor intención de construcción en Costa Rica*. El Observador. Artículo electrónico rescatado de: <https://observador.cr/por-primera-vez-guanacaste-es-la-provincia-con-la-mayor-intencion-de-construccion-en-costa-rica/#:~:text=Por%20Josu%C3%A9%20Alvarado&text=Guanacaste%20se%20convirti%C3%B3%20en%20la,2023%20en%20todo%20el%20pa%C3%ADs>.

Álvarez, J. (2023). *Modelación energética del edificio Mario Laserna usando software IES-VE*. (Tesis de grado). Departamento de ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Asociación Ibérica de Fabricantes de Impermeabilización (AIFIM). (s.f.) *PVC-P y TPO, dos soluciones de impermeabilización que contribuyen a la eficiencia del edificio*. Artículo electrónico rescatado de: <https://aifim.es/pvc-p-y-tpo-dos-soluciones-de-impermeabilizacion-que-contribuyen-a-la-eficiencia-del-edificio/#:~:text=El%20TPO%20o%20Poliolefina%20Termopl%C3%A1stica,a%20la%20sostenibilidad%20del%20edificio>.

Bravo, D. & Pérez, Y. (2016). *Eficiencia energética en la climatización de edificaciones*. Revista Publicando, 3(8). 2016, 218-238. Universidad Internacional del Ecuador. Quito, Ecuador.

Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL). (s.f.). *Guía de eficiencia energética para oficinas*. Dirección de innovación y eficiencia energética. Artículo electrónico rescatado de: https://www.cnfl.go.cr/contenido/documentos/eficiencia/guia_eficiencia_oficinas.pdf

Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL). (s.f.). *Ficha de consumo de equipos eléctricos*. Dirección de innovación y eficiencia energética. Artículo electrónico rescatado de: <https://luzydiversion.cnfl.go.cr/documentos/docentes/ficha-consumo.pdf>

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2024). *Guanacaste es la Provincia que Registra Mayor Intención de Metros Cuadrados de Construcción*. Revista CFIA. Artículo electrónico rescatado de: <https://revista.cfia.or.cr/guanacaste-es-la-provincia-que-registra-mayor-intencion-de-metros-cuadrados-de-construccion-2/>

De Luxán, M. (2000). *Buenas prácticas de arquitectura bioclimática*. Boletín CF+S N°14 Hacia una arquitectura y un urbanismo basado en criterios bioclimáticos. Instituto Juan de Herrera. Madrid, España.

Dewan, A. (2024). *El calentamiento global en 2023 se acercó al límite que el mundo está tratando de evitar*. CNN en español. Artículo electrónico rescatado de: <https://cnnespanol.cnn.com/2024/01/09/calentamiento-global-limite-2023->

[trax/#:~:text=En%202023%2C%20el%20calentamiento%20global,plazo%20de%201%2C5%20grados.](#)

Duran, M. (2013). *Adecuación bioclimática a viviendas en el trópico caribeño: El caso de la República Dominicana*. (Tesis de maestría). Escuela técnica superior de ingeniería de edificación, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Eurovent Certita Certification. (2023). *Entender el SEER y el SCOP*. Artículo electrónico recuperado de: <https://www.eurovent-certification.com/es/category/article/understanding-seer-and-scop?universe=energy-efficiency>

Fanger, P. (1972). *Thermal Comfort*. Mc Graw Hill. New York, Estados Unidos.

Global Petrol Prices. (2023). *Precios de la electricidad en Costa Rica*. Artículo electrónico rescatado de: https://es.globalpetrolprices.com/Costa-Rica/electricity_prices/

Guerri, J. (2018). *Arquitectura bioclimática: retos para un futuro cercano*. (Tesis de grado). Escuela técnica superior de arquitectura, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Hitachi. (s.f.) *EER (relación de eficiencia energética)*. Artículo electrónico recuperado de: <https://www.hitachiaircon.com/es/glossary/eer-relacion-de-eficiencia-energetica#:~:text=EER%20representa%20la%20relaci%C3%B3n%20de%20eficiencia%20energ%C3%A9tica,eficiencia%20energ%C3%A9tica%20y%20menores%20costos%20de%20electricidad>.

IEBS. (2023). *¿Qué es y cómo hacer un análisis CAME?* Artículo electrónico recuperado de: <https://www.iebschool.com/blog/que-es-un-analisis-came-y-como-se-hace-marketing-digital/#:~:text=Esta%20estrategia%2C%20tambi%C3%A9n%20conocida%20como%20de%20ataque,empresa%2C%20y%20diferenciarse%20as%C3%AD%20de%20su%20competencia>.

Illbruck.com (2023). Permeabilidad al vapor de agua: valor μ y S_d de los materiales. Artículo electrónico rescatado de: <https://www.illbruck.com/es-es/asesoramiento-de>

expertos/blog/permeabilidad-al-vapor-de-agua-valor-%CE%BC-y-sd-de-los-materiales/

Instituto de la Construcción de Castilla y León (ICCL). (2007). *Prontuario de soluciones constructivas/materiales*. Código técnico de la edificación web. Artículo electrónico rescatado de: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=15>

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (s.f). *Guía para el uso eficiente de la energía eléctrica aplicada a pequeños hoteles y otras pymes*. Área de conservación de la energía y gerencia de electricidad. Artículo electrónico rescatado de: <https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/c25aa134-4b77-4a9f-9cca-48d119bd9190/Gu%C3%ADa-PYMES.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IZQ3e6H>

Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (s.f.). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. Artículo electrónico rescatado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>

Medina, M. (2021). *Aprovechamiento de la inercia térmica del hormigón para el ahorro energético de los edificios*. Revista Ingenio Tecnológico, vol. 3, e018, 2021. Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

Mignucci, A. (2019). *Bruno Stagno: Una arquitectura para el trópico*. Primera edición. A+editores, San Juan Puerto Rico.

Municipalidad de Nicoya. (2010). *Borrador del Plan Regulador del Cantón de Nicoya*. GOBIERNO DE COSTA RICA, Ministerio de Hacienda y INYPSA, desarrollado por la Municipalidad de Nicoya, 2010

Navas, C. & Fonseca, C. (2015). *Densidad de la mampostería de concreto en Costa Rica*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructuras (LANAMME), Universidad de Costa Rica (UCR), San José, Costa Rica.

Nosara Civic Association (NCA). (2013). *Un retrato de la realidad económica en Nosara y Sámara: Proporcionando las herramientas para el desarrollo sostenible*. Center for Responsible Travel, Washington, EEUU.

- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2022). *Informe sobre la situación mundial de los edificios y la construcción en 2022: Hacia un sector de los edificios y la construcción con cero emisiones, eficiente y resistente*. Naciones Unidas. P.O. Box 30552, 00100 Nairobi, Kenia.
- Salazar, E. (2021) *Evaluación bioclimática de la arquitectura caribeña costarricense*. (Tesis de maestría). Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad de Colima, Colima, México.
- s.n. (2022). *Arquitectura bioclimática: mirar al pasado para construir el futuro*. Gron Circular Company. Artículo electrónico recuperado de: [Arquitectura bioclimática: mirar al pasado para construir el futuro – GronCR](#)
- Soler & Palau (2018). *Humedad ideal: salud y confort térmico*. Artículo electrónico recuperado de: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-ideal-confort-termico/>
- Stephenson, D. (1968). *CBD-105. Heating and Cooling Requirements*. National Research Council Canada. Artículo electrónico rescatado de: https://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd105_e.html
- The Engineering ToolBox. (s.f). *Heat Gain from Lights*. Artículo electrónico recuperado de: https://www.engineeringtoolbox.com/heat-gain-lights-d_709.html
- Villalobos, B. (2019). *Arquitectura bioclimática: diseño adaptado al cambio climático*. Oficina de divulgación e información de la Universidad de Costa Rica. Artículo electrónico rescatado de: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/9/12/arquitectura-bioclimatica-diseno-adaptado-al-cambio-climatico.html>

ANEXOS

Anexo A: Determinación de los días representativos de comportamiento climático para la estación seca y la estación lluviosa

Con el fin de determinar el día representativo para la estación seca, la cual se define entre los meses de diciembre a abril; y la estación lluviosa, comprendida entre los meses de abril a diciembre, se aplica la metodología desarrollada por Esparza-López (2015) y aplicada por Salazar-Ceciliano (2021). Este día representativo se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$D_R = (T_{mdiaría} - T_{mtemp}) + (O_{Tmdiaría} - O_{Tmtemp}) = 0$$

Donde:

D_R = Día representativo

$T_{mdiaría}$ = Temperatura media diaria

T_{mtemp} = Temperatura media temporada

$O_{Tmdiaría}$ = Oscilación de la temperatura media diaria

O_{Tmtemp} = Oscilación de la temperatura media de la temporada

Cuadro A-1. Valores para la determinación del día representativo de la estación seca

Fecha	T prom. Diario (°C)	Oscilación (°C)	Índice D_R
1-dic	26.71	8.15	-7.06
2-dic	27.91	14.20	0.19
3-dic	27.53	13.78	-0.61
4-dic	26.80	14.58	-0.54
5-dic	26.97	14.43	-0.53
6-dic	26.14	12.15	-3.64
7-dic	28.09	11.74	-2.09
8-dic	26.14	11.64	-4.14
9-dic	26.82	13.35	-1.76
10-dic	28.12	8.81	-5.00
11-dic	28.53	7.47	-5.92
12-dic	27.86	13.30	-0.77
13-dic	26.49	15.30	-0.13
14-dic	26.12	12.31	-3.50
15-dic	26.21	13.94	-1.78
16-dic	25.68	14.56	-1.68

17-dic	28.22	15.85	2.15
18-dic	26.84	10.74	-4.35
19-dic	26.80	14.48	-0.65
20-dic	26.18	15.61	-0.14
21-dic	25.51	14.70	-1.71
22-dic	25.84	4.24	-11.84
23-dic	26.35	2.24	-13.33
24-dic	26.49	10.90	-4.54
25-dic	27.03	14.05	-0.85
26-dic	26.18	3.07	-12.68
27-dic	28.89	7.04	-5.99
28-dic	27.37	11.25	-3.30
29-dic	26.73	5.15	-10.05
30-dic	26.03	12.02	-3.87
31-dic	24.20	13.27	-4.45
1-ene	26.13	6.63	-9.17
2-ene	26.80	4.47	-10.66
3-ene	28.93	10.43	-2.57
4-ene	27.07	3.80	-11.06
5-ene	29.12	10.52	-2.28
6-ene	25.15	11.07	-5.70
7-ene	28.70	14.15	0.93
8-ene	25.78	13.15	-3.00
9-ene	27.00	8.78	-6.15
10-ene	25.38	10.94	-5.60
11-ene	26.27	13.93	-1.72
12-ene	25.11	13.27	-3.54
13-ene	25.25	14.03	-2.65
14-ene	27.41	5.83	-8.68
15-ene	26.33	7.48	-8.11
16-ene	25.77	12.40	-3.75
17-ene	27.31	9.11	-5.50
18-ene	28.97	8.51	-4.45
19-ene	28.56	8.95	-4.42
20-ene	26.68	13.95	-1.29
21-ene	23.75	15.93	-2.25
22-ene	26.67	9.27	-5.98
23-ene	27.47	11.06	-3.39
24-ene	26.75	13.57	-1.60
25-ene	26.93	14.64	-0.36
26-ene	26.90	16.02	0.99
27-ene	26.20	13.40	-2.33
28-ene	25.73	14.78	-1.41

29-ene	28.88	10.18	-2.87
30-ene	28.39	3.40	-10.14
31-ene	26.87	13.09	-1.96
1-feb	27.83	11.99	-2.11
2-feb	26.84	12.47	-2.62
3-feb	28.60	9.30	-4.02
4-feb	28.35	7.79	-5.78
5-feb	27.46	5.65	-8.82
6-feb	30.27	8.59	-3.07
7-feb	28.13	12.22	-1.57
8-feb	25.87	15.34	-0.71
9-feb	28.35	10.81	-2.77
10-feb	27.48	15.23	0.79
11-feb	27.21	12.36	-2.36
12-feb	28.55	7.48	-5.89
13-feb	28.90	8.37	-4.66
14-feb	29.07	7.98	-4.87
15-feb	28.24	9.68	-4.00
16-feb	27.94	15.38	1.39
17-feb	28.88	10.05	-3.00
18-feb	27.64	11.93	-2.36
19-feb	28.38	15.37	1.83
20-feb	29.63	11.80	-0.49
21-feb	29.24	10.03	-2.65
22-feb	24.02	15.12	-2.79
23-feb	26.20	10.15	-5.57
24-feb	26.70	5.63	-9.60
25-feb	26.94	8.09	-6.89
26-feb	27.69	8.60	-5.63
27-feb	28.56	10.19	-3.17
28-feb	29.42	8.57	-3.94
1-mar	26.82	14.24	-0.86
2-mar	28.01	14.54	0.63
3-mar	27.66	14.19	-0.07
4-mar	26.28	14.46	-1.19
5-mar	26.04	14.15	-1.73
6-mar	28.43	14.17	0.67
7-mar	28.09	12.91	-0.93
8-mar	26.85	13.75	-1.32
9-mar	27.61	16.72	2.41
10-mar	26.73	12.69	-2.50
11-mar	27.73	8.71	-5.48
12-mar	29.39	10.91	-1.63

13-mar	30.06	8.58	-3.28
14-mar	28.50	12.94	-0.48
15-mar	28.11	14.33	0.52
16-mar	28.36	8.74	-4.82
17-mar	28.75	9.14	-4.03
18-mar	30.24	7.93	-3.75
19-mar	29.21	10.31	-2.41
20-mar	29.61	13.66	1.34
21-mar	29.68	15.26	3.01
22-mar	28.18	14.69	0.94
23-mar	28.84	14.31	1.22
24-mar	27.61	13.61	-0.70
25-mar	27.79	13.39	-0.74
26-mar	27.88	13.63	-0.42
27-mar	29.76	10.44	-1.72
28-mar	28.16	10.54	-3.23
29-mar	28.51	8.85	-4.57
30-mar	28.90	9.89	-3.13
31-mar	27.56	9.95	-4.41
Promedio	27.44	14.48	

Fuente: Elaboración propia, 2024

Cuadro A-2. Valores para la determinación del día representativo de la estación lluviosa

Fecha	T prom. Diario (°C)	Oscilación (°C)	Índice D_R
1-abr	29.34	12.10	1.99
2-abr	27.74	15.79	4.09
3-abr	28.10	16.24	4.90
4-abr	28.41	14.79	3.76
5-abr	28.80	16.12	5.48
6-abr	27.98	14.64	3.18
7-abr	28.49	10.30	-0.66
8-abr	28.79	16.27	5.62
9-abr	29.03	12.15	1.74
10-abr	27.91	9.40	-2.14
11-abr	31.59	6.37	-1.48
12-abr	32.49	6.73	-0.23
13-abr	29.70	9.84	0.09
14-abr	31.37	10.50	2.43
15-abr	32.38	6.76	-0.30
16-abr	31.98	9.45	1.99
17-abr	33.28	8.31	2.15
18-abr	32.53	6.51	-0.40

19-abr	29.22	13.50	3.28
20-abr	31.88	14.42	6.86
21-abr	28.54	11.71	0.81
22-abr	28.83	9.41	-1.20
23-abr	28.56	16.15	5.26
24-abr	28.70	9.60	-1.15
25-abr	27.99	9.61	-1.84
26-abr	29.86	12.38	2.80
27-abr	29.35	13.64	3.55
28-abr	29.38	15.74	5.68
29-abr	29.60	11.13	1.28
30-abr	29.70	13.10	3.35
1-may	31.07	13.92	5.54
2-may	29.09	12.81	2.46
3-may	28.35	11.02	-0.07
4-may	28.78	9.68	-0.98
5-may	28.57	10.91	0.04
6-may	29.83	11.62	2.01
7-may	27.97	12.98	1.51
8-may	28.53	11.16	0.24
9-may	27.58	11.25	-0.61
10-may	27.33	11.19	-0.92
11-may	27.79	12.20	0.55
12-may	29.10	13.15	2.81
13-may	27.99	12.87	1.42
14-may	29.00	9.01	-1.43
15-may	28.76	8.55	-2.13
16-may	29.39	13.57	3.52
17-may	27.53	10.63	-1.28
18-may	28.89	11.07	0.51
19-may	30.21	11.43	2.20
20-may	28.27	10.24	-0.94
21-may	28.57	13.01	2.14
22-may	28.75	14.49	3.80
23-may	27.57	8.89	-2.98
24-may	27.47	9.39	-2.58
25-may	27.09	6.98	-5.37
26-may	26.72	8.73	-4.00
27-may	26.74	10.10	-2.61
28-may	27.59	11.03	-0.83
29-may	26.03	5.15	-8.26
30-may	26.42	9.04	-3.98
31-may	25.67	7.63	-6.15

1-jun	25.46	12.88	-1.10
2-jun	27.28	9.78	-2.38
3-jun	26.58	10.86	-2.01
4-jun	28.31	11.07	-0.06
5-jun	27.34	10.72	-1.38
6-jun	26.48	9.68	-3.28
7-jun	27.46	10.79	-1.20
8-jun	29.08	8.62	-1.74
9-jun	28.62	9.74	-1.08
10-jun	28.02	8.14	-3.28
11-jun	27.88	9.64	-1.92
12-jun	26.23	8.01	-5.20
13-jun	29.63	15.16	5.35
14-jun	26.61	10.42	-2.42
15-jun	29.60	12.52	2.67
16-jun	26.92	9.15	-3.37
17-jun	27.49	13.69	1.73
18-jun	28.63	12.61	1.80
19-jun	27.37	12.06	-0.01
20-jun	27.99	12.64	1.19
21-jun	27.24	9.37	-2.83
22-jun	27.46	11.64	-0.34
23-jun	27.39	11.22	-0.83
24-jun	27.20	10.70	-1.55
25-jun	27.91	10.02	-1.51
26-jun	28.30	11.75	0.61
27-jun	26.35	8.02	-5.08
28-jun	26.50	9.93	-3.01
29-jun	26.22	7.39	-5.83
30-jun	26.59	12.17	-0.68
1-jul	27.77	9.83	-1.84
2-jul	30.20	9.68	0.44
3-jul	27.07	6.67	-5.70
4-jul	27.10	12.10	-0.24
5-jul	28.12	8.75	-2.57
6-jul	27.45	9.88	-2.12
7-jul	28.83	7.73	-2.88
8-jul	29.22	10.58	0.35
9-jul	27.41	9.05	-2.98
10-jul	27.64	11.77	-0.04
11-jul	25.96	10.53	-2.95
12-jul	27.44	11.83	-0.18
13-jul	29.21	11.53	1.29

14-jul	25.80	5.18	-8.46
15-jul	28.90	12.50	1.95
16-jul	28.80	10.54	-0.10
17-jul	28.77	10.25	-0.42
18-jul	31.84	6.97	-0.63
19-jul	28.95	8.76	-1.74
20-jul	28.00	10.16	-1.28
21-jul	27.33	9.35	-2.77
22-jul	28.14	11.75	0.44
23-jul	25.78	5.47	-8.20
24-jul	25.98	7.42	-6.04
25-jul	25.90	10.91	-2.64
26-jul	28.15	13.36	2.07
27-jul	28.65	12.40	1.61
28-jul	27.96	12.35	0.86
29-jul	26.73	9.09	-3.62
30-jul	25.68	8.58	-5.18
31-jul	25.54	10.77	-3.13
1-ago	28.84	9.89	-0.71
2-ago	27.95	10.92	-0.57
3-ago	27.70	16.15	4.41
4-ago	28.39	12.80	1.75
5-ago	28.04	9.60	-1.80
6-ago	25.41	6.81	-7.23
7-ago	26.96	12.88	0.39
8-ago	28.29	11.79	0.64
9-ago	27.51	9.09	-2.85
10-ago	26.25	9.30	-3.90
11-ago	27.43	12.75	0.74
12-ago	27.78	11.20	-0.46
13-ago	27.06	12.35	-0.04
14-ago	27.16	10.47	-1.81
15-ago	26.25	11.26	-1.94
16-ago	26.44	11.19	-1.82
17-ago	28.11	10.95	-0.38
18-ago	27.30	10.20	-1.95
19-ago	27.60	9.52	-2.33
20-ago	27.15	13.94	1.65
21-ago	27.33	9.76	-2.36
22-ago	26.26	9.05	-4.14
23-ago	27.03	12.34	-0.07
24-ago	27.91	13.59	2.05
25-ago	28.31	12.29	1.16

26-ago	29.54	10.33	0.42
27-ago	25.82	10.25	-3.38
28-ago	26.62	14.59	1.77
29-ago	26.23	12.49	-0.72
30-ago	27.85	11.18	-0.41
31-ago	28.41	10.92	-0.11
1-sep	27.07	9.53	-2.84
2-sep	25.28	7.68	-6.48
3-sep	27.53	12.62	0.71
4-sep	26.09	10.40	-2.95
5-sep	27.58	12.09	0.22
6-sep	26.59	9.12	-3.73
7-sep	26.96	12.31	-0.17
8-sep	26.94	12.14	-0.36
9-sep	26.58	10.98	-1.88
10-sep	27.63	11.32	-0.49
11-sep	26.88	12.99	0.43
12-sep	27.57	10.36	-1.52
13-sep	27.57	11.12	-0.76
14-sep	26.42	7.59	-5.44
15-sep	26.41	9.55	-3.49
16-sep	26.71	10.65	-2.08
17-sep	27.51	12.52	0.59
18-sep	27.69	13.30	1.55
19-sep	27.14	12.84	0.54
20-sep	27.05	10.83	-1.56
21-sep	28.43	12.77	1.76
22-sep	28.37	13.26	2.18
23-sep	28.08	13.24	1.87
24-sep	28.35	11.80	0.71
25-sep	28.81	13.23	2.60
26-sep	27.46	10.94	-1.04
27-sep	27.94	12.11	0.61
28-sep	27.26	11.37	-0.82
29-sep	27.05	11.45	-0.94
30-sep	27.36	9.45	-2.63
1-oct	26.49	11.51	-1.45
2-oct	26.14	10.55	-2.76
3-oct	25.41	13.97	-0.07
4-oct	26.92	11.96	-0.57
5-oct	27.97	11.37	-0.10
6-oct	27.36	10.70	-1.39
7-oct	27.16	11.52	-0.77

8-oct	26.63	12.68	-0.14
9-oct	25.89	10.56	-2.99
10-oct	26.84	14.15	1.55
11-oct	26.78	13.15	0.49
12-oct	28.31	12.48	1.35
13-oct	28.15	10.31	-0.99
14-oct	27.79	11.70	0.05
15-oct	28.79	13.54	2.89
16-oct	27.02	7.53	-4.90
17-oct	28.64	11.32	0.52
18-oct	27.69	12.10	0.35
19-oct	27.40	11.47	-0.58
20-oct	26.98	8.57	-3.89
21-oct	27.34	12.20	0.10
22-oct	26.36	7.25	-5.83
23-oct	24.42	9.67	-5.36
24-oct	24.78	8.20	-6.46
25-oct	25.56	8.52	-5.36
26-oct	26.15	11.18	-2.11
27-oct	26.72	11.23	-1.50
28-oct	25.78	7.57	-6.09
29-oct	27.06	9.21	-3.17
30-oct	26.20	10.55	-2.69
31-oct	26.94	9.80	-2.71
1-nov	27.86	8.20	-3.38
2-nov	27.53	11.32	-0.60
3-nov	29.54	10.96	1.06
4-nov	27.82	10.20	-1.42
5-nov	26.97	12.71	0.24
6-nov	25.57	8.16	-5.72
7-nov	26.77	13.09	0.42
8-nov	27.12	11.28	-1.04
9-nov	27.09	13.08	0.73
10-nov	25.66	11.49	-2.29
11-nov	26.98	10.99	-1.47
12-nov	25.78	6.80	-6.86
13-nov	25.86	7.98	-5.61
14-nov	23.73	8.15	-7.56
15-nov	26.69	12.55	-0.21
16-nov	26.35	6.94	-6.16
17-nov	26.83	11.35	-1.26
18-nov	25.65	7.55	-6.25
19-nov	26.30	10.80	-2.35

20-nov	29.82	16.93	7.30
21-nov	28.22	12.46	1.24
22-nov	26.94	14.72	2.22
23-nov	26.72	13.60	0.87
24-nov	26.66	15.03	2.24
25-nov	25.50	12.77	-1.17
26-nov	24.83	10.91	-3.71
27-nov	26.78	7.42	-5.25
28-nov	26.24	10.04	-3.16
29-nov	27.61	13.47	1.64
30-nov	26.95	7.82	-4.67
Promedio	27.66	11.78	

Fuente: Elaboración propia, 2024

San Rafael de Heredia, Costa Rica.

Febrero 2024 – Agosto 2024