

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA

SANTIAGO DE CHILE - CHILE



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

**DISEÑO DE MUROS IMPRESOS EN 3D PARA REDUCIR LA IRRADIACIÓN
SOLAR ACUMULADA**

PAULA NATALIA SEGUEL VARGAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ARQUITECTA

VERÓNICA ARCOS

28 DE JULIO DE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Diseño de muros impresos en 3D para reducir la irradiación solar acumulada

Nombre del candidato(a): Paula Natalia Seguel Vargas

Carrera / Grado: Arquitectura / Arquitecta

Campus: San Joaquín **Departamento:** Arquitectura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Verónica Arcos, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 25/08/2025

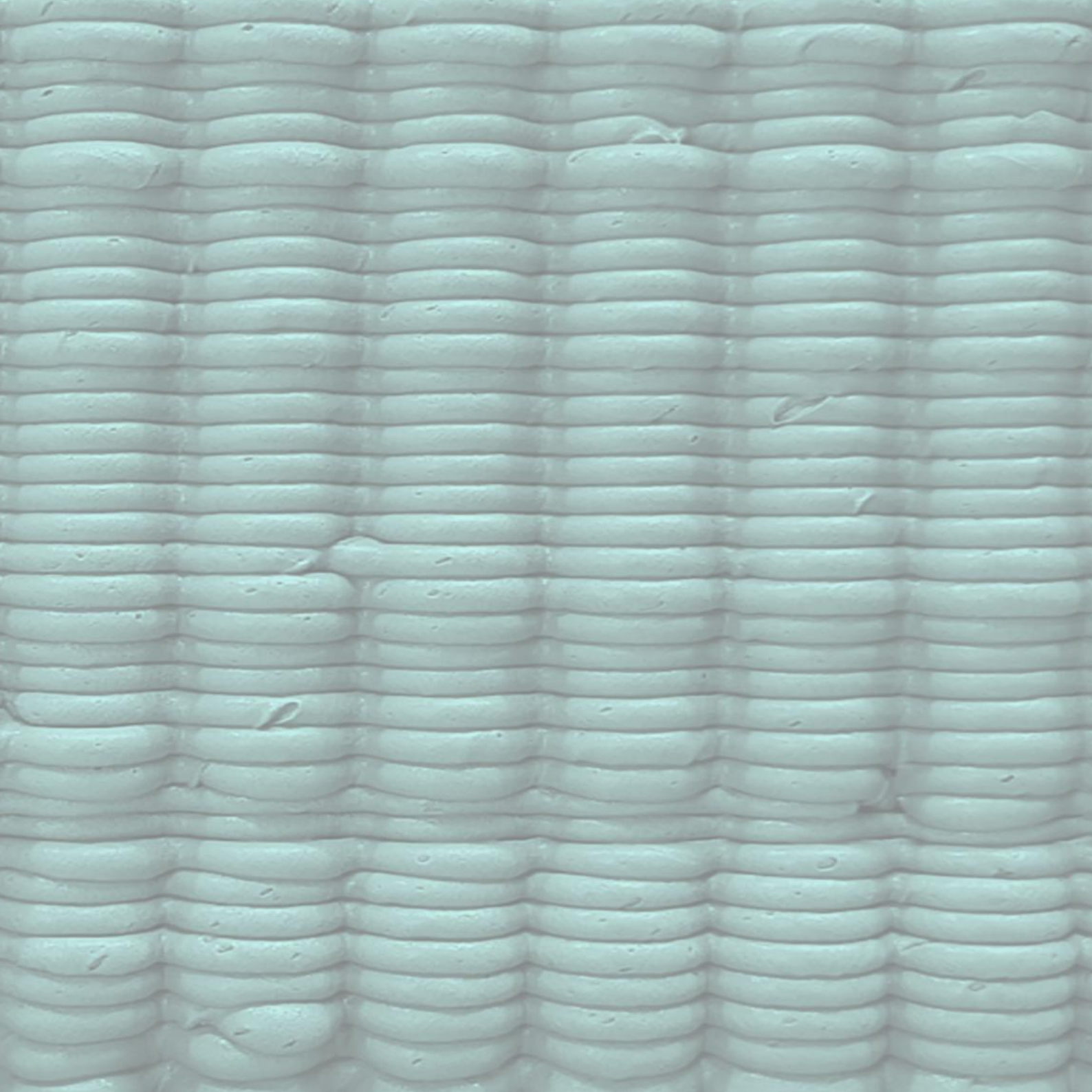
; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25/08/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA

SANTIAGO DE CHILE - CHILE



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

**DISEÑO DE MUROS IMPRESOS EN 3D PARA REDUCIR LA IRRADIACIÓN
SOLAR ACUMULADA**

PAULA NATALIA SEGUEL VARGAS

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE ARQUITECTA

VERÓNICA ARCOS

28 DE JULIO DE 2025

Advertencia: Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la institución.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi abuela Laura, por su sabiduría, fuerza y por ser mi raíz firme en cada momento difícil. A mi madre Heidy, por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme con el ejemplo a nunca rendirme. Y a mi pareja Exon, por acompañarme en los momentos de mayor estrés, por su paciencia y por confiar en mí incluso cuando yo dudaba. Gracias por sostenerme, impulsarme y creer en este proyecto tanto como yo.

RESUMEN

Esta investigación busca reducir la irradiación solar acumulada en fachadas mediante estrategias geométricas pasivas aplicadas a muros impresos en 3D, para ello, se desarrollaron ocho prototipos: uno liso como modelo base, tres con relieves primitivos (vertical, horizontal y combinado), y cuatro prototipos de muros evolutivos diseñados específicamente según la orientación solar (oriente, norte y poniente). La metodología incluyó seis etapas: revisión bibliográfica; diseño paramétrico de los muros con “Rhinoceros” (McNeel, 1993) y “Grasshopper” (McNeel, 2007); simulaciones solares utilizando “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017) en tres fechas clave del año (solsticio de invierno, equinoccio de primavera y solsticio de verano); fabricación de prototipos mediante impresión 3D utilizando arcilla como material de ensayo y evaluación comparativa de los resultados.

Los resultados evidencian que los prototipos de muros evolutivos, diseñados en función de la trayectoria solar, lograron reducir hasta en un 33% la irradiación solar acumulada mensual respecto al muro liso. El prototipo de muro evolutivo ME-FO (fachada oriente) fue el más eficiente, seguido del ME-FP (poniente) y ME-FN-V02 (norte). En cambio, algunos relieves simples, como el vertical o el horizontal, aumentaron la captación solar en ciertas orientaciones. Además, se identificaron limitaciones constructivas, como inestabilidad en muros con base angosta y parte superior ancha, lo que demuestra que no toda geometría térmicamente eficiente es viable para impresión. Esta investigación demuestra que el diseño geométrico adaptado al contexto solar puede ser una estrategia pasiva efectiva, combinando herramientas paramétricas, simulación climática y fabricación digital para generar soluciones arquitectónicas que reduzcan el ingreso térmico en climas soleados como Santiago de Chile.

Palabras clave: Impresión 3D, muros, auto-sombreado, irradiación solar.

ABSTRACT

This research seeks to reduce cumulative solar radiation on facades through passive geometric strategies applied to 3D-printed walls. To this end, eight prototypes were developed: one smooth as a base model, three with primitive reliefs (vertical, horizontal, and combined), and four prototypes evolutionary walls designed specifically according to solar orientation (east, north, and west). The methodology included six stages: literature review; parametric design of the walls with Rhinoceros (McNeel, 1993) and Grasshopper (McNeel, 1993); solar simulations using Ladybug Tools (Mackey & Sadeghipour, 2017) at three key dates of the year (winter solstice, spring equinox, and summer solstice); fabrication of prototypes by 3D printing using clay as a test material; and comparative evaluation of the results.

The results show that the evolutionary walls prototypes, designed according to the sun's trajectory, reduced monthly cumulative solar radiation by up to 33% compared to the smooth wall. The ME-FO evolutionary wall prototype (east facade) was the most efficient, followed by the ME-FP (west) and ME-FN-V02 (north). In contrast, some simple reliefs, such as vertical or horizontal, increased solar gain in certain orientations. In addition, construction limitations were identified, such as instability in walls with a narrow base and wide top, demonstrating that not all thermally efficient geometry is viable for printing. This research demonstrates that geometric design adapted to the solar context can be an effective passive strategy, combining parametric tools, climate simulation, and digital manufacturing to generate architectural solutions that reduce heat gain in sunny climates such as Santiago, Chile.

Keywords: 3D printing, walls, self-shading, solar radiation.

GLOSARIO

- **Auto-sombreado:** Estrategia pasiva de diseño en la que la propia geometría del muro proyecta sombra sobre sí misma, reduciendo la radiación solar directa acumulada (EL-Mahdy & Ali, 2024).
- **Ángulo de azimut solar:** Dirección horizontal del sol con respecto al norte geográfico. Se mide en grados y varía a lo largo del día (Boujoudar et al., 2024).
- **Ángulo de altitud solar:** Elevación del sol sobre el horizonte. Influye directamente en la longitud y posición de las sombras proyectadas (Kalogirou, 2009).
- **Capa de impresión:** Cordón o línea continua de material depositado por el extrusor. Su geometría y disposición afectan directamente el diseño y desempeño del muro (Buswell et al., 2018).
- **Desempeño térmico:** Capacidad de una construcción para controlar la transferencia de calor hacia y desde su interior, y así mantener condiciones térmicas estables que optimicen el confort (Tamimi et al., 2023).
- **EPW (“EnergyPlus Weather File”):** Archivo climático estandarizado utilizado en software de simulación energética, que contiene datos meteorológicos horarios como radiación, temperatura y humedad (Crawley et al., 2001).
- **Equinoccio de primavera:** Fecha del año en la que el día y la noche tienen igual duración. Este fenómeno ocurre cuando la Tierra se encuentra en una posición en donde el Sol ilumina ambos hemisferios (Rongzhi & Kaizhong, 2020).
- **Extrusión:** Proceso de fabricación en impresión 3D mediante el cual el material es depositado capa por capa a través de un extrusor, generando una pieza tridimensional. El diámetro del extrusor determina el ancho del cordón de material depositado (Buswell et al., 2018).

- **Fabricación aditiva:** Proceso constructivo que consiste en la adición de material capa por capa siguiendo un modelo digital 3D, utilizado en la impresión 3D de muros (Hossain et al., 2020).
- **Irradiancia:** Representa la densidad de potencia instantánea que incide sobre una superficie por unidad de área. Se expresa en $[W/m^2]$ y representa el valor determinado de un día (Núñez & Victoria, 2024).
- **Irradiación solar:** Energía de radiación solar recibida por unidad de superficie durante un periodo específico, expresada en $[kWh/m^2día]$ (Qazi, 2017).
- **Radiación solar:** Cantidad total de energía solar que incide sobre la superficie de la Tierra, que comprende tanto la radiación directa normal como la radiación solar difusa dispersada por la atmósfera y las nubes (Amado & Poggi, 2022).
- **Relieves geométricos:** Protuberancia o variación en la superficie de los muros que permiten generar auto-sombreado y modificar la incidencia de la radiación solar (EL-Mahdy & Ali, 2024).
- **Solsticio de invierno:** Se define como el día más corto del año, que ocurre cuando la declinación solar alcanza su valor mínimo (Page, 2018).
- **Solsticio de verano:** Se define como la época del año en la que se recibe la mayor radiación solar por día, que ocurre en diciembre (Gastli & Charabi, 2010).
- **Voladizo de impresión:** Ángulo máximo con el que un material depositado en impresión 3D puede sobresalir sin soporte adicional (EL-Mahdy & Ali, 2024).

ÍNDICE	
AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
GLOSARIO	4
1. Introducción	8
CAPÍTULO 01. Marco teórico.....	22
2. Estado del arte	23
CAPÍTULO 02. Alcances de la investigación.....	30
3. Pregunta de investigación.....	18
4. Objetivos	31
5. Hipótesis	31
6. Metodología	32
CAPÍTULO 03. Revisión bibliográfica	43
7. Información climática de Santiago de Chile	44
8. Datos meteorológicos anuales de Santiago de Chile	46
9. Cambio de estaciones	47
10. Temperaturas medias y precipitaciones	51
11. Protección solar.....	52
12. Gráfico horario	53
13. Ángulos de la posición solar.....	54
CAPÍTULO 04. Desarrollo de los prototipos de muros.....	57

14.	Fase 1: Desarrollo del prototipo de muro teórico liso (MT-L).....	58
15.	Fase 2: Desarrollo de los prototipos de muros primitivos	60
16.	Fase 3: Desarrollo de los prototipos de muros evolutivos.....	67
CAPÍTULO 05. Simulación solar de los prototipos de muros		76
17.	Fase 1: Evaluación de la irradiación solar acumulada del prototipo de muro teórico liso	77
18.	Fase 2: Evaluación de la irradiación solar acumulada de los prototipos de muros primitivos	79
19.	Fase 3: Evaluación de la irradiación solar acumulada de los prototipos de muros evolutivos	85
CAPÍTULO 06. Fabricación de los prototipos de muros		94
20.	Fabricación de los prototipos de muros	95
21.	Prototipos de muros impresos	100
CAPÍTULO 07. Resultados y conclusiones.....		106
22.	Resultados generales de la simulación.....	107
23.	Conclusiones.....	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		113
ANEXO A. Gráficos de la trayectoria solar		117
ANEXO B. Resultados de simulación solar de prototipos de muros		143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de la ciudad seleccionada para el estudio. Elaboración propia. 20

Figura 1.1 - Cabina de vigilancia en impresión 3D (ICH, 2024). 24

Figura 1.2 - Tipos de pared (ancho de filamento de 35 mm) para el análisis paramétrico (dimensiones en mm) (Chamatete & Yalçinkaya, 2024). 25

Figura 1.3 - Resultados de la simulación térmica del flujo de calor para variantes individuales de las muestras ensayadas, asumiendo que el material que soporta la carga era PLA (Dziura et al., 2023). 26

Figura 1.4 - Comparación del análisis de la radiación solar de los muros (EL-Mahdy & Ali, 2024). 27

Figura 1.5 - a) Radiación solar en fachadas. b) Diseño de fachada con geometría de panel informada por los resultados de radiación (Dervishaj & Gudmundsson, 2024). 28

Figura 1.6 - a) Fotografía, imagen infrarroja y temperaturas en verano a las 16:30 h de toda la fachada; b) detalle de la termografía IR de la fachada cerrada al pavimento (Barbero-Barrera et al. , 2024). 29

Figura 2.1 - Esquema de la metodología de la investigación. Elaboración propia. 32

Figura 2.2 - Esquema de la ‘Etapa 1: Revisión bibliográfica de la impresión 3D’. Elaboración propia. 33

Figura 2.3 - Esquema de la ‘Etapa 2: Diseño de los prototipos de muros’. Elaboración propia. 34

Figura 2.4 - Esquema de la modelación 3D de los prototipos de muros. Elaboración propia. 35

Figura 2.5 - Esquema ‘Etapa 3: Simulación solar de los prototipos de muros’. Elaboración propia. 37

Figura 2.6 - Esquema ‘Etapa 6: Fabricación de los prototipos de muros’. Elaboración propia. 40

Figura 2.7 - Esquema de la construcción de los prototipos de muros. Elaboración propia. .. 40

Figura 2.8 - Esquema de la ‘Etapa 7: Evaluación de los resultados’. Elaboración propia. 41

Figura 2.9 - Esquema de la 'Etapa 8: Elaboración de la documentación final'. Elaboración propia.....	42
Figura 3.1 - a) Cartografía interactiva de los climas de Chile. b) Esquema de los climas de Chile (Rioseco & Tesser, s. f.).....	44
Figura 3.2 - Datos meteorológicos anuales de Santiago de Chile (Marsh, 2023a).....	46
Figura 3.3 - Fechas astronómicas clave que marcan el cambio de estaciones en Santiago de Chile. Elaboración propia.....	47
Figura 3.4 - Radiación solar directa y difusa en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023a).	48
Figura 3.5 - Radiación solar directa y difusa en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023a).	49
Figura 3.6 - Radiación solar directa y difusa en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023).	50
Figura 3.7 - Gráfico de temperaturas medias y precipitaciones de Santiago (Meteoblue, 2024).	51
Figura 3.8 - a) Gráfico de protección solar de Santiago de verano a otoño. b) Gráfico de protección solar de Santiago de invierno a primavera (Milne, 2014).	52
Figura 3.9 - Gráfico horario de la radiación global horizontal de Santiago de Chile (Milne, 2014).	53
Figura 3.10 - Supuesto de ángulo de altitud. Elaboración propia en base a Marsh (2023b)..	55
Figura 3.11 - Supuesto de ángulo de azimut. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	56
Figura 4.1 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MT-L. Elaboración propia.....	58
Figura 4.2 - Proceso de diseño de la curvatura base del prototipo de muro MP-RV. Elaboración propia.....	60
Figura 4.3 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MP-RV. Elaboración propia.....	61

Figura 4.5 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MP-RH. Elaboración propia.....	63
Figura 4.6 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MP-RHV. Elaboración propia.....	65
Figura 4.7 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FO. Elaboración propia.....	68
Figura 4.8 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FN-V01. Elaboración propia.....	70
Figura 4.9 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FN-V02. Elaboración propia.....	72
Figura 4.10 - Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FP. Elaboración propia.....	74
Figura 5.1 - Isométrica del prototipo de muro MT-L para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	77
Figura 5.2 - Isométrica del prototipo de muro MP-RV para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	79
Figura 5.3 - Isométrica del prototipo de muro MP-RH para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	81
Figura 5.4 - Isométrica del prototipo de muro MP-RHV para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	83
Figura 5.5 - Isométrica del prototipo de muro ME-FO para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	85
Figura 5.6 - Isométrica del prototipo de muro ME-FN-V01 para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	87
Figura 5.7 - Isométrica del prototipo de muro ME-FN-V02 para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	89
Figura 5.8 - Isométrica del prototipo de muro ME-FP para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.....	92

Figura 7.1 - Comparación entre el área proyectada y el área efectiva del muro teórico liso y un muro con relieve. Elaboración propia.....	111
Figura A.1 - a) Posición del sol a las 10:00 AM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 11:00 AM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	117
Figura A.2 - a) Posición del sol a las 12:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 13:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	118
Figura A.3 - a) Posición del sol a las 14:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 15:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	119
Figura A.4 - Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en la orientación oriente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	120
Figura A.5 - Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en la orientación norte de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	121
Figura A.6 - Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en la orientación poniente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	122
Figura A.7 - a) Posición del sol a las 08:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 09:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	124
Figura A.8 - a) Posición del sol a las 10:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 11:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	125
Figura A.9 - a) Posición del sol a las 12:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 13:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	126

Figura A.10 - a) Posición del sol a las 14:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 15:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	127
Figura A.11 - Posición del sol a las 16:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	128
Figura A.12 - Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en la orientación oriente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	129
Figura A.13 - Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en la orientación norte de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	130
Figura A.14 - Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en la orientación poniente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	131
Figura A.15 - a) Posición del sol a las 07:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 08:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	133
Figura A.16 - a) Posición del sol a las 09:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 10:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	134
Figura A.17 - a) Posición del sol a las 11:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 12:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	135
Figura A.18 - a) Posición del sol a las 13:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 14:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	136
Figura A.19 - a) Posición del sol a las 15:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile. b) Posición del sol a las 16:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	137
Figura A.20 - Posición del sol a las 15:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).	138

Figura A.21 - Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en la orientación oriente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	139
Figura A.22 - Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en la orientación norte de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	140
Figura A.23 - Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en la orientación poniente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 - Coordenadas geográficas de Santiago. Elaboración propia.	45
Tabla 3.2 - Clasificación climática de Köppen para Santiago. Elaboración propia en base a Rioseco & Tesser (s. f.).	45
Tabla 3.3 - Horas con mayor radiación global horizontal en Santiago de Chile en los cambios de estaciones. Elaboración propia en base a Milne (2014).	54
Tabla 4.1 - Vistas del prototipo de muro MT-L. Elaboración propia.	59
Tabla 4.2 - Vistas del prototipo de muro MP-RV. Elaboración propia.	62
Tabla 4.3 - Vistas del prototipo de muro MP-RH. Elaboración propia.	64
Tabla 4.4 - Vistas del prototipo de muro MP-RHV. Elaboración propia.	66
Tabla 4.5 - Vistas del prototipo de muro ME-FO. Elaboración propia.	69
Tabla 4.6 - Vistas del prototipo de muro ME-FN-V01. Elaboración propia.	71
Tabla 4.7 - Vistas del prototipo de muro ME-FN-V02. Elaboración propia.	73
Tabla 4.8 - Vistas del prototipo de muro ME-FP. Elaboración propia.	75
Tabla 5.1 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MT-L en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	78
Tabla 5.2 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RV en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	80
Tabla 5.3 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RH en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	82

Tabla 5.4 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RHV en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	84
Tabla 5.5 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FO vs. MT-L en la orientación oriente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	86
Tabla 5.6 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V01 vs. MT-L en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	88
Tabla 5.7 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V02 en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	90
Tabla 5.8 - 93Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FP en la orientación poniente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	93
Tabla 6.1 - 96Información técnica de impresión 3D del día 1 al 3. Elaboración propia.....	96
Tabla 6.2 - Información técnica de impresión 3D del día 4. Elaboración propia.....	97
Tabla 6.3 - Información técnica de impresión 3D del día 5 al 7. Elaboración propia.....	98
Tabla 6.4 - Información técnica de impresión 3D del día 8 al 12. Elaboración propia.....	99
Tabla 6.5 - Vista del prototipo de muro impreso MT-L. Elaboración propia.	100
Tabla 6.6 - Vista del prototipo de muro impreso MP-RV. Elaboración propia.	101
Tabla 6.7 - Vista del prototipo de muro impreso MP-RH. Elaboración propia.	102
Tabla 6.8 - 103Vista del prototipo de muro impreso MP-RHV. Elaboración propia.	103
Tabla 6.9 - Vista del prototipo de muro impreso ME-FO. Elaboración propia.	104
Tabla 6.10 - 105Vista del prototipo de muro impreso ME-FP. Elaboración propia.....	105
Tabla 7.1 - Resultados comparativos de los prototipos de muros evolutivos versus el prototipo de muro teórico liso. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	108
Tabla A.1 - Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	123
Tabla A.2 - Horario de las orientaciones en el solsticio de invierno en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	123
Tabla A.3 - Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	132

Tabla A.4 - Horario de las orientaciones en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	132
Tabla A.5 - Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	142
Tabla A.6 - Horario de las orientaciones en el solsticio de verano en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).	142
Tabla B.1 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MT-L (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	143
Tabla B.2 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	144
Tabla B.3 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	145
Tabla B.4 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MT-L (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	146
Tabla B.5 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	147
Tabla B.6 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	148
Tabla B.7 - Irradiación solar del muro MT-L en el solsticio de invierno en la orientación poniente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	148
Tabla B.8 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	149
Tabla B.9 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	150
Tabla B.10 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	151
Tabla B.11 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	152

Tabla B.12 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	153
Tabla B.13 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	154
Tabla B.14 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	155
Tabla B.15 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	156
Tabla B.16 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	157
Tabla B.17 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	157
Tabla B.18 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	158
Tabla B.19 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	159
Tabla B.20 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	160
Tabla B.21 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	161
Tabla B.22 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	162
Tabla B.23 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	163
Tabla B.24 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	164
Tabla B.25 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	164

Tabla B.26 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017)....	165
Tabla B.27 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	166
Tabla B.28 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	167
Tabla B.29 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017). ...	168
Tabla B.30 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	169
Tabla B.31 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	170
Tabla B.32 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	171
Tabla B.33 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	172
Tabla B.34 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	173
Tabla B.35 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017). ..	173
Tabla B.36 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	174
Tabla B.37 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	175
Tabla B.38 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	176
Tabla B.39 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	177

Tabla B.40 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	178
Tabla B.41 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017)..	179
Tabla B.42 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	180
Tabla B.43 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	181
Tabla B.44 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017)..	182
Tabla B.45 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).....	183
Tabla B.46 - Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	184
Tabla B.47 - Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	184
Tabla B.48 - Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	185

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MT-L en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	78
Gráfico 5.2 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo muro MP-RV en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	80
Gráfico 5.3 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RV en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	82
Gráfico 5.4 - 84Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RV en tres orientaciones. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	84
Gráfico 5.5 - 86Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FO vs. MT-L en la orientación oriente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	86
Gráfico 5.6 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V01 vs. MT-L en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	88
Gráfico 5.7 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V02 en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	90
Gráfico 5.8 - Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FP en la orientación poniente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	93
Gráfico 7.1 - Porcentaje de reducción de la irradiación solar acumulada mensual de los prototipos de muros evolutivos. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).	109

1. Introducción

La presente investigación experimental y cuantitativa se enfoca en la comparación entre muros con relieves geométricos y muros lisos impresos en 3D. Ante la creciente escasez de vivienda y la crisis climática, explorar alternativas de construcción sostenibles es sumamente importante. Esta propuesta tiene como objetivo evaluar la irradiación solar acumulada en tres orientaciones en Santiago de Chile (ver Figura 1). A través de simulaciones solares se busca cuantificar la relación entre las formas geométricas de los relieves y la radiación solar disponible.

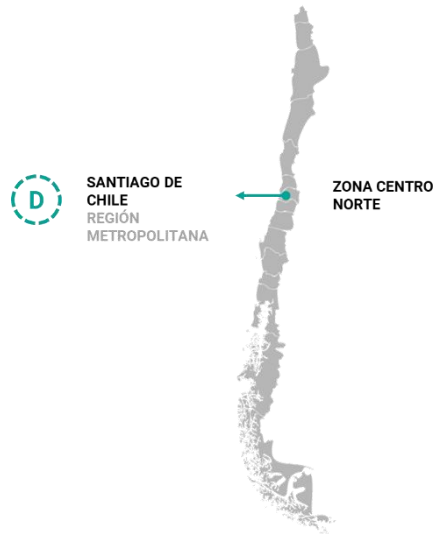


Figura 1

Esquema de la ciudad seleccionada para el estudio. Elaboración propia.

1.1. Motivación

Esta investigación nace del interés por explorar cómo el diseño geométrico puede contribuir de forma efectiva al desempeño térmico pasivo de los edificios, en particular en climas como el de Santiago de Chile, donde la exposición solar es intensa durante gran parte del año. En un contexto de crisis climática y escasez de recursos, resulta esencial proponer estrategias arquitectónicas que reduzcan la carga térmica sin recurrir a sistemas activos de climatización. Además, la motivación también responde a la necesidad de integrar herramientas digitales de diseño y simulación en el desarrollo de soluciones adaptadas al entorno, utilizando la forma arquitectónica como mecanismo de control solar.

1.2. Identificación del problema

A pesar de la existencia de tecnologías de control solar, muchas de estas son costosas, artificiales o de difícil mantenimiento, por lo que, entonces existe una necesidad de desarrollar estrategias geométricas pasivas capaces de reducir la captación solar mediante el diseño mismo de la forma, sin requerir mecanismos adicionales. Debido a esto, el problema abordado es cómo lograr esa reducción de irradiación solar acumulada a través de muros impresos en 3D, utilizando geometría adaptativa como herramienta principal.

1.3. Campo de aplicación

Los resultados obtenidos pueden ser aplicados en la construcción de viviendas sociales, edificios de bajo consumo energético o espacios públicos expuestos al sol, especialmente en zonas con climas cálidos y secos, como lo es Santiago de Chile. Además, esta metodología puede ser replicada en procesos de enseñanza, prototipado arquitectónico y fabricación digital con materiales de ensayo como la arcilla.

CAPÍTULO 01. Marco teórico

2. Estado del arte

2.1. Integración de impresión 3D en la construcción

La tecnología de construcción en impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, es un proceso en el cual los materiales se depositan capa por capa para crear estructuras complejas a partir de un modelo tridimensional (Hossain et al., 2020). Esta técnica ha revolucionado la industria de la construcción, ya que, según Sakin & Kiroglu (2017) tiene ventajas como la reducción de los costos, la eficiencia en el tiempo de construcción, la disminución del impacto ambiental, y, además, la disminución de accidentes y muertes en la obra. Asimismo, brinda beneficios como la disminución de residuos de los materiales, la reducción del costo de la mano de obra y el adelanto del proceso de su producción (Hossain et al., 2020). Este método de construcción se realiza con softwares de modelación 3D, los cuales permiten la fabricación de elementos estructurales y arquitectónicos sin la necesidad de utilizar moldes, a diferencia de los métodos tradicionales de construcción en hormigón (Le et al., 2012).

La industria de la construcción convencional se ha enfrentado a desafíos tales como; aumentar la eficiencia en la infraestructura, la sostenibilidad, la calidad en la construcción, la reducción de los plazos de entrega y del ciclo de vida de los materiales. De acuerdo con Sakin & Kiroglu (2017) estos desafíos se pueden abordar a través de la colaboración y comunicación de los profesionales a cargo del proyecto. Si se utiliza la metodología de modelado de información de la construcción (BIM) en la construcción de impresión 3D, se puede facilitar el proceso de diseño, generando soluciones más eficientes, reduciendo los errores en la coordinación, estimando los costos de una manera más rápida, y reduciendo los tiempos de construcción (Sakin & Kiroglu, 2017). Además, la impresión 3D de los elementos de construcción de las viviendas es menos costoso que los métodos de construcción tradicionales que existen en la actualidad, puesto que, no es necesario el almacenamiento y el transporte de los materiales, ya que, se suelen imprimir los componentes in situ (Sakin & Kiroglu, 2017).

La tecnología de construcción en impresión 3D en Chile ha presentado avances en el desarrollo de pruebas de impresión de muros con refuerzos de acero integrados, con el objetivo de lograr capacidades resistentes sísmicas, las cuales son requisitos fundamentales para adaptar esta nueva tecnología y cumplir con la normativa de construcción en Chile (García, 2020).

La Universidad del Bío-Bío (UBB) realizó la primera construcción de hormigón impreso 3D en Chile, una cabina de vigilancia (ver Figura 1.1), conformada por muros de hormigón impreso. El tiempo de construcción de los muros fue de 40 minutos cada uno. Además, cuenta con la integración de ventanas, refuerzos, techumbre, aislación térmica y revestimientos (ICH, 2024).



Figura 1.1

Cabina de vigilancia en impresión 3D (ICH, 2024).

2.2. Integración de impresión 3D en la construcción de muros

Los autores Chamatete & Yalçinkaya (2024) realizaron un estudio experimental con la finalidad de desarrollar tres estructuras de celosías (ver Figura 1.2), con el mismo espesor y longitudes de contorno, vacíos y porcentajes de aislamiento similares. Sobre la base de los resultados obtenidos se concluyó que el área vacía de las celosías afecta el rendimiento térmico de las envolventes 3D en condiciones de aire estancado. Mientras que, el ancho del filamento, la longitud de la banda y el área de intersección entre las bandas afectan el comportamiento térmico cuando los vacíos se ocupan con materiales aislantes, debido a los puentes térmicos. Es por esto por lo que, el uso efectivo del aislamiento tuvo una variación entre el 26 y el 44%, debido a los puentes térmicos.

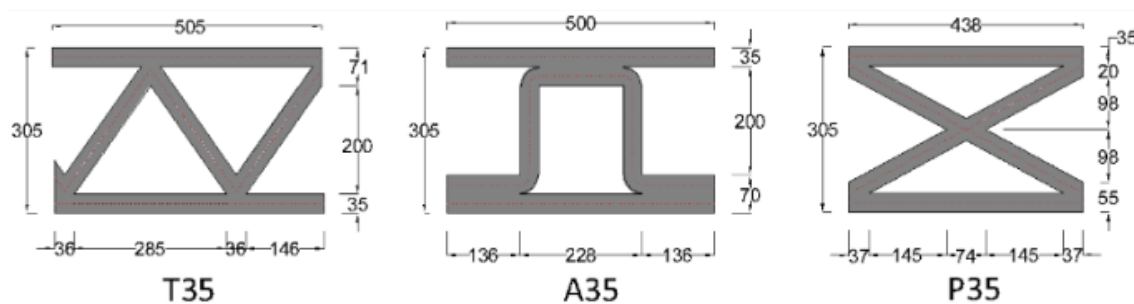


Figura 1.2

Tipos de pared (ancho de filamento de 35 mm) para el análisis paramétrico (dimensiones en mm) (Chamatete & Yalçinkaya, 2024).

El estudio experimental de los autores Dziura et al. (2023) consistió en el diseño de ocho soluciones de patrones de relleno (ver Figura 1.3), fabricados con los mismos materiales (hormigón y espuma PUR) y con las mismas dimensiones externas (1000 x 700 x 430 mm), pero con la diferencia en el patrón de relleno, a los cuales se les realizaron simulaciones informáticas de conductividad térmica con el Método de Elementos Finitos (MEF), como también mediciones de la conductividad térmica de las muestras. A partir de los resultados obtenidos por los autores, se concluyó que la geometría interna del tabique tiene un impacto en el aislamiento térmico. Además, el concepto geométrico de las soluciones se diseñó con la finalidad de extender las conexiones entre las superficies internas y externas del tabique para maximizar la longitud del puente térmico, y, por consiguiente, mejorar el aislamiento térmico de la pared.

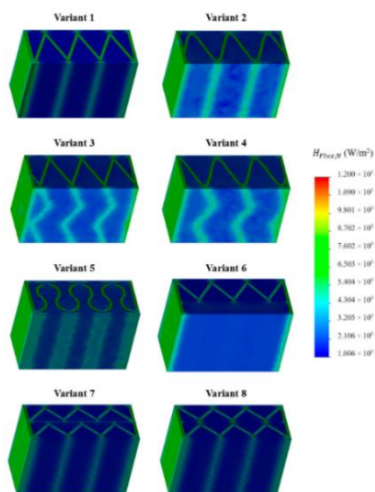


Figura 1.3

Resultados de la simulación térmica del flujo de calor para variantes individuales de las muestras ensayadas, asumiendo que el material que soporta la carga era PLA (Dziura et al., 2023).

2.3. Evaluación del rendimiento de la radiación solar de fachadas

Los autores EL-Mahdy & Ali (2024) realizaron una investigación enfocada en evaluar el rendimiento de la radiación solar en paredes impresas en 3D no tradicionales (ver Figura 1.4), las cuales se diseñaron para maximizar el sombreado propio y disminuir la exposición solar. La metodología consistió en cuatro etapas; en la primera etapa, se realizaron pruebas de extrusión e impresión del material. Luego, se exploraron distintas geometrías para optimizar al máximo el sombreado propio. Durante la tercera etapa, se fabricaron los muros impresos en 3D, y, por último, se evaluó su rendimiento frente a la radiación solar. A partir de los resultados, se concluyó que, al haber una gran cantidad de relieves y mientras mayor sea su ángulo de inclinación, más se esparcía el calor por la fachada. Sin embargo, los autores concluyeron que se necesita más investigación para mejorar los muros de auto-sombreado en una implementación a gran escala.

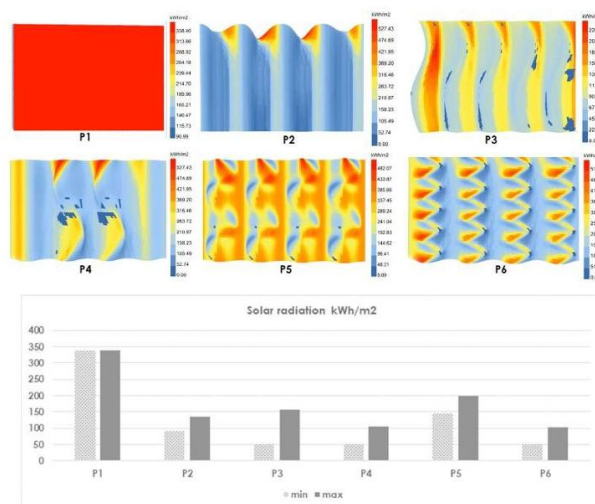


Figura 1.4

Comparación del análisis de la radiación solar de los muros (EL-Mahdy & Ali, 2024).

El estudio de los autores Dervishaj & Gudmundsson (2024) propone un flujo de trabajo de diseño paramétrico para fachadas solares (ver Figura 1.5), las cuales se pueden adaptar al contexto, siendo reutilizables en entornos urbanos cambiantes. La metodología de trabajo consistió en la aplicación de simulaciones de radiación solar para ajustar los módulos de fachada según la exposición solar y las condiciones específicas del contexto urbano. Además, se utilizó el “Solar Circularity Indicator” (SCI) para evaluar la reutilización de módulos. Los resultados muestran que las fachadas diseñadas lograron un mejor aprovechamiento de la luz natural y reducción de deslumbramiento, además de adaptarse de manera eficaz a diferentes escenarios urbanos.

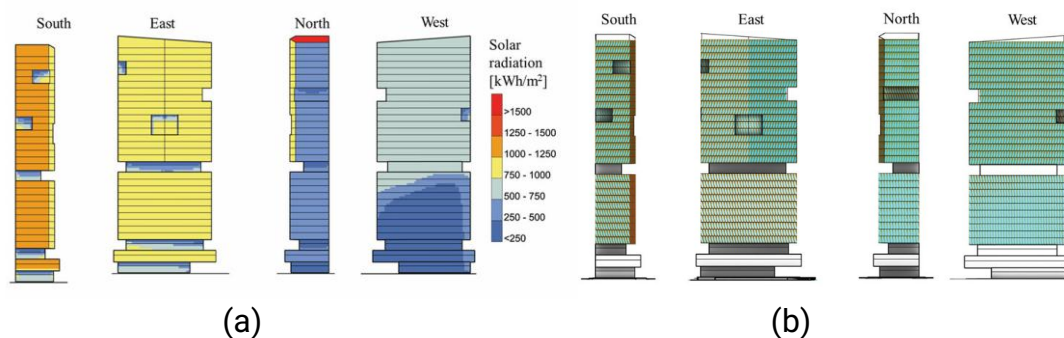


Figura 1.5

- a) Radiación solar en fachadas. b) Diseño de fachada con geometría de panel informada por los resultados de radiación (Dervishaj & Gudmundsson, 2024).

En la investigación de los autores Barbero-Barrera et al. (2024) se analiza el impacto de las protecciones solares en superficies opacas, evaluando su influencia en invierno y verano mediante ensayos de termografía infrarroja (ver Figura 1.6). Los resultados muestran que reducen la ganancia térmica hasta un 60% en verano y mejoran la retención de calor en invierno. Además, se destaca que los datos de temperatura solar tienden a sobreestimar los flujos térmicos, mientras que la termografía infrarroja se presenta como una herramienta precisa para evaluar el rendimiento térmico.

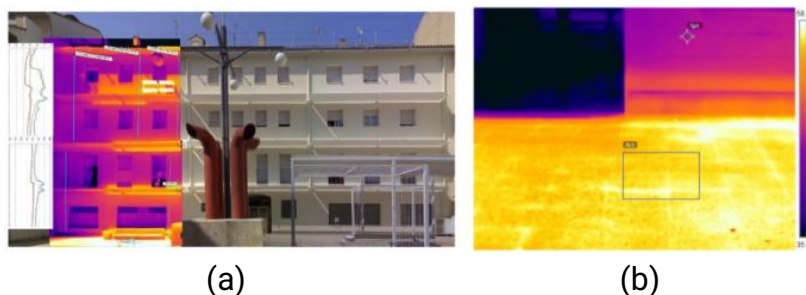


Figura 1.6

- a) Fotografía, imagen infrarroja y temperaturas en verano a las 16:30 h de toda la fachada; b) detalle de la termografía IR de la fachada cerrada al pavimento (Barbero-Barrera et al. , 2024).

CAPÍTULO 02. Alcances de la investigación

3. Pregunta de investigación

- ¿Cómo se puede diseñar la geometría de los cordones externos en muros impresos en 3D para **reducir la irradiación solar acumulada** en las fachadas con orientación oriente, norte y poniente en Santiago de Chile?

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

- **Diseñar y fabricar** prototipos de muros impresos en 3D con distintas configuraciones geométricas de relieve, con el fin de **evaluar su irradiación solar acumulada** en las orientaciones oriente, norte y poniente de Santiago de Chile, y desarrollar prototipos de muros impresos en 3D adaptados a la reducción de la energía solar acumulada.

4.2. Objetivos específicos

- **Diseñar y fabricar** prototipos de muros impresos en 3D con relieves geométricos verticales, horizontales y combinados.
- **Cuantificar** la irradiación solar acumulada en prototipos de muros impresos en 3D con distintos relieves geométricos comparándolos con un muro de superficie lisa.
- **Establecer** geometrías de muros impresos en 3D adaptadas a cada orientación, con el fin de reducir la irradiación solar acumulada.

5. Hipótesis

La **geometría de los cordones externos de muros impresos en 3D** puede ser diseñada mediante patrones de relieve que interrumpen y dispersan la radiación solar incidente en las fachadas orientadas al oriente, norte y poniente en Santiago de Chile, logrando una **reducción significativa** de la **energía solar acumulada** en comparación con un muro de superficie lisa.

6. Metodología

La presente investigación de tipo experimental y cuantitativa tiene como objetivo diseñar y fabricar prototipos de muros impresos en 3D, adaptando su geometría para el clima de Santiago de Chile, y comparar la irradiación solar acumulada entre un muro liso y muros con relieves geométricos verticales, horizontales y combinados. La metodología propuesta se divide en las siguientes etapas (ver Figura 2.1):

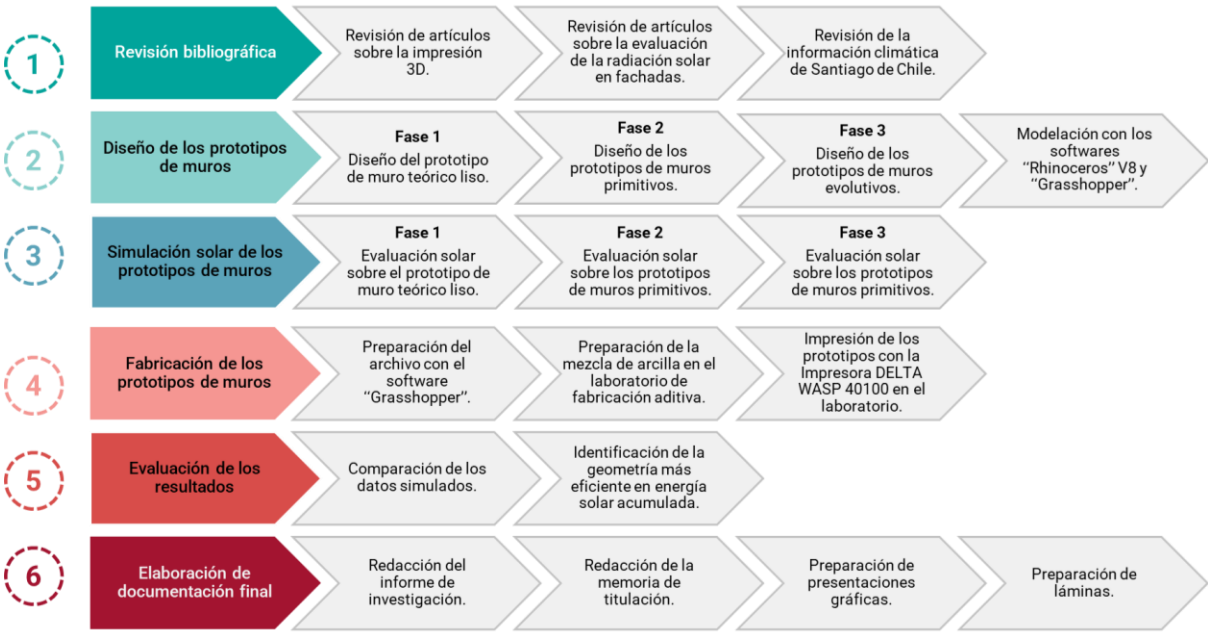


Figura 2.1
Esquema de la metodología de la investigación. Elaboración propia.

6.1. Etapa 1. Revisión bibliográfica de la impresión 3D

La primera etapa de la investigación, como se observa en la Figura 2.2, consiste en la revisión bibliográfica y recopilación de datos desde fuentes primarias, tales como: artículos publicados en revistas especializadas sobre los avances en la integración de impresión 3D en la construcción de muros, y la evaluación de la radiación solar en fachadas. Además, se revisará la información climática sobre la ciudad de Santiago de Chile (Región Metropolitana), con las siguientes herramientas; “ClimateConsultant” (Milne, 2014) y “AndrewMarsh”; “2D Data View” (Marsh, 2023a) y “3D Sun-Path” (Marsh, 2023b).

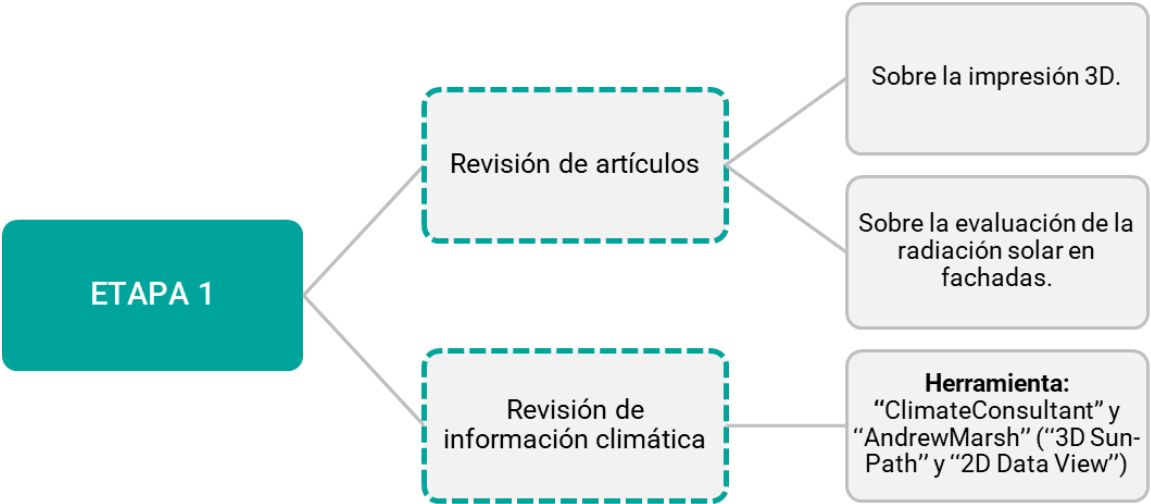


Figura 2.2
Esquema de la ‘Etapa 1: Revisión bibliográfica de la impresión 3D’. Elaboración propia.

6.2. Etapa 2. Diseño de los prototipos de muros

La segunda etapa de la metodología se divide en tres fases (ver Figura 2.3), con la finalidad de generar diferentes configuraciones geométricas para el análisis comparativo de la irradiación solar acumulada en muros impresos en 3D.

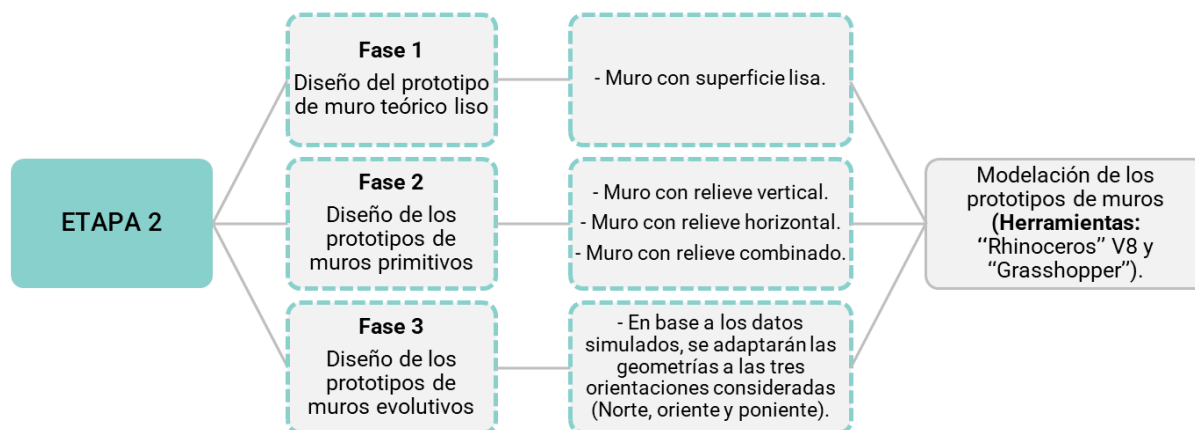


Figura 2.3

Esquema de la 'Etapa 2: Diseño de los prototipos de muros'. Elaboración propia.

6.2.1. Fase 1. Diseño del prototipo de muro teórico liso

La primera fase de esta etapa consiste en el diseño de un prototipo de muro con superficie lisa, que servirá como referencia para comparar la irradiación solar acumulada con respecto a los muros con relieves geométricos. El modelo se diseñará como un prisma rectangular a escala 1:10 o 1:5, con dimensiones aproximadas de 50 mm de altura, 100 mm de ancho y 150 mm de espesor, su modelación 3D (ver Figura 2.4) se realizará con las herramientas “Rhinceros” versión ocho (McNeel, 1993) y “Grasshopper” (McNeel, 2007).



Figura 2.4

Esquema de la modelación 3D de los prototipos de muros. Elaboración propia.

6.2.2. Fase 2. Diseño de los prototipos de muros primitivos

La segunda fase consiste en la realización del diseño de tres prototipos de muros primitivos, cada prototipo presentará una configuración geométrica distinta; un muro con relieve vertical, un muro con relieve horizontal y un muro con relieve combinado (horizontal y vertical). Estos muros se desarrollarán también con “Rhinceros” versión ocho (McNeel, 1993) y “Grasshopper” (McNeel, 2007), manteniendo la escala experimental (1:10 y 1:5) y las dimensiones base de 50 mm de altura, 100 mm de ancho y 150 mm de espesor.

6.2.3. Fase 3. Diseño de los prototipos de muros evolutivos

En la tercera fase, se realizará el diseño de prototipos de muros adaptados para la reducción de la energía solar acumulada, tomando como base los resultados obtenidos en las simulaciones solares realizadas en la etapa tres. A partir del análisis comparativo entre los muros con relieves verticales, horizontales, combinados y el muro liso de referencia, se identificará cuál configuración geométrica resulta más eficiente en cada una de las tres orientaciones analizadas: norte, oriente y poniente. En base a las conclusiones, se desarrollarán tres nuevos prototipos, cada uno adaptado específicamente a su orientación correspondiente, integrando los patrones geométricos que hayan demostrado mayor reducción de irradiación solar acumulada durante los distintos momentos del año (solsticios y equinoccios). Cada muro será nuevamente modelado en “Rhinceros” versión ocho (McNeel, 1993), con ayuda de “Grasshopper” (McNeel, 2007), utilizando la escala 1:2.5 y las dimensiones aproximadas de 50 mm de alto, 100 mm de ancho y 150 mm de espesor. Las nuevas geometrías podrán incorporar variaciones en la profundidad, ángulo o frecuencia del relieve, en función de la eficacia demostrada en la etapa de simulación.

6.3. Etapa 3. Simulación solar de los prototipos de muros

La tercera etapa de la investigación se divide en tres fases (ver Figura 2.5), enfocadas en la evaluación comparativa de la irradiación solar acumulada en los distintos prototipos de muros desarrollados. Estas fases permitirán analizar el comportamiento solar de un muro liso teórico, de los muros primitivos con relieves geométricos, y de los muros evolutivos adaptados a cada orientación.

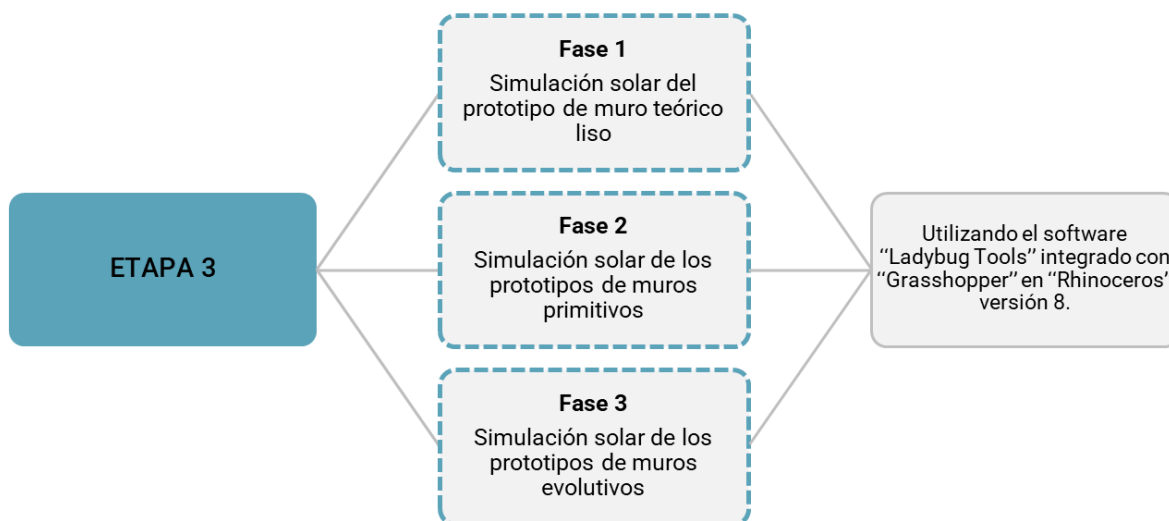


Figura 2.5

Esquema 'Etapa 3: Simulación solar de los prototipos de muros'. Elaboración propia.

6.3.1. Fase 1. Simulación solar del prototipo de muro teórico liso

En la primera fase de esta etapa se evaluará la irradiación solar acumulada mensual sobre la superficie del prototipo de muro teórico liso, el cual servirá como referencia para comparar los resultados en los siguientes prototipos con relieves geométricos. Se realizarán simulaciones detalladas utilizando el software “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017) integrado con “Grasshopper” (McNeel, 2007) en “Rhinceros” versión ocho (McNeel, 1993).

Primero, se comenzará con la importación de un archivo climático en formato EPW (“EnergyPlus Weather File”) correspondiente a Santiago de Chile, el cual contiene datos meteorológicos como radiación solar y temperatura, fundamentales para la simulación. A partir de este archivo, se simulará la incidencia solar en las tres orientaciones consideradas: norte, oriente y poniente, durante tres fechas representativas del año: solsticio de invierno (20 de junio), equinoccio de primavera (22 de septiembre) y solsticio de verano (21 de diciembre), enfocándose en las horas de mayor radiación solar global horizontal. Luego, “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017) calculará la irradiación solar incidente sobre cada plano de la superficie del muro considerando el ángulo de incidencia y la duración de exposición solar a lo largo del día. Estos valores se integrarán en el tiempo para obtener la energía acumulada en kilovatios-hora por metro cuadrado [kWh/m^2] para cada relieve, que servirá como punto de comparación para las siguientes simulaciones. Posteriormente, la irradiación solar acumulada diaria obtenida para cada fecha representativa (solsticios y equinoccio) y para cada orientación, fue multiplicada por el número de días del mes correspondiente, permitiendo estimar la irradiación solar acumulada mensual para cada estación a partir de un único día representativo, reduciendo el tiempo de cálculo sin afectar la precisión de los resultados.

6.3.2. Fase 2. Simulación solar de los prototipos de muros primitivos

En la segunda fase se evaluará la irradiación solar acumulada en los tres prototipos de muros primitivos: con relieves verticales, horizontales y combinados, modelados previamente en la etapa dos. Cada uno será simulado en las tres orientaciones consideradas en Santiago de Chile: norte, oriente y poniente. El procedimiento seguirá los mismos pasos definidos en la fase uno: uso del archivo EPW, configuración de las fechas clave (solsticios y equinoccio), y cálculo de la energía acumulada mediante “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017). Esto permitirá identificar las configuraciones geométricas más eficientes en cuanto a reducción de irradiación solar acumulada, en comparación con el muro liso de referencia.

6.3.3. Fase 3. Simulación solar de los prototipos de muros evolutivos

En esta última fase se realizará la simulación solar de los tres prototipos de muros evolutivos desarrollados en la etapa dos, cada uno adaptado a una orientación específica (norte, oriente y poniente). Luego, se empleará el mismo archivo EPW y se simularán los tres momentos del año ya mencionados. Los modelos serán evaluados por áreas de superficie expuesta y se calculará la energía solar acumulada. Los resultados serán comparados con: los prototipos primitivos (vertical, horizontal y combinado) y el muro teórico liso de referencia, lo que permitirá comprobar si los nuevos diseños efectivamente presentan una mejora en la reducción de irradiación solar acumulada, y en qué medida cada geometría adaptada responde mejor a su orientación y condiciones climáticas. Finalmente, los resultados se visualizarán a través de mapas solares 3D y gráficos comparativos, facilitando la lectura y comparación del rendimiento solar entre las distintas propuestas.

6.4. Etapa 4. Fabricación de los prototipos de muros

La cuarta etapa de la presente investigación (ver Figura 2.6), consiste en la preparación del archivo para impresión, elaborando los protocolos en “Grasshopper” (McNeel, 2007), y se convertirá en un archivo de instrucciones (“G-code”), optimizando la impresión de cada capa de las muestras. A continuación, se preparará la mezcla de arcilla con agua, y luego, se realizará la impresión 3D la impresora DELTA WASP 40100 en el Laboratorio de Fabricación Aditiva de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM), que permitirá la fabricación de los prototipos a escala 1:10, 1:5 y 1:2.5 (ver Figura 2.7).

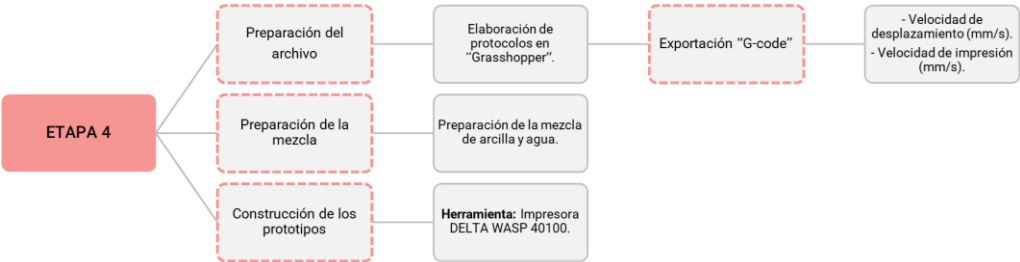


Figura 2.6

Esquema ‘Etapa 6: Fabricación de los prototipos de muros’. Elaboración propia.

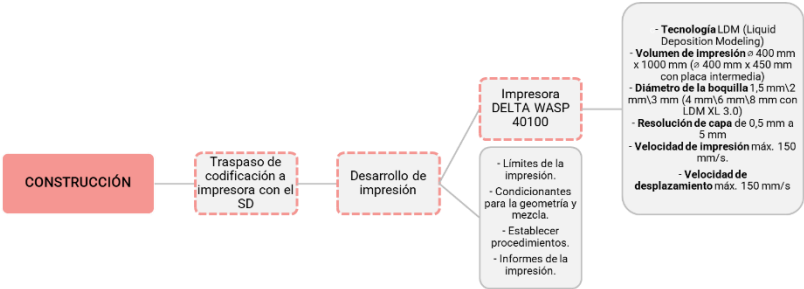


Figura 2.7

Esquema de la construcción de los prototipos de muros. Elaboración propia.

6.5. Etapa 5. Evaluación de los resultados

La quinta etapa de la metodología (ver Figura 2.8) consiste en la evaluación comparativa de los resultados obtenidos en las simulaciones solares de los prototipos de muros, con el objetivo de determinar la efectividad real de las geometrías adaptadas en la reducción de la irradiación solar acumulada, en relación con los prototipos primitivos y el muro liso de referencia. Para ello, se analizarán los datos obtenidos de las simulaciones realizadas con “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017), comparando los valores de irradiación solar acumulada (kWh/m^2) para cada orientación (norte, oriente y poniente) y para cada estación representativa del año: solsticio de invierno, equinoccio de primavera y solsticio de verano. Los resultados se organizarán en: tablas comparativas, que incluirán valores numéricos de irradiación acumulada por superficie; gráficos de barras, para visualizar tendencias y diferencias entre prototipos; mapas de radiación solar en 3D, que mostrarán la distribución espacial de la energía recibida en cada diseño. Finalmente, se identificarán las configuraciones geométricas más eficientes para cada orientación, reconociendo patrones que permitan reducir la energía solar sobre las fachadas.

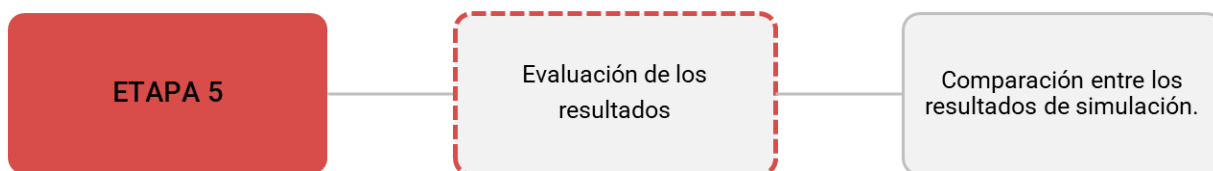


Figura 2.8

Esquema de la ‘Etapa 7: Evaluación de los resultados’. Elaboración propia.

6.6. Etapa 6. Elaboración de la documentación final

En esta última etapa (ver Figura 2.9) se consolidará toda la información obtenida a lo largo del proyecto en un documento final que incluirá los resultados, análisis y conclusiones del estudio. Este documento estará compuesto por: Introducción y justificación del proyecto, metodología detallada de cada etapa, resultados de las simulaciones solares, directrices de diseño propuestas, mediciones experimentales, conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones. Además, se desarrollarán láminas y material gráfico para la presentación final, incluyendo diagramas explicativos, mapas de radiación y fotografías de los prototipos impresos.

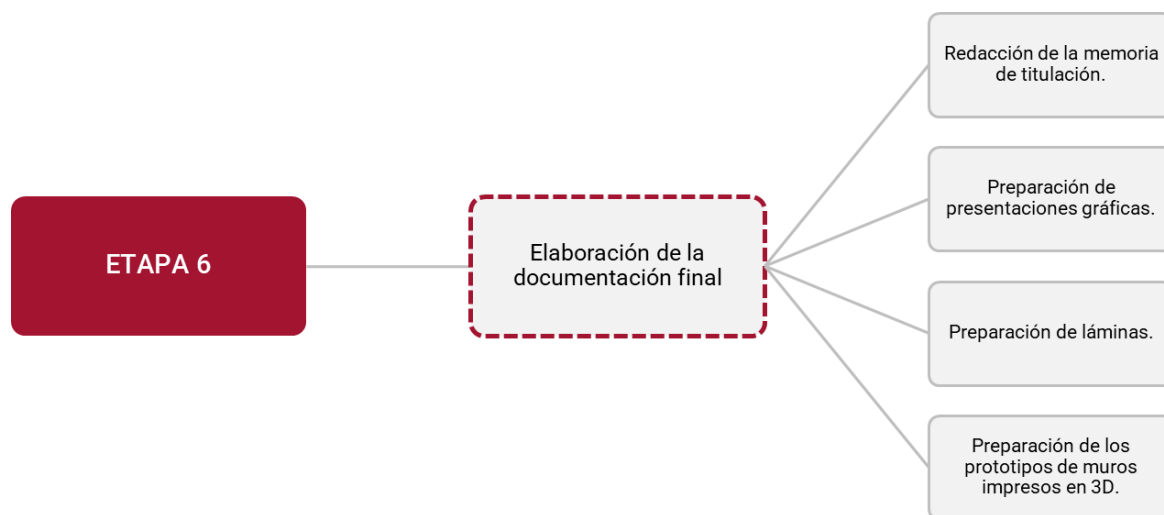


Figura 2.9

Esquema de la 'Etapa 8: Elaboración de la documentación final'. Elaboración propia.

CAPÍTULO 03. Revisión bibliográfica

7.1. Clima de Santiago de Chile (Región Metropolitana)

La localidad de Santiago de Chile, situada en las coordenadas geográficas: latitud -33,45694 y longitud -70,64827 (ver Tabla 3.1), presenta un clima templado caracterizado por veranos cálidos y secos, e inviernos fríos y lluviosos (ver Tabla 3.2), clasificado como Csb según Köppen (Rioseco & Tesser, s. f.). Las temperaturas varían notablemente entre estaciones, con veranos que alcanzan los 30°C e inviernos que pueden bajar a los 7°C. La lluvia se concentra principalmente en invierno, mientras que los veranos son áridos.

Tabla 3.1
Coordenadas geográficas de Santiago. Elaboración propia.

Ciudad	Coordenadas geográficas	
	Latitud	Longitud
Santiago de Chile	-33,45694	-70,64827

Tabla 3.2
Clasificación climática de Köppen para Santiago. Elaboración propia en base a Rioseco & Tesser (s. f.).

Clasificación climática de Köppen	
Ciudad	Santiago de Chile
Clasificación	Csb
Clima	Templado cálido con lluvias invernales.
Primera letra, en mayúscula (Grupo climático)	
Letra	C
Umbral térmico	La temperatura media del mes más frío es inferior a 18°C y
Clima	Templados: de lluvias estacionales y lluvias todo el año.
Formación de vegetación	Bosque templado y matorral.
Segunda letra, en minúscula (Particularidades pluviométricas)	
Letra	s
Características pluviométricas	La precipitación del mes más seco en verano es inferior a un tercio de la del mes más lluvioso de invierno.
Tercera letra, en minúscula (Particularidades térmicas)	
Letra	b
Características térmicas	La temperatura media del mes más cálido es inferior a los 22°C y, al menos, cuatro meses, con temperaturas medias que superan los 10°C.

8. Datos meteorológicos anuales de Santiago de Chile

La Figura 3.2 presenta los datos meteorológicos anuales de Santiago de Chile obtenidos desde un archivo EPW (“EnergyPlus Weather File”) con el software “2D Data View” de “Andrew Marsh” (Marsh, 2023a). En este gráfico se visualiza que la temperatura del bulbo seco presenta máximos durante los meses de verano, alcanzando valores superiores a los 30 °C, mientras que en invierno se registran temperaturas más bajas, con promedios cercanos a 5 °C. Además, la humedad relativa muestra un comportamiento inverso, siendo más elevada en invierno debido a la mayor frecuencia de precipitaciones. En cuanto a la radiación solar difusa y directa alcanza sus máximos en verano, coincidiendo con el mayor número de horas de sol. Por otra parte, la velocidad y dirección del viento se mantienen relativamente constantes durante el año, aunque con intensidades mayores en verano. Finalmente, la profundidad de precipitación se concentra en los meses de invierno, confirmando el carácter mediterráneo del clima local.

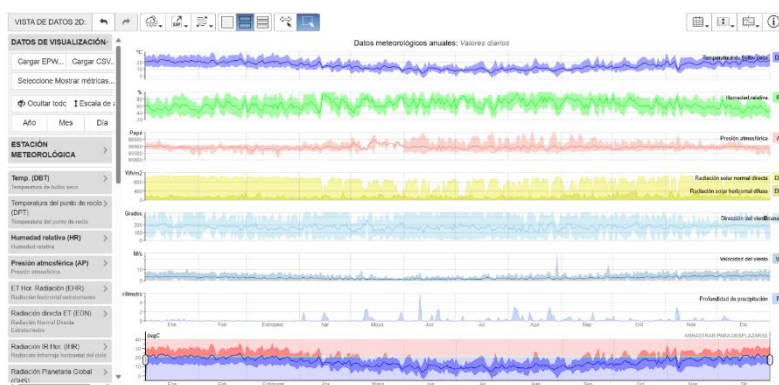


Figura 3.2

Datos meteorológicos anuales de Santiago de Chile (Marsh, 2023a).

9. Cambio de estaciones

El siguiente diagrama (ver Figura 3.3), identifica las tres fechas astronómicas clave que marcan el cambio de estaciones en Santiago de Chile: el solsticio de invierno (20 de junio), el equinoccio de primavera (22 de septiembre) y el solsticio de verano (21 de diciembre). Estas fechas permiten analizar el comportamiento solar y climático en momentos representativos del año, fundamentales para el desarrollo de estrategias de diseño bioclimático adaptadas a cada estación.



Figura 3.3

Fechas astronómicas clave que marcan el cambio de estaciones en Santiago de Chile.
Elaboración propia.

9.1. Solsticio de verano (21 de diciembre)

La Figura 3.4 muestra los datos de radiación solar correspondientes al solsticio de verano en Santiago de Chile, el 21 de diciembre. En esta fecha se alcanza el día más largo del año, con la mayor cantidad radiación solar normal directa, la cual alcanza un valor máximo cercano a 1100 [Wh/m²], especialmente en las horas del mediodía, lo que implica una alta exposición a la radiación en las fachadas con mayor orientación norte, mientras que, la radiación solar horizontal difusa llega aproximadamente a 100 [Wh/m²].

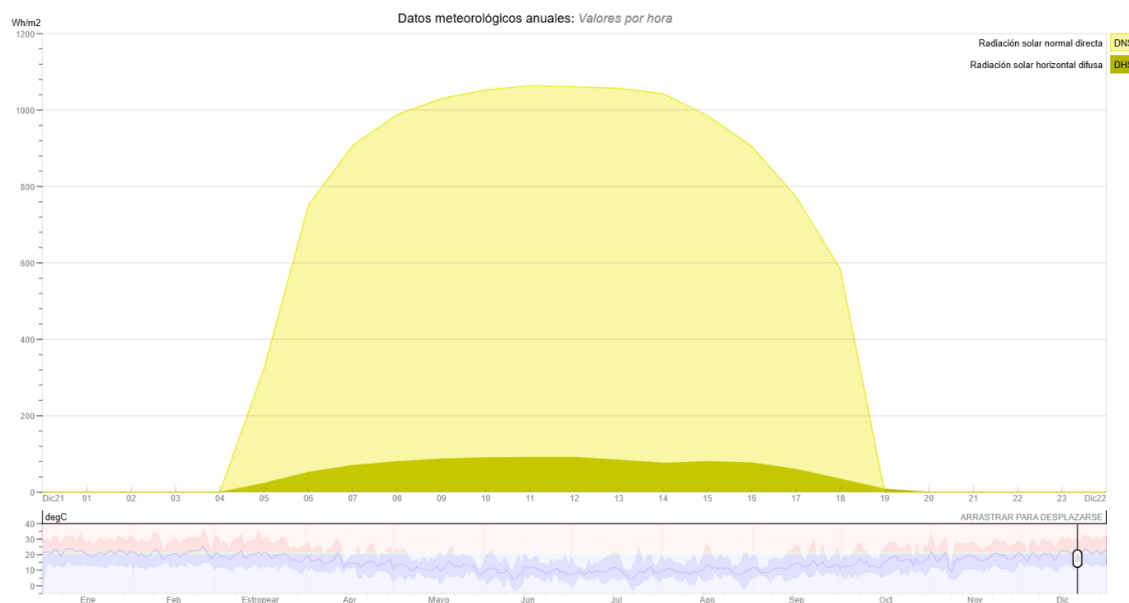


Figura 3.4

Radiación solar directa y difusa en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023a).

9.2. Solsticio de invierno (20 de junio)

Durante el solsticio de invierno, el 20 de junio (ver Figura 3.5), Santiago de Chile experimenta el día más corto del año, con un valor de radiación solar normal directa que disminuye considerablemente, alcanzando un valor cercano a 500 [Wh/m²], mientras que la radiación solar horizontal difusa se mantiene alrededor de 150 [Wh/m²], siendo mínima, especialmente en las horas de la mañana y últimas horas del día.

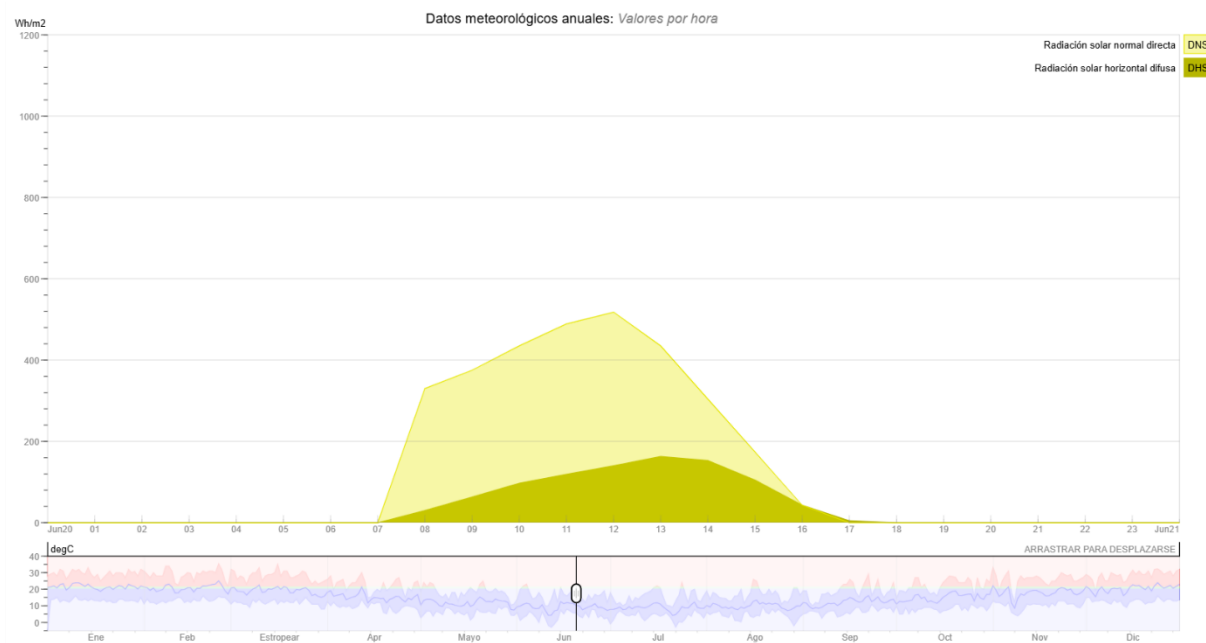


Figura 3.5

Radiación solar directa y difusa en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023a).

9.3. Equinoccio de primavera (22 de septiembre)

El equinoccio de primavera, que ocurre el 22 de septiembre (ver Figura 3.6), marca un momento de transición entre el invierno y el verano. Durante este día, el tiempo de luz solar es prácticamente igual al de la noche, y la radiación solar normal directa alcanza un valor máximo aproximado de 990 [Wh/m²], y la radiación solar horizontal difusa alcanza también alrededor de 100 [Wh/m²].

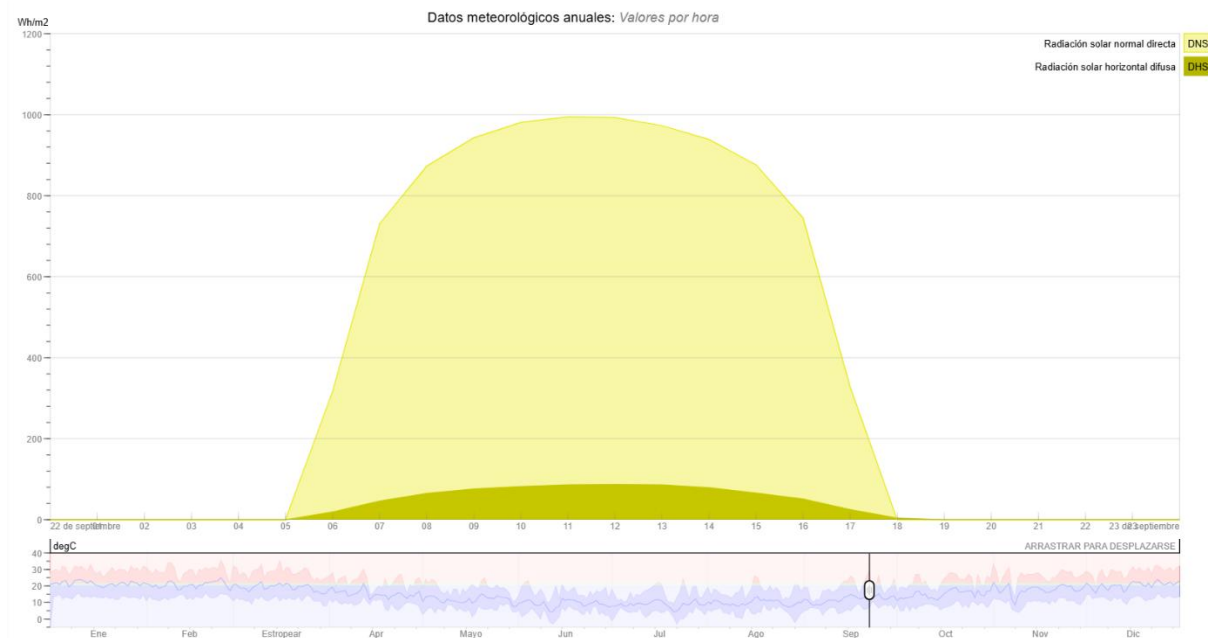


Figura 3.6

Radiación solar directa y difusa en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023).

10. Temperaturas medias y precipitaciones

El clima de Santiago tiene una mayor variabilidad (ver Figura 3.7), con veranos que alcanzan los 30°C e inviernos fríos de hasta 7°C (Meteoblue, 2024). Por lo que, los muros deben tener una buena capacidad de adaptación a los cambios estacionales, proporcionando aislamiento térmico en invierno y disipación de calor en verano. Santiago recibe un aproximado de 300 mm de lluvia al año, las cuales se concentran en invierno (Meteoblue, 2024). Debido a esto, los muros deben tener buena resistencia a la humedad y un diseño que permita la evacuación de agua para prevenir problemas de infiltración.

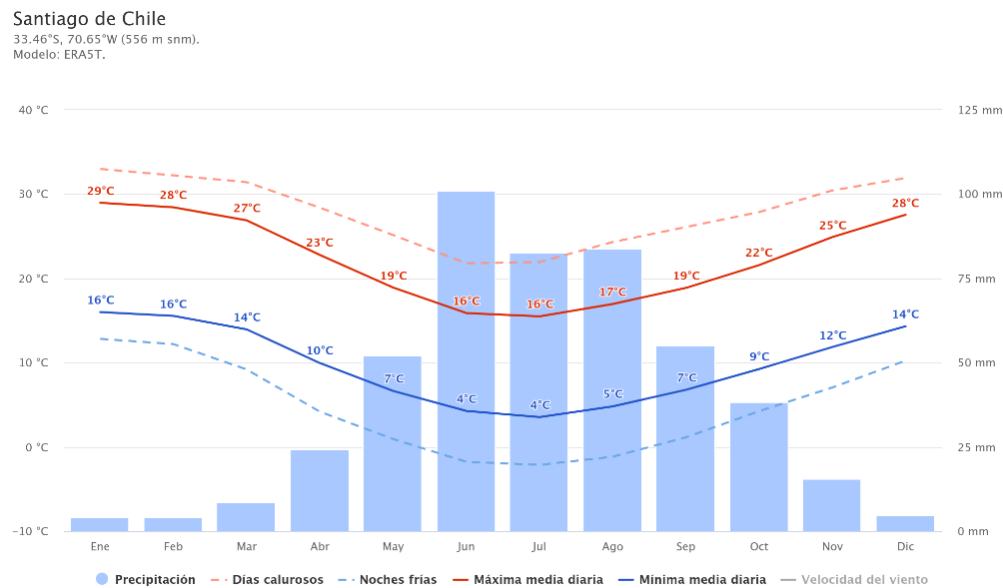
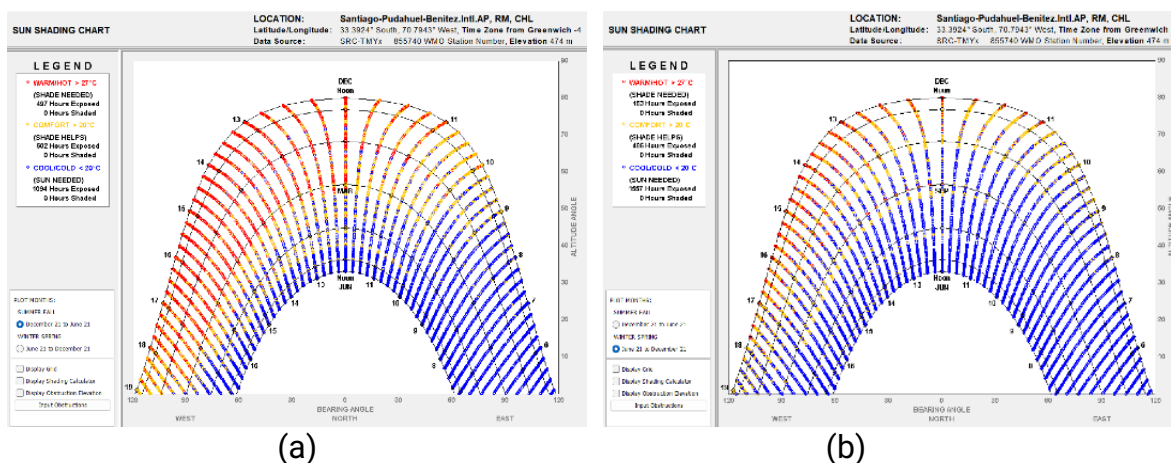


Figura 3.7

Gráfico de temperaturas medias y precipitaciones de Santiago (Meteoblue, 2024).

11. Protección solar

A partir de la Figura 3.8, se puede deducir que, el diseño geométrico de la fachada oriente de Santiago debe integrar relieves verticales que controlen el acceso del sol matutino y reduzcan el sobrecalentamiento. Mientras que, la fachada norte debe consistir en curvaturas horizontales que bloqueen el sol en verano, pero que permitan la entrada de calor en invierno. Por último, en la fachada poniente se deben integrar relieves verticales que disipen el calor vespertino.

**Figura 3.8**

- a) Gráfico de protección solar de Santiago de verano a otoño. b) Gráfico de protección solar de Santiago de invierno a primavera (Milne, 2014).

12. Gráfico horario

De acuerdo con la Figura 3.9 y la Tabla 3.3, en Santiago de Chile, las horas de mayor radiación solar global horizontal varían según la estación del año. Durante el solsticio de invierno (20 de junio), estas se concentran entre las 10:00 a.m. y las 14:00 p.m., mientras que en el equinoccio de primavera (22 de septiembre) ocurren entre las 08:00 a.m. y las 16:00 p.m. En el solsticio de verano (21 de diciembre), las horas de mayor radiación directa abarcan desde las 07:00 a.m. hasta las 17:00 p.m.

Este análisis permite acotar el rango horario para estudiar la incidencia de la radiación solar en los prototipos de muros impresos en 3D, enfocándose en los periodos de máxima exposición solar para optimizar el diseño de relieves geométricos que favorezcan el auto-sombreado y reduzcan la irradiación solar acumulada.

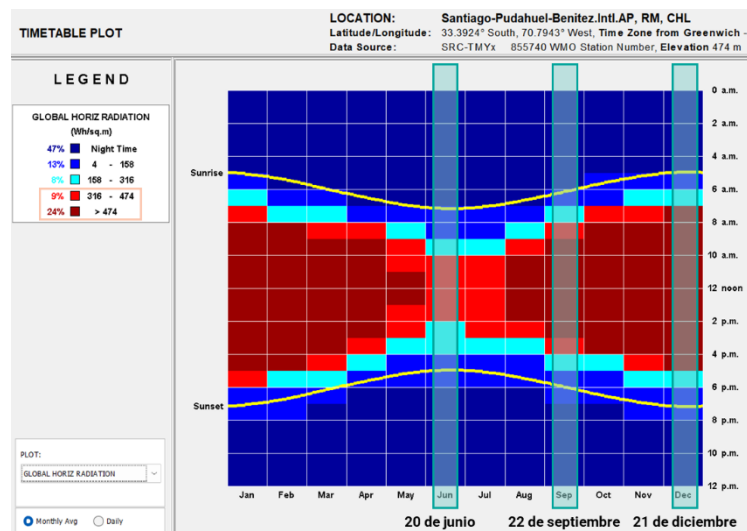


Figura 3.9

Gráfico horario de la radiación global horizontal de Santiago de Chile (Milne, 2014).

Tabla 3.3

Horas con mayor radiación global horizontal en Santiago de Chile en los cambios de estaciones. Elaboración propia en base a Milne (2014)

Santiago de Chile	
Cambios de estaciones	Radiación global horizontal ≥ 474 (Wh/sq.m)
Solsticio de invierno (20 de Junio)	10:00 AM A 14:00 PM
Equinoccio de primavera (22 de Septiembre)	8:00 AM A 16:00 PM
Solsticio de verano (21 de Diciembre)	7:00 AM a 17:00 PM

13. Ángulos de la posición solar

Para el diseño de los muros impresos en 3D, se analizaron los ángulos de azimuth (indica la dirección horizontal del sol con respecto al norte) y altitud solar (mide la altura del sol en el cielo sobre el horizonte), correspondientes a las horas de mayor radiación solar global horizontal durante el solsticio de invierno (20 de junio), el equinoccio de primavera (22 de septiembre) y el solsticio de verano (21 de diciembre). Los datos completos de estos ángulos se encuentran desde la Figura A.1 a la Figura A.23 y la Tabla A.1 a la Tabla A.6 del Anexo A. Esta información es relevante para definir la orientación y la geometría de los relieves en los muros, con el objetivo de maximizar las áreas de sombra proyectadas sobre la propia superficie del muro. Al diseñar los relieves basados en estas variables, se busca optimizar el auto-sombreado en cada orientación de fachada (norte, oriente y poniente) en Santiago de Chile, reduciendo así la irradiación solar acumulada y mejorando el rendimiento bioclimático de las fachadas.

13.1. Ángulo de altitud mayor a 60°

Cuando el ángulo de altitud solar supera los 60° (ver Figura 3.10), existe una mayor posibilidad de proteger las superficies del muro mediante relieves o voladizos geométricos. Este supuesto se basa en que, a medida que el sol se posiciona más alto en el cielo, las sombras proyectadas por los relieves se vuelven más efectivas para bloquear la radiación solar. Sin embargo, el diseño está limitado por las capacidades técnicas de la impresión 3D, ya que el ángulo máximo para fabricar voladizos sin soporte adicional es de 25° a 30°. Por lo tanto, las geometrías deben optimizarse dentro de este rango para garantizar la funcionalidad del auto-sombreado y la viabilidad técnica durante la fabricación de los prototipos de muros.

Altitud

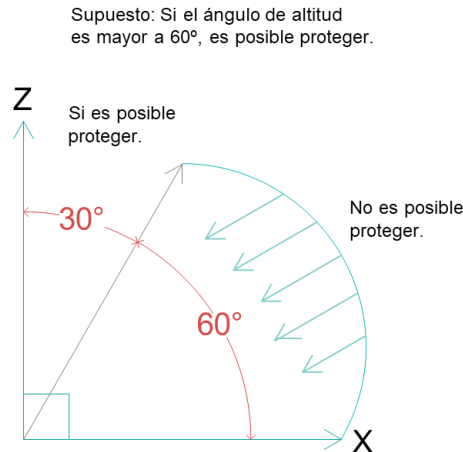


Figura 3.10

Supuesto de ángulo de altitud. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

13.2. Ángulo de azimut 90° como el más desfavorable

El azimut de 90° (ver Figura 3.11), correspondiente al este exacto (oriente), se considera el ángulo más desfavorable para el diseño de relieves auto-sombreados. Esto se debe a que, en las primeras horas de la mañana, cuando el sol incide desde esta dirección, los rayos solares impactan directamente sobre los relieves sin generar sombras suficientes que puedan proteger la superficie del muro. La incidencia directa sobre las superficies verticales minimiza la eficacia del diseño geométrico en términos de autosombreado, exponiendo los muros a una mayor acumulación de irradiación solar en esta orientación específica.

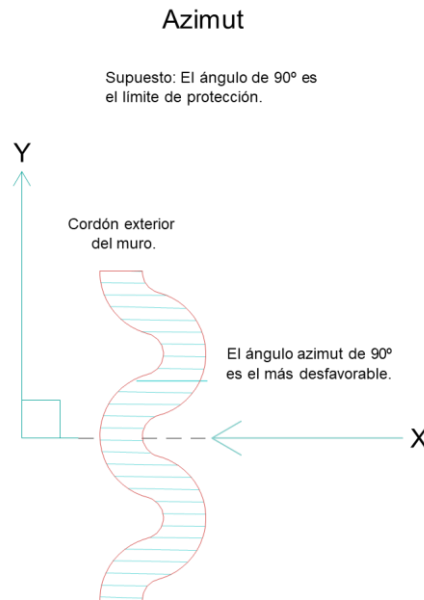


Figura 3.11

Supuesto de ángulo de azimut. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

CAPÍTULO 04. Desarrollo de los prototipos de muros

14. Fase 1: Desarrollo del prototipo de muro teórico liso (MT-L)

El diseño del prototipo de muro teórico liso (ver Figura 4.1) se basó en un rectángulo de 968 mm de largo por 130 mm de ancho. Se redondearon las esquinas del rectángulo, para mejorar la viabilidad del proceso de impresión 3D. Posteriormente, se incorporó un cordón interior en forma de zigzag, cuya función es asegurar la adhesión entre los cordones exteriores del muro. Esta configuración se diseñó considerando un diámetro de extrusor de 20 mm en escala real, valor seleccionado por su compatibilidad con la escala de impresión (1:10, 1:5 y 1:2.5) y para garantizar una correcta deposición del material (arcilla).

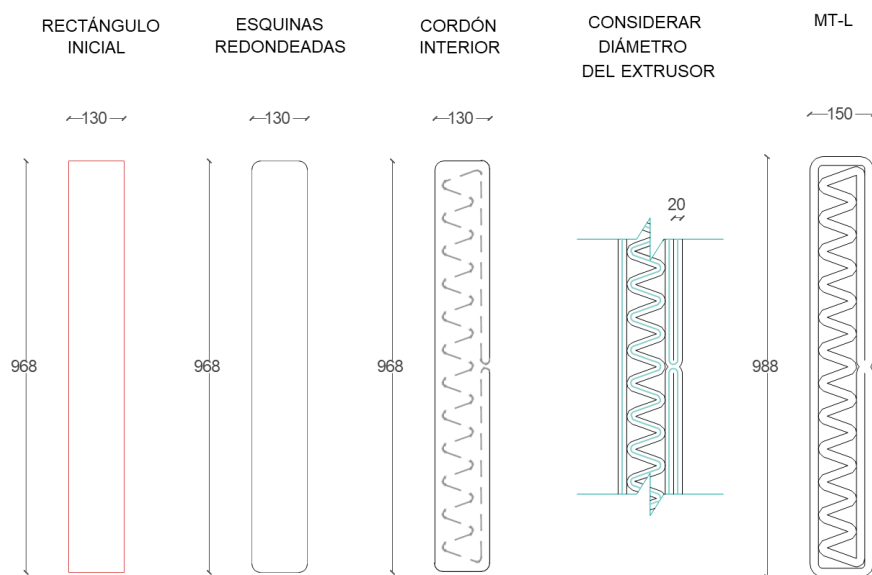
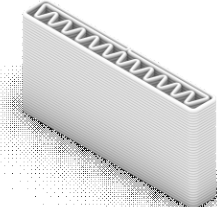
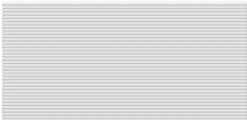
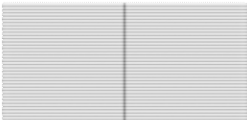


Figura 4.1

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MT-L. Elaboración propia.

A continuación, se presentan las vistas del prototipo de muro primitivo teórico liso MT-L (ver Tabla 4.1), el cual fue diseñado como modelo base de comparación para todos los demás prototipos, con una geometría plana y sin relieves, sirve como referencia para medir la efectividad de los relieves geométricos implementados en los otros muros.

Tabla 4.1
Vistas del prototipo de muro MT-L. Elaboración propia.

Vistas del muro MT-L		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

15. Fase 2: Desarrollo de los prototipos de muros primitivos

15.1. Prototipo de muro primitivo con relieve vertical (MP-RV)

Para el diseño del prototipo de muro primitivo con relieve vertical (ver Figura 4.2), se utilizó como geometría base un círculo de 40 mm de diámetro, definido a partir de las restricciones técnicas de la impresión 3D, ya que, el extrusor a escala real tiene un diámetro de 20 mm, y, por lo tanto, el mínimo viable para la curvatura es el doble de esa medida. Este círculo fue dividido de forma tangencial para generar una semicurva. A partir de esta mitad, se estableció una profundidad de 15 mm, correspondiente al valor intermedio entre el mínimo (10 mm) y el máximo (20 mm) posibles según el diámetro del círculo base. Esta configuración permitió generar la curva final que define el relieve vertical del muro.

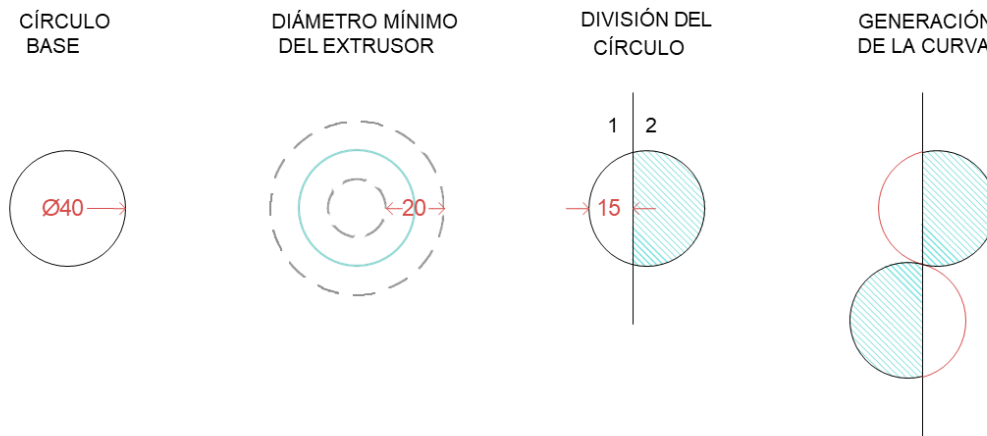


Figura 4.2

Proceso de diseño de la curvatura base del prototipo de muro MP-RV. Elaboración propia.

La segunda etapa del diseño del muro MP-RV (ver Figura 4.3) consistió en extender la curva generada inicialmente a lo largo de una superficie de 968 mm de largo por 130 mm de ancho, conformando así el cuerpo principal del muro. Posteriormente, se redondean las esquinas de la geometría, con el objetivo de mejorar la continuidad del recorrido del extrusor y asegurar una mayor viabilidad durante el proceso de impresión 3D. Finalmente, se incorpora un cordón interior paralelo a los cordones exteriores, considerando el diámetro del extrusor, de modo que los cuatro cordones queden correctamente unidos y se garantice la estabilidad estructural de la impresión.

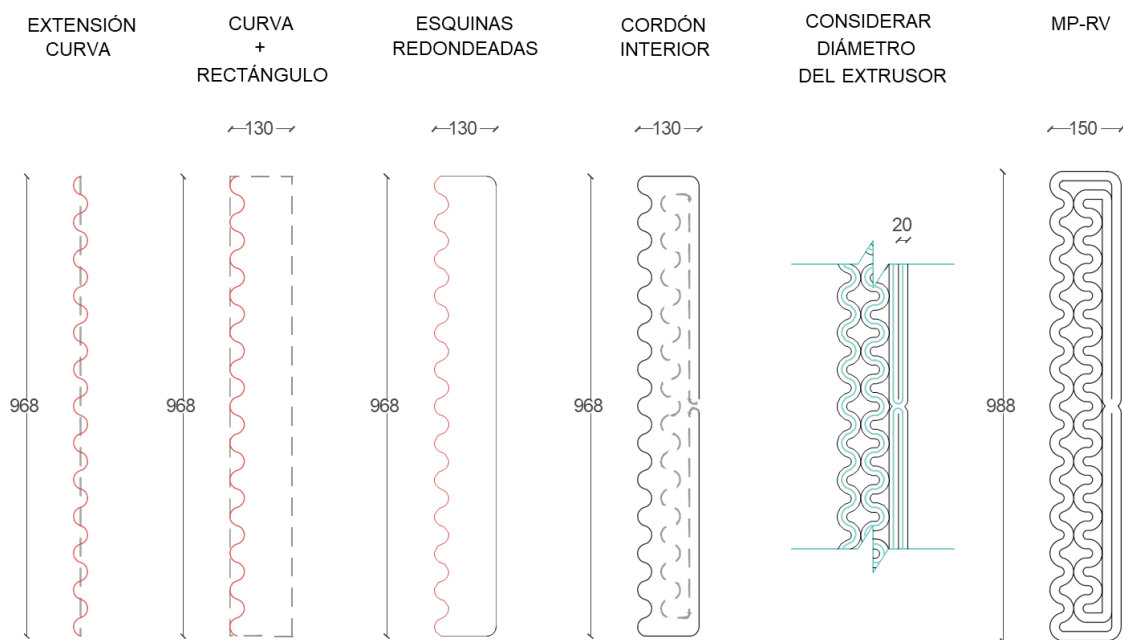
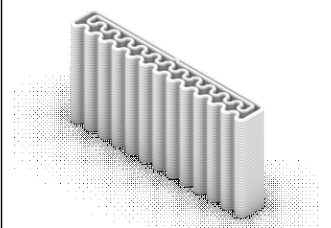
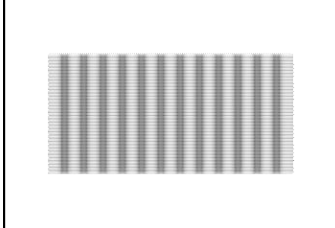
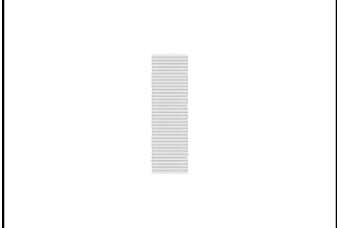
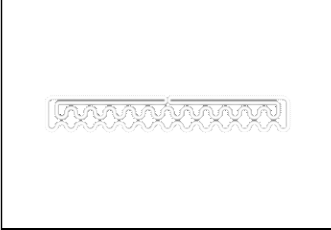
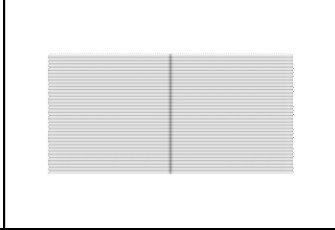
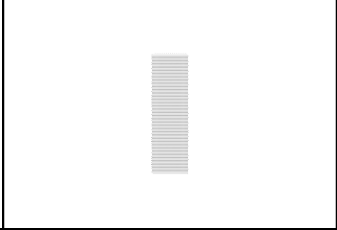


Figura 4.3

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MP-RV. Elaboración propia.

En la Tabla 4.2 se presentan las vistas del prototipo de muro primitivo con relieve vertical MP-RV, el cual está conformado por un relieve que se repite a lo largo del muro, formando pliegues que generan sombras verticales. Esta estrategia se hizo para analizar si una superficie perpendicular al recorrido solar matutino o vespertino puede reducir la cantidad de radiación absorbida.

Tabla 4.2
Vistas del prototipo de muro MP-RV. Elaboración propia.

Vistas del muro MP-RV		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

15.2. Prototipo de muro primitivo con relieve horizontal (MP-RH)

Como se observa en la Figura 4.5, el prototipo de muro primitivo con relieve horizontal fue diseñado a partir de una curva base de 968 mm de largo, con esquinas redondeadas para favorecer la continuidad del flujo de impresión. A esta curva se le añadió una superficie rectangular de 130 mm de ancho por 968 mm de largo, conformando así el cuerpo del muro. Las esquinas del rectángulo también fueron redondeadas para optimizar la trayectoria del extrusor. Posteriormente, se incorporó un cordón interior, dispuesto de forma paralela entre ambos cordones exteriores, asegurando una correcta adherencia entre las capas. Finalmente, se aplicó una interpolación a la geometría para generar relieves horizontales con una inclinación de 25° , orientados hacia la parte superior del muro.

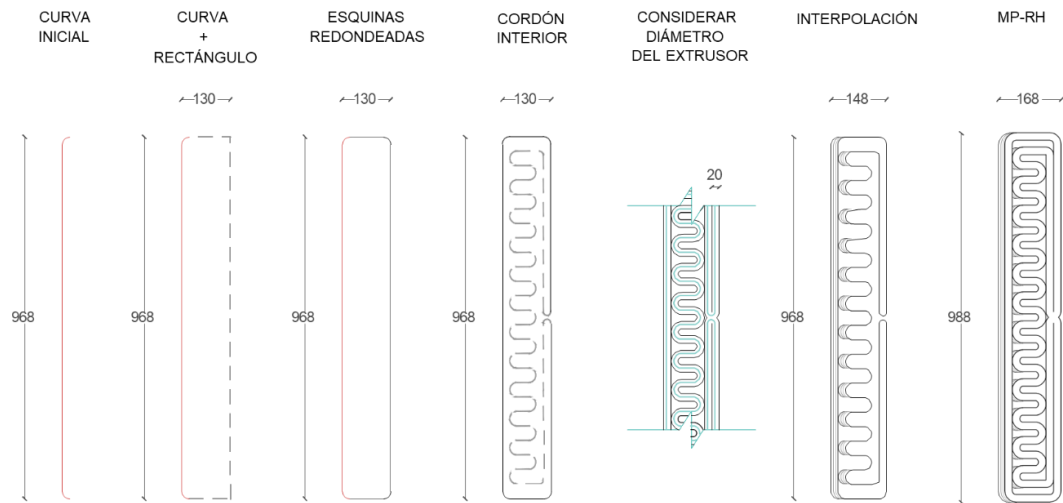
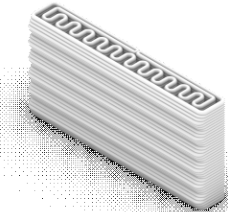
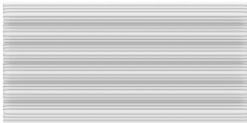
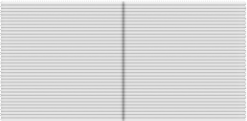


Figura 4.5

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MP-RH. Elaboración propia.

En la Tabla 4.3 se presentan las vistas del prototipo de muro primitivo con relieve horizontal MP-RH, el cual implementa una estrategia de sombreado horizontal, formando un relieve escalonado que favorece el bloqueo de la radiación cuando el sol se encuentra en posiciones altas (especialmente al mediodía).

Tabla 4.3
Vistas del prototipo de muro MP-RH. Elaboración propia.

Vistas del muro MP-RH		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

15.3. Prototipo de muro primitivo con relieve horizontal y vertical (MP-RHV)

El prototipo de muro primitivo con relieve combinado (ver Figura 4.6) fue diseñado a partir de la misma curva base utilizada en el muro primitivo con relieve vertical, manteniendo las dimensiones de 968 mm de largo por 130 mm de ancho. Se incorporó un cordón interior, dispuesto de forma paralela a los cordones exteriores, para asegurar la continuidad estructural durante la impresión. A esta configuración se le integró la interpolación aplicada en el diseño del muro con relieve horizontal de una inclinación de 25°, generando así un muro con relieves que combinan ondulaciones verticales y horizontales, permitiendo evaluar su comportamiento frente a la irradiación solar acumulada.

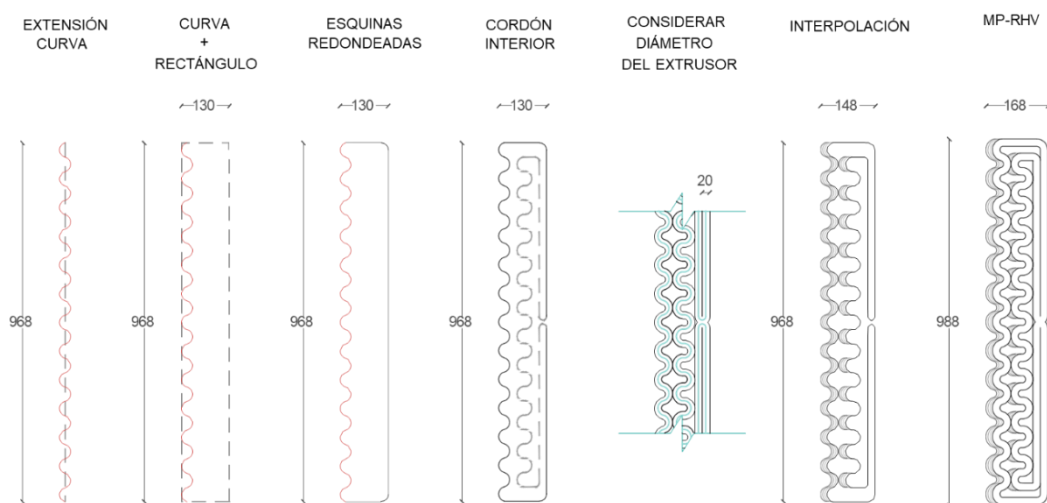
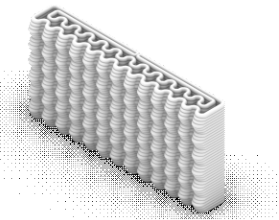
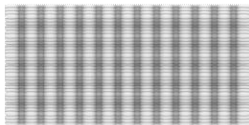
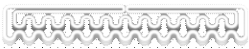
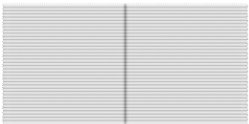


Figura 4.6

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro MP-RHV. Elaboración propia.

A continuación, se presentan las vistas del prototipo de muro primitivo con relieve horizontal y vertical MP-RHV (ver Tabla 4.4), su geometría es una combinación de los relieves verticales y horizontales aplicados anteriormente, con la finalidad de aumentar las áreas de auto-sombreado y analizar si la complejidad geométrica permite una mejor dispersión de la radiación solar.

Tabla 4.4
Vistas del prototipo de muro MP-RHV. Elaboración propia.

Vistas del muro MP-RHV		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

16. Fase 3: Desarrollo de los prototipos de muros evolutivos

El diseño de los prototipos de muros evolutivos (ME) se desarrolló a partir de la curva utilizada en el muro base MP-RV, que cuenta con un relieve regular vertical, siendo la base para todos los muros ME, y luego fue modificada en función de los datos de irradiación solar obtenidos mediante “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017) para cada orientación: oriente, norte y poniente. A través de “RhinoCeros” (McNeel, 2007), se generaron curvas modificadas con variaciones en profundidad y forma según los valores de radiación acumulada en horas específicas. Posteriormente, se incorporaron curvas intercaladas entre la base y la curva modificada para suavizar las transiciones de geometría, utilizando el componente “loft”, se generaron superficies que responden a la captación solar, permitiendo crear muros con relieves adaptados que disminuyen el ingreso de radiación solar.

16.1. Prototipo de muro evolutivo fachada oriente (ME-FO)

El prototipo de muro evolutivo fachada oriente (ver Figura 4.7) se diseñó a partir de la misma curva base utilizada en el muro MP-RV. Se generó una segunda curva, que aumenta la profundidad de la curvatura a 34 mm, combinada con la curvatura de 15 mm de profundidad. A esta curva se le realiza “mirror” creando dos curvas intercaladas, que se replican para formar una superficie con relieve que se adapta al comportamiento solar matutino. El resultado es un muro más plano en zonas críticas y con pliegues suaves donde no hay tanto sol, creado a partir de los datos de irradiación solar acumulada entre las 07:00 y 12:00 horas. En este muro, la geometría del relieve se reduce en los puntos con mayor irradiación, es decir, donde da más el sol en la mañana, el relieve se retrae para evitar la captación solar.

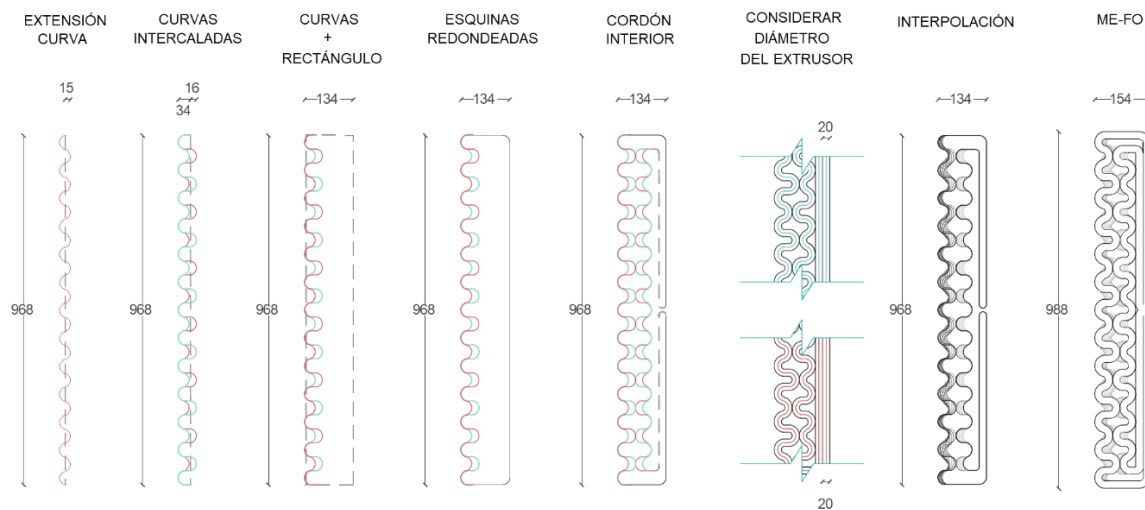


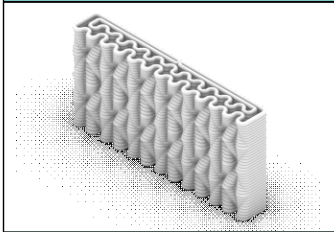
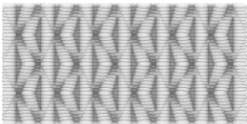
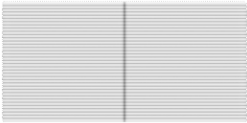
Figura 4.7

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FO. Elaboración propia.

El prototipo de muro ME-FO fue diseñado específicamente para la orientación oriente, considerando las condiciones de radiación solar global horizontal durante la mañana, particularmente en el solsticio de invierno, equinoccio de primavera y solsticio de verano. Su geometría incorpora un patrón de relieve combinado, como se observa en la Tabla 4.5, generado a partir de curvas entrelazadas y progresivas, las cuales se orientan hacia el noreste, coincidiendo con la trayectoria solar durante las primeras horas del día. La intención del diseño fue reducir la exposición directa durante las horas con mayor carga térmica inicial del día (entre 07:00 am y 12:00 pm), logrando así mejorar el comportamiento pasivo del muro y su desempeño bioclimático.

Tabla 4.5

Vistas del prototipo de muro ME-FO. Elaboración propia.

Vistas del muro ME-FO		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

16.2. Prototipos de muros evolutivos fachada norte (ME-FN)

16.2.1. Prototipo de muro evolutivo fachada norte (ME-FN-V01)

El prototipo de muro evolutivo ME-FN-V01 (ver Figura 4.8) se diseñó a partir de la misma curva base utilizada en el muro MP-RV, manteniendo las dimensiones originales. Se generó una segunda curva, que aumenta la profundidad de la curvatura a 34 mm, combinada con la curvatura de 15 mm de profundidad. Se interpolaron ambas curvas (base y modificada), la curva base se ubicó en la parte inferior del muro y la curva modificada en la parte superior, generando una superficie levemente inclinada, que busca captar menor irradiación solar acumulada al mediodía.

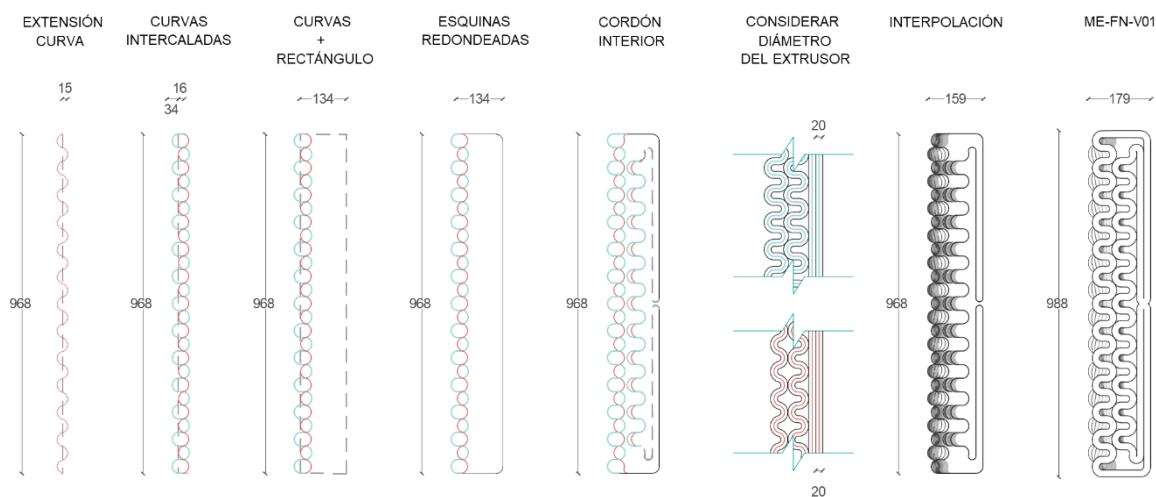
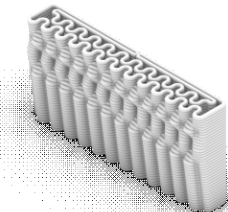
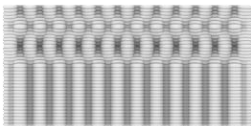
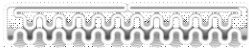
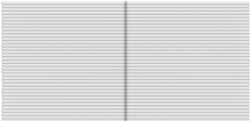


Figura 4.8

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FN-V01. Elaboración propia.

El prototipo de muro evolutivo fachada norte ME-FN-V01 (ver Tabla 4.6) fue diseñado con el objetivo de reducir la irradiación solar acumulada sobre la fachada norte, especialmente en verano, cuando el sol alcanza su mayor altitud. Su geometría presenta curvas horizontales y verticales, con relieves que se distribuyen con mayor frecuencia en la parte superior del muro y disminuyen en la parte inferior de éste.

Tabla 4.6
Vistas del prototipo de muro ME-FN-V01. Elaboración propia.

Vistas del muro ME-FN-V01		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

16.2.2. Prototipo de muro evolutivo fachada norte (ME-FN-V02)

El prototipo de muro evolutivo ME-FN-V02 (ver Figura 4.9) se diseñó a partir de la misma curva base utilizada en el muro MP-RV. Se generó una segunda curva a partir de la curva base, la cual aumentó su profundidad a 35 mm. Y se utilizó una tercera curva (recta) que nace del muro teórico liso. Se interpolaron las tres curvas (base, modificada y recta), la curva base se ubicó en la parte inferior del muro, la curva modificada en la parte superior y la curva recta en el centro el muro, con la finalidad de que el muro aumentara la inclinación de manera progresiva, buscando captar menor irradiación solar acumulada al mediodía.

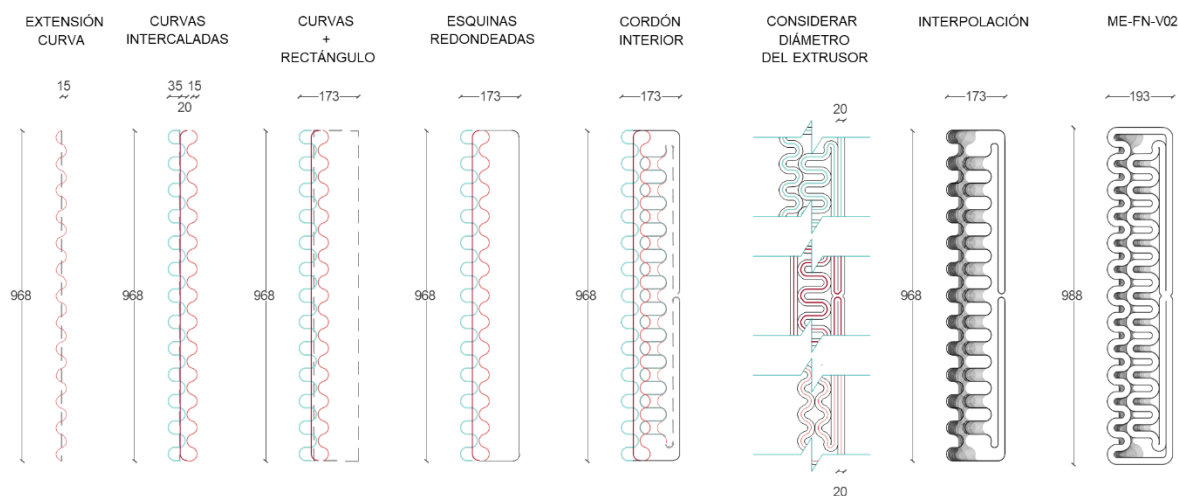
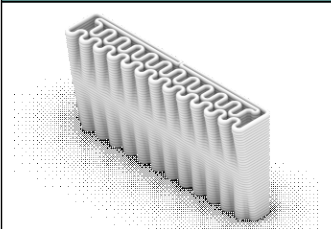
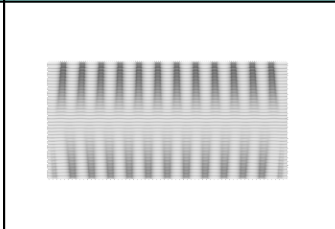
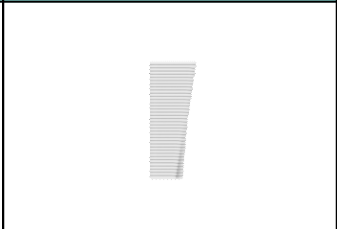
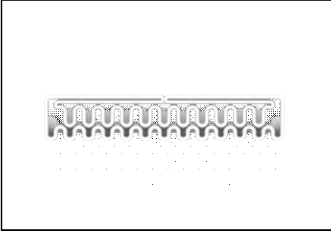
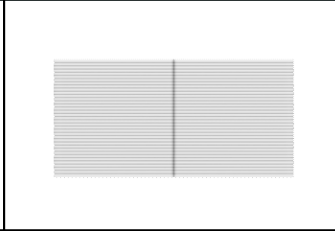
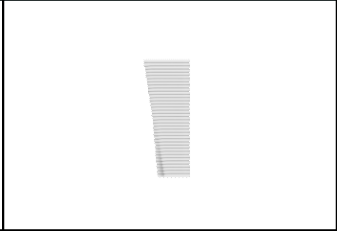


Figura 4.9

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FN-V02. Elaboración propia.

La versión dos del prototipo de muro evolutivo fachada norte ME-FN-V02 (ver Tabla 4.7) fue diseñado para adaptarse con mejor precisión a los ángulos solares que alcanzan una mayor altitud, ya que, su geometría se basa en relieves verticales más pronunciados en la parte superior del muro y van disminuyendo hacia la parte inferior, lo que demuestra una mayor reducción de irradiación solar acumulada en comparación al muro ME-FN-V01, que se refleja en las simulaciones siguientes.

Tabla 4.7
Vistas del prototipo de muro ME-FN-V02. Elaboración propia.

Vistas del muro ME-FN-V02		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

16.3. Prototipo de muro evolutivo fachada poniente (ME-FP)

El prototipo de muro evolutivo ME-FP (ver Figura 4.10) se diseñó a partir de la misma curva base utilizada en el muro MP-RV. Se generó una segunda curva a partir de la curva base, la cual aumentó su profundidad a 39 mm. A esta curva se le realiza “mirror” creando dos curvas intercaladas, que se replican para formar una superficie con relieve que tiene una alternancia más marcada, manteniendo los contrastes de profundidad entre pliegues, permitiendo que la forma final no pierda la protección solar en los sectores con mayor radiación. Este muro se enfoca en la irradiación entre las 14:00 y 17:00 horas, que es cuando el sol pega más fuerte en la fachada poniente.

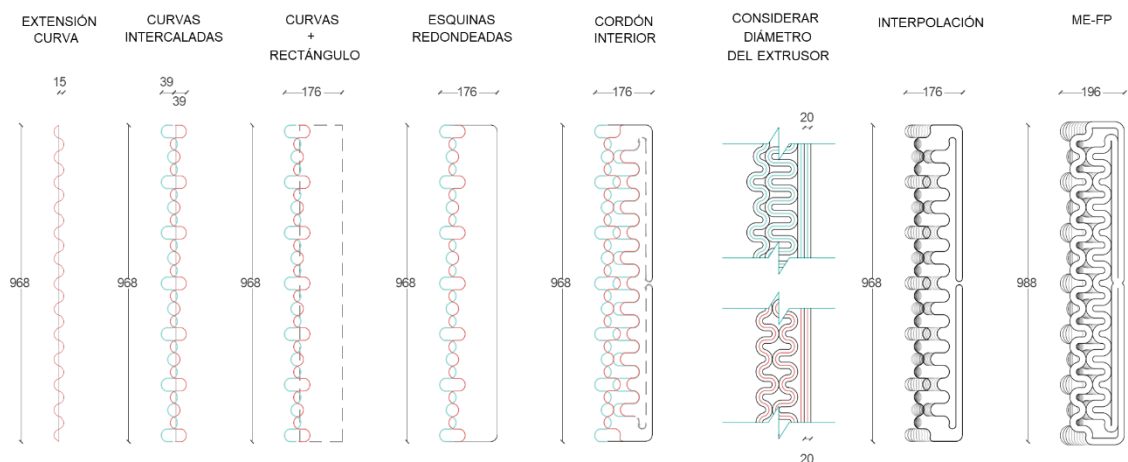
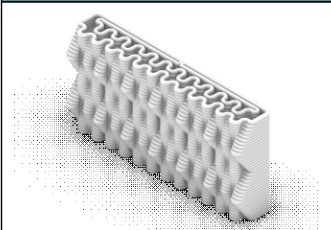
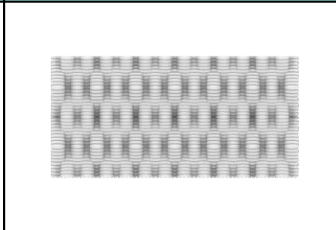
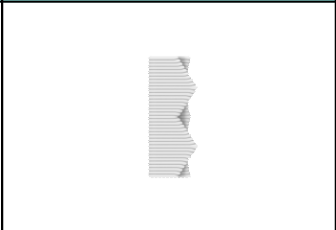
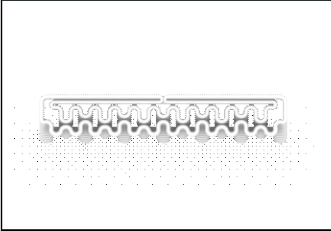
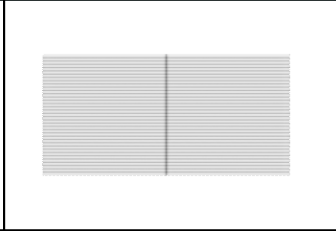
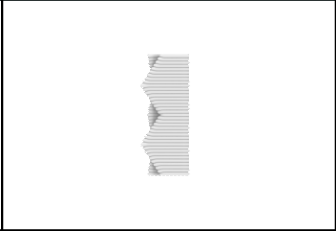


Figura 4.10

Vista en planta del proceso de diseño del prototipo de muro ME-FP. Elaboración propia.

La Tabla 4.8 muestra las vistas del prototipo de muro evolutivo fachada poniente (ME-FP), el cual fue diseñado para enfrentar la radiación solar vespertina, cuando el sol se encuentra bajo y entra de manera directa por la fachada poniente. Su geometría se compone de curvas verticales con inclinaciones que permiten interrumpir la luz solar en ángulos bajos, considerando con especial atención las horas entre las 14:00 pm a 17:00 pm durante el solsticio de verano y el equinoccio de primavera.

Tabla 4.8
Vistas del prototipo de muro ME-FP. Elaboración propia.

Vistas del muro ME-FP		
Isométrica	Elevación frontal	Elevación lateral izquierda
		
Planta	Elevación posterior	Elevación lateral derecha
		

CAPÍTULO 05.

Simulación solar de los prototipos de muros

17. Fase 1: Evaluación de la irradiación solar acumulada del prototipo de muro teórico liso

17.1. Prototipo de muro MT-L

La Figura 5.1 muestra una vista isométrica del prototipo de muro teórico liso (MT-L), el cual se presenta sin relieves ni modificaciones, representando una superficie plana que sirve como modelo base para todas las simulaciones solares siguientes. El diagrama esquemático permite visualizar cómo el muro recibe la irradiación solar $[W/m^2]$ en sus cordones exteriores y se observa el área expuesta en $[m^2]$.

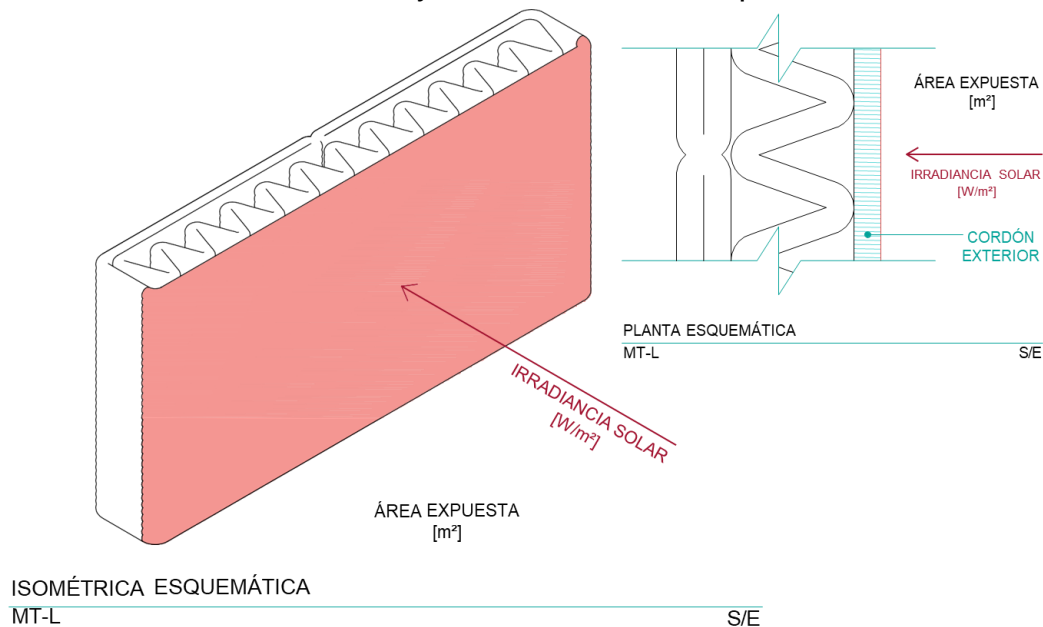


Figura 5.1

Isométrica del prototipo de muro MT-L para la simulación de la irradiación solar acumulada.
Elaboración propia.

La simulación realizada en “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017) para las tres orientaciones y días representativos definidos en la metodología, permitió estimar la irradiación solar acumulada mensual a partir de un único día de simulación por estación. En diciembre (verano), se observa que la irradiación solar acumulada mensual en la orientación oriente alcanza 3,226 [KWh/m²], siendo el valor más alto registrado. En cambio, la fachada norte recibe 0,676 [KWh/m²] y el poniente 1,917 [KWh/m²], como se muestra en la Tabla 5.1 y en el Gráfico 5.1. Los datos completos de las simulaciones del muro MT-L para las otras estaciones y orientaciones están disponibles en la Tabla B.1 a la Tabla B.9 del Anexo B.

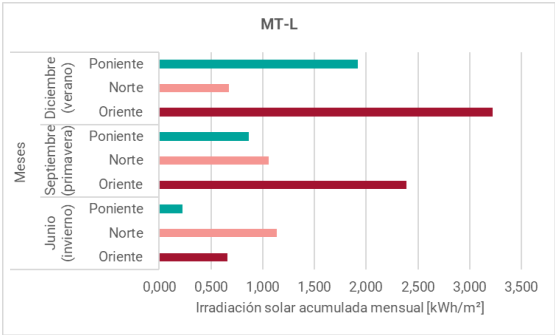
Tabla 5.1

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MT-L en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MT-L										
Santiago de Chile										
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses									Unidad
	Junio (invierno)			Septiembre (primavera)			Diciembre (verano)			
	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	
MT-L	0,656	1,137	0,222	2,388	1,057	0,867	3,226	0,676	1,917	[kWh/m²]

Gráfico 5.1

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MT-L en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



18. Fase 2: Evaluación de la irradiación solar acumulada de los prototipos de muros primitivos

18.1. Prototipo de muro MP-RV

El prototipo de muro primitivo con relieve vertical (ver Figura 5.2) incorpora un patrón de relieve en sentido vertical, con la finalidad de reducir la energía solar acumulada mediante sombras proyectadas entre los pliegues. La imagen representativa permite visualizar la manera en que la irradiancia solar [W/m^2] se aplica en sus cordones exteriores y se observa la sumatoria de las áreas expuestas [m^2].

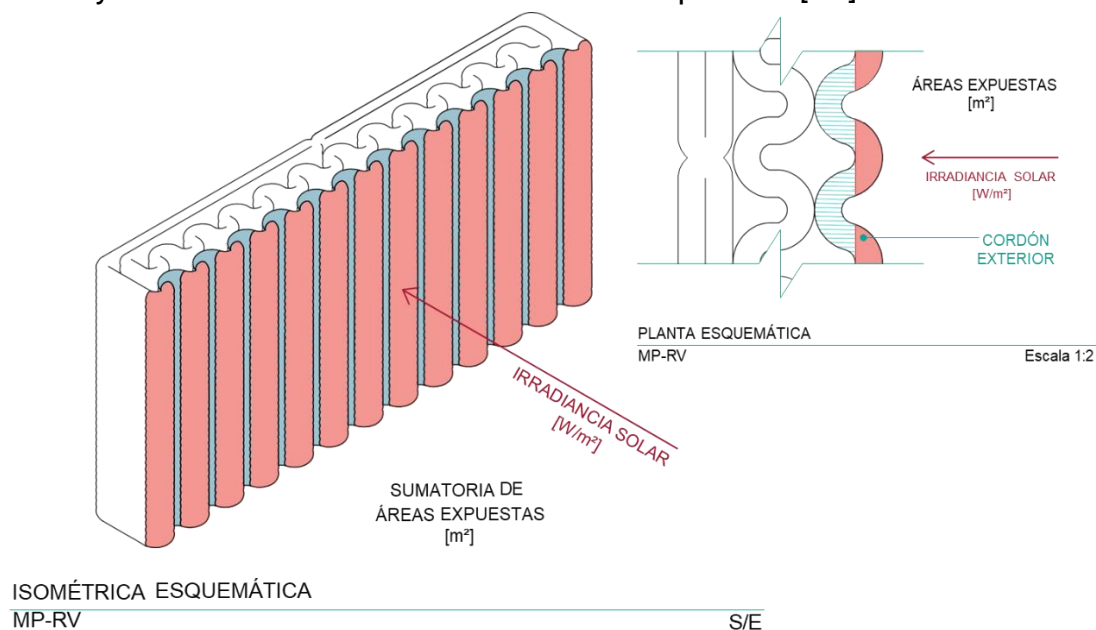


Figura 5.2

Isométrica del prototipo de muro MP-RV para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.

De acuerdo con las simulaciones, en la orientación oriente en diciembre (verano), la irradiación sube a 3,695 [KWh/m²], superando incluso al muro teórico liso, lo que indica que esta geometría puede aumentar la captación solar en ciertos ángulos. En la orientación poniente, sin embargo, se reduce ligeramente la irradiación, con un valor de 1,743 [KWh/m²], como se aprecia en la Tabla 5.2 y en el Gráfico 5.2. Estos datos reflejan que, si bien el relieve vertical genera sombra, su orientación no siempre es favorable para bloquear la radiación solar en todas las orientaciones. Para más detalle, consultar Tabla B.10 a la Tabla B.18 del Anexo B.

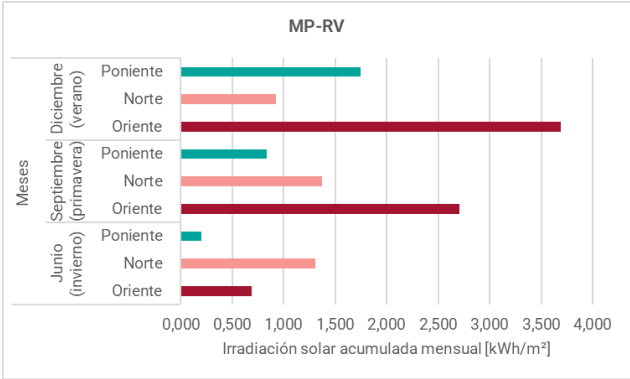
Tabla 5.2

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RV en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RV										
Santiago de Chile										
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses									Unidad
	Junio (invierno)			Septiembre (primavera)			Diciembre (verano)			
	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	
	MP-RV	0,690	1,305	0,203	2,703	1,373	0,835	3,695	0,927	

Gráfico 5.2

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo muro MP-RV en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



18.2. Prototipo de muro MP-RH

El prototipo de muro primitivo con relieve horizontal (ver Figura 5.3), presenta una secuencia de curvas en eje horizontal, con el objetivo de proyectar sombra desde los pliegues horizontales, dependiendo de la posición solar. El diagrama esquemático tiene como finalidad visualizar la manera en que la irradiancia solar [W/m^2] se proyecta en sus cordones exteriores antes de realizar la simulación del muro.

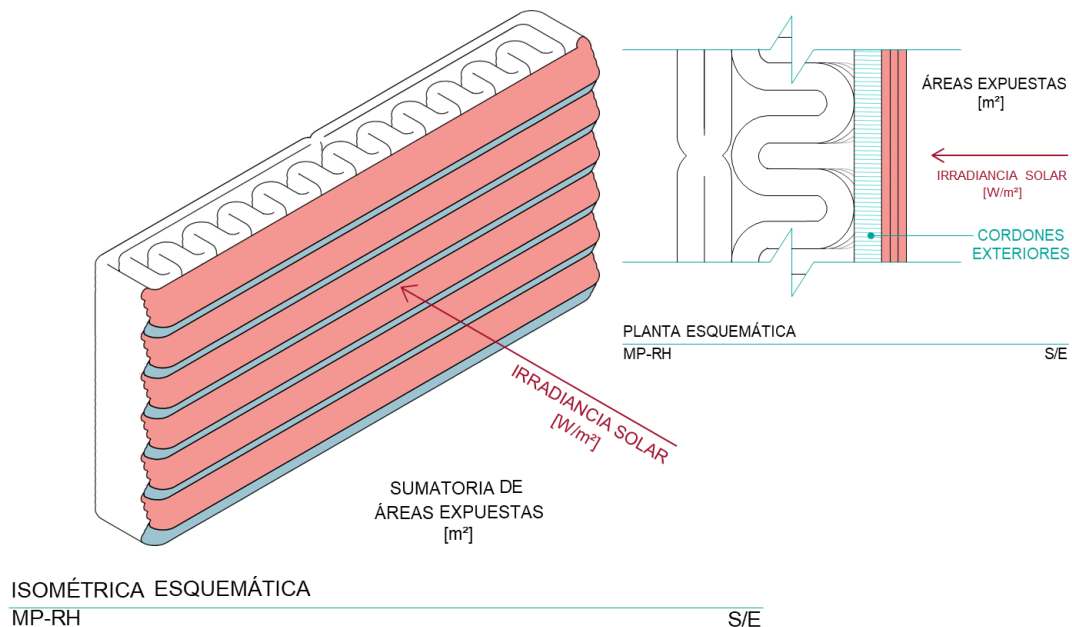


Figura 5.3

Isométrica del prototipo de muro MP-RH para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.

En este caso, el relieve horizontal intenta bloquear la radiación cuando el sol se encuentra en su punto más alto. Sin embargo, en la orientación norte en diciembre (verano), la irradiación solar acumulada alcanzó 1,119 [KWh/m²], mayor que el muro teórico liso, lo que indica una ineficiencia en el diseño para esa orientación. En la orientación poniente, en cambio, se observan mejoras en junio (invierno) y en septiembre (primavera), como se muestra en los valores resumidos de la Tabla 5.3 y en el Gráfico 5.3. Para las cifras completas de las simulaciones del muro MP-RH, ver Tabla B.19 a la Tabla B.27 del Anexo B.

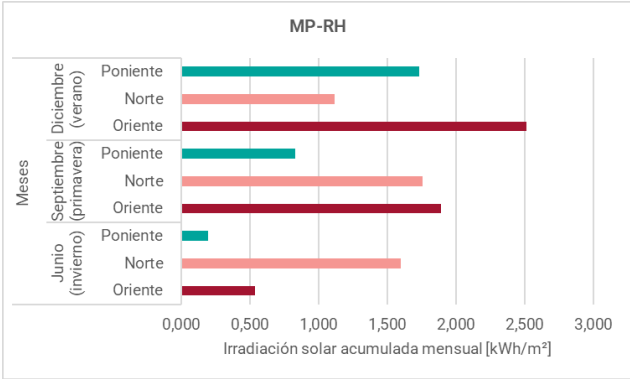
Tabla 5.3

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RH en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RH										
Santiago de Chile										
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses									Unidad
	Junio (invierno)			Septiembre (primavera)			Diciembre (verano)			
	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	
	MP-RH	0,540	1,600	0,195	1,892	1,757	0,830	2,516	1,119	

Gráfico 5.3

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RV en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



18.3. Prototipo de muro MP-RHV

En la Figura 5.4 se muestra la geometría del prototipo de muro con relieve combinado horizontal y vertical (MP-RHV), el cual presenta una configuración que surge de la superposición de los patrones aplicados en los muros MP-RV y MP-RH. El esquema permite entender cómo se distribuye la irradiancia solar sobre la superficie, pero no representa los valores de la simulación.

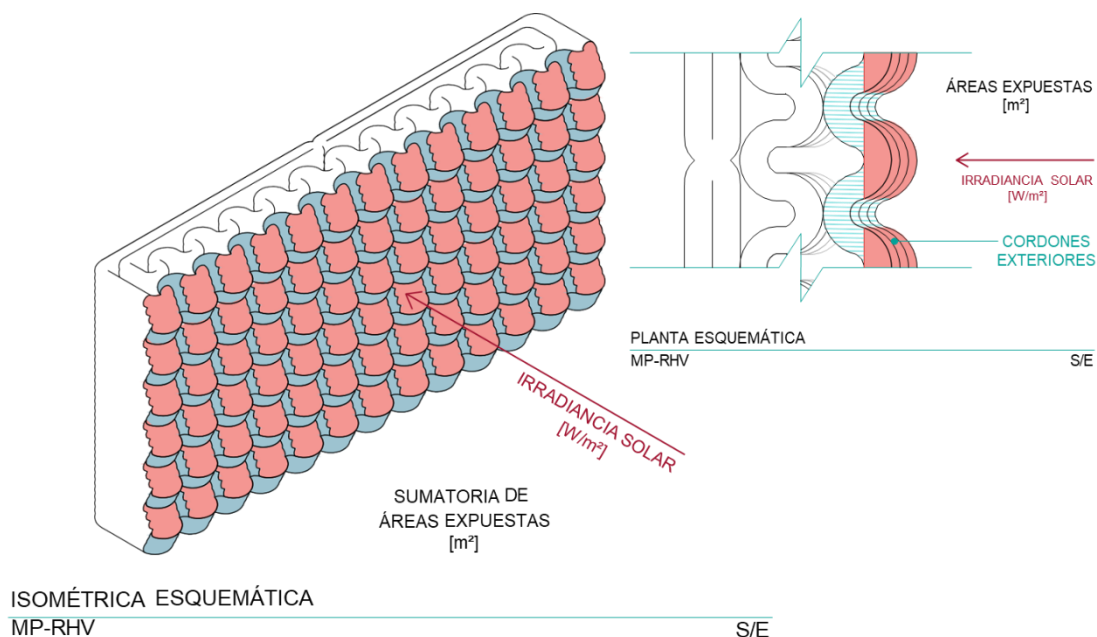


Figura 5.4

Isométrica del prototipo de muro MP-RHV para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.

En la Tabla 5.4 y en el Gráfico 5.4, se observa que en la orientación norte en diciembre (verano) la irradiación solar acumulada mensual fue de 0,682 [KWh/m²], apenas superior al valor del muro teórico liso. En la orientación oriente en diciembre (verano), bajó a 2,357 [KWh/m²], superando al muro MP-RH, pero sin alcanzar los niveles de los muros evolutivos. Esta tabla permite analizar cómo la geometría combinada puede ofrecer un resultado intermedio. Los datos detallados están en la Tabla B.28 a la Tabla B.36 del Anexo B.

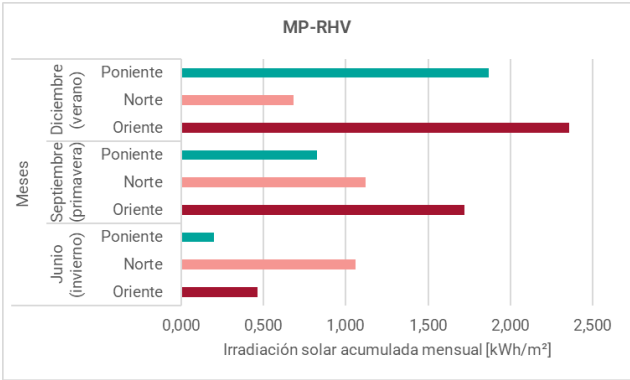
Tabla 5.4

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RHV en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RHV										
Santiago de Chile										
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses									Unidad
	Junio (invierno)			Septiembre (primavera)			Diciembre (verano)			
	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	Oriente	Norte	Poniente	
	MP-RHV	0,465	1,061	0,201	1,721	1,121	0,827	2,357	0,682	

Gráfico 5.4

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro MP-RV en tres orientaciones.
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



19. Fase 3: Evaluación de la irradiación solar acumulada de los prototipos de muros evolutivos

19.1 Prototipo de muro ME-FO

En la Figura 5.5 se muestra la geometría del prototipo de muro evolutivo fachada oriente (ME-FO), el cual presenta un patrón de relieve combinado, generado a partir de curvas entrelazadas y progresivas, las cuales se orientan hacia el noreste, coincidiendo con la trayectoria solar de la mañana. El esquema permite entender cómo se distribuye la irradiación solar sobre la superficie, pero no representa los valores de la simulación.

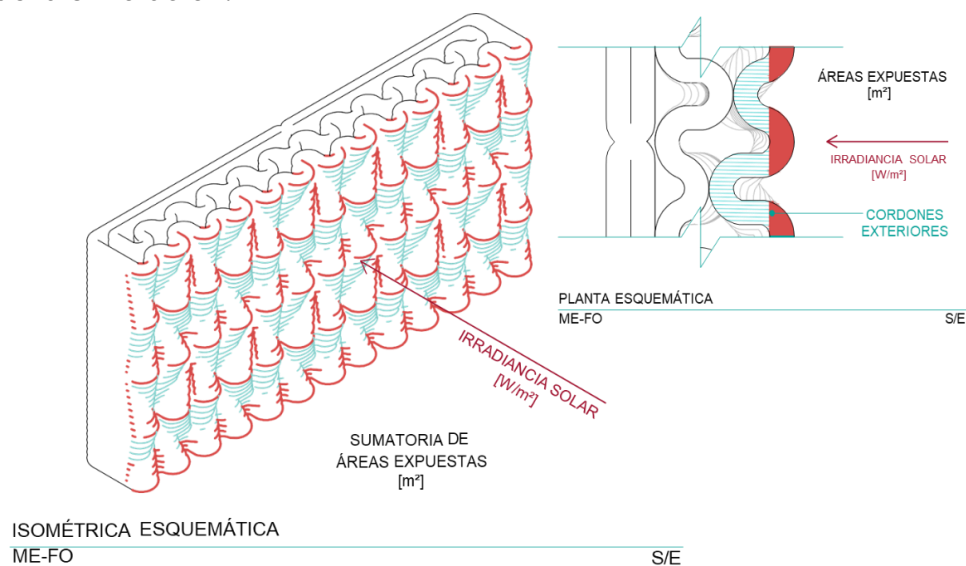


Figura 5.5

Isométrica del prototipo de muro ME-FO para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 5.5 y el Gráfico 5.5, en diciembre (verano), la irradiación solar acumulada bajó de 3,226 a 2,274 [KWh/m²] en comparación al muro liso teórico, lo que representa una mejora del 30%. En junio (invierno), la captación se redujo de 0,656 a 0,440 [KWh/m²], equivalente a una disminución de 33%. En septiembre (primavera), disminuyó de 2,388 a 1,637 [KWh/m²], lo que equivale a 32%. Las cifras completas están en la Tabla B.37 a la Tabla B.39 del Anexo B.

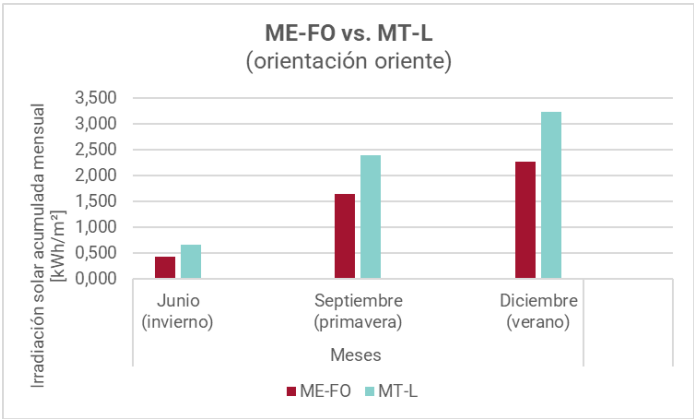
Tabla 5.5

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FO vs. MT-L en la orientación oriente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FO vs. MT-L (orientación oriente)					
ME-FO vs. MT-L					
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses			Unidad	
	Junio (invierno)	Septiembre (primavera)	Diciembre (verano)		
	ME-FO	0,440	1,637		2,274
	MT-L	0,656	2,388		3,226

Gráfico 5.5

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FO vs. MT-L en la orientación oriente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



19.2. Prototipos de muros ME-FN

19.2.1. Prototipo de muro ME-FN-V01

En la Figura 5.6 se muestra la geometría del prototipo de muro evolutivo fachada norte versión uno (ME-FN-V01), el cual presenta curvas horizontales y verticales, con relieves que se distribuyen con mayor frecuencia en la parte superior del muro y disminuyen en su parte inferior. El diagrama esquemático tiene como finalidad visualizar la manera en que la irradiancia solar [W/m^2] se proyecta en sus cordones exteriores antes de realizar la simulación del muro.

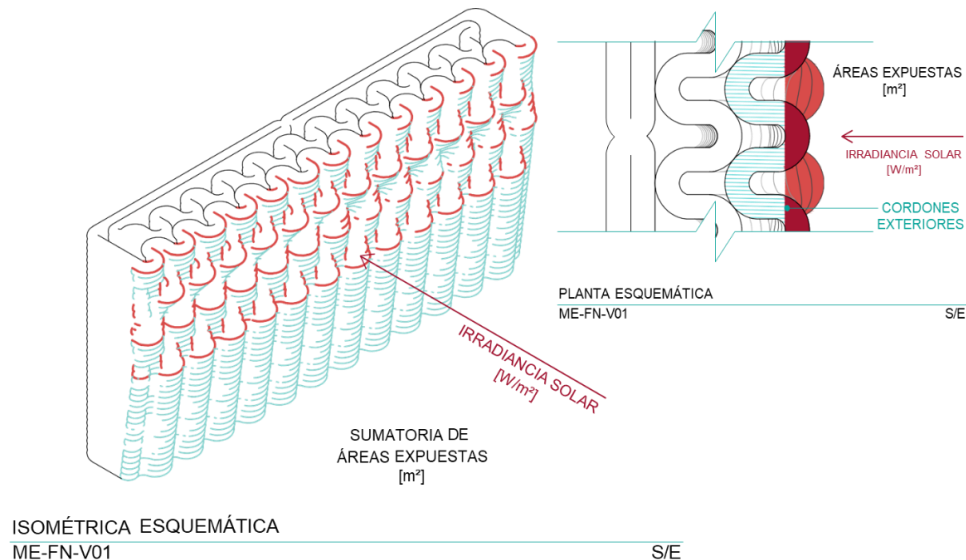


Figura 5.6

Isométrica del prototipo de muro ME-FN-V01 para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.

En la Tabla 5.6 y en el Gráfico 5.6, se observa que la primera versión del prototipo de muro evolutivo fachada norte (ME-FN-V01), en diciembre (verano), registró el mismo valor que el muro liso (0,676 [KWh/m²]), lo que representa una disminución del 0% respecto al MT-L, esto indica que su impacto sobre la captación solar fue limitado, lo que reafirma que esta versión sirvió principalmente como punto de partida para desarrollar una propuesta más eficiente (ME-FN-V02). Los datos completos se encuentran en la Tabla B.40 a la Tabla B.42 en el Anexo B.

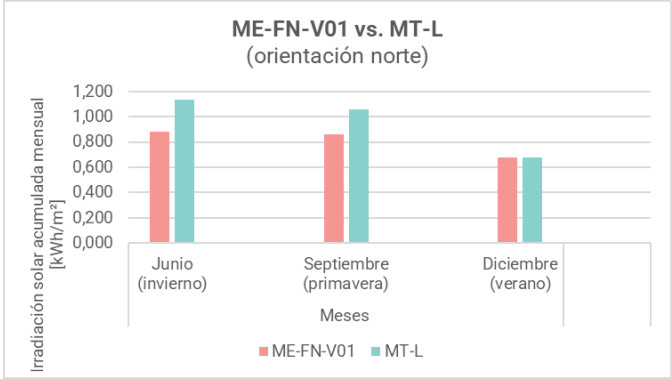
Tabla 5.6

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V01 vs. MT-L en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V01 vs. MT-L (orientación norte)				
ME-FN-V01 vs. MT-L				
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses			Unidad
	Junio (invierno)	Septiembre (primavera)	Diciembre (verano)	
ME-FN-V01	0,883	0,861	0,676	[kWh/m²]
MT-L	1,137	1,057	0,676	

Gráfico 5.6

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V01 vs. MT-L en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



19.2.2. Prototipo de muro ME-FN-V02

La Figura 5.7 muestra una vista isométrica del prototipo de muro evolutivo fachada norte versión dos (ME-FN-V02), su geometría se basa en relieves verticales más pronunciados en la parte superior del muro y van disminuyendo hacia la parte inferior, con la finalidad de captar menor irradiación solar acumulada en la zona inferior. El diagrama esquemático permite visualizar cómo el muro recibe la irradiación solar $[W/m^2]$ en sus cordones exteriores y se observa el área expuesta en $[m^2]$.

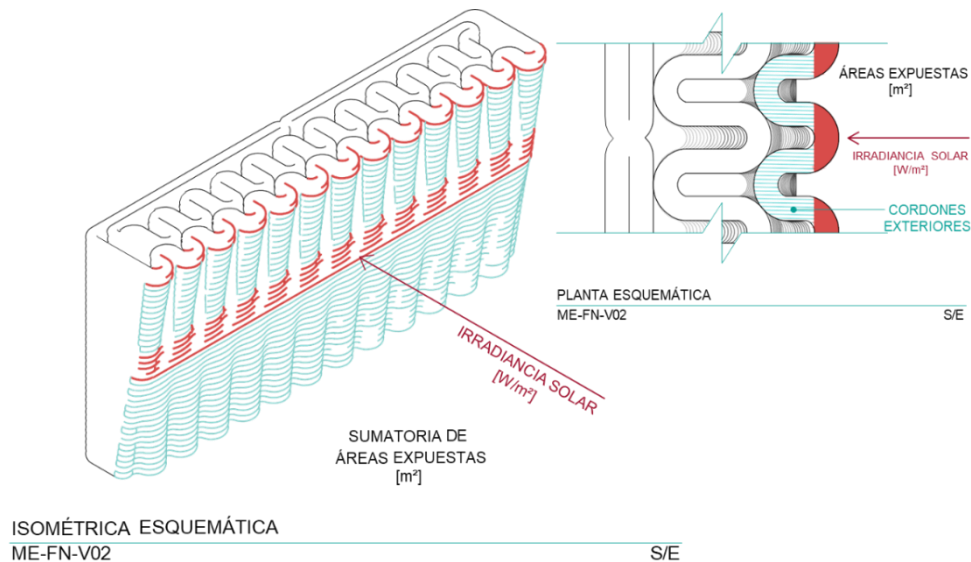


Figura 5.7

Isométrica del prototipo de muro ME-FN-V02 para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados representados en la Tabla 5.7 y en el Gráfico 5.7, se observa que la segunda versión del prototipo de muro evolutivo fachada norte (ME-FN-V02), en diciembre (verano), disminuyó de 0,676 a 0,604 [KWh/m²], lo que representa una mejora del 11%. En septiembre (primavera), se reduce de 1,057 a 0,791 [KWh/m²], equivalente a 23%, y en junio (invierno), la captación bajó de 1,137 a 0,872 [KWh/m²], lo que equivale a 23%. Ver Tabla B.43 a la Tabla B.45 en el Anexo B.

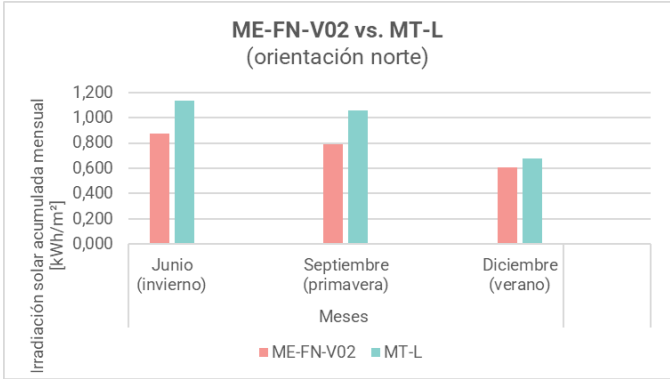
Tabla 5.7

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V02 en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V02 vs. MT-L (orientación norte)				
ME-FN-V02 vs. MT-L				
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses			Unidad
	Junio (invierno)	Septiembre (primavera)	Diciembre (verano)	
	ME-FN-V02	0,872	0,791	
MT-L	1,137	1,057	0,676	[kWh/m²]

Gráfico 5.7

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FN-V02 en la orientación norte. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



Sin embargo, a pesar de estos buenos resultados en términos de captación solar, la geometría global del prototipo de muro ME-FN-V02 genera un problema estructural, ya que, el diseño tiene una base más angosta y una parte superior más ancha, lo que podría provocar inestabilidad durante la impresión en arcilla. Aunque este muro no ha sido impreso aún, la experiencia con otros prototipos indica que esta proporción podría causar derrumbes, debido a que su centro de masa se encuentra desplazado hacia arriba. Esto demuestra que no basta sólo con diseñar la geometría exterior del muro, si no que, la forma general del muro también debe ser constructivamente viable.

19.3. Prototipo de muro ME-FP

La Figura 5.8 muestra una vista isométrica del prototipo de muro evolutivo fachada poniente (ME-FP), su geometría se compone de curvas verticales con inclinaciones que permiten interrumpir la luz solar en ángulos bajos, considerando con especial atención el horario vespertino. El diagrama esquemático permite visualizar cómo el muro recibe la irradiancia solar [W/m^2] en sus cordones exteriores y se observa el área expuesta en [m^2].

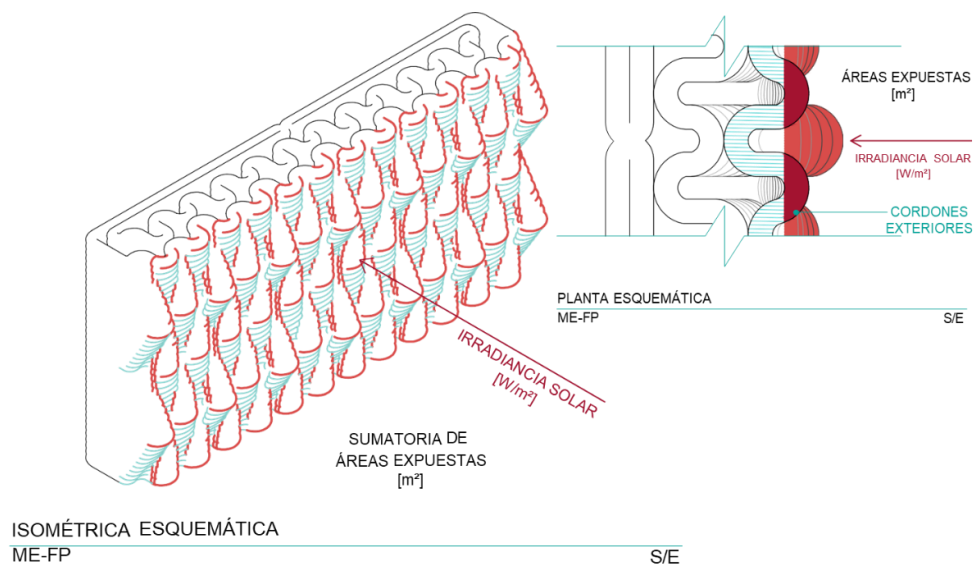


Figura 5.8

Isométrica del prototipo de muro ME-FP para la simulación de la irradiación solar acumulada. Elaboración propia.

Como se muestra en la Tabla 5.8 y en el Gráfico 5.8, el prototipo de muro ME-FP reduce la irradiación solar acumulada mensual de la tarde en diciembre (verano), logrando una irradiación de 1,668 [KWh/m²], frente a los 1,917 [KWh/m²] del muro teórico liso, lo que representa una disminución del 13%, en junio (invierno), la captación baja de 0,222 a 0,171 [KWh/m²], con una reducción del 23%, y en septiembre (primavera) de 0,867 a 0,756 [KWh/m²], equivalente a una mejora del 13%. Estos valores reflejan que la geometría aplicada a la fachada poniente fue efectiva para reducir la carga térmica en las horas críticas de la tarde. Ver la Tabla B.46 a la Tabla B.48 del Anexo B.

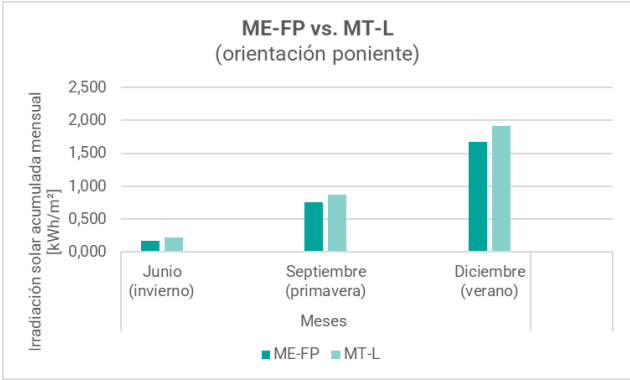
Tabla 5.8

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FP en la orientación poniente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FP vs. MT-L (orientación poniente)				
Nomenclatura del prototipo de muro	ME-FP vs. MT-L			Unidad
	Meses			
	Junio (invierno)	Septiembre (primavera)	Diciembre (verano)	
	ME-FP	0,171	0,756	
MT-L	0,222	0,867	1,917	[kWh/m²]

Gráfico 5.8

Irradiación solar acumulada mensual del prototipo de muro ME-FP en la orientación poniente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



CAPÍTULO 06.

Fabricación de los prototipos de muros

20. Fabricación de los prototipos de muros

Para complementar el análisis solar y evaluar la factibilidad constructiva de los prototipos, se fabricaron seis de los ocho muros diseñados, utilizando impresión 3D en arcilla con la impresora Delta WASP 40100, con la finalidad de comprobar si las geometrías generadas paramétricamente eran realmente imprimibles y estables. La mezcla base utilizada fue una combinación de arcilla tamizada y agua, cuya proporción se ajustó experimentalmente para cada muro. En el primer caso se utilizó una relación de 70% arcilla y 30% de agua, mientras que en otros fue necesario aumentar la fluidez a 67,5% arcilla y 32,5% agua, como se detalla en la Tabla 6.1 a la Tabla 6.4.

Los modelos primitivos se imprimieron a escalas 1:10 y luego a 1:5, pero los prototipos de muros evolutivos requerían una escala mayor (1:2.5) para representar de mejor manera sus geometrías complejas. El proceso de impresión se realizó capa por capa, considerando un número de capas que varió de 51 a 37, dependiendo de la altura del modelo, y para mejorar la estabilidad de los prototipos de muros, incluyeron cordones interiores, además de ambos cordones exteriores, lo que permitió evitar deformaciones en algunos casos. Los parámetros de programación “G-code” variaron levemente, en general, se utilizó una velocidad de avance de 1800 [mm/min], velocidad de extrusión de [50 mm/min], y una presión que varió entre 0,3 a 0,7 [Mpa] según la mezcla. Finalmente, los muros impresos fueron dejados en secado natural a temperatura ambiente.

Tabla 6.1
Información técnica de impresión 3D del día 1 al 3. Elaboración propia.

Información técnica de los días operativos de impresión 3D							
Pruebas	Día	1		2		3	
	Fecha	14-01-2025		13-03-2025		17-03-2025	
	Objetivo	Prueba de impresión con arcilla del muro MP-RV.		Prueba de impresión con arcilla del muro MP-RV.		Prueba de impresión con arcilla del muro MP-RV con cordón interior.	
Modelo 3D	Nomenclatura	MP-RV		MP-RV		MP-RV	
	Imagen						
	Medidas [mm]	150 x 988 x 514		150 x 988 x 514		150 x 988 x 514	
	N° de capas	51		51		51	
	N° de cordones	2		2		3	
Parámetros	Escala	1:10		1:10		1:10	
	Medidas [mm]	15 x 98x 52		15 x 98 x 52		15 x 98 x 52	
Tipo de mezcla	Material	Arcilla		Arcilla		Arcilla	
	Porcentaje de material [%]	70		67,5		67,5	
	Porcentaje de agua [%]	30		32,5		32,5	
	Cantidad de material [gr]	1400		2025		2025	
	Cantidad de agua [gr]	600		975		975	
	Total de la mezcla [gr]	2000		3000		3000	
Proceso de mezcla	Tamizado	Sí		Sí		Sí	
	N° de veces	1		1		1	
	Mezclado	No		Sí		Sí	
	Tiempo de mezclado [min]	0		5		5	
	Vibrado	Sí		Sí		No	
	Tiempo de vibración [min]	5		5		0	
Programación de Gcode	Velocidad de avance [F] [mm/min]	1800		1800		1800	
	Velocidad de extrusión [E] [mm/min]	50		50		50	
	Altura de capas [mm]	1		1		1	
	Diámetro de boquilla [mm]	2		2		2	
Configuración de impresora	Diámetro de boquilla [mm]	2		2		2	
	Home Z [mm]	1204,6		1204,6		1201,5	
	Presión [MPa]	0,7		0,7		0,2	0,3
Impresión	N° de impresiones	1		2		3	
	Impresión	1		1	2	3	1
	Tiempo de impresión [min]	8		8	4	4	17
	Porcentaje de impresión [%]	100		100	7	7	96
Resultados	Observación	Las primeras 13 capas se imprimieron más "aplastadas", debido al alza en el manejo de la presión. Sin embargo, hubo una buena fluidez del material.		Las primeras dos capas impresas tuvieron un alza en la presión. Además, al secarse la impresión, se inclinó el cordón posterior hacia adentro.		Se observa que las capas impresas tuvieron una mayor adherencia debido a la presión, por lo que, el muro impreso está más "aplastado".	
	Imagen						

Tabla 6.2
 Información técnica de impresión 3D del día 4. Elaboración propia.

Información técnica de los días operativos de impresión 3D							
Pruebas	Día	4					
	Fecha	25-03-2025					
	Objetivo	Prueba de impresión con arcilla del muro MP-RV en escala 1:5.					
Modelo 3D	Nomenclatura	MP-RV					
	Imagen						
	Medidas [mm]	150 x 988 x 514					
	N° de capas	39					
	N° de cordones	4					
Parámetros	Escala	1:5					
	Medidas [mm]	30 x 197 x 102					
Tipo de mezcla	Material	Arcilla					
	Porcentaje de material [%]	67,5					
	Porcentaje de agua [%]	32,5					
	Cantidad de material [gr]	2025					
	Cantidad de agua [gr]	975					
	Total de la mezcla [gr]	3000					
Proceso de mezcla	Tamizado	Sí					
	N° de veces	1					
	Mezclado	Sí					
	Tiempo de mezclado [min]	5					
	Vibrado	Sí					
	Tiempo de vibración [min]	5					
Programación de Gcode	Velocidad de avance [F] [mm/min]	1800					
	Velocidad de extrusión [E] [mm/min]	50					
	Altura de capas [mm]	2,6					
	Diámetro de boquilla [mm]	4					
Configuración de impresora	Diámetro de boquilla [mm]	4					
	Home Z [mm]	1160					
	Presión [MPa]	0,25	0,25	0,3	0,25	0,3	0,35
Impresión	N° de impresiones	6					
	Impresión	1	2	3	4	5	6
	Tiempo de impresión [min]	11	28	6	13	13	13
	Porcentaje de impresión [%]	39	100	21	46	46	46
Resultados	Observación	Al haber un error en la configuración de puntos en el grasshopper, el cordón interior no se adherió a los cordones exteriores.	El muro se derrumbó, debido a que, el cordón interior no se adherió a los cordones exteriores.	El cordón interior no se adherió a los cordones exteriores, por lo que no se pudo terminar la impresión.	El muro se desplomó por la falta de adhesión entre los cordones.	El cordón interior no se adherió a los cordones exteriores.	No se terminó la impresión por la falta de adhesión entre los cordones del muro.
	Imagen						

Tabla 6.3

Información técnica de impresión 3D del día 5 al 7. Elaboración propia.

Información técnica de los días operativos de impresión 3D							
Pruebas	Día	5		6		7	
	Fecha	31-03-2025		03-04-2025		25-06-2025	
	Objetivo	Prueba de impresión con arcilla del muro MP-RV.		Impresión con arcilla de los muros MP-RH y MP-RHV.		Impresión con arcilla del muro ME-FP.	
Modelo 3D	Nomenclatura	MP-RV		MP-RH		MP-RHV	
	Imagen						
	Medidas [mm]	150 x 988 x 514		150 x 988 x 488		150 x 988 x 488	
	N° de capas	39		37		37	
	N° de cordones	4		4		4	
Parámetros	Escala	1:5		1:5		1:5	
	Medidas [mm]	30 x 197 x 102		30 x 197 x 97		30 x 197 x 97	
Tipo de mezcla	Material	Arcilla		Arcilla		Arcilla	
	Porcentaje de material [%]	67,5		67,5		67,5	
	Porcentaje de agua [%]	32,5		32,5		32,5	
	Cantidad de material [gr]	2025		4050		4050	
	Cantidad de agua [gr]	975		1950		1950	
	Total de la mezcla [gr]	3000		6000		6000	
Proceso de mezcla	Tamizado	Sí		Sí		Sí	
	N° de veces	1		1		1	
	Mezclado	Sí		Sí		Sí	
	Tiempo de mezclado [min]	5		5		5	
	Vibrado	Sí		Sí		Sí	
	Tiempo de vibración [min]	5		5		5	
Programación de Gcode	Velocidad de avance [F] [mm/min]	1800		1800		1800	
	Velocidad de extrusión [E] [mm/min]	50		50		50	
	Altura de capas [mm]	2,6		2,6		5,2	
	Diámetro de boquilla [mm]	4		4		8	
Configuración de impresora	Diámetro de boquilla [mm]	4		3		8	
	Home Z [mm]	1160		1160		1160	
	Presión [MPa]	0,3 a 0,35		0,35	0,3	0,25	0,35
Impresión	N° de impresiones	1		3		2	
	Impresión	1		1	2	3	1
	Tiempo de impresión [min]	23		25	24	24	12
	Porcentaje de impresión [%]	100		100	100	100	16
							50
Resultados	Observación	Hubo fluidez en la extrusión del material. Aunque hubieron un par de burbujas de aire que generaron desperfectos, se logró completar la impresión.	Hubo una buena fluidez en la extrusión del material. Por lo que, se logró completar la impresión.	Se imprimió correctamente el prototipo de muro. Sin embargo, al momento de moverlo de la impresora, se comenzó a asentarse.	Se imprimió completamente el prototipo de muro.	No se adherieron correctamente las capas exteriores e interiores del muro, por lo que se desplomó la cara exterior del muro.	Por falta de material no se pudo completar la impresión. Sin embargo, al secarse el muro impreso, se agrietó en el punto más débil del cordón posterior.
	Imagen						

Tabla 6.4

Información técnica de impresión 3D del día 8 al 12. Elaboración propia.

Información técnica de los días operativos de impresión 3D							
Pruebas	Día	8	9	10	11	12	
	Fecha	01-07-2025	02-07-2025	07-07-2025	08-07-2025	22-07-2025	
	Objetivo	Impresión con arcilla del muro ME-FP.	Impresión con arcilla del 50% restante del muro ME-FP.	Impresión con arcilla del muro ME-FO.	Impresión con arcilla del 50% restante del muro ME-FO.	Impresión con arcilla del muro primitivo MP-RH y el muro teórico liso MP-TL.	
Modelo 3D	Nomenclatura	ME-FP	ME-FP	ME-FO	ME-FO	MP-RH	MP-TL
	Imagen						
	Medidas [mm]	196 x 988 x 488	196 x 988 x 488	154 x 988 x 488	154 x 988 x 488	150 x 988 x 488	150 x 988 x 488
	N° de capas	37	37	37	37	37	37
	N° de cordones	4	4	4	4	4	4
Parámetros	Escala	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:2.5	1:5	
	Medidas [mm]	78 x 395 x 195	78 x 395 x 195	61x 395 x 195	61 x 395 x 195	30 x 197 x 97	
Tipo de mezcla	Material	Arcilla	Arcilla	Arcilla	Arcilla	Arcilla	
	Porcentaje de material [%]	65	65	65	65	65	
	Porcentaje de agua [%]	35	35	35	35	35	
	Cantidad de material [gr]	6750	6750	6750	6750	6750	
	Cantidad de agua [gr]	3635	3635	3635	3635	3635	
	Total de la mezcla [gr]	10385	10385	10385	10385	10385	
Proceso de mezcla	Tamizado	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
	N° de veces	1	1	1	1	1	
	Mezclado	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
	Tiempo de mezclado [min]	5	5	5	5	5	
	Vibrado	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	
	Tiempo de vibración [min]	5	5	5	5	5	
Programación de Gcode	Velocidad de avance [F] [mm/min]	1800	1800	1800	1800	1800	
	Velocidad de extrusión [E] [mm/min]	50	50	50	50	50	
	Altura de capas [mm]	5,2	5,2	5,2	5,2	2,6	
	Diámetro de boquilla [mm]	8	8	8	8	4	
Configuración de impresora	Diámetro de boquilla [mm]	8	8	8	8	4	
	Home Z [mm]	1160	1160	1160	1160	1160	
	Presión [MPa]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
Impresión	N° de impresiones	1	1	1	1	2	
	Impresión	1	1	1	1	1	2
	Tiempo de impresión [min]	30	30	30	30	25	25
	Porcentaje de impresión [%]	50	50	50	50	100	100
Resultados	Observación	La impresión resultó correctamente. Sin embargo, se realizó el 50% restante del muro el día siguiente, para que las primeras capas tuvieran una mayor resistencia.	Se completó correctamente la siguiente parte del muro.	La impresión resultó correctamente.	Se completó correctamente el 50% restante del muro.	Hubo una buena fluidez en la extrusión del material, sin embargo, aparecieron burbujas de aire.	A pesar de que se generaron burbujas de aire, se completó correctamente la impresión.
	Imagen						

21. Prototipos de muros impresos

Las siguientes tablas presentan las vistas en elevaciones e isométricas de los muros fabricados en arcilla mediante impresión 3D. Se incluyen elevaciones frontales, posteriores, laterales, vistas en planta y perspectiva isométrica para cada prototipo.

21.1. Prototipo de muro MT-L

Como se observa en la Tabla 6.5, la impresión del prototipo de muro teórico liso (MT-L) fue realizada en escala 1:5, y presentó buena fluidez de la mezcla durante el proceso de impresión, sin embargo, hubo leves burbujas de aire debido al alza en la presión.

Tabla 6.5

Vista del prototipo de muro impreso MT-L. Elaboración propia.

Vistas del prototipo de muro impreso MT-L	
Isométrica	Planta
	
Elevación frontal	Elevación posterior
	
Elevación lateral izquierda	Elevación lateral derecha
	

21.2. Prototipo de muro MP-RV

Como se observa en la Tabla 6.6, la impresión del prototipo de muro MP-RV fue realizada en escala 1:5, y presentó buena estabilidad durante el proceso de fabricación.

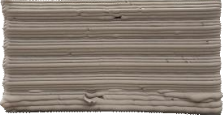
Tabla 6.6
Vista del prototipo de muro impreso MP-RV. Elaboración propia.

Vistas del prototipo de muro impreso MP-RV	
Isométrica	Planta
	
Elevación frontal	Elevación posterior
	
Elevación lateral izquierda	Elevación lateral derecha
	

21.3. Prototipo de muro MP-RH

En las vistas laterales del prototipo de muro MP-RH de la Tabla 6.7, se observa una modulación de relieves horizontales, mientras que en planta se observa una variación en la profundidad del cordón. Este muro fue uno de los más rápidos de imprimir y no presentó colapsos en su fabricación, sin embargo, luego de secarse completamente, se contrajo y se quebró en su punto más débil, es decir, en la unión posterior del muro.

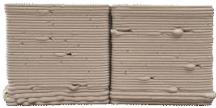
Tabla 6.7
Vista del prototipo de muro impreso MP-RH. Elaboración propia.

Vistas del prototipo de muro impreso MP-RH	
Isométrica	Planta
	
Elevación frontal	Elevación posterior
	
Elevación lateral izquierda	Elevación lateral derecha
	

21.4. Prototipo de muro MP-RH

En las vistas laterales del prototipo de muro MP-RHV (ver Tabla 6.8) se aprecia la interacción entre ambos ejes de curvatura, y a pesar de la complejidad de su geometría, la impresión resultó exitosa, aunque necesitó mayor tiempo de secado y control de la presión.

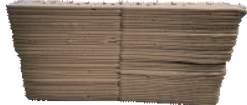
Tabla 6.8
Vista del prototipo de muro impreso MP-RHV. Elaboración propia.

Vistas del prototipo de muro impreso MP-RHV	
Isométrica	Planta
	
Elevación frontal	Elevación posterior
	
Elevación lateral izquierda	Elevación lateral derecha
	

21.5. Prototipo de muro ME-FO

En las vistas del prototipo de muro impreso ME-FO de la Tabla 6.9, se observan los relieves orientados hacia el noreste, con la finalidad de bloquear el sol de la mañana. La fabricación de este muro fue estable, y se imprimió en dos etapas, permitiendo mayor firmeza entre capas.

Tabla 6.9
Vista del prototipo de muro impreso ME-FO. Elaboración propia.

Vistas del prototipo de muro impreso ME-FO	
Isométrica	Planta
	
Elevación frontal	Elevación posterior
	
Elevación lateral izquierda	Elevación lateral derecha
	

21.6. Prototipo de muro ME-FP

En las vistas del prototipo de muro impreso ME-FP de la Tabla 6.10, se aprecia que la geometría del muro incorpora ondulaciones suaves que aumentan progresivamente y se intercalan entre sí. La impresión del muro se completó con éxito en escala 1:2.5, aunque se imprimió en dos etapas, permitiendo que el 50% del muro impreso se seque y al día siguiente se completó la siguiente parte del muro.

Tabla 6.10
Vista del prototipo de muro impreso ME-FP. Elaboración propia.

Vistas del prototipo de muro impreso ME-FP	
Isométrica	Planta
	
Elevación frontal	Elevación posterior
	
Elevación lateral izquierda	Elevación lateral derecha
	

CAPÍTULO 07.

Resultados y conclusiones

22. Resultados generales de la simulación

Se realizaron simulaciones de irradiación solar acumulada en $[KWh/m^2]$ sobre ocho muros distintos, expuestos a tres orientaciones (oriente, norte y poniente) y tres días claves del año: solsticio de verano, equinoccio de primavera y solsticio de invierno. Los datos fueron obtenidos con el plugin “Ladybug Tools” (Mackey & Sadeghipour, 2017), utilizando el archivo climático (EPW) de Santiago de Chile.

El prototipo de muro teórico liso (MT-L) fue utilizado como referencia para comparar la efectividad de las estrategias geométricas pasivas implementadas en los otros muros. A continuación, se resumen los resultados más relevantes: oriente 3,226 $[KWh/m^2]$, norte 0,676 $[KWh/m^2]$ y poniente 1,917 $[KWh/m^2]$. El prototipo de muro con relieve vertical (MP-RV) aumentó la captación solar en las orientaciones oriente y norte, debido a su forma perpendicular a la trayectoria solar, sólo en la orientación poniente mostró una leve disminución de 9%. El prototipo de muro con relieve horizontal (MP-RH) tuvo un mejor desempeño en la orientación poniente, sin embargo, en la orientación norte no logró reducir la captación solar en el solsticio de verano, e incluso aumentó en comparación con el muro teórico liso. El prototipo de muro con relieve combinado (MP-RHV) mostró resultados intermedios, ya que, en el solsticio de verano en la orientación norte, logró igualar casi el prototipo de muro teórico liso con un valor de 0,682 versus 0,676 $[KWh/m^2]$, pero sin una mejora significativa.

Los prototipos de muros evolutivos fueron diseñados específicamente en base a la trayectoria solar y muestran los mejores resultados; el prototipo de muro evolutivo fachada oriente (ME-FO) redujo la irradiación solar acumulada mensual en diciembre (verano) de 3,226 a 2,274 $[KWh/m^2]$, con una disminución del 30%, en junio (invierno), la reducción fue 33%, y en el septiembre (primavera), disminuyó un 32%.

La primera versión del prototipo de muro evolutivo norte (ME-FN-V01), no logró una mejora frente al muro teórico liso en diciembre (verano), ya que, mantuvo el mismo valor en la irradiación solar acumulada (0,676 [KWh/m²]), por lo que no se consideró como una versión definitiva. En cambio, la versión dos del prototipo de muro evolutivo norte (ME-FN-V02), disminuyó la captación solar en diciembre (verano) a 0,604 [KWh/m²], es decir, en un 11% menos, en septiembre (primavera) la reducción fue de 25%, y en junio (invierno) fue de 23%. Finalmente, el muro evolutivo fachada poniente (ME-FP), mostró las mayores reducciones generales en esa orientación, con una baja de 13% en diciembre (verano), 23% en junio (invierno), y 13% en septiembre (primavera) (ver el Tabla 7.1).

Tabla 7.1

Resultados comparativos de los prototipos de muros evolutivos versus el prototipo de muro teórico liso. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

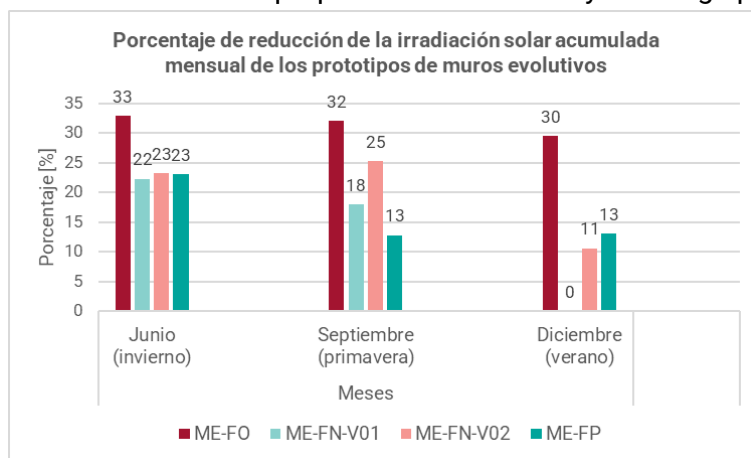
Resultados comparativos de los prototipos de muros evolutivos vs. el prototipo de muro teórico liso			
Nomenclatura del prototipo de muro	Meses		
	Junio (invierno)	Septiembre (primavera)	Diciembre (verano)
MT-L vs. ME-FO			
MT-L [kWh/m ²]	0,656	2,388	3,226
ME-FO [kWh/m ²]	0,440	1,637	2,274
Reducción [%]	33	32	30
MT-L vs. ME-FN-V01			
MT-L [kWh/m ²]	1,137	1,057	0,676
ME-FN-V01 [kW]	0,883	0,861	0,676
Reducción [%]	22	18	0
MT-L vs. ME-FN-V02			
MT-L [kWh/m ²]	1,137	1,057	0,676
ME-FN-V02 [kW]	0,872	0,791	0,604
Reducción [%]	23	25	11
MT-L vs. ME-FP			
MT-L [kWh/m ²]	0,222	0,867	1,917
ME-FP [kWh/m ²]	0,171	0,756	0,604
Reducción [%]	23	13	13

23. Conclusiones

A partir de esta investigación, se concluye que, el diseño geométrico adaptado a la trayectoria solar es eficaz, puesto que, los muros evolutivos (ME) demostraron mejoras significativas en comparación a los muros primitivos (MP) y al muro teórico liso (MT-L). Con respecto a los porcentajes obtenidos, estos alcanzaron un 33% de reducción de la irradiación solar acumulada mensual (ver Gráfico 7.1), lo que valida la hipótesis de que la geometría exterior del muro puede actuar como estrategia pasiva de control solar, reduciendo el ingreso térmico sin necesidad de dispositivos adicionales. También, se concluye que no todos los relieves reducen la irradiación solar acumulada, ya que, algunos muros con relieves simples, como el muro vertical (MP-RV) y el muro horizontal (MP-RH), incluso aumentaron la captación solar en ciertas orientaciones, demostraron que no basta con agregar ondulaciones, puesto que, su efectividad depende del ángulo solar, la orientación del muro y la forma específica del relieve.

Gráfico 7.1

Porcentaje de reducción de la irradiación solar acumulada mensual de los prototipos de muros evolutivos. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).



Como también, la orientación define el tipo de estrategia geométrica que se debe implementar en el diseño del cordón exterior del muro, ya que, cada fachada solar requiere un diseño diferente, como por ejemplo, la fachada oriente requirió una demanda de protección matinal (ME-FO fue eficiente), la fachada norte exige una precisión de la protección solar al mediodía (ME-FN-V02 logró la reducción de la irradiación solar acumulada mensual, pero no fue viable su construcción), y la fachada poniente necesita protección vespertina (ME-FP fue eficaz).

Se debe tomar en consideración que la forma global del muro también influye en la viabilidad constructiva, como, por ejemplo, el muro ME-FN-V02, demostró que no siempre basta con modificar el relieve exterior: en ese caso, la geometría completa del muro se alteró, siendo más ancha arriba que abajo, esto genera inestabilidad durante la impresión, lo que muestra que el buen desempeño térmico puede ser incompatible con la fabricación de los prototipos de muros.

Además, se puede concluir que es posible imprimir muros térmicamente eficientes, pero con condiciones, ya que, la mayoría de los modelos se imprimieron exitosamente en arcilla, sin embargo, fue necesario controlar la mezcla, la presión, la forma del cordón y las proporciones geométricas para evitar colapsos durante la impresión, esto demuestra que la eficiencia solar debe ir acompañada de la viabilidad física desde el diseño propio del muro.

Por último, se puede concluir que, los muros con relieves ya sean verticales u horizontales, aumentan la superficie real del muro, teniendo mayor área que el metro cuadrado del muro teórico liso, lo que provoca una captación solar más alta, como se evidenció en las simulaciones. Lo anterior es clave para entender que la geometría exterior del muro puede generar efectos térmicos no deseados si no se considera el aumento del área proyectada del muro (ver Figura 7.1).

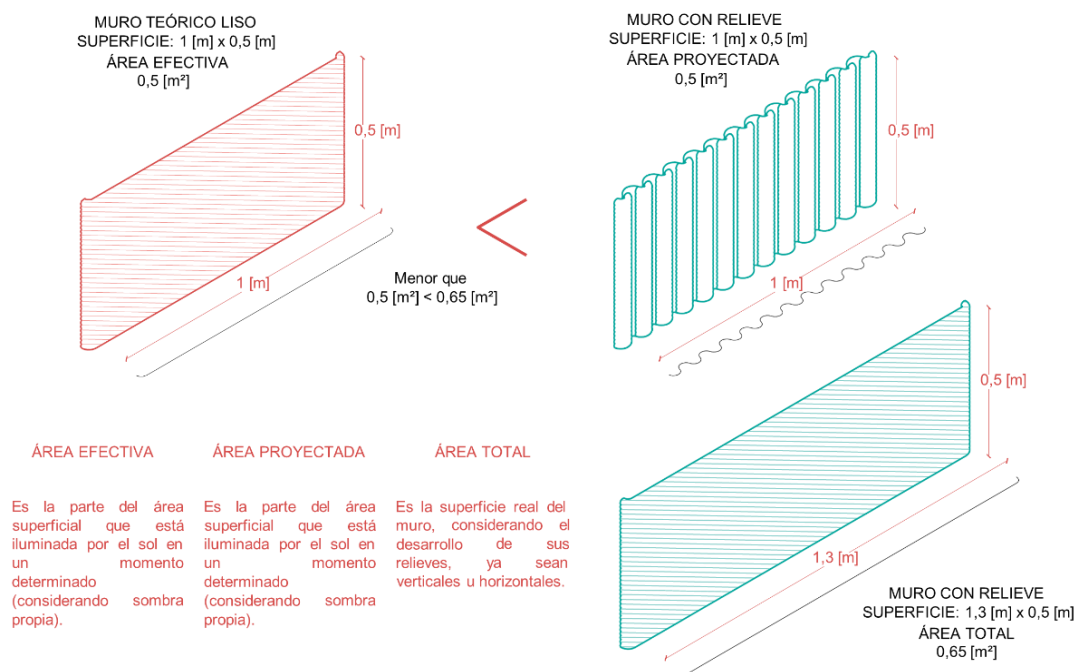


Figura 7.1

Comparación entre el área proyectada y el área efectiva del muro teórico liso y un muro con relieve. Elaboración propia.

24. Investigaciones futuras

A partir de este estudio, se abren múltiples líneas de investigación para continuar desarrollando y mejorando los resultados obtenidos. Por ejemplo, se propone realizar simulaciones térmicas avanzadas utilizando un software como ANSYS, con el fin de modelar con mayor precisión la transmisión de calor, acumulación térmica y comportamiento estacional de los muros. Además, podría desarrollarse un método automatizado basado en inteligencia artificial, que, al ingresar datos climáticos de una ubicación determinada, genere de forma directa geometrías adaptadas para cada caso, facilitando su implementación en distintos contextos geográficos. Finalmente, se podría explorar la utilización de otros materiales imprimibles como biocemento o materiales reciclados, lo cual permitiría aplicar esta metodología en proyectos de arquitectura sustentable con mayor flexibilidad y menor impacto ambiental. Estas proyecciones permitirían consolidar un método de diseño ambientalmente consciente, adaptable, fabricable y sustentable, basado en datos climáticos locales y tecnologías digitales de nueva generación.

REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS

- Amado, M., & Poggi, F. (2022). Physical, Social and Energy Analysis. *Sustainable Energy Transition for Cities*, 65–87. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824277-3.00001-3>
- Barbero-Barrera, M. del M., Tendero-Caballero, R., & García de Viedma-Santoro, M. (2024). Impact of Solar Shading on Façades' Surface Temperatures under Summer and Winter Conditions by IR Thermography. *Architecture*, 4(2), 221–246. <https://doi.org/10.3390/architecture4020014>
- Boujoudar, M., Bouarfa, I., El Ydrissi, M., Abraim, M., El Alani, O., Bennouna, E. G., & Ghennioui, H. (2024). Design and development of a low-cost single-axis solar tracking system. *Performance Enhancement and Control of Photovoltaic Systems*, 359–373. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13392-3.00018-9>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. En *Cement and Concrete Research* (Vol. 112, pp. 37–49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- Chamatete, K., & Yalçınkaya, Ç. (2024). Numerical Evaluation on Thermal Performance of 3D Printed Concrete Walls: The Effects of Lattice Type, Filament Width and Granular Filling Material. *Buildings*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/buildings14040926>
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., & Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)

- Dervishaj, A., & Gudmundsson, K. (2024). Parametric design workflow for solar, context-adaptive and reusable facades in changing urban environments. *Journal of Building Performance Simulation*. <https://doi.org/10.1080/19401493.2024.2432916>
- Dziura, P., Maroszek, M., Góra, M., Rudziewicz, M., Pławecka, K., & Hebda, M. (2023). Influence of the In-Fill Pattern of the 3D Printed Building Wall on Its Thermal Insulation. *Materials*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/ma16175772>
- EL-Mahdy, D., & Ali, M. (2024). Assessing the solar radiation performance of self-shaded 3D-printed clay-based façades. *Architectural Engineering and Design Management*, 20(2), 249–268. <https://doi.org/10.1080/17452007.2023.2285325>
- García, R. (2020). *Construcción impresa-3D en la Universidad del Bío-Bío: oportunidad única de innovación*. construye2025. <https://construye2025.cl/2020/12/21/construccion-impresa-3d-en-la-universidad-del-bio-bio-oportunidad-unica-de-innovacion/>
- Gastli, A., & Charabi, Y. (2010). Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 790–797. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.08.018>
- Hossain, M. A., Zhumabekova, A., Paul, S. C., & Kim, J. R. (2020). A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Número 20, pp. 1–21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su12208492>
- ICH. (2024). *Universidad del Bío-Bío completó la primera construcción de hormigón impreso 3D en Chile*. ICH. <https://ich.cl/noticias-ich/universidad-del-bio-bio-completo-la-primera-construccion-de-hormigon-impreso-3d-en-chile/>
- Kalogirou, S. A. (2009). Environmental Characteristics. *Solar Energy Engineering*, 49–762. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.00002-9>

- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558–566. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.12.003>
- Mackey, C., & Sadeghipour, M. (2017). *Ladybug Tools LLC*.
- Marsh, A. (2023a). *2D Data View*. AndrewMarsh. <https://drajmarsh.bitbucket.io/data-view2d.html>
- Marsh, A. (2023b). *3D Sun-Path*. AndrewMarsh. <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath3d.html>
- McNeel, R. (1993). *Rhinoceros 8*. <https://www.rhino3d.com/>
- McNeel, R. (2007). *Grasshopper: Algorithmic modeling for Rhino*. <https://www.grasshopper3d.com/>
- Meteoblue. (2024). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Santiago de Chile*. Meteoblue. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/santiago-de-chile_chile_3871336
- Milne, M. (2014). *Climate Consultant*. Society of Building Science Educators. <https://www.sbse.org/resources/climate-consultant>
- Núñez, R., & Victoria, M. (2024). Solar Radiation. *Fundamentals of Solar Cells and Photovoltaic Systems Engineering*, 25–57. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96105-9.00002-1>
- Page, J. (2018). The role of solar-radiation climatology in the design of photovoltaic systems. *McEvoy's Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 601–670. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809921-6.00016-1>

- Qazi, S. (2017). Fundamentals of Standalone Photovoltaic Systems. *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas*, 31–82. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803022-6.00002-2>
- Rioseco, R., & Tesser, C. (s. f.). *Cartografía interactiva de los climas de Chile*. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. UC. Recuperado 12 de diciembre de 2024, de https://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/index.htm
- Rongzhi, Z., & Kaizhong, Y. (2020). Basics of orbital calculation for spacecraft collision avoidance. *Spacecraft Collision Avoidance Technology*, 11–33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818011-2.00002-7>
- Sakin, M., & Kiroglu, Y. C. (2017). 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM. *Energy Procedia*, 134, 702–711. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.562>
- Tamimi, A. Al, Hassan, H., Rodriguez-Ubinas, E., Alhaidary, H., & Mansouri, A. (2023). Thermal performance of 3D concrete printed walls: calculated and in-situ measured U-values. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. <https://doi.org/10.1080/13467581.2023.2278467>

ANEXO A. Gráficos de la trayectoria solar

A.1 Solsticio de invierno

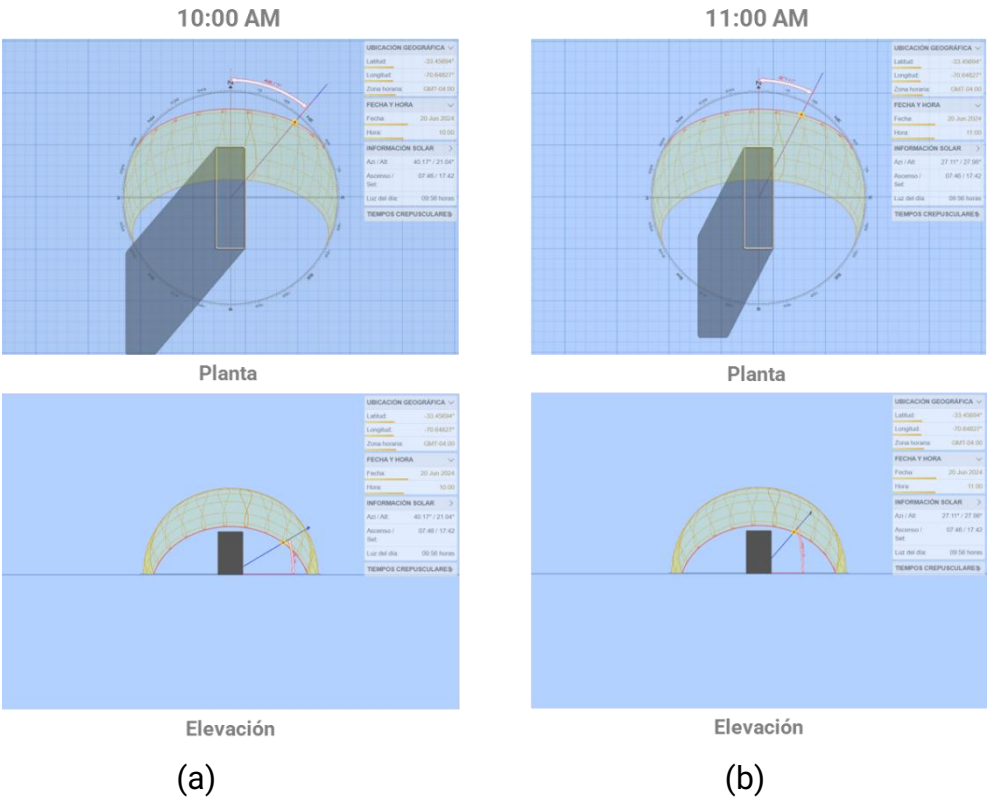


Figura A.1

- a) Posición del sol a las 10:00 AM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile.
- b) Posición del sol a las 11:00 AM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

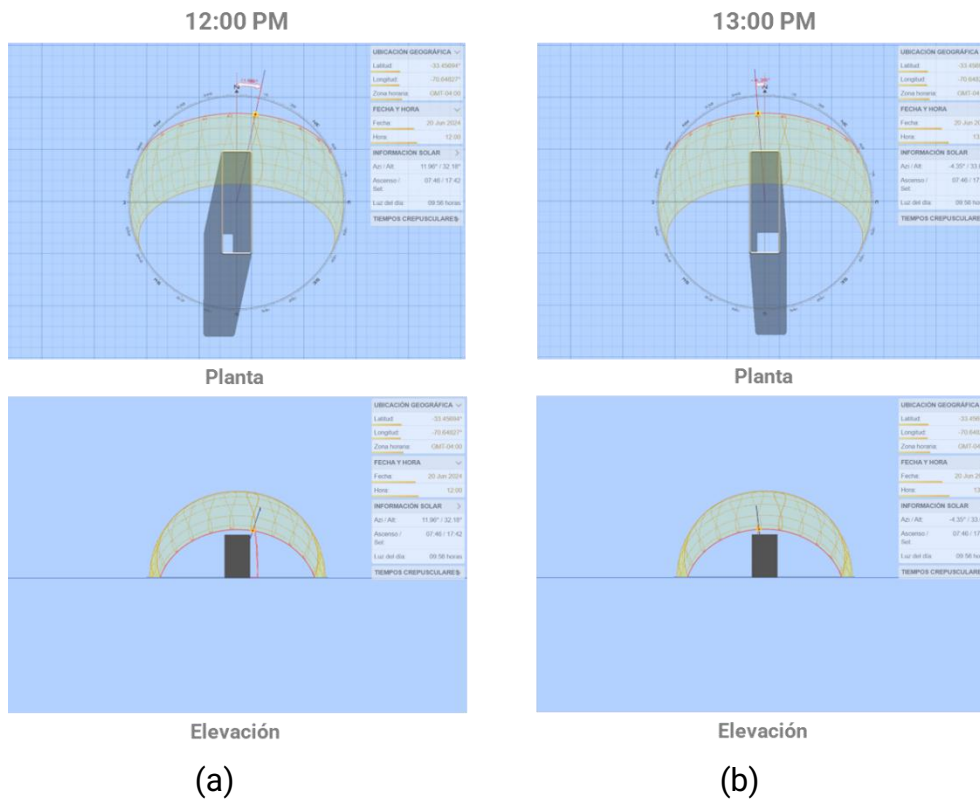


Figura A.2

- a) Posición del sol a las 12:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile.
 b) Posición del sol a las 13:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

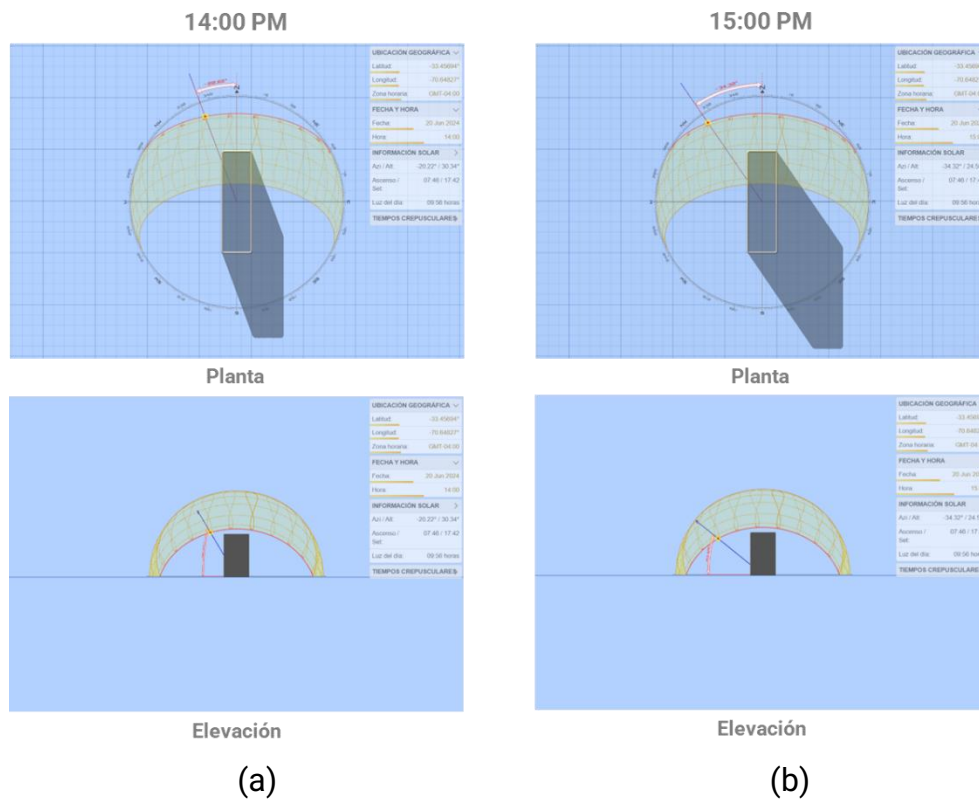


Figura A.3

- a) Posición del sol a las 14:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile.
 b) Posición del sol a las 15:00 PM en el solsticio de invierno en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

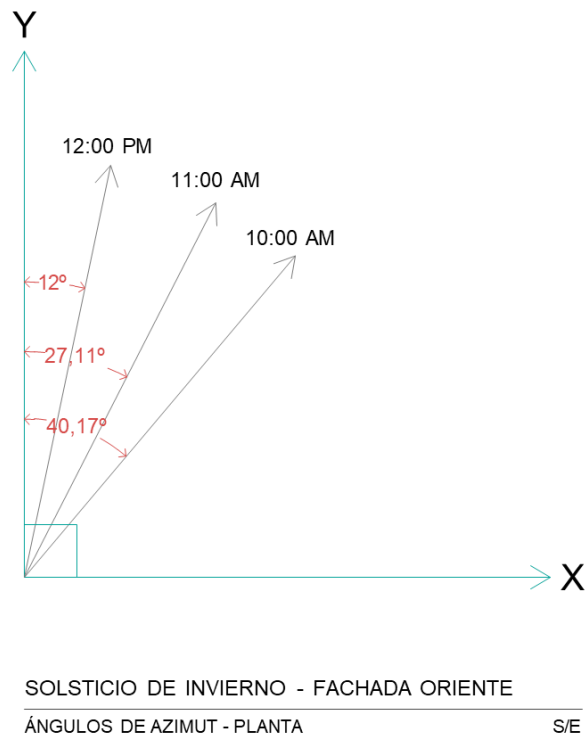
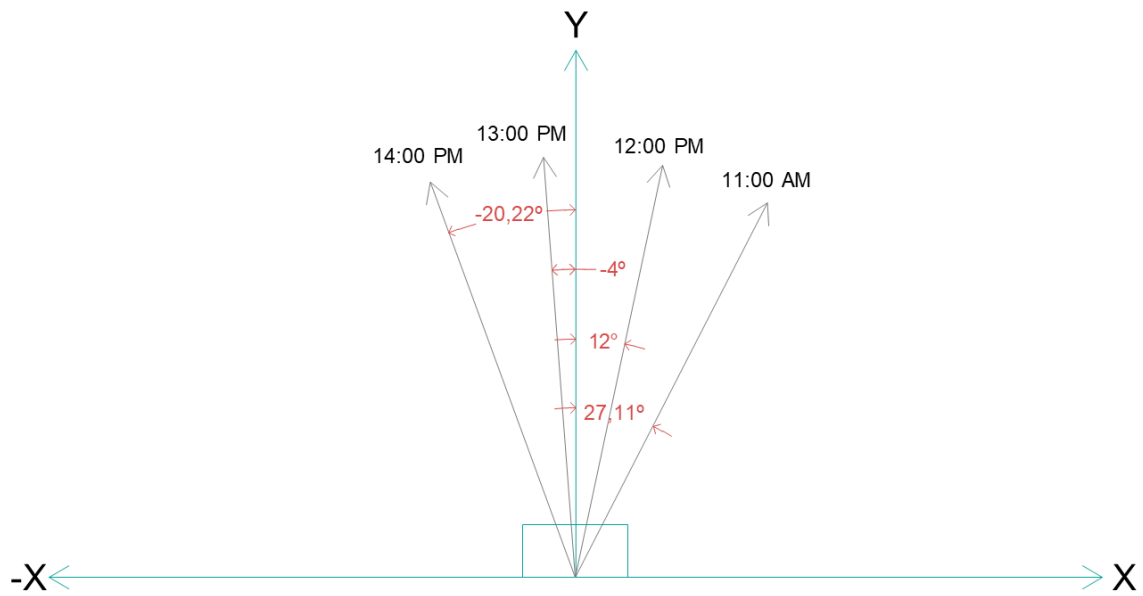


Figura A.4

Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en la orientación oriente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).



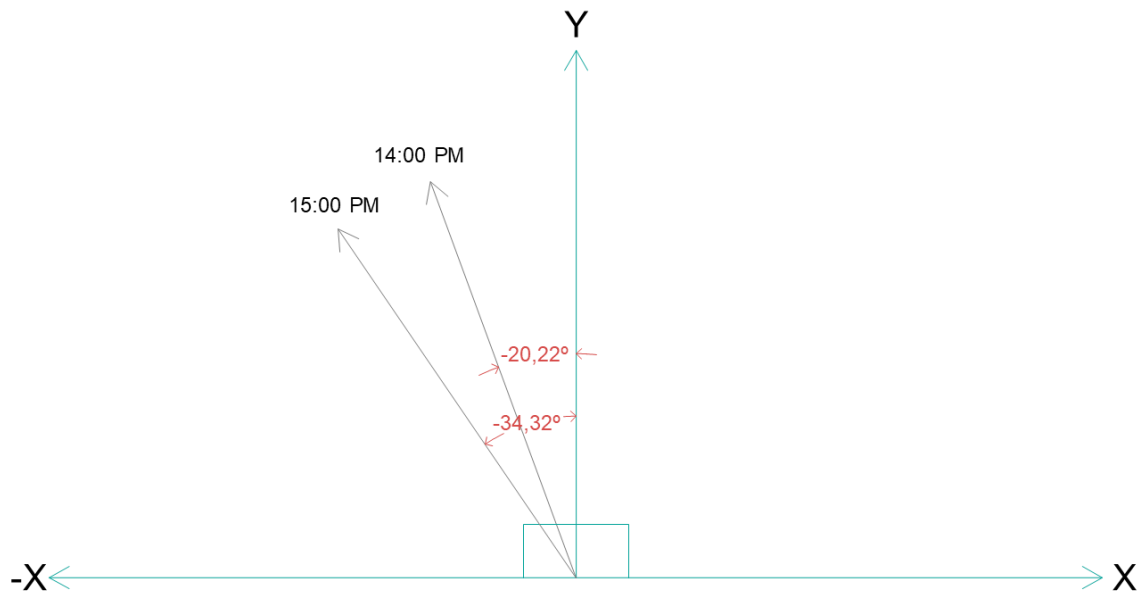
SOLSTICIO DE INVIERNO - FACHADA NORTE

ÁNGULOS DE AZIMUT - PLANTA

S/E

Figura A.5

Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en la orientación norte de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).



SOLSTICIO DE INVIERNO - FACHADA PONIENTE

ÁNGULOS DE AZIMUT - PLANTA

S/E

Figura A.6

Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en la orientación poniente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Tabla A.1

Ángulos de la posición solar del solsticio de invierno en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Santiago de Chile		
Solsticio de invierno (20 de junio)		
Horas	Ángulo	
	Azimut	Altitud
10:00 AM	40,17°	21,04°
11:00 AM	27,11°	27,98°
12:00 PM	11,96°	32,18°
13:00 PM	-4,35°	33,01°
14:00 PM	-20,22°	30,34°

Tabla A.2

Horario de las orientaciones en el solsticio de invierno en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Orientación	Horario solar
Oriente	10:00 AM a 12:00 PM
Norte	11:00 AM a 14:00 PM
Poniente	14:00 PM

A.2 Equinoccio de primavera

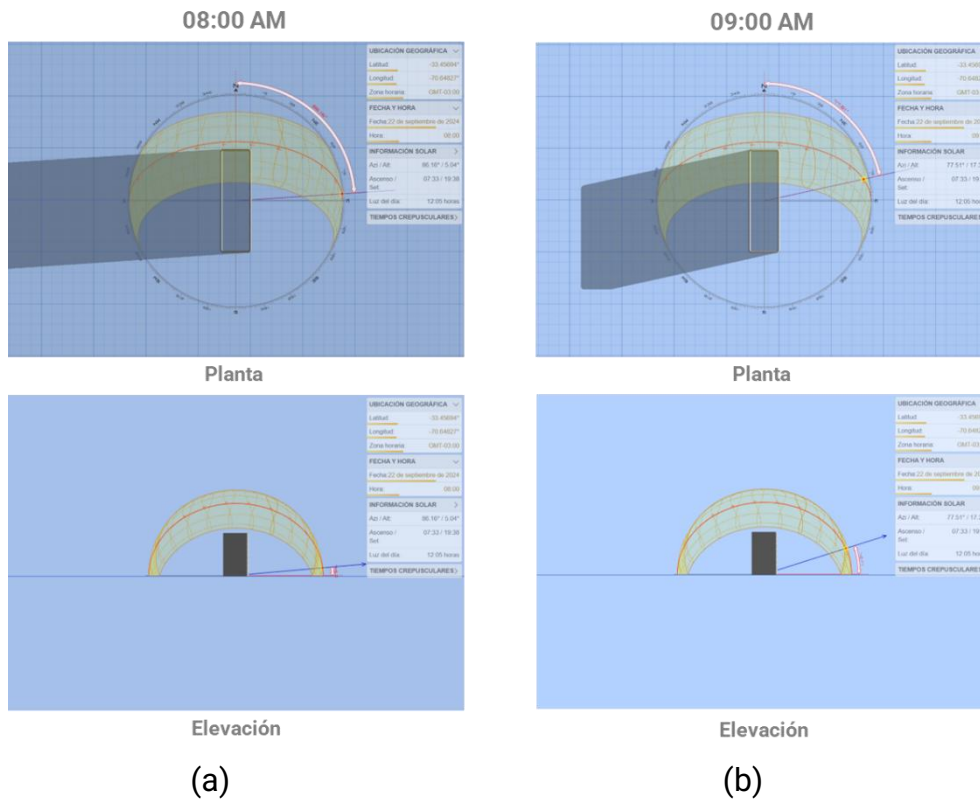


Figura A.7

- a) Posición del sol a las 08:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile.
 b) Posición del sol a las 09:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile
 (Marsh, 2023b).

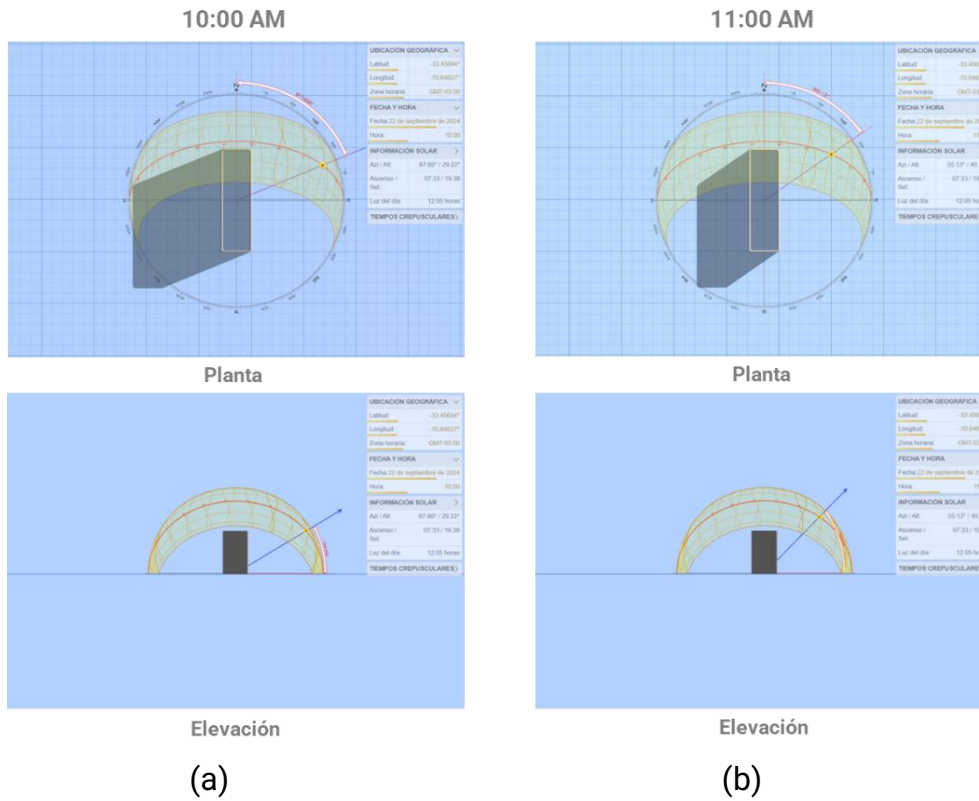


Figura A.8

- a) Posición del sol a las 10:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile.
 b) Posición del sol a las 11:00 AM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile
 (Marsh, 2023b).

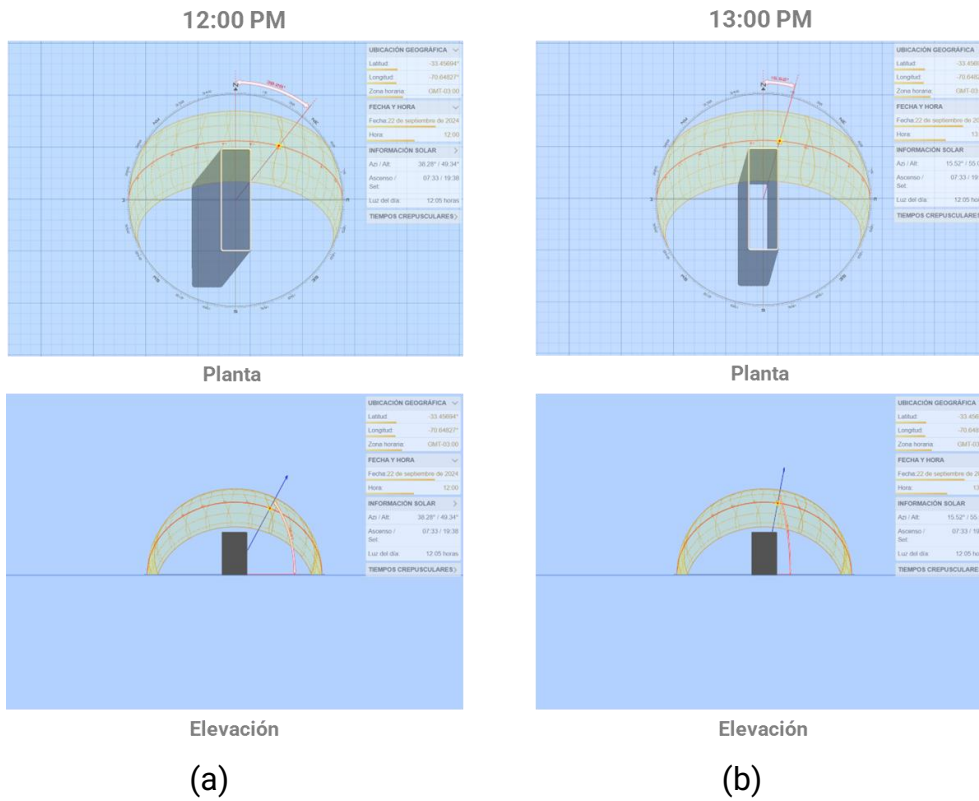


Figura A.9

- a) Posición del sol a las 12:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile.
 b) Posición del sol a las 13:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile
 (Marsh, 2023b).

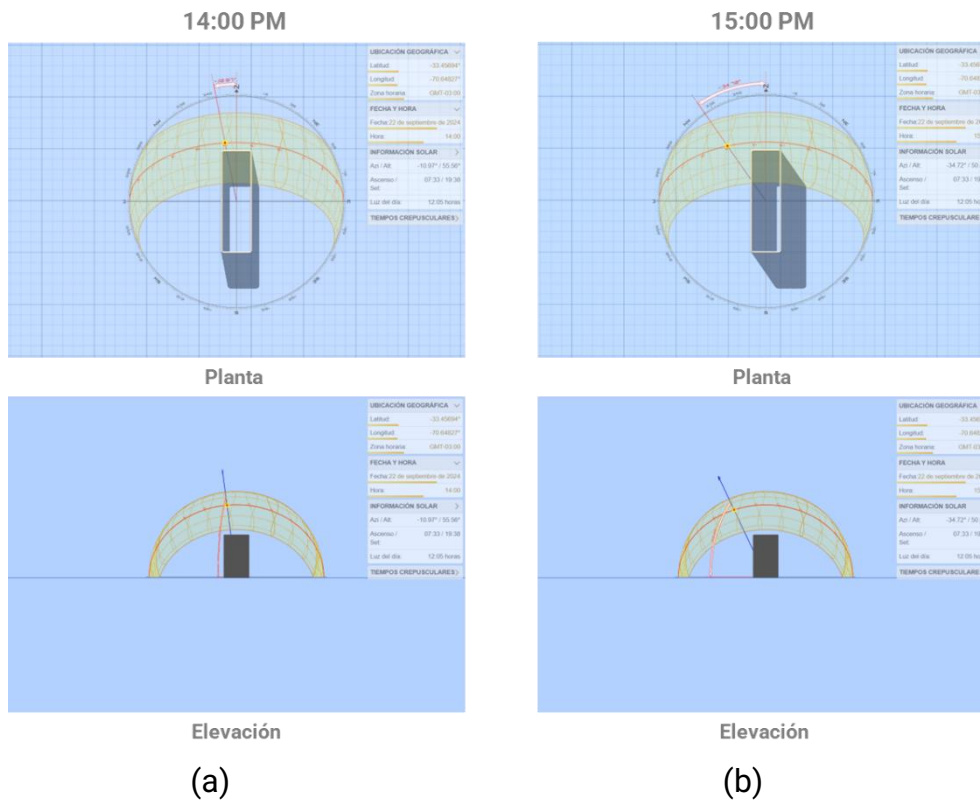


Figura A.10

- a) Posición del sol a las 14:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile.
- b) Posición del sol a las 15:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

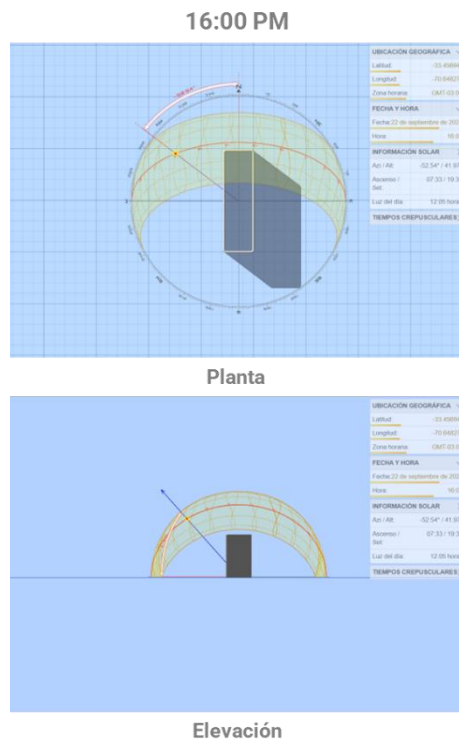


Figura A.11

Posición del sol a las 16:00 PM en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

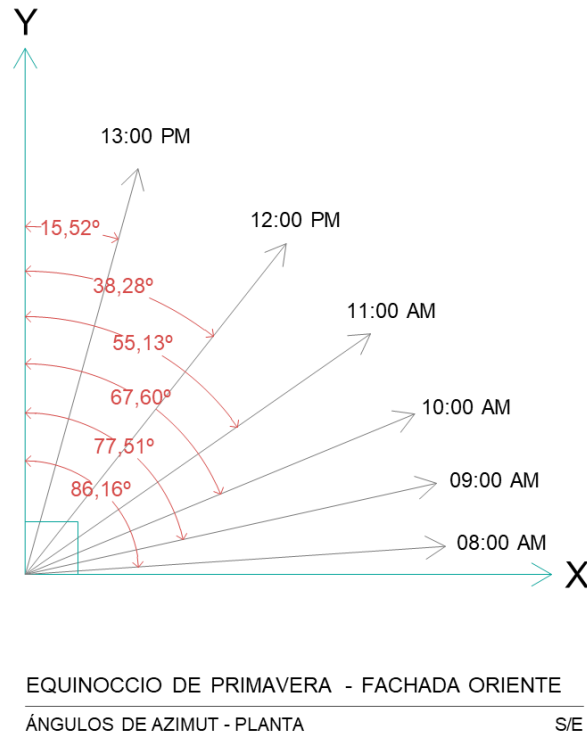
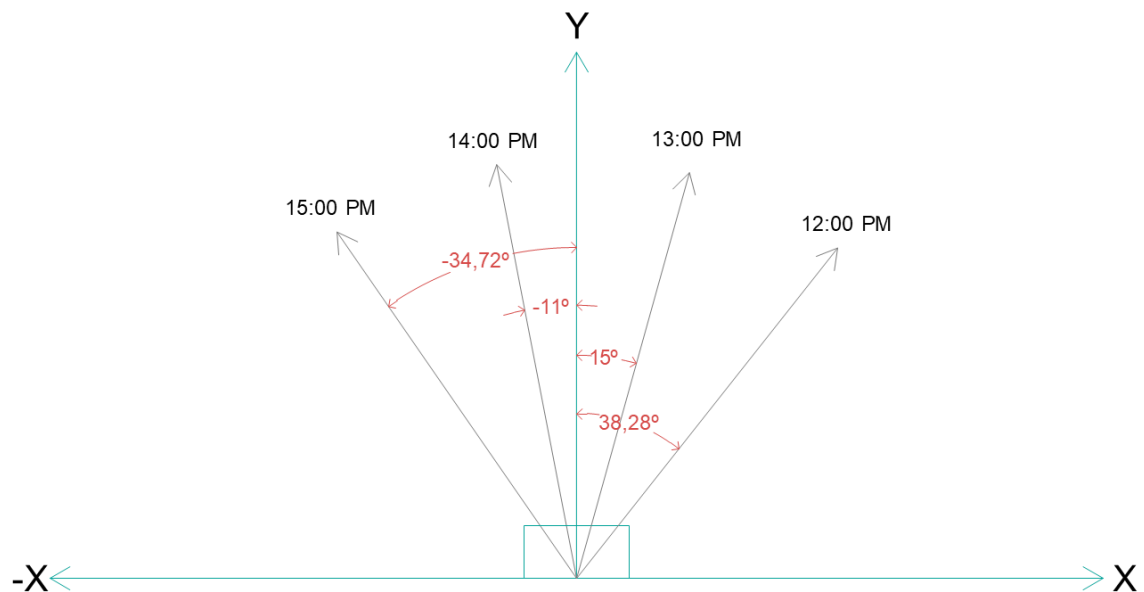


Figura A.12

Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en la orientación oriente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).



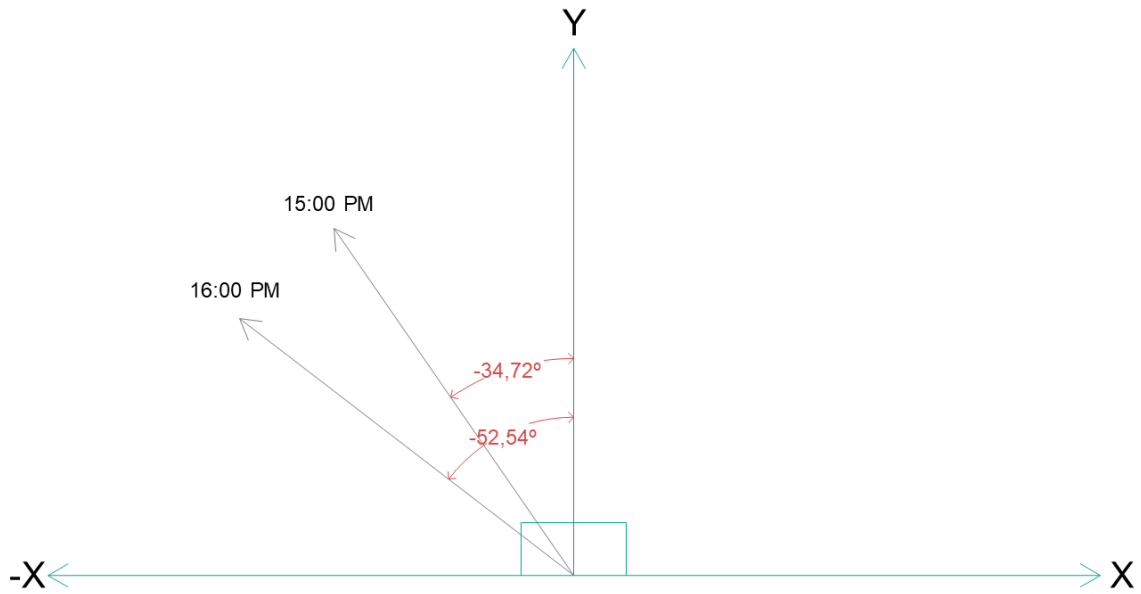
EQUINOCCIO DE PRIMAVERA - FACHADA NORTE

ÁNGULOS DE AZIMUT - PLANTA

S/E

Figura A.13

Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en la orientación norte de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).



EQUINOCCIO DE PRIMAVERA - FACHADA PONIENTE

ÁNGULOS DE AZIMUT - PLANTA

S/E

Figura A.14

Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en la orientación poniente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Tabla A.3

Ángulos de la posición solar del equinoccio de primavera en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Santiago de Chile		
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)		
Horas	Ángulo	
	Azimut	Altitud
08:00 AM	86,16°	5,04°
09:00 AM	77,51°	17,31°
10:00 AM	67,60°	29,22°
11:00 AM	55,13°	40,20°
12:00 PM	38,28°	49,34°
13:00 PM	15,52°	55,06°
14:00 PM	-10,97°	55,56°
15:00 PM	-34,72°	50,65°
16:00 PM	-52,54°	41,97°

Tabla A.4

Horario de las orientaciones en el equinoccio de primavera en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Orientación	Horario solar
Oriente	08:00 AM a 13:00 PM
Norte	12:00 PM a 15:00 PM
Poniente	15:00 PM a 16:00 PM

A.3 Solsticio de verano

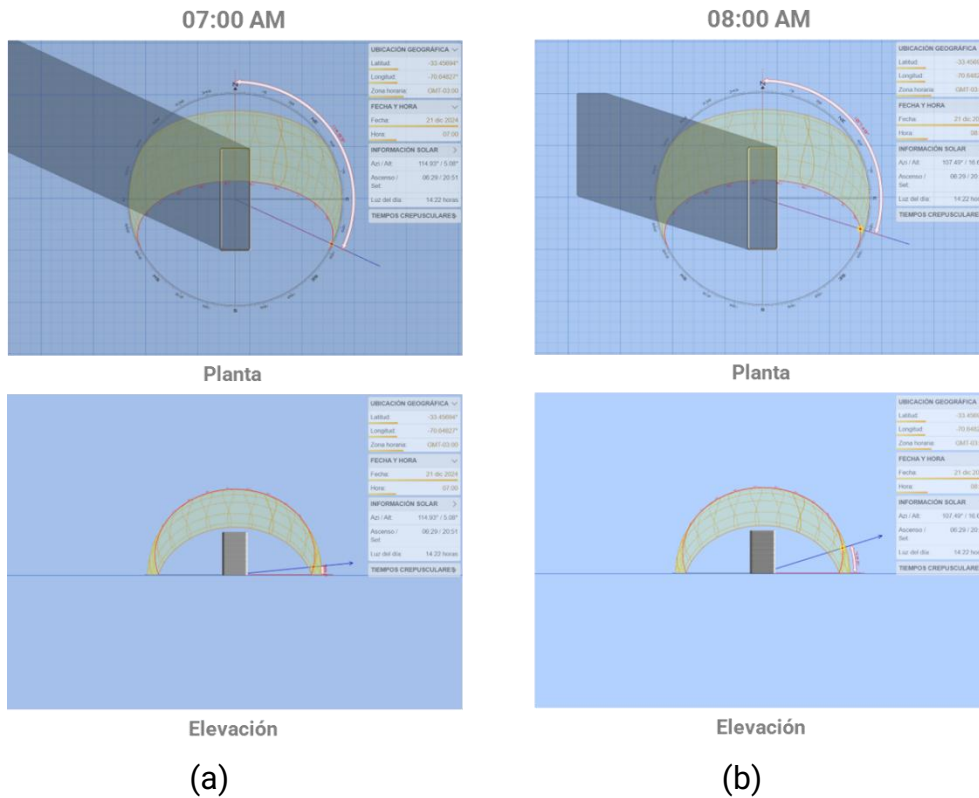


Figura A.15

- a) Posición del sol a las 07:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile.
b) Posición del sol a las 08:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

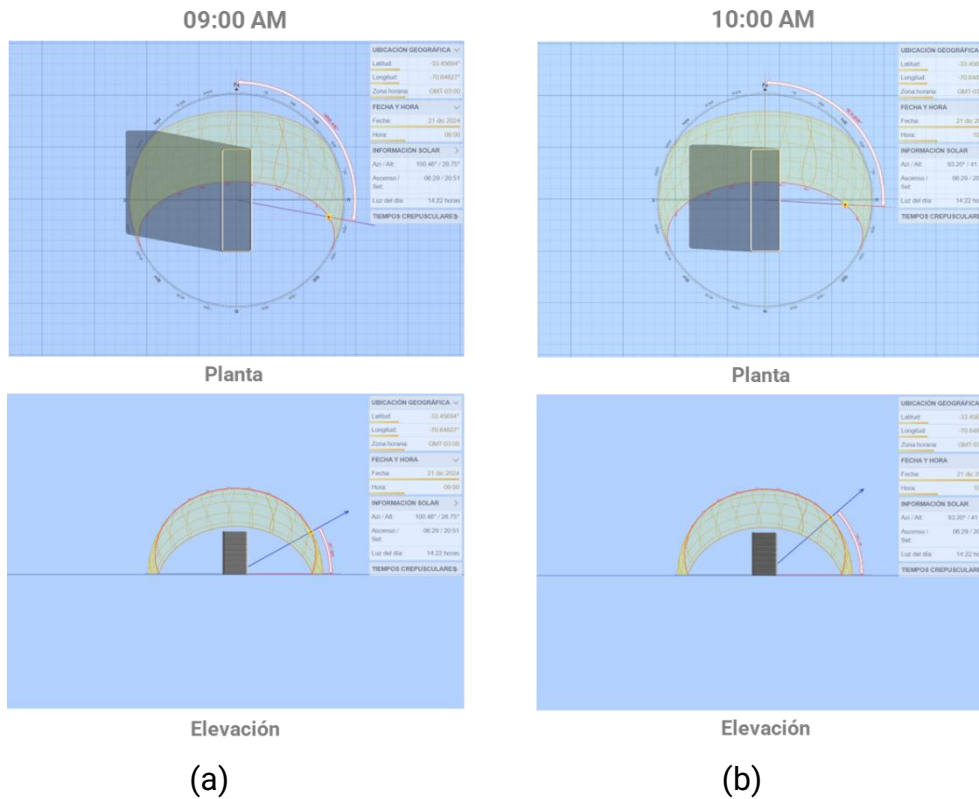


Figura A.16

- a) Posición del sol a las 09:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile.
- b) Posición del sol a las 10:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

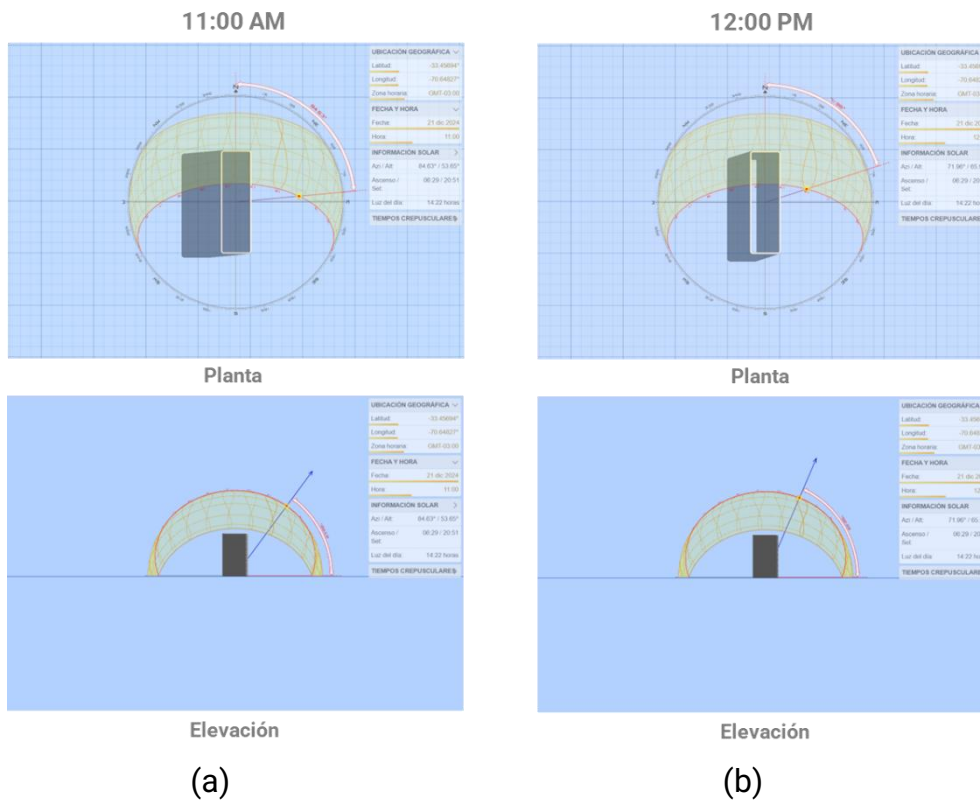


Figura A.17

- a) Posición del sol a las 11:00 AM en el solsticio de verano en Santiago de Chile.
- b) Posición del sol a las 12:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

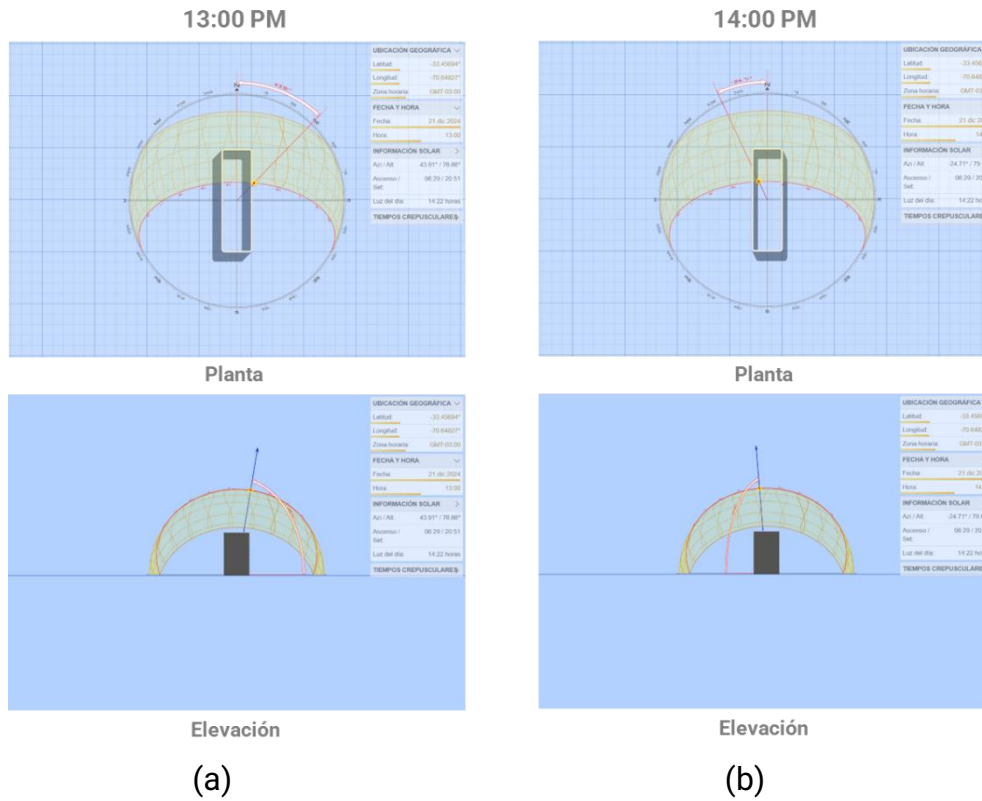


Figura A.18

- a) Posición del sol a las 13:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile.
- b) Posición del sol a las 14:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

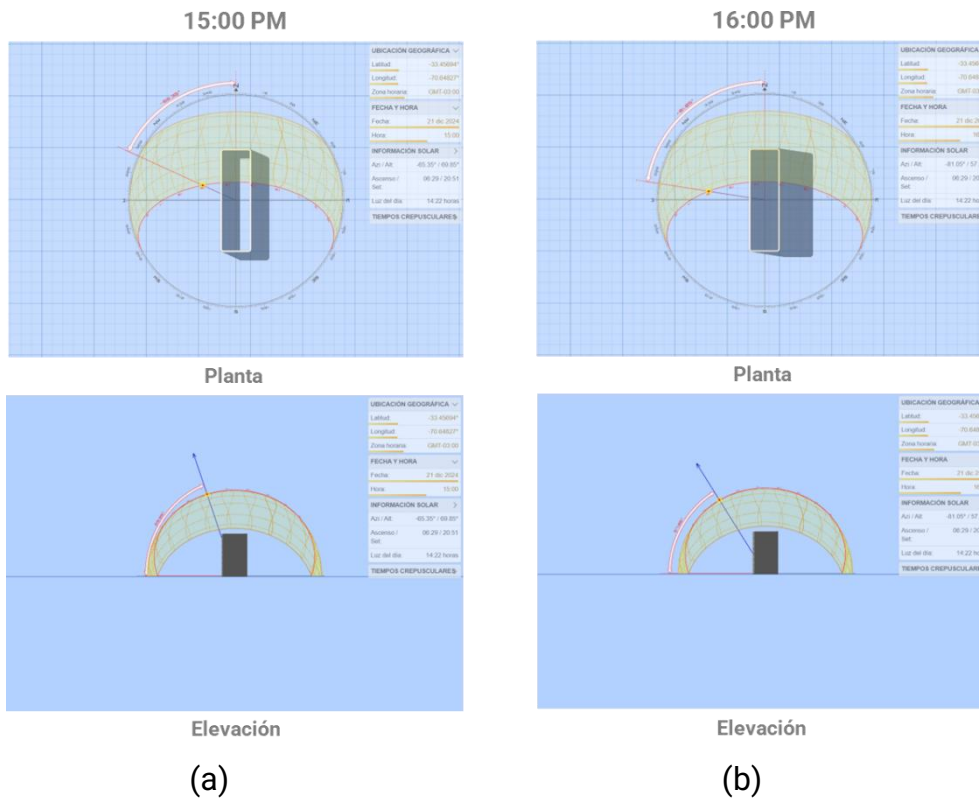
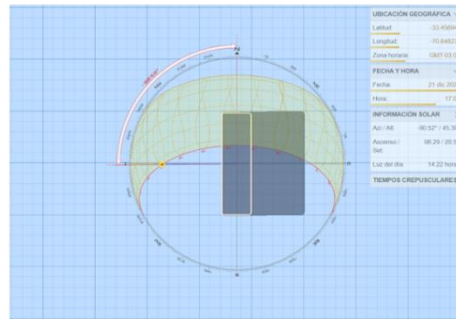


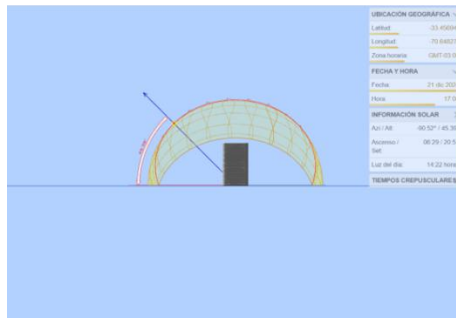
Figura A.19

- a) Posición del sol a las 15:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile.
- b) Posición del sol a las 16:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

17:00 PM



Planta



Elevación

Figura A.20

Posición del sol a las 15:00 PM en el solsticio de verano en Santiago de Chile (Marsh, 2023b).

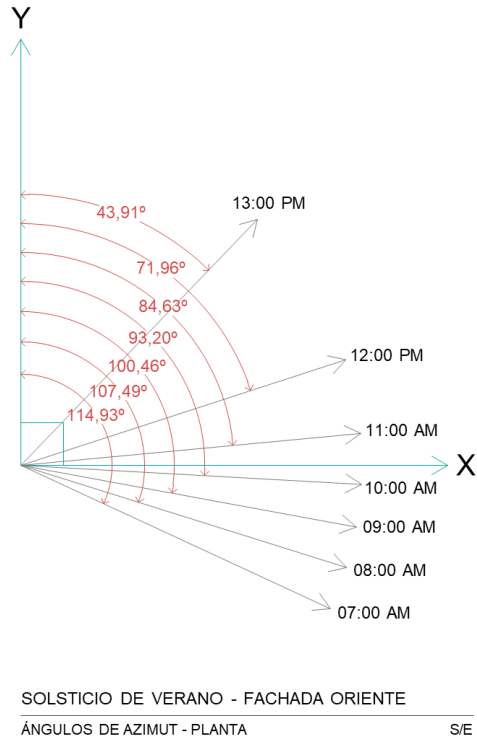
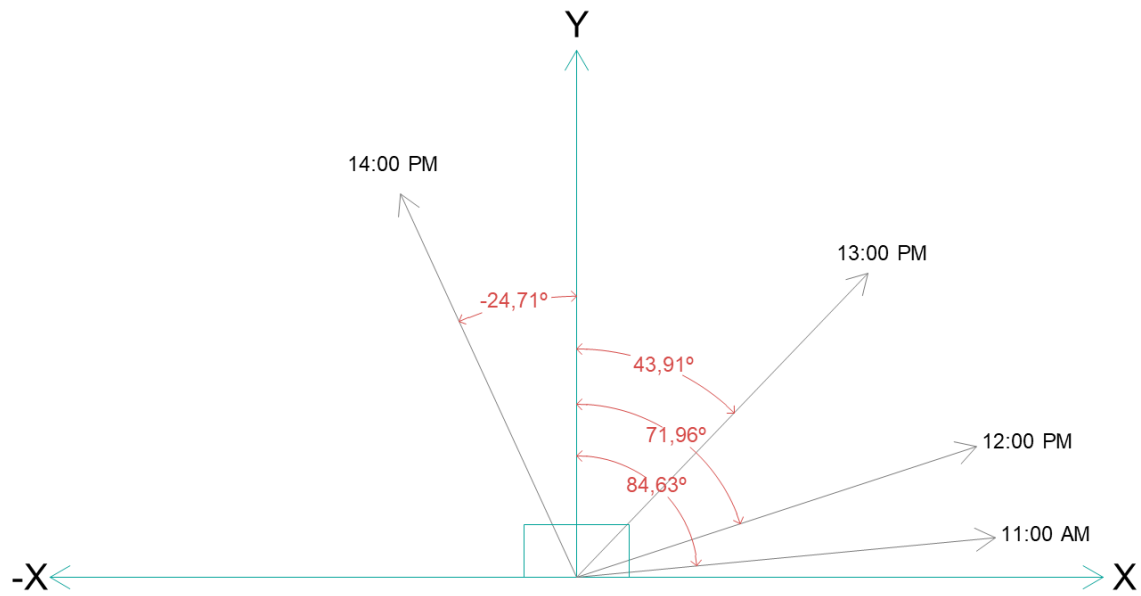


Figura A.21

Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en la orientación oriente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).



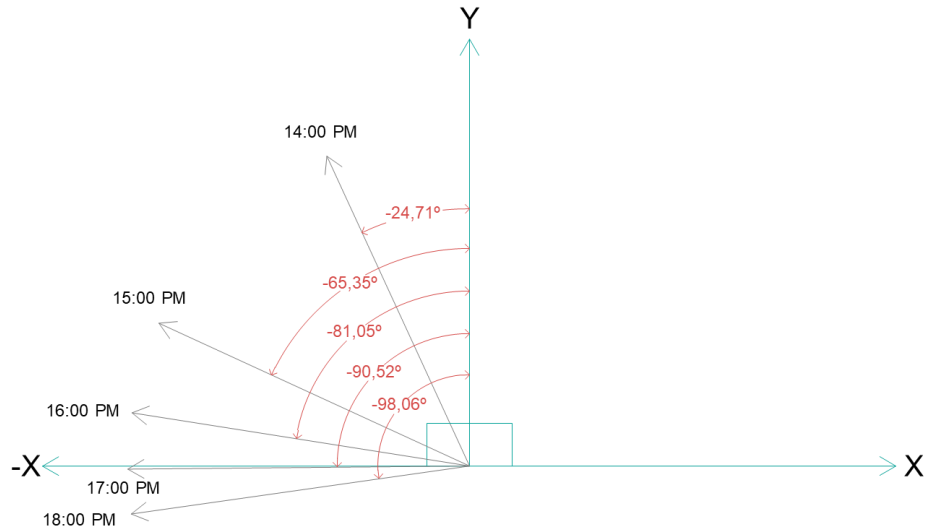
SOLSTICIO DE VERANO - FACHADA NORTE

ÁNGULOS DE AZIMUT - PLANTA

S/E

Figura A.22

Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en la orientación norte de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).



SOLSTICIO DE VERANO - FACHADA PONIENTE

ÁNGULOS DE AZIMUT - PLANTA

S/E

Figura A.23

Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en la orientación poniente de Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Tabla A.5

Ángulos de la posición solar del solsticio de verano en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Santiago de Chile		
Solsticio de verano (21 de diciembre)		
Horas	Ángulo	
	Azimut	Altitud
07:00 AM	114,93°	5,08°
08:00 AM	107,49°	16,63°
09:00 AM	100,46°	28,75°
10:00 AM	93,20°	41,15°
11:00 AM	84,63°	53,65°
12:00 PM	71,96°	65,90°
13:00 PM	43,91°	76,66°
14:00 PM	-24,71°	79,08°
15:00 PM	-65,35°	69,85°
16:00 PM	-81,05°	57,86°
17:00 PM	-90,52°	45,39°

Tabla A.6

Horario de las orientaciones en el solsticio de verano en Santiago de Chile. Elaboración propia en base a Marsh (2023b).

Orientación	Horario solar
Oriente	07:00 AM a 13:00 PM
Norte	11:00 PM a 14:00 PM
Poniente	14:00 PM a 17:00 PM

ANEXO B. Resultados de simulación solar de prototipos de muros

B.1. Prototipo de muro MT-L

Tabla B.1

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MT-L (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MT-L (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MT-L		2,35	Orente	90	10:00 AM	40,17°	21,04°	0,009	0,022	0,656
					11:00 AM	27,11°	27,98°	0,008		
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,006		

Tabla B.2

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MT-L		2,35	Orente	90	08:00 AM	86,16°	5,04°	0,020	0,080	2,388
					09:00 AM	77,51°	17,31°	0,019		
					10:00 AM	67,60°	29,22°	0,015		
					11:00 AM	55,13°	40,20°	0,012		
					12:00 PM	38,28°	49,34°	0,006		
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,008		

Tabla B.3

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MT-L		2,35	Oriente	90	07:00 AM	114,93°	5,08°	0,022	0,104	3,226
					08:00 AM	107,49°	16,63°	0,021		
					09:00 AM	100,46°	28,75°	0,019		
					10:00 AM	93,20°	41,15°	0,015		
					11:00 AM	84,63°	53,65°	0,013		
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,007		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,007		

Tabla B.4

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MT-L (orientación norte).
Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MT-L (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MT-L		2,35	Norte	90	11:00 AM	27,11°	27,98°	0,010	0,038	1,137
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,011		
					13:00 PM	-4,35°	33,01°	0,010		
					14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,008		

Tabla B.5

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MT-L		2,35	Norte	90	12:00 PM	38,28°	49,34°	0,010	0,035	1,057
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,010		
					14:00 PM	-10,97°	55,56°	0,008		
					15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,007		

Tabla B.6

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MT-L		2,35	Norte	90	11:00 AM	84,63°	53,65°	0,006	0,022	0,676
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,005		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,005		
					14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,005		

Tabla B.7

Irradiación solar del muro MT-L en el solsticio de invierno en la orientación poniente. Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MT-L (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MT-L		2,35	Poniente	90	14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,007	0,007	0,222

Tabla B.8

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MT-L (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MT-L		2,35	Poniente	90	15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,015	0,029	0,867
					16:00 PM	-52,54°	41,97°	0,014		

Tabla B.9

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MT-L (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MT-L		2,35	Poniente	90	14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,014	0,062	1,917
					15:00 PM	-65,35°	69,85°	0,016		
					16:00 PM	-81,05°	57,86°	0,017		
					17:00 PM	-90,52°	45,39°	0,015		

B.2. Prototipo de muro MP-RV

Tabla B.10

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MP-RV		3,11	Orente	90	10:00 AM	40,17°	21,04°	0,009	0,023	0,690
					11:00 AM	27,11°	27,98°	0,008		
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,006		

Tabla B.11

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímut	Altitud			
MP-RV		3,11	Oriente	90	08:00 AM	86,16°	5,04°	0,023	0,090	2,703
					09:00 AM	77,51°	17,31°	0,022		
					10:00 AM	67,60°	29,22°	0,017		
					11:00 AM	55,13°	40,20°	0,012		
					12:00 PM	38,28°	49,34°	0,007		
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,009		

Tabla B.12

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MP-RV		3,11	Orente	90	07:00 AM	114,93°	5,08°	0,025	0,119	3,695
					08:00 AM	107,49°	16,63°	0,025		
					09:00 AM	100,46°	28,75°	0,022		
					10:00 AM	93,20°	41,15°	0,019		
					11:00 AM	84,63°	53,65°	0,013		
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,006		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,009		

Tabla B.13

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RV		3,11	Norte	90	11:00 AM	27,11°	27,98°	0,011	0,044	1,305
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,012		
					13:00 PM	-4,35°	33,01°	0,011		
					14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,009		

Tabla B.14

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RV		3,11	Norte	90	12:00 PM	38,28°	49,34°	0,013	0,046	1,373
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,013		
					14:00 PM	-10,97°	55,56°	0,011		
					15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,009		

Tabla B.15

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RV		3,11	Norte	90	11:00 AM	84,63°	53,65°	0,008	0,030	0,927
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,008		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,007		
					14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,007		

Tabla B.16

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MP-RV		3,11	Poniente	90	14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,007	0,007	0,203

Tabla B.17

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MP-RV		3,11	Poniente	90	15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,014	0,028	0,835
					16:00 PM	-52,54°	41,97°	0,014		

Tabla B.18

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RV (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RV		3,11	Poniente	90	14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,012	0,056	1,743
					15:00 PM	-65,35°	69,85°	0,014		
					16:00 PM	-81,05°	57,86°	0,015		
					17:00 PM	-90,52°	45,39°	0,014		

B.3. Prototipo de muro MP-RH

Tabla B.19

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MP-RH		2,35	Orente	90	10:00 AM	40,17°	21,04°	0,006	0,018	0,540
					11:00 AM	27,11°	27,98°	0,006		
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,005		

Tabla B.20

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RH		2,35	Oriente	90	08:00 AM	86,16°	5,04°	0,014	0,063	1,892
					09:00 AM	77,51°	17,31°	0,014		
					10:00 AM	67,60°	29,22°	0,012		
					11:00 AM	55,13°	40,20°	0,010		
					12:00 PM	38,28°	49,34°	0,006		
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,008		

Tabla B.21

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MP-RH		2,35	Orente	90	07:00 AM	114,93°	5,08°	0,015	0,081	2,516
					08:00 AM	107,49°	16,63°	0,015		
					09:00 AM	100,46°	28,75°	0,014		
					10:00 AM	93,20°	41,15°	0,013		
					11:00 AM	84,63°	53,65°	0,011		
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,006		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,007		

Tabla B.22

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RH		2,35	Norte	90	11:00 AM	27,11°	27,98°	0,014	0,053	1,600
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,015		
					13:00 PM	-4,35°	33,01°	0,014		
					14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,011		

Tabla B.23

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RH		2,35	Norte	90	12:00 PM	38,28°	49,34°	0,017	0,059	1,757
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,016		
					14:00 PM	-10,97°	55,56°	0,014		
					15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,012		

Tabla B.24

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MP-RH		2,35	Norte	90	11:00 AM	84,63°	53,65°	0,009	0,036	1,119
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,009		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,009		
					14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,008		

Tabla B.25

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MP-RH		2,35	Poniente	90	14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,007	0,007	0,195

Tabla B.26

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MP-RH		2,35	Poniente	90	15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,014	0,028	0,830
					16:00 PM	-52,54°	41,97°	0,014		

Tabla B.27

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RH (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RH		2,35	Poniente	90	14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,010	0,056	1,734
					15:00 PM	-65,35°	69,85°	0,015		
					16:00 PM	-81,05°	57,86°	0,016		
					17:00 PM	-90,52°	45,39°	0,015		

B.4. Prototipo de muro MP-RHV

Tabla B.28

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
MP-RHV		3,12	Orente	90	10:00 AM	40,17°	21,04°	0,006	0,016	0,465
					11:00 AM	27,11°	27,98°	0,005		
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,004		

Tabla B.29

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RHV		3,12	Orente	90	08:00 AM	86,16°	5,04°	0,014	0,057	1,721
					09:00 AM	77,51°	17,31°	0,013		
					10:00 AM	67,60°	29,22°	0,011		
					11:00 AM	55,13°	40,20°	0,007		
					12:00 PM	38,28°	49,34°	0,005		
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,007		

Tabla B.30

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MP-RHV		3,12	Orente	90	07:00 AM	114,93°	5,08°	0,015	0,076	2,357
					08:00 AM	107,49°	16,63°	0,015		
					09:00 AM	100,46°	28,75°	0,014		
					10:00 AM	93,20°	41,15°	0,011		
					11:00 AM	84,63°	53,65°	0,008		
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,005		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,008		

Tabla B.31

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MP-RHV		3,12	Norte	90	11:00 AM	27,11°	27,98°	0,009	0,035	1,061
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,010		
					13:00 PM	-4,35°	33,01°	0,009		
					14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,007		

Tabla B.32

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MP-RHV		3,12	Norte	90	12:00 PM	38,28°	49,34°	0,011	0,037	1,121
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,010		
					14:00 PM	-10,97°	55,56°	0,009		
					15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,007		

Tabla B.33

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
MP-RHV		3,12	Norte	90	11:00 AM	84,63°	53,65°	0,006	0,022	0,682
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,006		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,005		
					14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,005		

Tabla B.34

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RHV		3,12	Poniente	90	14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,007	0,007	0,201

Tabla B.35

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RHV		3,12	Poniente	90	15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,014	0,028	0,827
					16:00 PM	-52,54°	41,97°	0,014		

Tabla B.36

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro MP-RHV (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
MP-RHV		3,12	Poniente	90	14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,014	0,060	1,871
					15:00 PM	-65,35°	69,85°	0,016		
					16:00 PM	-81,05°	57,86°	0,016		
					17:00 PM	-90,52°	45,39°	0,015		

B.5. Prototipo de muro ME-FO

Tabla B.37

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
ME-FO		3,11	Orente	90	10:00 AM	40,17°	21,04°	0,005	0,015	0,440
					11:00 AM	27,11°	27,98°	0,005		
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,004		

Tabla B.38

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
ME-FO		3,11	Orente	90	08:00 AM	86,16°	5,04°	0,013	0,055	1,637
					09:00 AM	77,51°	17,31°	0,012		
					10:00 AM	67,60°	29,22°	0,010		
					11:00 AM	55,13°	40,20°	0,007		
					12:00 PM	38,28°	49,34°	0,005		
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,007		

Tabla B.39

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FO (orientación oriente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
ME-FO		3,11	Orente	90	07:00 AM	114,93°	5,08°	0,014	0,073	2,274
					08:00 AM	107,49°	16,63°	0,014		
					09:00 AM	100,46°	28,75°	0,013		
					10:00 AM	93,20°	41,15°	0,011		
					11:00 AM	84,63°	53,65°	0,008		
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,006		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,008		

B.6. Prototipo de muro ME-FN-V01

Tabla B.40

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
ME-FN-V01		3,06	Norte	90	11:00 AM	27,11°	27,98°	0,008	0,029	0,883
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,008		
					13:00 PM	-4,35°	33,01°	0,008		
					14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,006		

Tabla B.41

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
ME-FN-V01		3,06	Norte	90	12:00 PM	38,28°	49,34°	0,008	0,029	0,861
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,008		
					14:00 PM	-10,97°	55,56°	0,007		
					15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,006		

Tabla B.42

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FN-V01 (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
ME-FN-V01		3,06	Norte	90	11:00 AM	84,63°	53,65°	0,006	0,022	0,676
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,006		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,005		
					14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,005		

B.7. Prototipo de muro ME-FN-V02

Tabla B.43

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
ME-FN-V02		2,86	Norte	90	11:00 AM	27,11°	27,98°	0,008	0,029	0,872
					12:00 PM	11,96°	32,18°	0,008		
					13:00 PM	-4,35°	33,01°	0,008		
					14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,006		

Tabla B.44

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimut	Altitud			
ME-FN-V02		2,86	Norte	90	12:00 PM	38,28°	49,34°	0,008	0,026	0,791
					13:00 PM	15,52°	55,06°	0,007		
					14:00 PM	-10,97°	55,56°	0,006		
					15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,005		

Tabla B.45

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FN-V02 (orientación norte)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
ME-FN-V02		2,86	Norte	90	11:00 AM	84,63°	53,65°	0,005	0,019	0,604
					12:00 PM	71,96°	65,90°	0,005		
					13:00 PM	43,91°	76,66°	0,005		
					14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,005		

B.8. Prototipo de muro ME-FP

Tabla B.46

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en junio del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de invierno (20 de junio)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
ME-FP		3,08	Poniente	90	14:00 PM	-20,22°	30,34°	0,006	0,006	0,171

Tabla B.47

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en septiembre del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Equinoccio de primavera (22 de septiembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azimet	Altitud			
ME-FP		3,08	Poniente	90	15:00 PM	-34,72°	50,65°	0,013	0,025	0,756
					16:00 PM	-52,54°	41,97°	0,013		

Tabla B.48

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente). Elaboración propia en base a Mackey & Sadeghipour (2017).

Irradiación solar acumulada mensual en diciembre del prototipo de muro ME-FP (orientación poniente)										
Santiago de Chile										
Solsticio de verano (21 de diciembre)										
Nomenclatura del prototipo de muro	Imagen	Área del muro [m²]	Orientación	Inclinación de la superficie [°]	Horas	Ángulo		Irradiación solar acumulada por hora [kWh/m²h]	Irradiación solar acumulada diaria [kWh/m²día]	Irradiación solar acumulada mensual [kWh/m²]
						Azímuth	Altitud			
ME-FP		3,08	Poniente	90	14:00 PM	-24,71°	79,08°	0,011	0,054	1,668
					15:00 PM	-65,35°	69,85°	0,014		
					16:00 PM	-81,05°	57,86°	0,015		
					17:00 PM	-90,52°	45,39°	0,014		



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA – UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA