



Universidad Privada de Tacna

Modelo de Cañon-Urbano de una simple capa para la ciudad de Moquegua

Elaborado por:

Pedro Vilca Apaza

Físico Teórico

Este reporte presenta el desarrollo de un modelo Físico destinado a predecir la temperatura ambiente y superficial en las calles de la ciudad de Moquegua, mediante la aplicación del modelo de Cañón Urbano de una sola capa.

2 de noviembre de 2025

Índice general

1. Fundamento teorico	1
1.1. Modelo de cañón urbano (UCM)	1
1.1.1. Balance de energia para la masa de aire contenida en el cañon urbano	1
1.1.2. Intercambio de energia en cada superficie	2
1.1.3. Metodo de diferencias Finitas-Euler Bakward	3
2. Metodología	4
2.1. Calculo de la temperatura ambiente	4
2.2. Calculo de la irradiacia solar modificada para Moquegua	5
2.2.1. Irradiacia pavimento	5
2.2.2. Irradiacia pared 1 y 2	5
3. Resultados	6
3.1. Resultado de temperatura ambiente en las calles de Moquegua sin cobertura vegetal	9
3.2. Resultado de temperatura ambiente en las calles de Moquegua con covertura vegetal 40 % solo pavimento	15
3.3. Resultado de temperatura ambiente en las calles de Moquegua con covertura vegetal 40 % en pavimento, muro1 y muro2 25 %	21
3.4. Irradiancia modificada debido a las sombras proyectadas por los muros en las calles de Moquegua	27
Bibliografía	31
Appendices	32
A. Variables y parámetros físicos	32
B. Modelo de Cañon-urbano de una simple capa, codigo en python	33
B.1. Codigo de programacion en python	33

Capítulo 1

Fundamento teorico

Existen diversos modelos físicos meteorológicos de microescala¹ que pueden modelar el comportamiento de la temperatura tanto en el aire como en la superficie urbana. Entre los modelos mas comunes se encuentran:

1. Modelos de balance de energía superficial (SEB – Surface Energy Balance)
2. Modelos de cañón urbano (UCM – Urban Canopy Models)
3. Modelos de múltiples capas urbanas (MLUCM – Multi-Layer Urban Canopy Models)
4. Entre otros.

Entre todos estos modelos se elige trabajar con el modelo cañón urbano (UCM) [modelo completo por Kusaka et al. (2001)] debido a que el requerimiento asignado es predecir temperaturas de superficie y ambiente en las calles de la ciudad de Moquegua variando el tipo de superficie de las calles². Además, se dispone de datos sobre la altura de los edificios y ancho de las calles, parámetros fundamentales para la aplicación de este modelo. Asimismo, se cuenta con mediciones experimentales de la irradiancia solar.

1.1. Modelo de cañón urbano (UCM)

El Modelo de Cañón Urbano es una representación física simplificada del entorno urbano que permite describir los intercambios de energía, radiación y masa entre las superficies (suelo, paredes y techos, Figura 1.1a) y el aire contenido entre los edificios. Pero para nuestro caso particular solo se usara intercambios de energia superficial de (Suelo y paredes, Figura 1.1b).

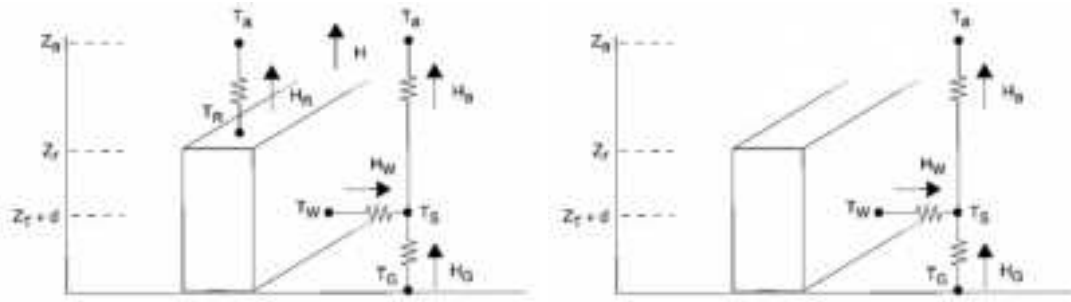
1.1.1. Balance de energia para la masa de aire contenida en el cañón urbano

Partiendo en la descripción del modelo de cañón, se hace el balance de energía de la masa de aire contenida en el cañón urbano, describe que la tasa de cambio de la energía interna del aire será igual a la suma de flujo de convección de la pared y suelo, el flujo de energía antropogénica y el flujo de convección hacia la atmósfera superior. siendo la siguiente ecuación:

$$C_a \frac{dT_a}{dt} = \sum_i H_i + Q_{\text{antro}} + H_{\text{arriba}} \quad (1.1)$$

¹La microescala meteorológica es el estudio de fenómenos atmosféricos de pequeña escala, que abarcan desde unos pocos centímetros hasta unos pocos kilómetros.

²La variación de tipo del suelo según el modelo será variar los coeficientes de albedo y emisividad



(a) Esquema del modelo de cañon urbano de una sola capa, obtenida por el artículo [Kusaka et al. \(2001\)](#) para nuestro caso, solo se considera suelo y paredes.

Figure 1.1: Modelo de cañon urbano de una sola capa

Para simplificar y aproximar los calculos se asumira que la temperatura del aire es cuasi-estacionario³ ($\frac{dT_a}{dt} \approx 0$).

la ecuacion anterior se reduce a:

$$0 \approx \sum_i H_i + Q_{\text{antro}} + H_{\text{arriba}} \quad (1.2)$$

Remplazando los valores para cada termino de la ecuacion se tiene:

$$\sum_i h_i A_i (T_i - T_a) + Q_{\text{antro}} + h_{\text{top}} A_{\text{top}} (T_{\infty} - T_a) \approx 0 \quad (1.3)$$

Operando y despejando el valor de T_a se tiene:

$$T_a = \frac{\sum_i h_i A_i T_i + Q_{\text{antro}} + h_{\text{top}} A_{\text{top}} T_{\infty}}{\sum_i h_i A_i + h_{\text{top}} A_{\text{top}}} \quad (1.4)$$

La ecuacion 1.4 nos permite calcular la temperatura del aire en el cañon urbano si se conoce la temperatura de las superficies, y los coeficientes de transferencia.

1.1.2. Intercambio de energia en cada superficie

El intercambio de energia en cada superficie se da por radiacion neta resivida (Radiacion del sol) y emitida debe de ser igual a la suma del flujo de calor sensible⁴, latente y el flujo de calor hacia el interior de la tierra. Es decrita por la ecuacion :

$$R_{n,i} = H_i + I E_i + G_i \quad (1.5)$$

Remplazando los valores de cada termino se tiene:

$$\left. -k \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q_{\text{net,surf}} = (1 - \alpha) G + E_{\downarrow} - \varepsilon \sigma T_s^4 - h(T_s - T_a) \quad (1.6)$$

³Es la condicion en donde del aire se aproxima a un estado estacionario, varia lentamente con el tiempo

⁴Esto se collocara para poder estimar la perdida de calor cuando se le incluya un tipo de suelo que posea humedad, debido a la vegetacion

Para poder resolver la ecuacion 1.6 se debe que es una ecuacion diferencial de frontera, se debe de conocer la temperatura en el interior de la tierra, para lo cual se usara la ecuacion de conduccion de calor por conduccion tambien conocida como la ecuacion de difusion de calor de Fourier:

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}} \quad (1.7)$$

En resumen, para determinar la temperatura del aire en el cañón urbano, primero es necesario calcular las temperaturas de la superficie de las paredes y del suelo resolviendo la ecuación 1.6. Para ello, se requiere conocer la temperatura en el interior del terreno, la cual se obtiene al resolver la ecuación 1.7. Finalmente, con estos resultados se puede determinar la temperatura del aire en el cañón urbano mediante la ecuación 1.4. Las ecuaciones 1.6 y 1.7 pueden resolverse de diversas maneras; en este estudio se emplearán métodos numéricos, específicamente el método de diferencias finitas. La información fue tomada de [Sequeira-Chavarría and Ramírez-Bogantes \(2019\)](#).

1.1.3. Metodo de diferencias Finitas-Euler Bakward

El metodo de diferencias finitas es un metodo numerico que permite resolver ecuaciones diferenciales al aproximar las derivadas por diferencias finitas. En este caso se discretizara la conduccion de calor en solo una dimencion espacial (z) y el tiempo (t).

Discretización espacial y temporal

Si discretizamos la ecuacion de conduccion de calor 1.7 en el espacio y tiempo obtenemos:

$$\rho_i c_{p,i} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{k_{i+1/2}(T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1})}{\Delta z_{i+1/2}} - \frac{k_{i-1/2}(T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1})}{\Delta z_{i-1/2}}. \quad (1.8)$$

Forma matricial y resolución

El sistema anterior se reorganiza para todos los nodos del dominio, obteniendo un sistema lineal tridiagonal en los valores de temperatura T_i^{n+1} :

$$a_{i-1} T_{i-1}^{n+1} + a_i T_i^{n+1} + a_{i+1} T_{i+1}^{n+1} = b_i, \quad (1.9)$$

Para resolver este sistema de manera eficiente, se emplea el **método de Thomas**.

Capítulo 2

Metodología

El modelo planteado para las calles de Moquegua se basa en el modelo de cañón urbano de una sola capa, que considera el intercambio de energía entre las superficies urbanas y el aire atrapado dentro de ella. El modelo modificado se muestra en la figura 2.1

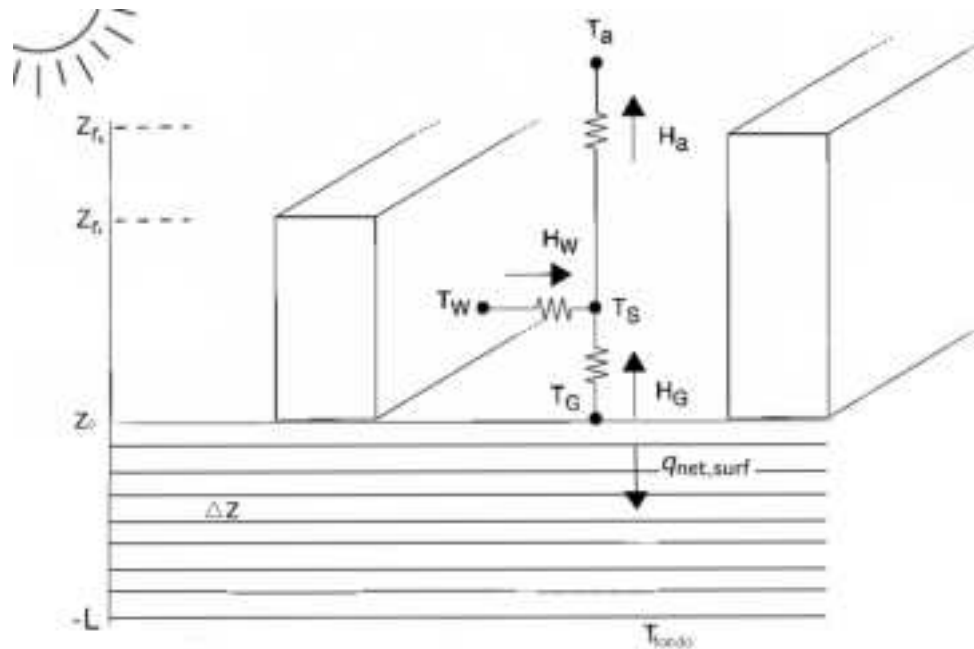


Figure 2.1: Esquema del modelo utilizado para las calles de Moquegua

Lo que se considera para este modelo son los intercambios de energía superficial del suelo y paredes, ignorando los techos, esto influenciado por el requerimiento del arquitecto

2.1. Cálculo de la temperatura ambiente

Para calcular la temperatura ambiente en las calles de Moquegua, se utiliza la ecuación 1.4, esta ecuación nos pide los parámetros físicos y geométricos del sistema, esto se encuentra en el cuadro 3.1, como también las temperaturas del suelo y paredes, las cuales se calcularán mediante la ecuación de difusión de calor en una dimensión, ecuación 1.6, pero como ya se describió en el marco teórico, se hará uso del método de diferencias finitas implícito para resolver la ecuación de difusión, teniendo que resolver un sistema de ecuaciones lineales tridiagonal

en cada paso de tiempo ecuacion 1.8, esta matriz se resuelve en intervalos de tiempos de 60 segundos, durante un periodo de 24 horas.

En la primera iteración de 60 segundos se propone una temperatura inicial de 25 °C para las superficies (suelo y paredes), que en este caso es la temperatura ambiente inicial, ahora para resolver la ecuacion 1.8, se pone las condiciones de frontera en la superficie y en la profundidad maxima del pavimento y paredes que son $T^0 = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ y $T^L = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$. con el metodo de Thomas se resuelve la ecuacion y se obtiene la temperatura en cada capa del pavimento, en nuestro caso se uso 4 capas de una longitud total de 1.5 m con resolucio de 0.01 m los valores de las propiedades termicas se encuentran en el cuadro 3.1, estas iteraciones haran que la temperatura de la superficie cambie, y con este nuevo valor de temperatura de la superficie se calcula la temperatura del aire en la calle mediante la ecuacion 1.4, de esta manera obtenemos la temperatura del: Aire, paredes y pavimento para el primer intervalo de tiempo (60 s). Este proceso se repite para cada intervalo de tiempo de 60 segundos hasta completar las 24 horas.

2.2. Calculo de la irradiacia solar modificada para Moquegua

2.2.1. Irradiacia pavimento

La irradiacia solar (G) cambia su valor dependiendo de la hora del dia, para este caso se modelo la irradiancia tipo seno con un pico maximo alas 12 am de 1000 W/m², y con horas de salida y puesta del sol a las 6 am y 6 pm respectivamente Figura 2.2. Para este modelo tambien se concidero datos expermientales como es la sombra que se proyecta en las paredes y calles de moquegua, estos datos fueron proporcionados por el arquitecto, de esta manera se modifiko la irradiancia solar en las paredes y calles de moquegua dependiendo de la hora del dia, los resultados se encuentran en losarchivos entrgados junto con este informe.

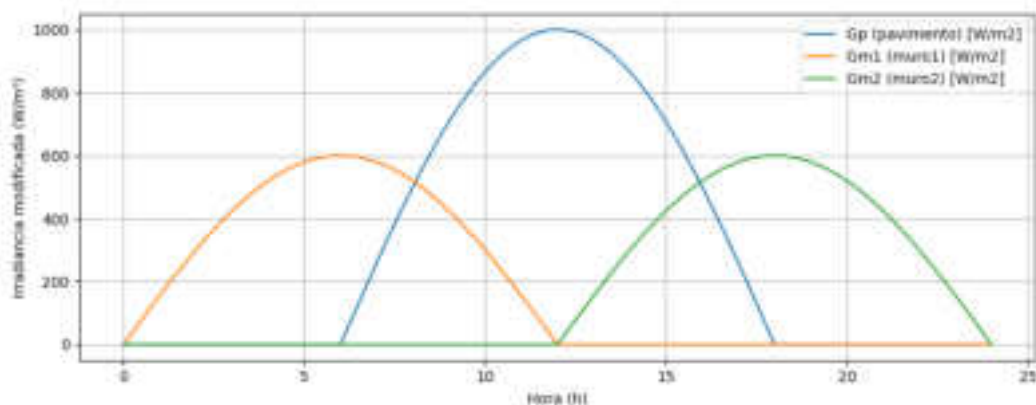


Figure 2.2: Irradiancia solar generada para el modelo de Moquegua, pavimento, paredes 1 y 2

2.2.2. Irradiacia pared 1 y 2

La irradiacia solar en las paredes 1 y 2 debido a la inclinacion de 90° de las paredes, la irradiancia que reciben es menor que la del pavimento estimando un valor de $600 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ teniendo este valor maximo alas 6 am y 6 pm respectivamente, con un modelo tipo seno.

Capítulo 3

Resultados

Los resultados obtenidos del modelo urbano simplificado para las calles de Moquegua se presentan a continuación. Se incluyen las constantes físicas, térmicas, ópticas y geométricas empleadas en el modelo, así como las gráficas de temperatura ambiente para cada calle analizada. Se recuerda que este modelo no se debe de utilizar para querer predecir temperaturas reales, sino para comparar el comportamiento térmico entre distintas calles con diferentes características físicas y geométricas.

Table 3.1: Constantes físicas, térmicas, ópticas y geométricas empleadas en el modelo urbano simplificado.

Símbolo / Nombre	Descripción	Valor / Unidades
Radiación solar		
$pico$	Irradiancia solar máxima	$1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
$salida_{sol}$	Hora de salida del sol	6 h
$puesta_{sol}$	Hora de puesta del sol	18 h
Propiedades atmosféricas		
ε_{atm}	Emisividad atmosférica efectiva	0.8
Propiedades geométricas		
L_{calle}	Longitud representativa de la calle	100 m
Convección y calor urbano		
h_{pav}	Coefficiente convectivo del pavimento	$15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
h_{muro}	Coefficiente convectivo del muro	$5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Q_{antrop}	Flujo de calor antropogénico promedio	$50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$
Temperaturas base		
T_{amb}	Temperatura ambiente inicial	293.15 K (25°C)
T_{fondo}	Temperatura de fondo	308.15 K (35°C)
Propiedades ópticas y radiativas		
α_{pav}	Albedo del pavimento	0.10
α_{muro}	Albedo del muro	0.40
ε_{pav}	Emisividad del pavimento	0.95
ε_{muro}	Emisividad del muro	0.90
Propiedades térmicas de muros		
C_{muro1}	Capacidad térmica superficial del muro 1	$2,5 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_{muro2}	Capacidad térmica superficial del muro 2	$2,5 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Propiedades térmicas del pavimento (multicapa)		
Asfalto superficie	Espesor: 0.05 m, ρ : $1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, c_p : $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, k : $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Asfalto base	Espesor: 0.10 m, ρ : $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, c_p : $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, k : $0.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Subbase	Espesor: 0.30 m, ρ : $1800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, c_p : $840 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, k : $0.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Subsuelo	Espesor: 1.00 m, ρ : $1700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, c_p : $900 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, k : $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
Parámetros numéricos		
dt	Paso de tiempo de integración	60 s
t_{max}	Duración de simulación (1 día)	86400 s

Región	Tmax Pavimento (°C)	Tmax Muro1 (°C)	Tmax Muro2 (°C)	Tmax Aire (°C)
CALLE LIMA	59.41	31.78	29.54	37.3
CALLE MOQUEGUA	61.23	33.5	36.35	37.32
CALLE AYACUCHO	57.0	27.89	37.88	31.97
CALLE JUNIN	61.23	33.5	36.35	37.32
CALLE CUZCO	59.41	31.78	29.54	37.3
CALLE PIURA	54.53	24.99	34.95	32.64
CALLE LIBERTAD	59.12	31.12	31.63	37.33
CALLE ANCASH	59.12	31.12	31.63	37.33
CALLE TACNA	56.11	24.99	35.65	33.17
CALLE AREQUIPA	59.12	31.12	31.63	37.33
CALLE CALLAO	60.67	32.5	35.97	37.24
CALLE TARAPACA	56.11	24.99	35.49	33.17

(a) Sin cobertura Vegetal

Región	Tmax Pavimento (°C)	Tmax Muro1 (°C)	Tmax Muro2 (°C)	Tmax Aire (°C)
CALLE LIMA	45.43	28.4	25.55	31.95
CALLE MOQUEGUA	47.31	30.47	32.34	32.21
CALLE AYACUCHO	44.51	25.95	35.24	28.68
CALLE JUNIN	47.31	30.47	32.34	32.21
CALLE CUZCO	45.43	28.4	25.55	31.95
CALLE PIURA	41.4	24.99	31.71	28.47
CALLE LIBERTAD	44.95	27.84	27.58	31.88
CALLE ANCASH	44.95	27.84	27.58	31.88
CALLE TACNA	42.91	24.99	32.37	28.98
CALLE AREQUIPA	44.95	27.84	27.58	31.88
CALLE CALLAO	46.67	29.53	31.95	32.05
CALLE TARAPACA	42.91	24.99	32.22	28.98

(b) Con cobertura Vegetal 40 % Solo Pavimento

Región	Tmax Pavimento (°C)	Tmax Muro1 (°C)	Tmax Muro2 (°C)	Tmax Aire (°C)
CALLE LIMA	44.49	24.97	24.97	30.67
CALLE MOQUEGUA	46.22	24.97	25.6	30.7
CALLE AYACUCHO	42.79	24.97	27.88	26.28
CALLE JUNIN	46.22	24.97	25.6	30.7
CALLE CUZCO	44.49	24.97	24.97	30.67
CALLE PIURA	39.84	24.97	24.97	26.38
CALLE LIBERTAD	43.93	24.97	24.97	30.5
CALLE ANCASH	43.93	24.97	24.97	30.5
CALLE TACNA	41.37	24.97	25.2	26.88
CALLE AREQUIPA	43.93	24.97	24.97	30.5
CALLE CALLAO	45.56	24.97	25.2	30.52
CALLE TARAPACA	41.37	24.97	25.05	26.88

(c) Con cobertura Vegetal 40 % Pavimento, Muro1 y Muro2 25 %

Figure 3.1: Resultados de temperatura promedio en las calles de Moquegua bajo diferentes condiciones de cobertura vegetal.

3.1. Resultado de temperatura ambiente en las calles de Moquegua sin cobertura vegetal

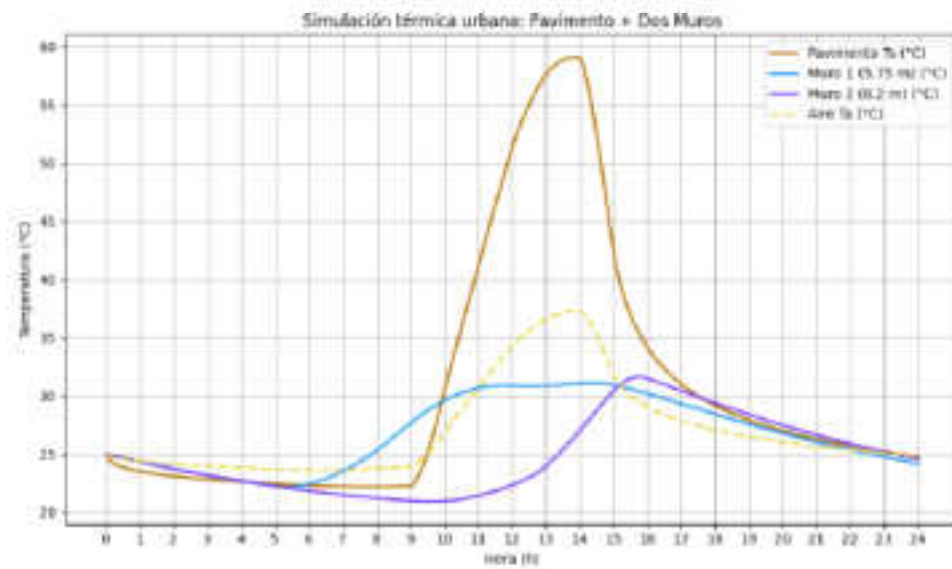


Figure 3.2: CALLE ANCASH

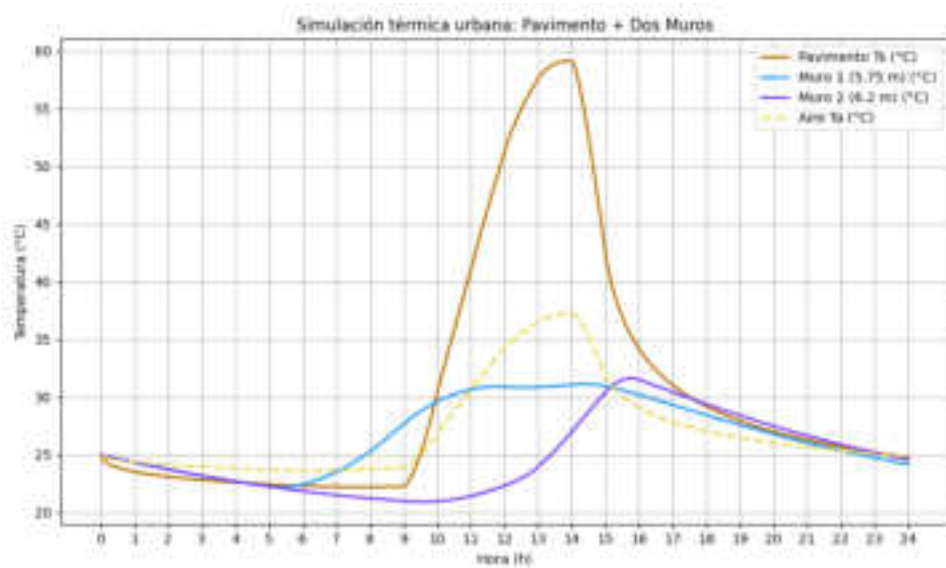


Figure 3.3: CALLE AREQUIPA

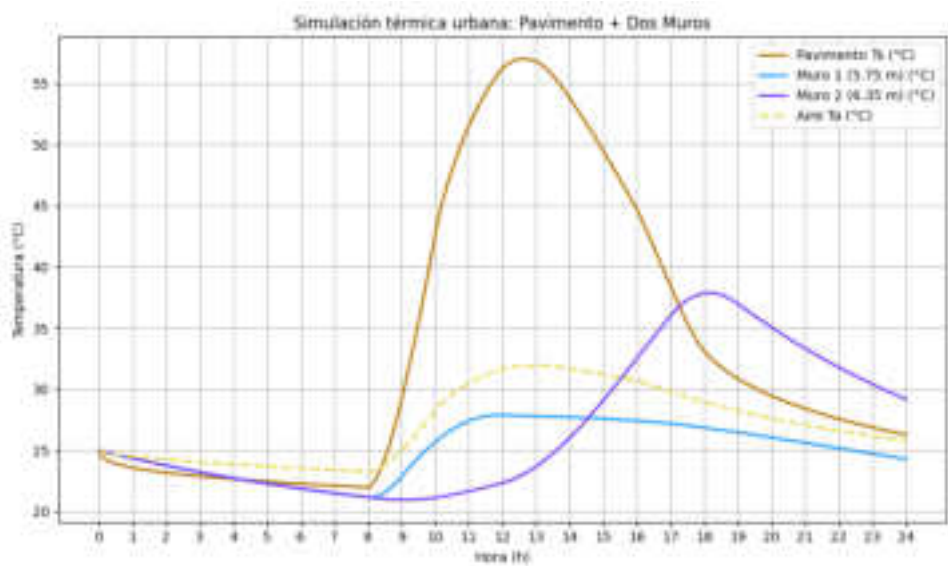


Figure 3.4: CALLE AYACUCHO

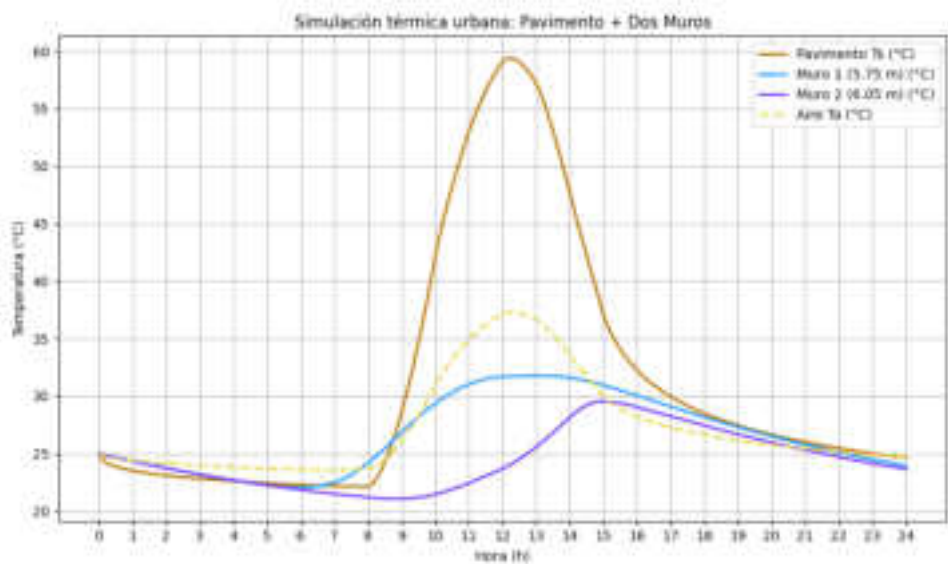


Figure 3.5: CALLE CUZCO

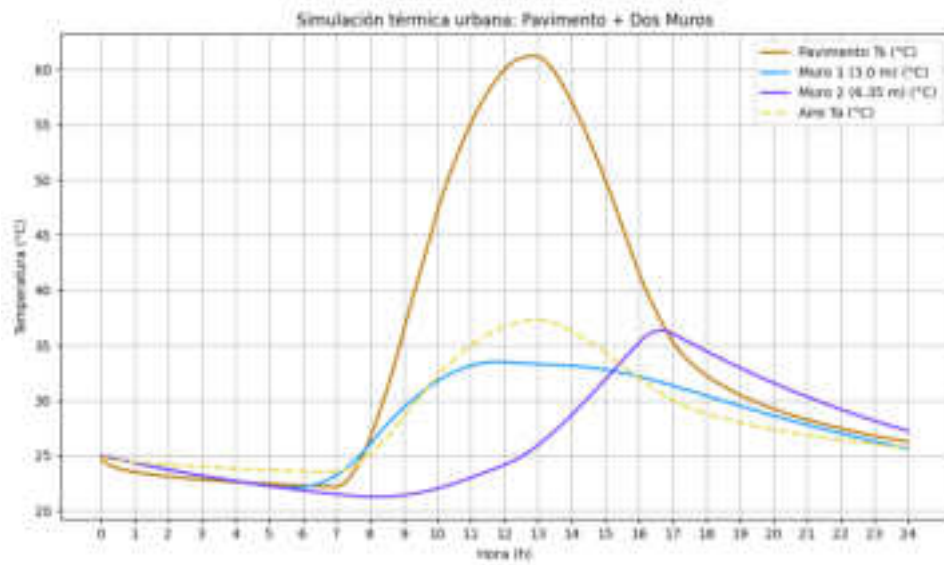


Figure 3.6: CALLE JUNIN

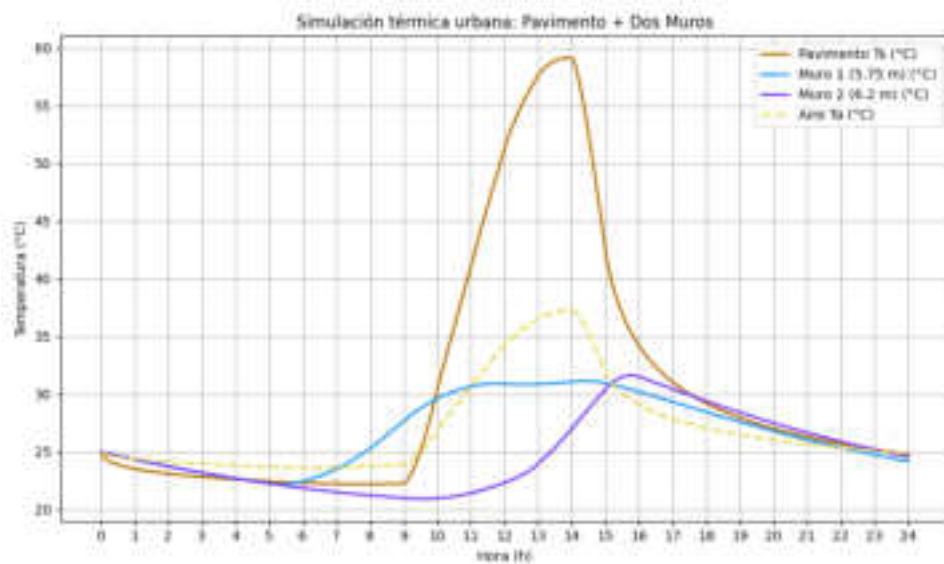


Figure 3.7: CALLE LIBERTAD

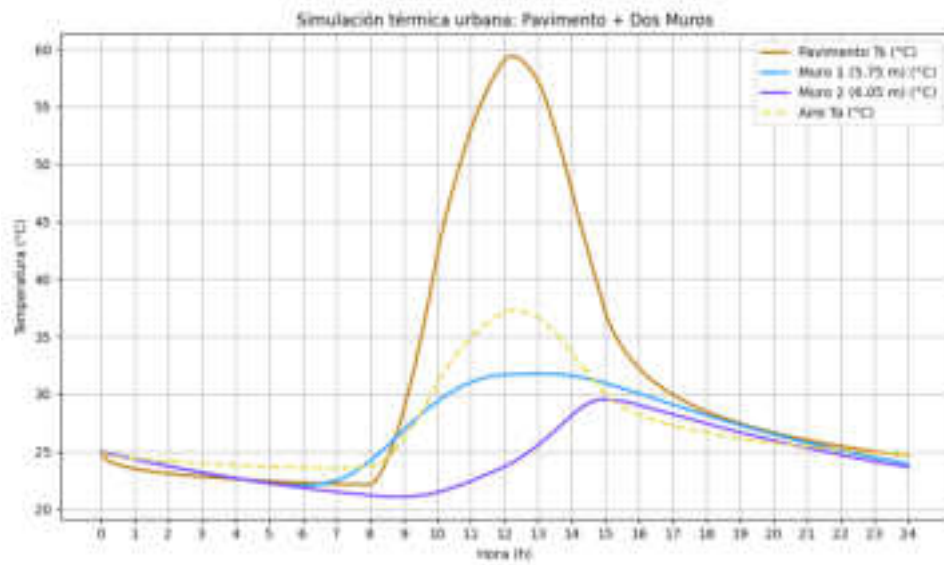


Figure 3.8: CALLE LIMA

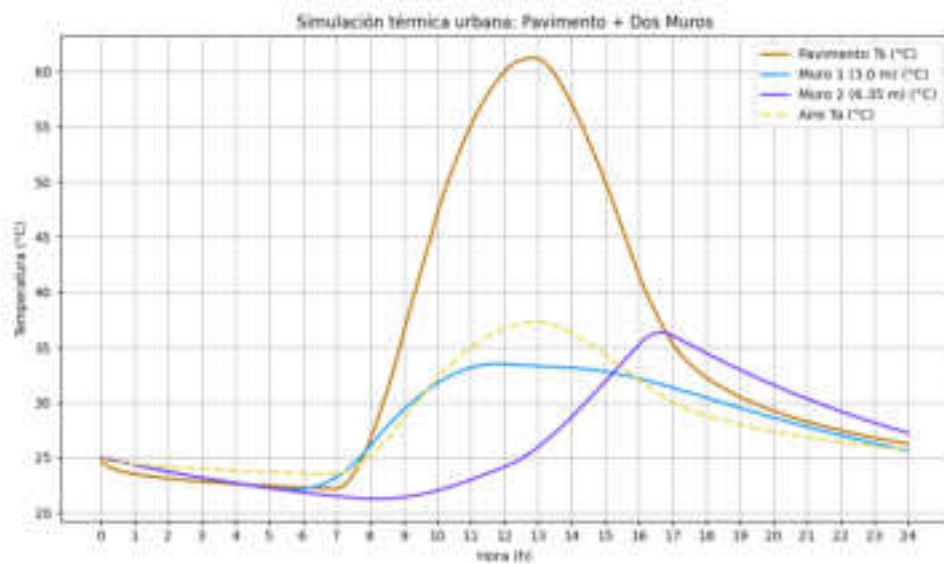


Figure 3.9: CALLE MOQUEGUA

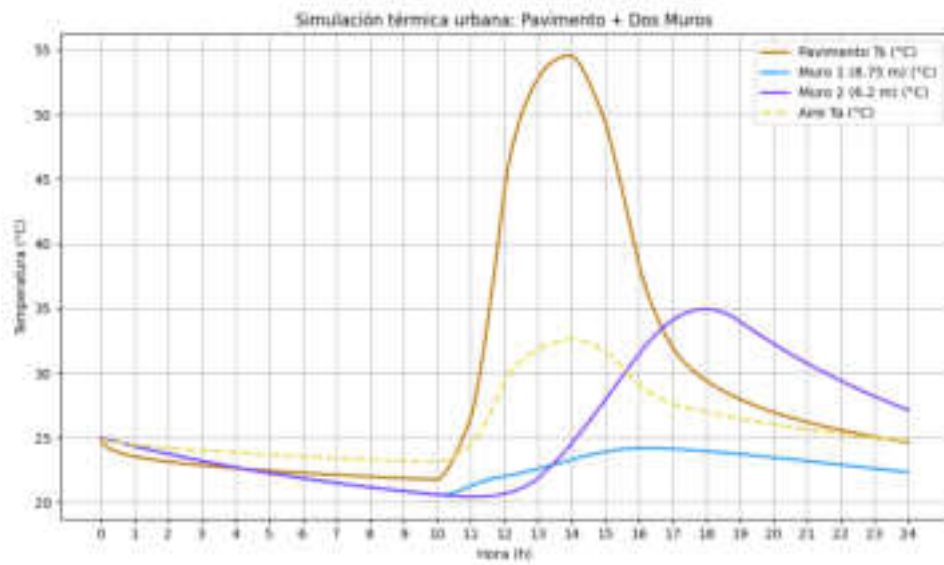


Figure 3.10: CALLE PIURA

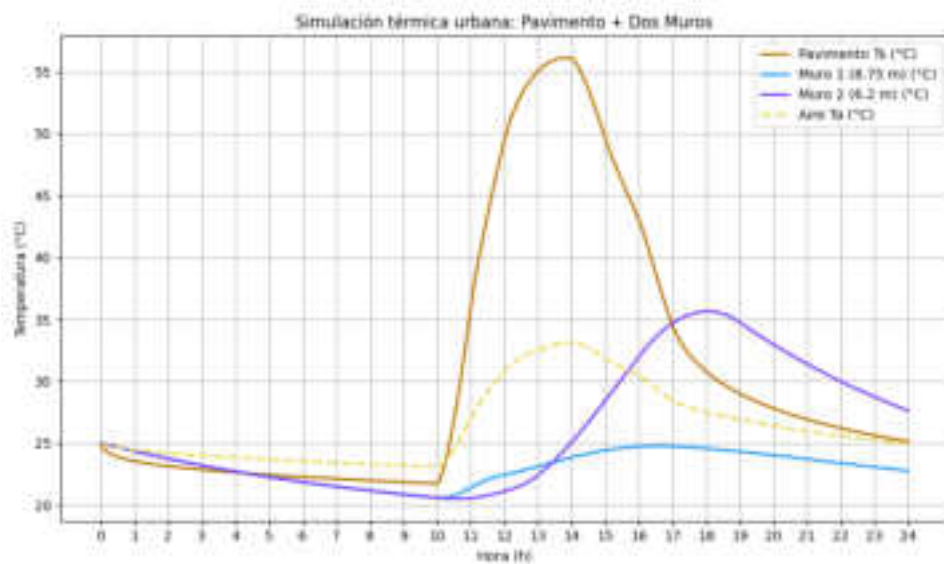


Figure 3.11: CALLE TACNA

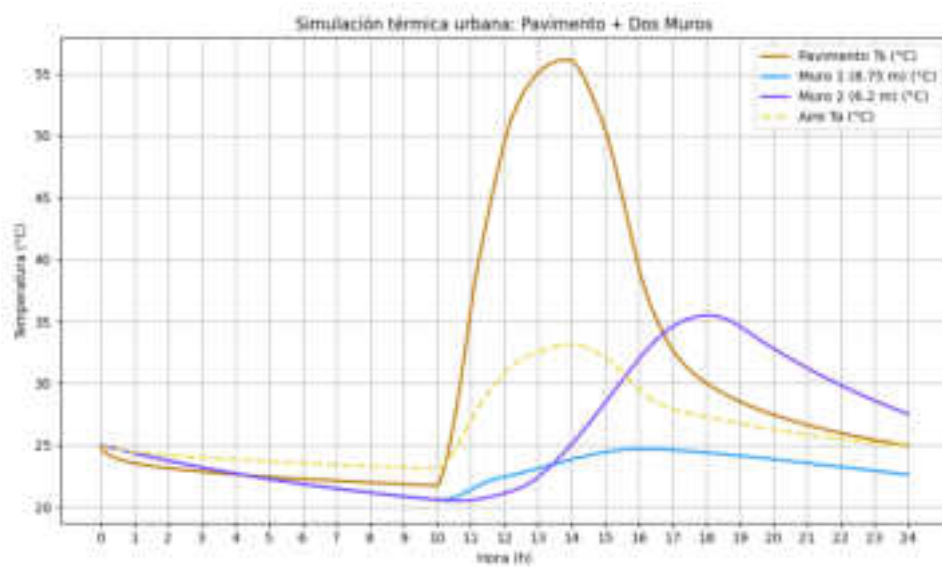


Figure 3.12: CALLE TARAPACÁ

3.2. Resultado de temperatura ambiente en las calles de Moquegua con cobertura vegetal 40 % solo pavimento

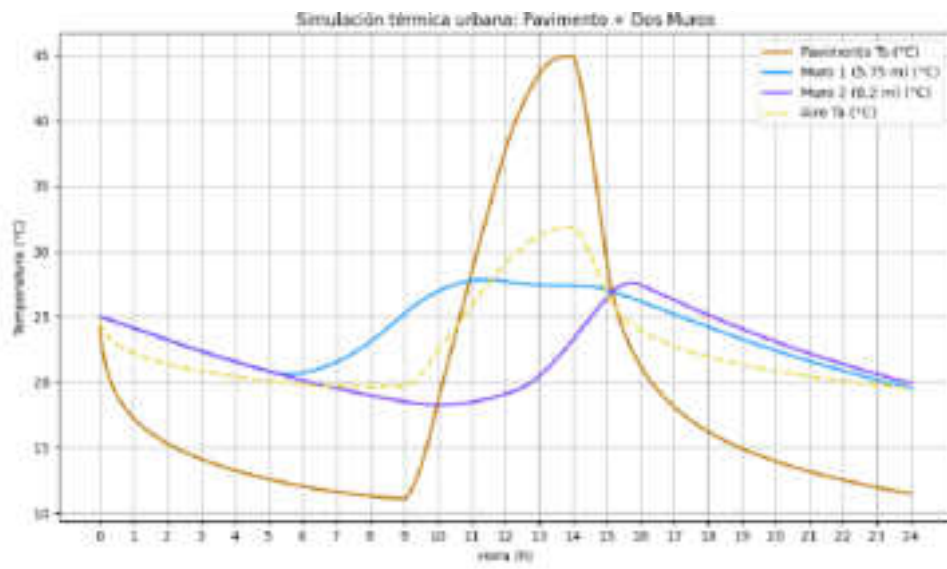


Figure 3.13: CALLE ANCASH

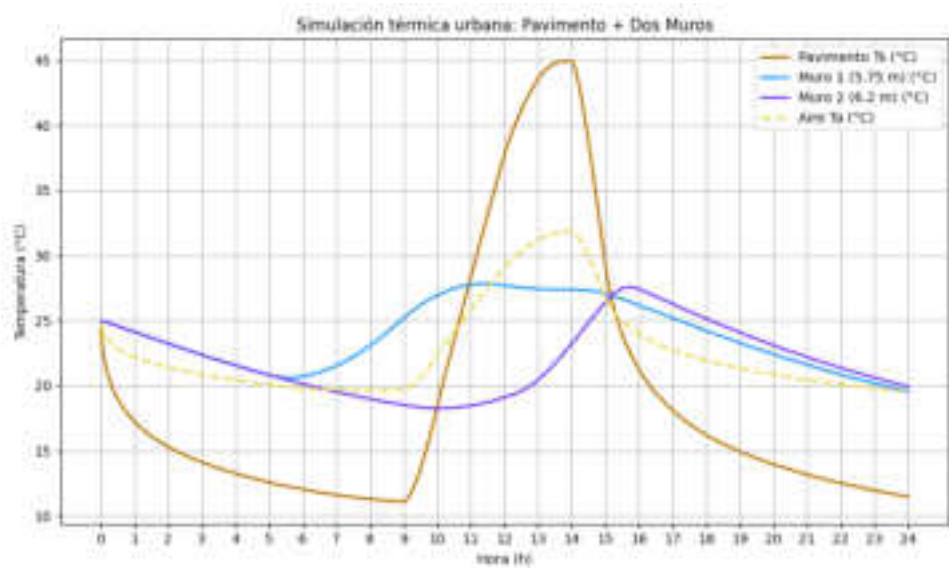


Figure 3.14: CALLE AREQUIPA

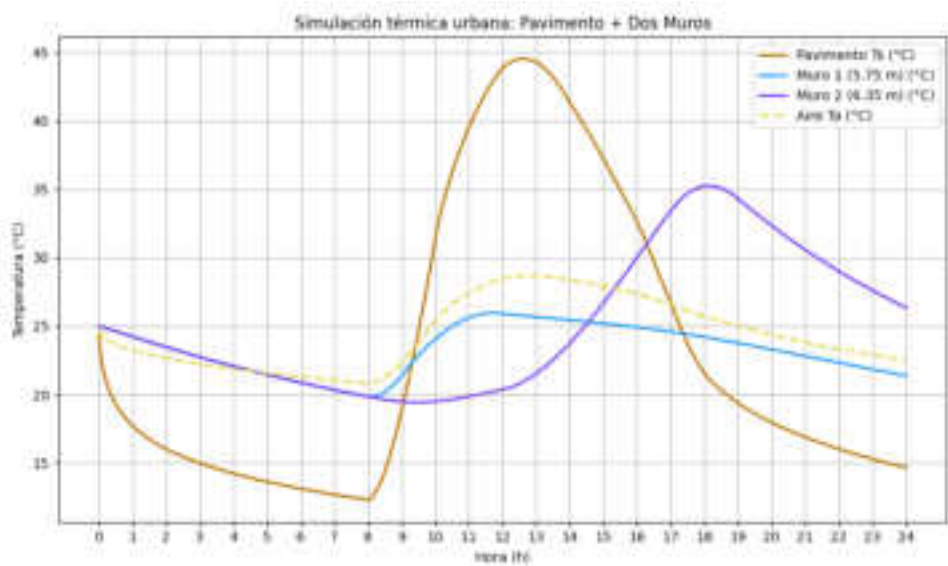


Figure 3.15: CALLE AYACUCHO

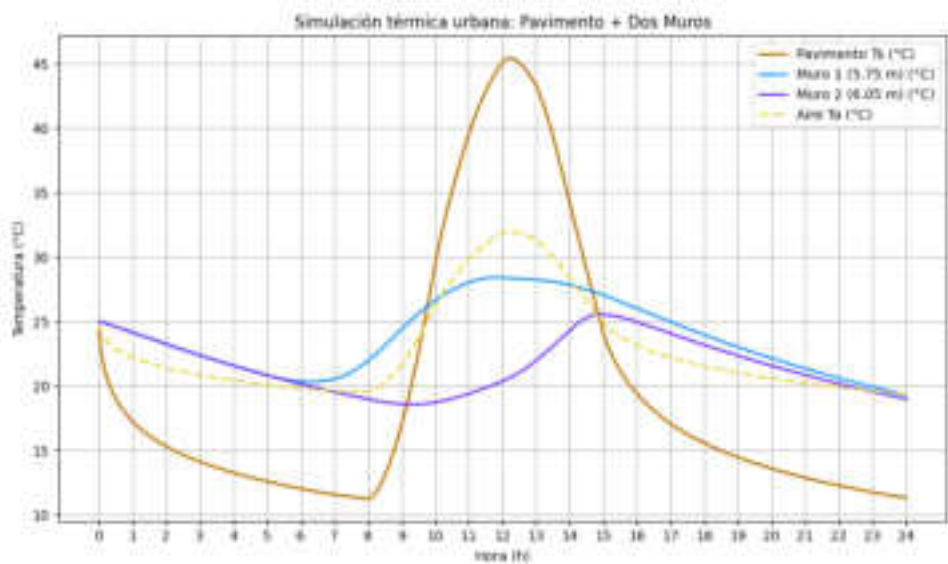


Figure 3.16: CALLE CUZCO

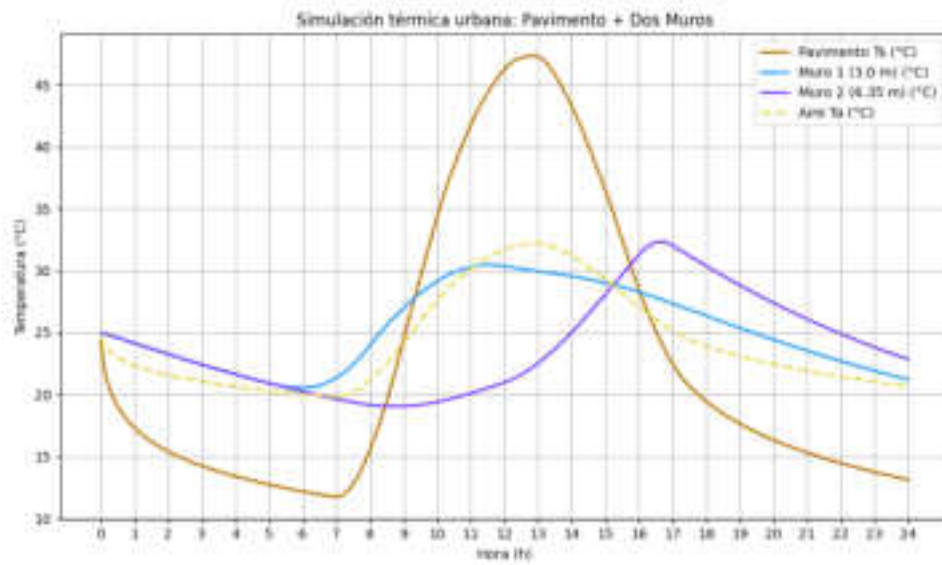


Figure 3.17: CALLE JUNIN

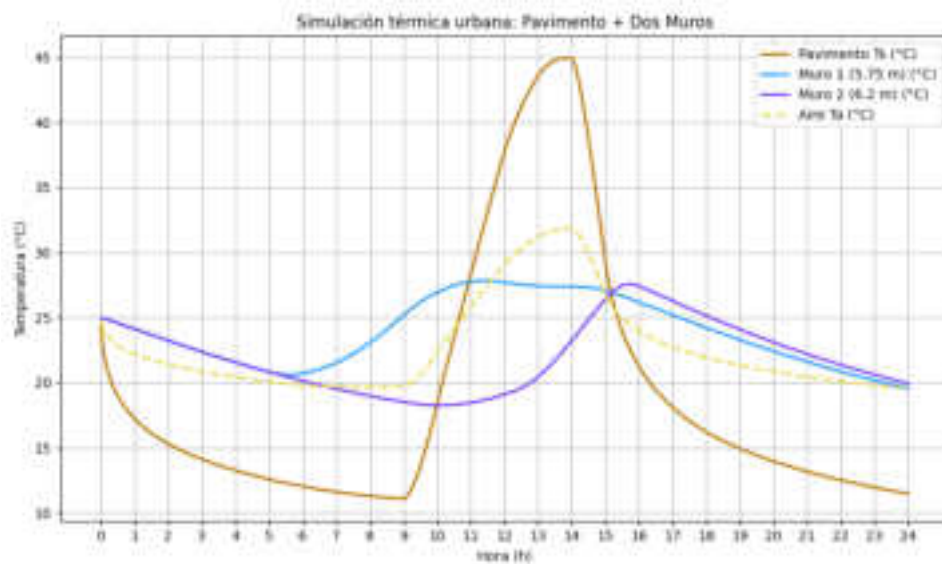


Figure 3.18: CALLE LIBERTAD

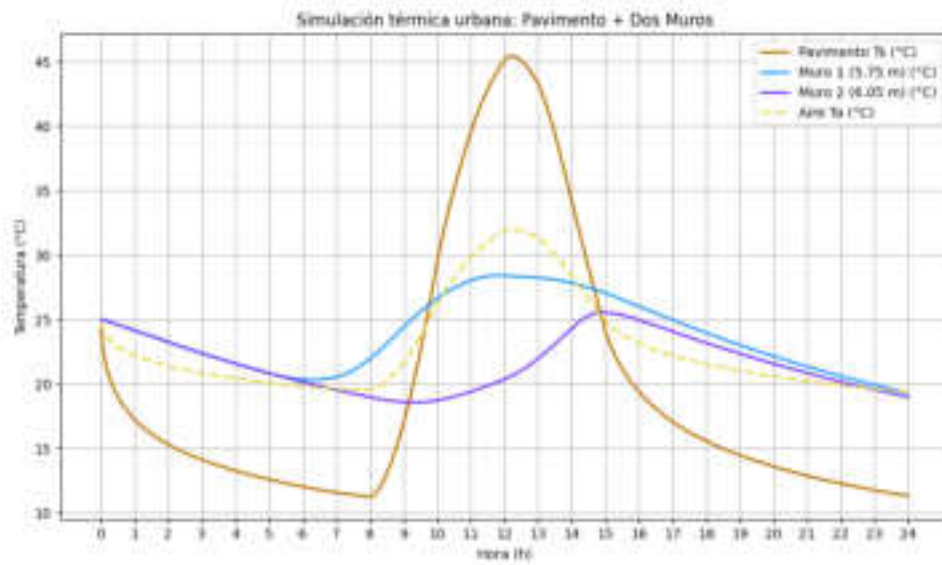


Figure 3.19: CALLE LIMA

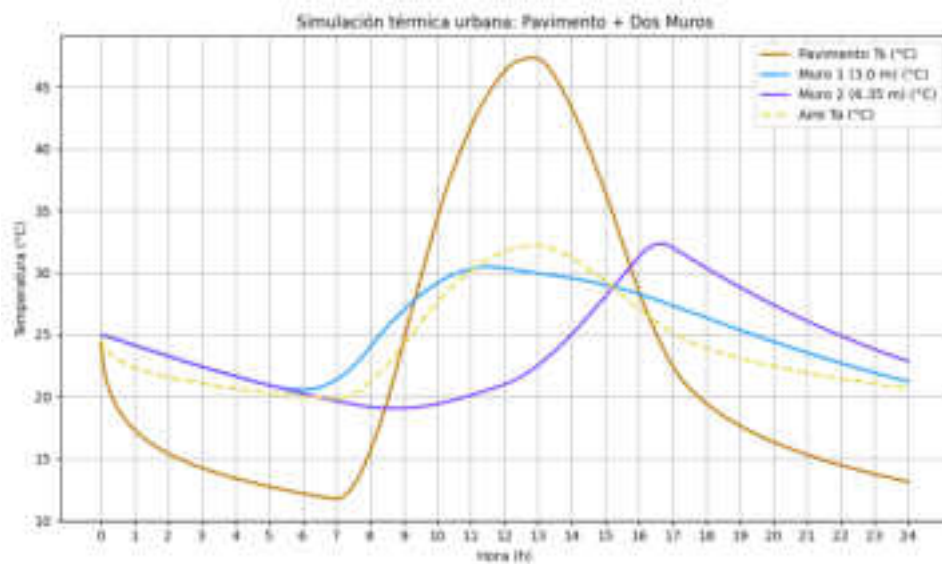


Figure 3.20: CALLE MOQUEGUA

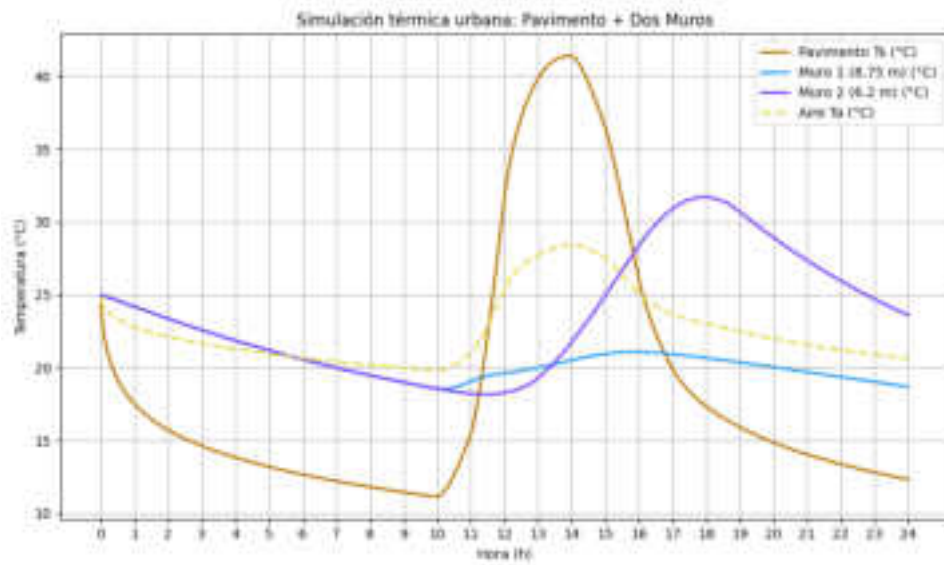


Figure 3.21: CALLE PIURA

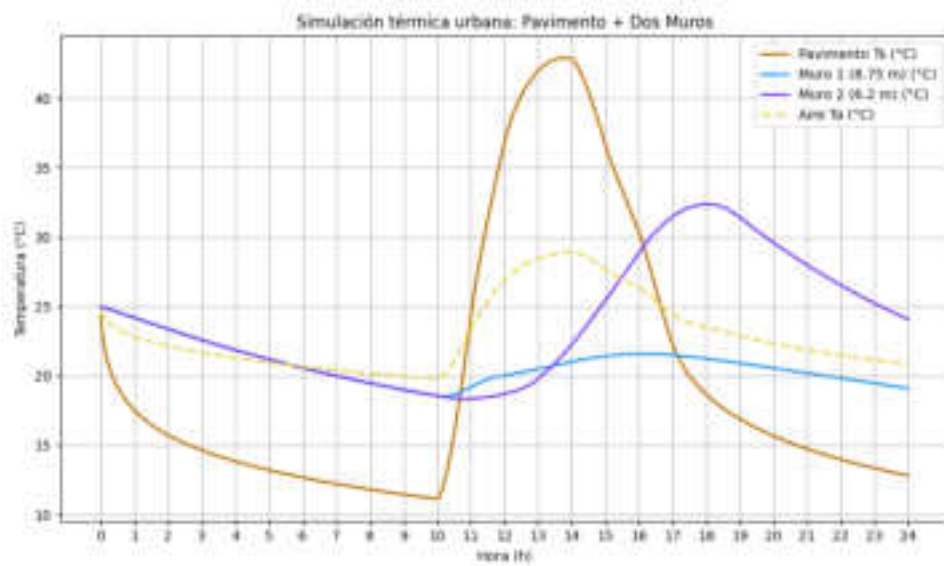


Figure 3.22: CALLE TACNA

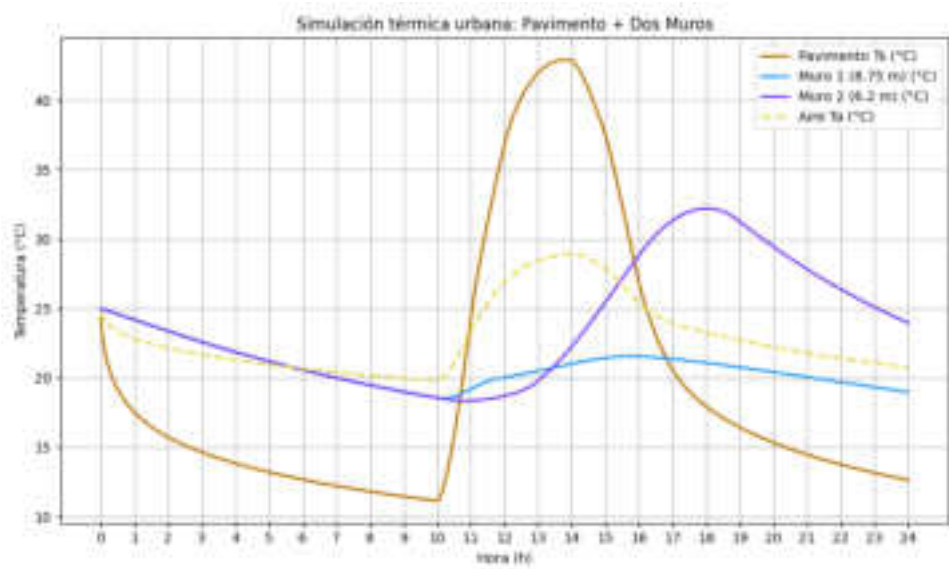


Figure 3.23: CALLE TARAPACÁ

3.3. Resultado de temperatura ambiente en las calles de Moquegua con cobertura vegetal 40 % en pavimento, muro1 y muro2 25 %

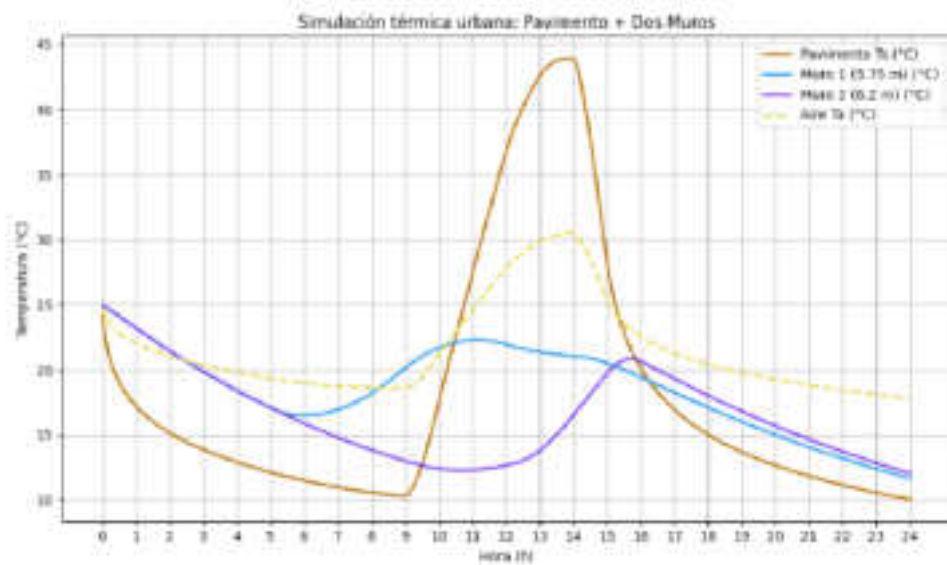


Figure 3.24: CALLE ANCASH

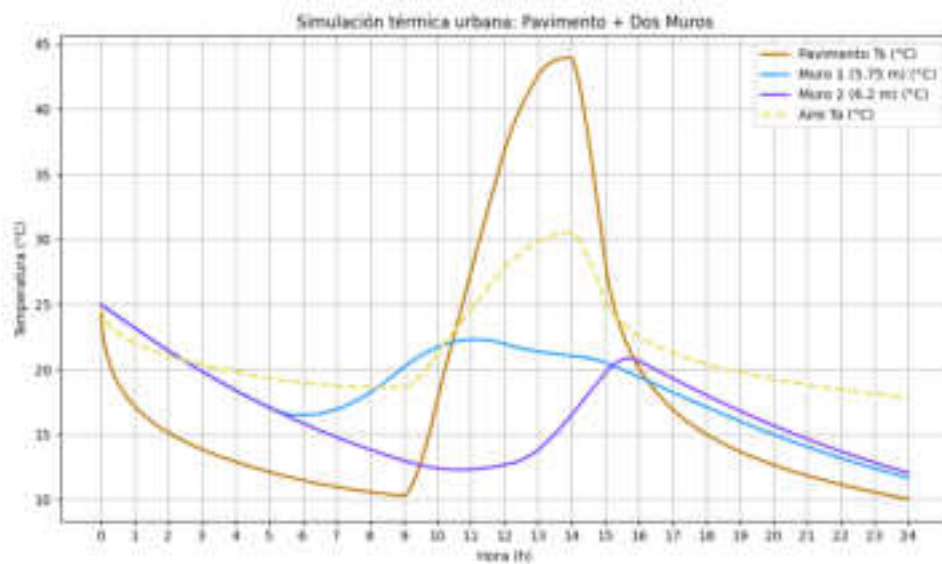


Figure 3.25: CALLE AREQUIPA

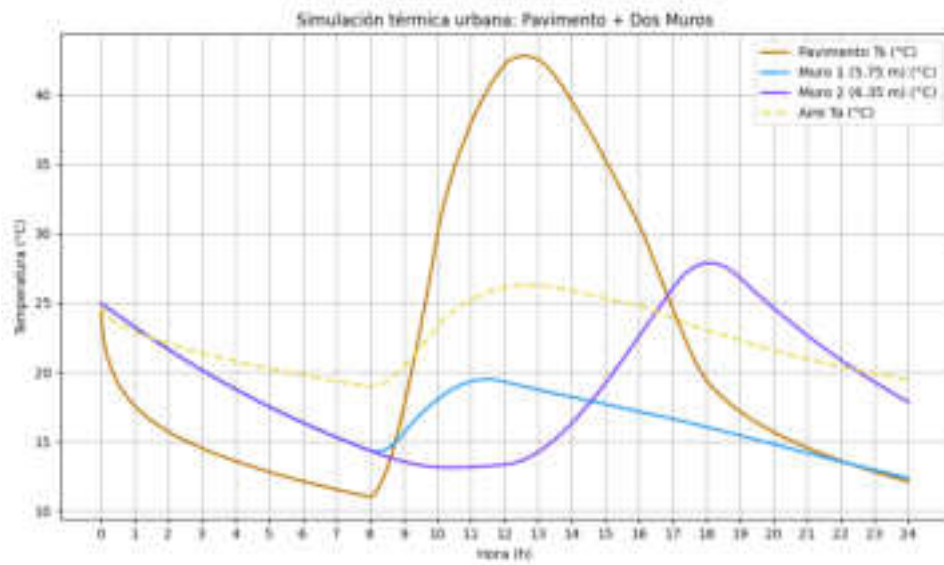


Figure 3.26: CALLE AYACUCHO

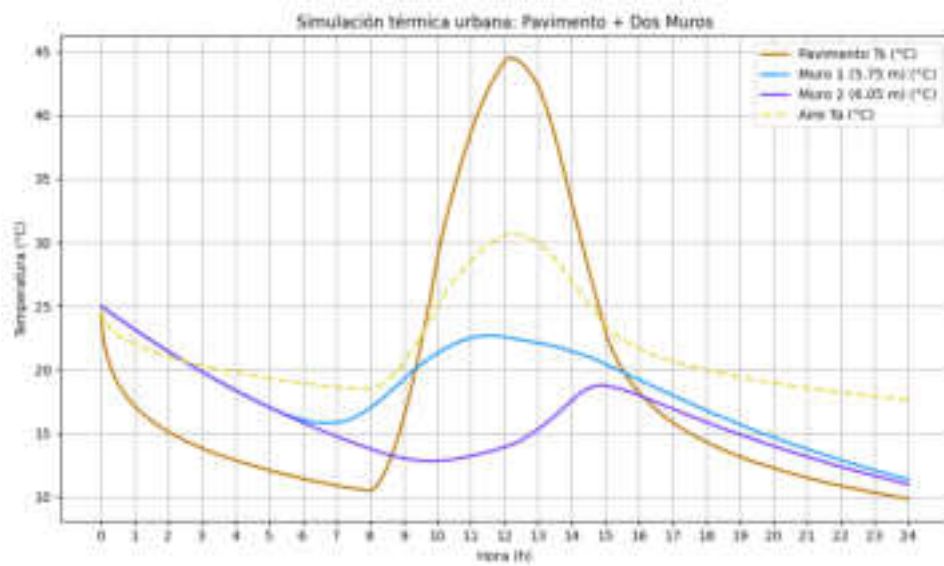


Figure 3.27: CALLE CUZCO

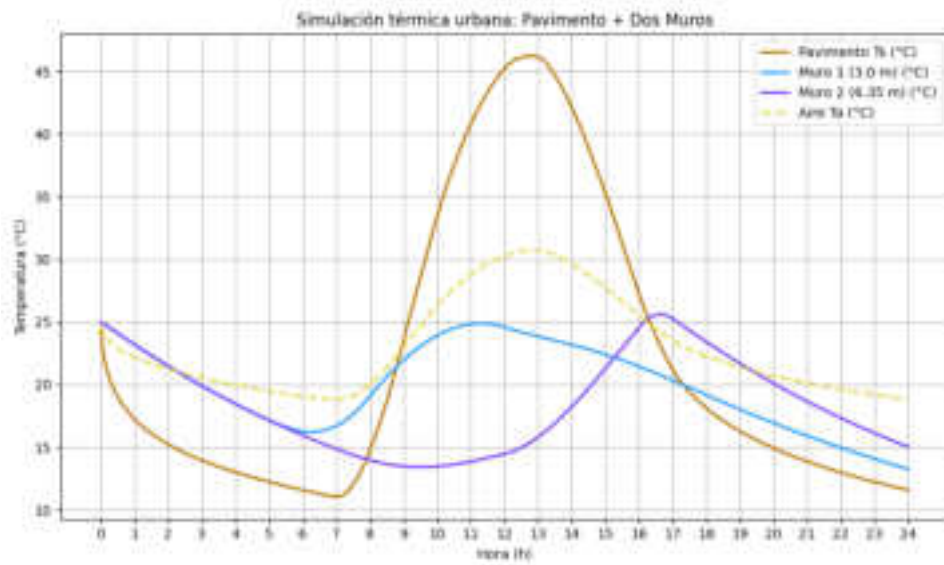


Figure 3.28: CALLE JUNIN

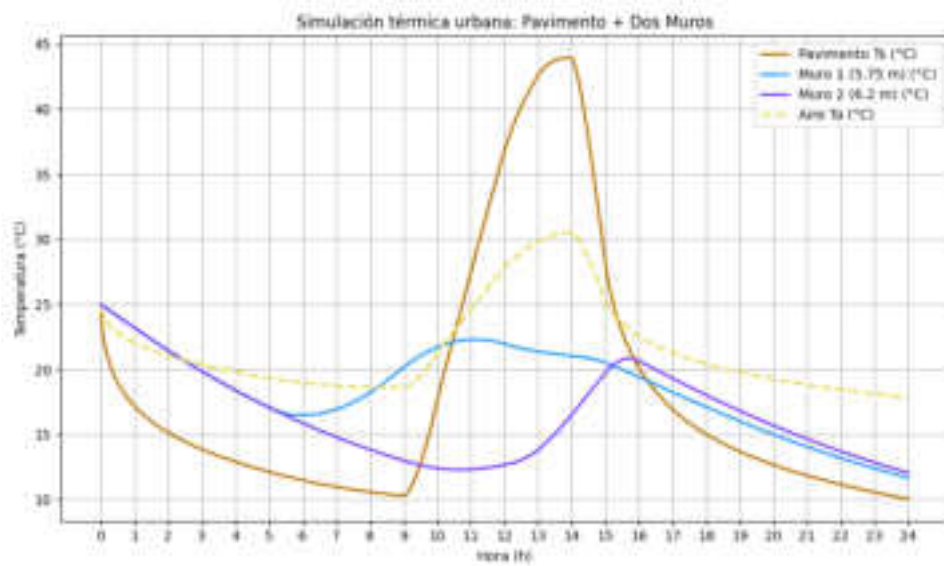


Figure 3.29: CALLE LIBERTAD

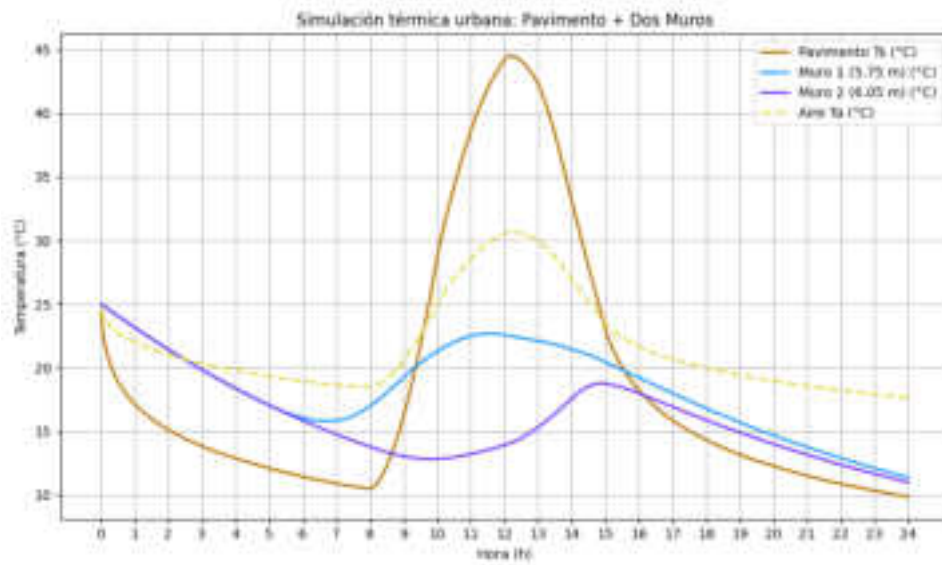


Figure 3.30: CALLE LIMA

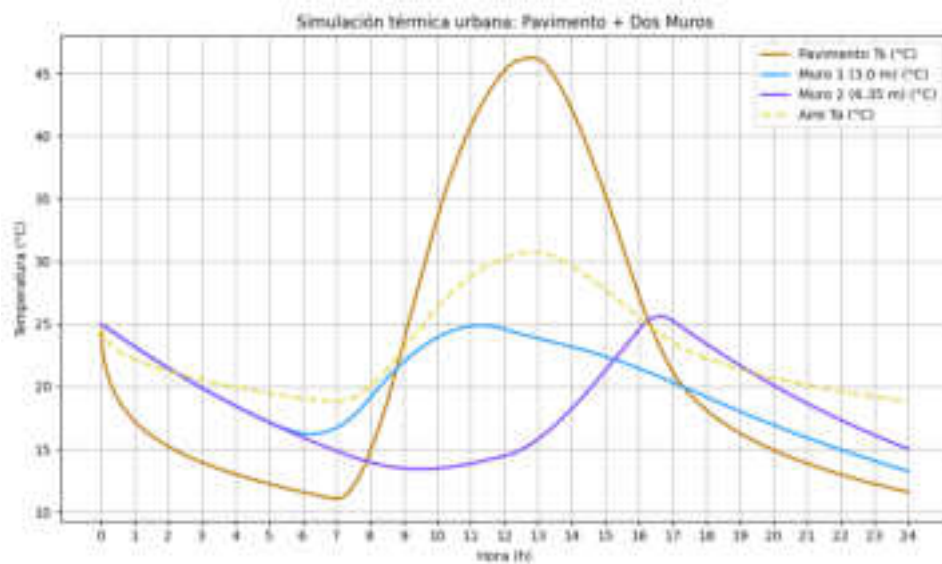


Figure 3.31: CALLE MOQUEGUA

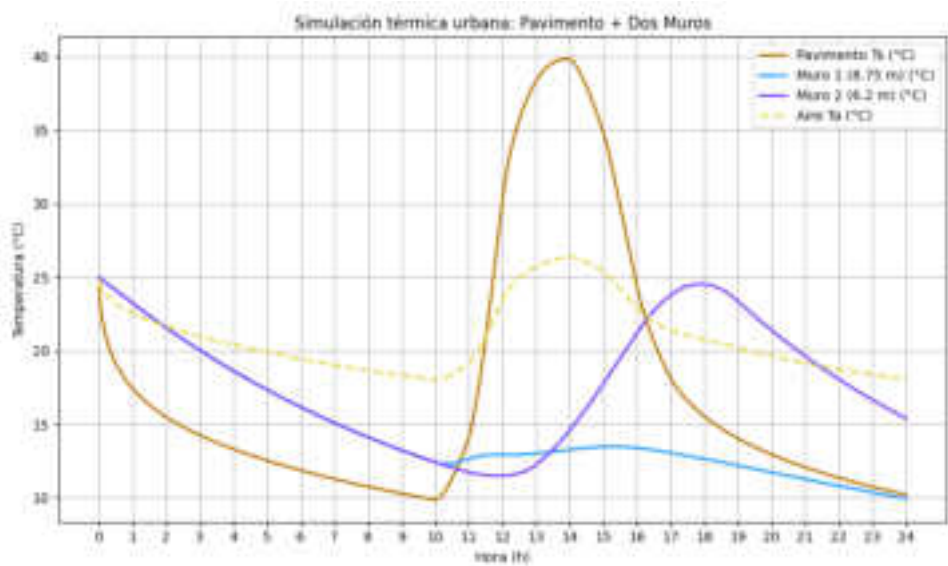


Figure 3.32: CALLE PIURA

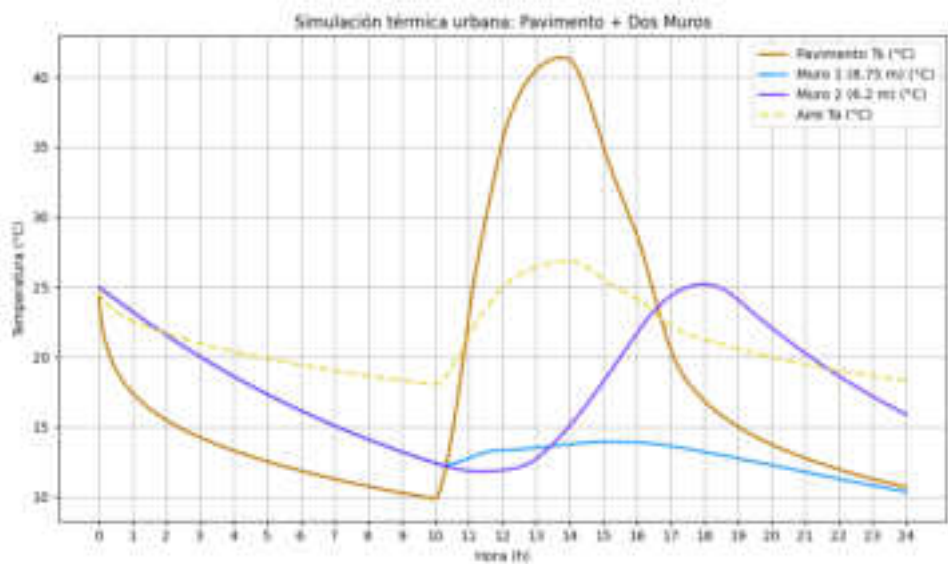


Figure 3.33: CALLE TACNA

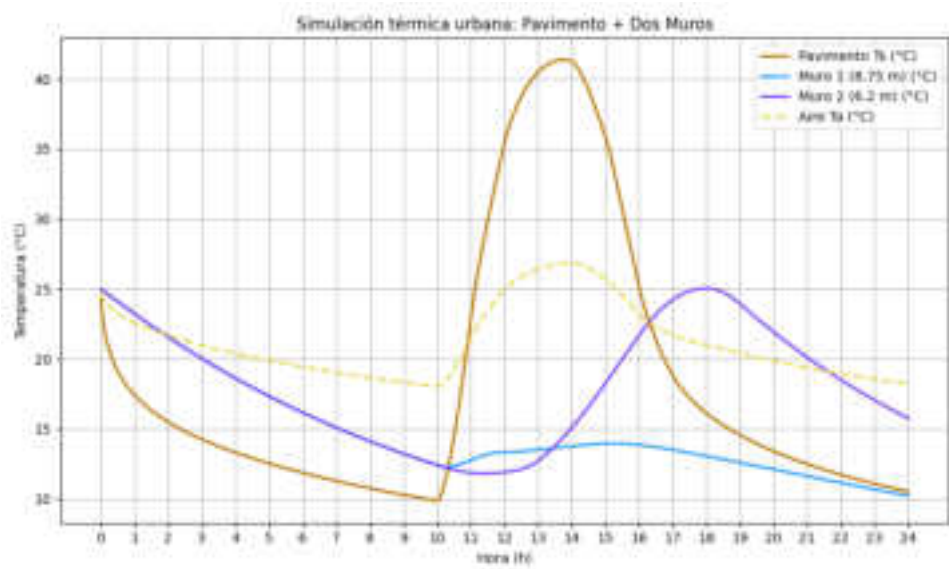


Figure 3.34: CALLE TARAPACÁ

3.4. Irradiancia modificada debido a las sombras proyectadas por los muros en las calles de Moquegua

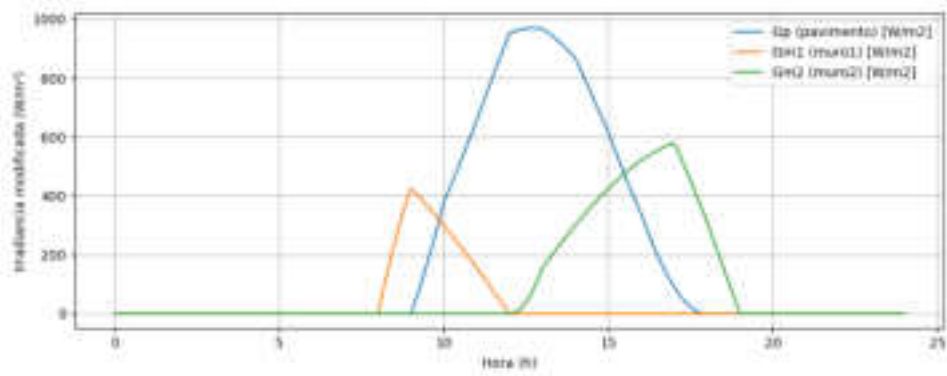


Figure 3.35: CALLE ANCASH

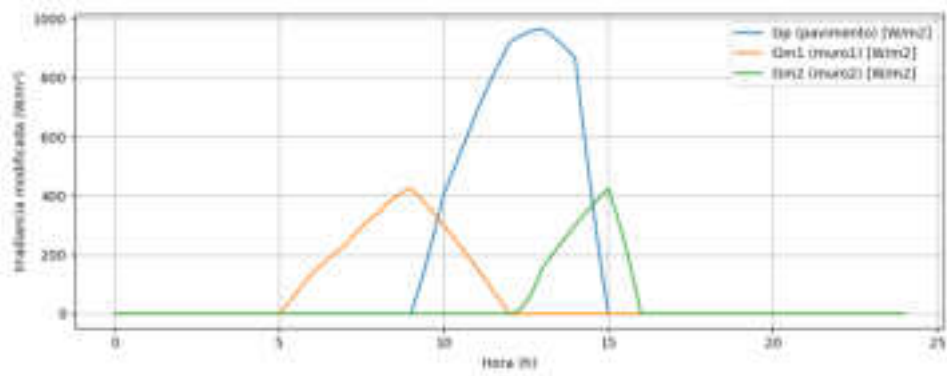


Figure 3.36: CALLE AREQUIPA

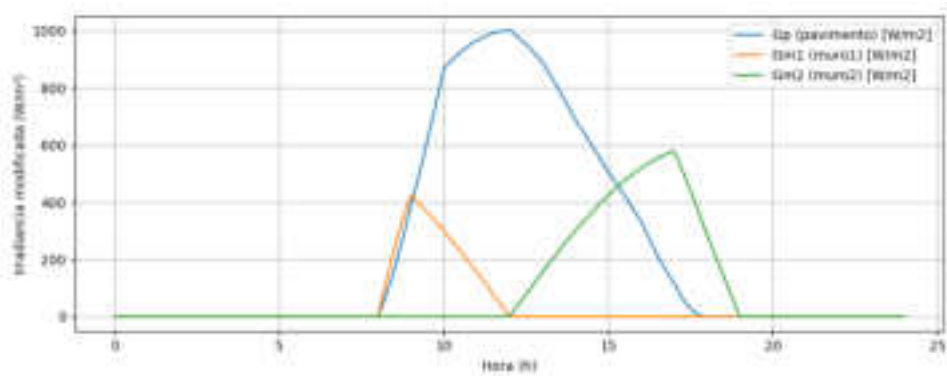


Figure 3.37: CALLE AYACUCHO

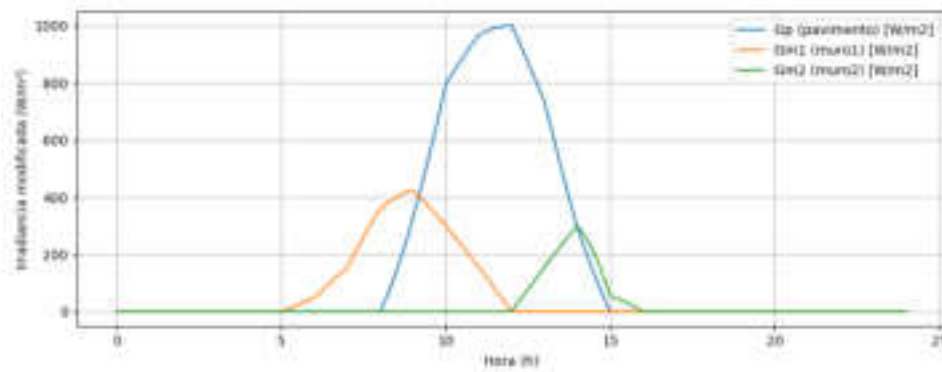


Figure 3.38: CALLE CUZCO

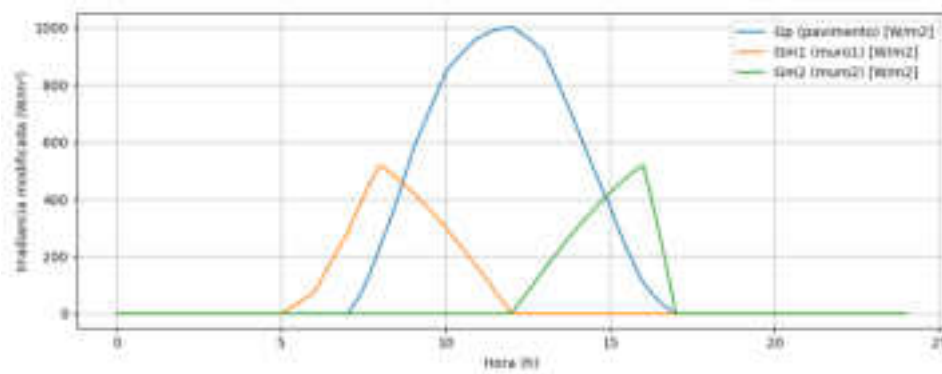


Figure 3.39: CALLE JUNIN

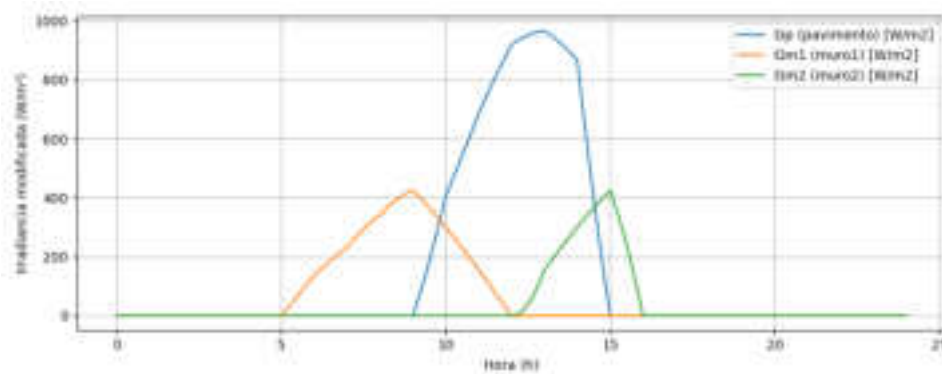


Figure 3.40: CALLE LIBERTAD

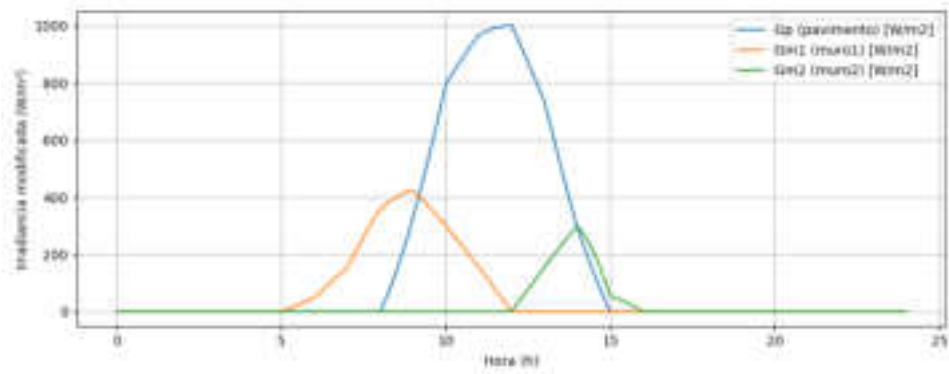


Figure 3.41: CALLE LIMA

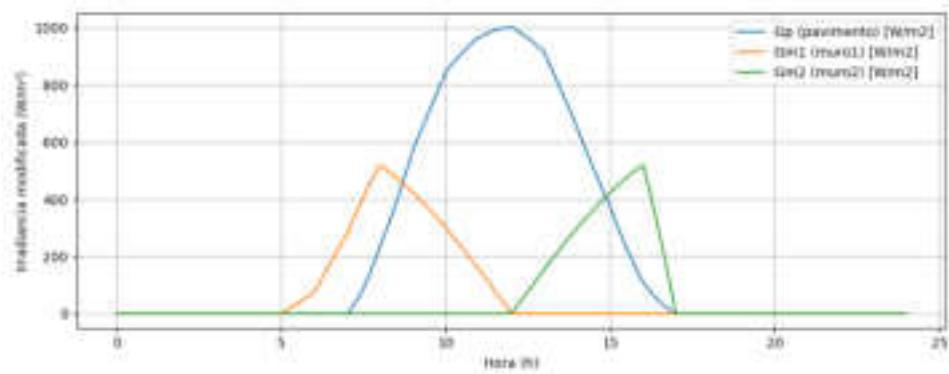


Figure 3.42: CALLE MOQUEGUA

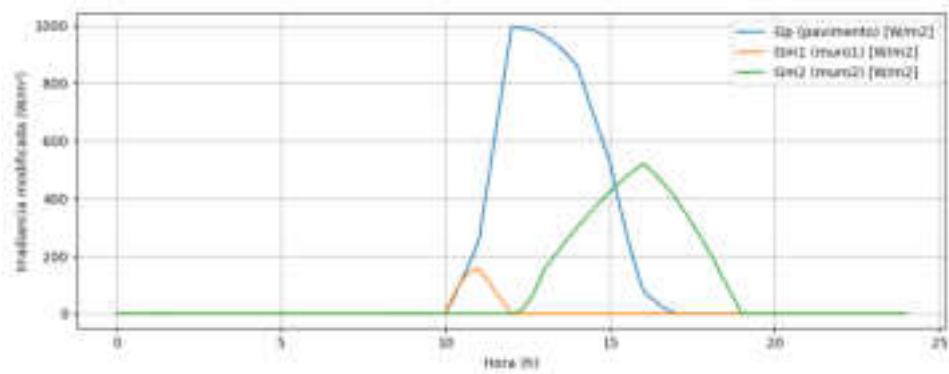


Figure 3.43: CALLE PIURA

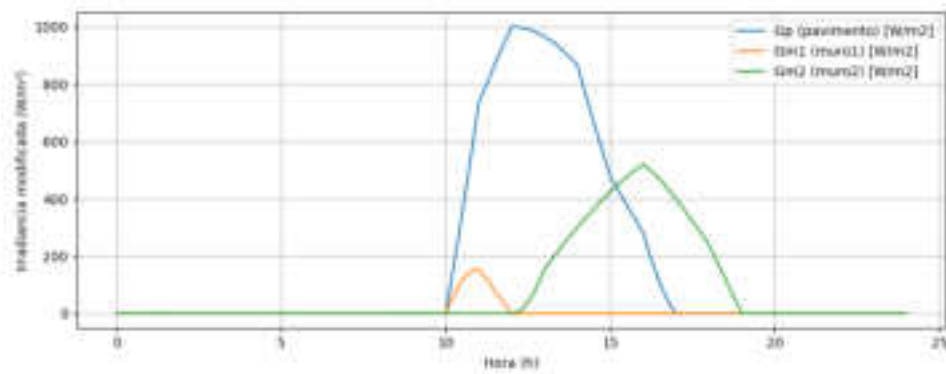


Figure 3.44: CALLE TACNA

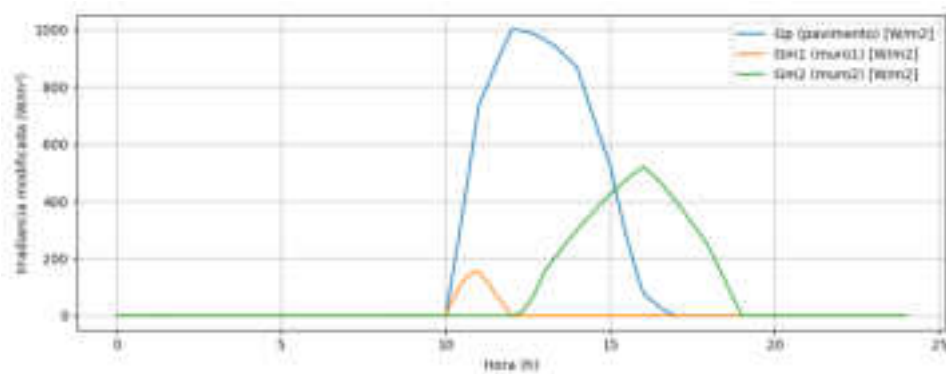


Figure 3.45: CALLE TARAPACÁ

Bibliografía

Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F. (2001), 'A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models: Comparison With Multi-Layer And Slab Models', *Boundary-Layer Meteorology* **101**(3), 329–358.

URL: <https://link.springer.com/10.1023/A:1019207923078>

Sequeira-Chavarría, F. and Ramírez-Bogantes, M. (2019), 'Aspectos computacionales del método de diferencias finitas para la ecuación de calor dependiente del tiempo', *Uniciencia* **33**(1), 83.

URL: <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/11107>

Apéndice A

Variables y parámetros físicos

Table A.1: Descripción de las variables y parámetros usados en el modelo de cañón urbano.

Símbolo	Descripción	Unidades
T_a	Temperatura del aire dentro del cañón urbano	K
T_i	Temperatura de la superficie i (suelo o pared)	K
T_s	Temperatura de la superficie del suelo	K
T_∞	Temperatura del aire ambiente (fuera del cañón)	K
C_a	Capacidad térmica del aire en el cañón	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
h_i	Coeficiente convectivo de la superficie i	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
h_{top}	Coeficiente convectivo con la atmósfera superior	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
A_i	Área de intercambio térmico de la superficie i	m^2
A_{top}	Área de intercambio con la atmósfera superior	m^2
Q_{antro}	Flujo de calor antropogénico	W
H_i	Flujo convectivo entre el aire y la superficie i	W
H_{arriba}	Flujo convectivo entre el aire del cañón y el aire libre	W
$R_{n,i}$	Radiación neta recibida por la superficie i	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
IE_i	Flujo de calor latente (evaporación)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
G_i	Flujo de calor hacia el interior del suelo	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
$q_{\text{net,surf}}$	Flujo neto superficial (entrante al suelo)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
α	Albedo de la superficie (fracción reflejada de radiación solar)	adimensional
ε	Emisividad térmica de la superficie	adimensional
σ	Constante de Stefan–Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
G	Irradiancia solar incidente	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
$E_\downarrow$	Radiación de onda larga descendente del cielo	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
k	Conductividad térmica del suelo	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
ρ	Densidad del material del suelo	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
c	Calor específico del material	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\alpha = \frac{k}{\rho c}$	Difusividad térmica del material	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
t	Tiempo	s
z	Profundidad (coordenada vertical)	m

Apéndice B

Modelo de Cañon-urbano de una simple capa, codigo en python

B.1. Codigo de programacion en python

```
1 import numpy as np
2 import math
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import pandas as pd
5 from scipy.interpolate import interp1d
6
7
8 nombre=["CALLE LIMA",
9         "CALLE MOQUEGUA",
10        "CALLE AYACUCHO",
11        "CALLE JUNIN",
12        "CALLE CUZCO",
13        "CALLE PIURA",
14        "CALLE LIBERTAD",
15        "CALLE ANCASH",
16        "CALLE TACNA",
17        "CALLE AREQUIPA",
18        "CALLE CALLAO",
19        "CALLE TARAPACA"]
20
21 for a,nombreguard in zip(np.linspace(1,34,12),nombre):
22
23     cols=[a, a+1, a+2]
24
25     # =====
26     # FUNCIONES DE IRRADIANCIA Y RADIACION
27     # =====
28     def irradiancia_solar(t_segundos, pico=1000.0, salida_sol=6.0,
29                          puesta_sol=18.0):
30         """Modelo simple tipo campana senoidal"""
31         hora = (t_segundos / 3600.0) % 24
32         if hora < salida_sol or hora > puesta_sol:
33             return 0.0
34         fase = math.pi * (hora - salida_sol) / (puesta_sol - salida_sol)
35         return pico * max(0.0, math.sin(fase))
36
37     def L_descendente(Ta):
38         """Radiacion larga descendente atmosferica"""
39         eps_atm = 0.8
```

APÉNDICE B. MODELO DE CAÑON-URBANO DE UNA SIMPLE CAPA, CODIGO EN PYTHON34

```
39     sigma = 5.670374419e-8
40     return eps_atm * sigma * Ta**4
41
42     # =====
43     # CARGA DEL ARCHIVO CON LOS PORCENTAJES DE AREA (COLUMNAS 1,2,3)
44     # =====
45     archivo = 'Data1.xlsx'
46     df = pd.read_excel(archivo, skiprows=3, index_col=0)
47
48     # Tiempo en segundos (columna 37 tiene las horas)
49     x = df[37].values * 3600.0
50
51     # Diccionarios para interpoladores y maximos originales
52     f_area_dict = {}
53     max_value = {}
54
55     # Columnas 1,2,3 -> pavimento, muro1, muro2
56
57     names = ["f_area_calle", "f_area_altura_edificio1", "
58             f_area_altura_edificio2"]
59
60     for col, name in zip(cols, names):
61         y_raw = df[col].values.astype(float)
62         # Guardar maximo original
63         max_val = np.max(y_raw) if np.max(y_raw) != 0 else 1.0
64         max_value[col] = max_val
65         # Normalizar de 0 a 1 usando su maximo
66         y = y_raw / max_val
67         f_area_dict[name] = interp1d(x, y, bounds_error=False, fill_value
68                                     =(y[0], y[-1]))
69
70     # Extraer interpoladores
71     f_area_calle = f_area_dict["f_area_calle"]
72     f_area_altura_edificio1 = f_area_dict["f_area_altura_edificio1"]
73     f_area_altura_edificio2 = f_area_dict["f_area_altura_edificio2"]
74
75     # mostrar los maximos detectados
76     print("max_value detectados (column: max):", max_value)
77
78     # =====
79     # PARAMETROS DEL MODELO
80     # =====
81
82     altura_edificio1 = max_value[cols[1]] # m (muro 1)
83     altura_edificio2 = max_value[cols[2]] # m (muro 2)
84     ancho_calle = max_value[cols[0]]      # m
85     Largo_Calle = 100 # m
86
87     # Areas activas
88     A_pavimento = ancho_calle * Largo_Calle
89     A_muro1 = altura_edificio1 * Largo_Calle
90     A_muro2 = altura_edificio2 * Largo_Calle
91
92     # Coeficientes convectivos (W/m2K)
93     h_pavimento = 15.0
94     h_muro = 5.0
95
96     # Calor antropogenico (W/m2)
97     Q_antrop = 50.0
98
99     # Temperaturas base (K)
```

```

98     T_amb = 25.0 + 273.15
99     T_fondo = 35.0 + 273.15
100
101     # Propiedades Opticas
102     albedo_pav = 0.1
103     albedo_muro = 0.40
104     eps_pav = 0.95
105     eps_muro = 0.9
106     sigma = 5.670374419e-8
107
108     # Propiedades de muros
109     C_muro1 = 2.5e5 # J/m2K
110     C_muro2 = 2.5e5 # J/m2K
111
112     # =====
113     # PAVIMENTO MULTICAPA 1D
114     # =====
115     capas_pavimento = [
116         {"nombre": "asfalto_superficie", "espesor": 0.05, "rho": 1800.0, "
117         cp": 900.0, "k": 1.0},
118         {"nombre": "asfalto_base", "espesor": 0.10, "rho": 2000.0, "
119         cp": 900.0, "k": 0.8},
120         {"nombre": "subbase", "espesor": 0.30, "rho": 1800.0, "
121         cp": 840.0, "k": 0.5},
122         {"nombre": "subsuelo", "espesor": 1.00, "rho": 1700.0, "
123         cp": 900.0, "k": 1.0},
124     ]
125
126     # Construir malla 1D
127     dz_lista, prop_mat = [], []
128     for capa in capas_pavimento:
129         n_celdas = max(4, int(round(capa["espesor"] / 0.01)))
130         dz = capa["espesor"] / n_celdas
131         for _ in range(n_celdas):
132             dz_lista.append(dz)
133             prop_mat.append({"rho": capa["rho"], "cp": capa["cp"], "k":
134             capa["k"]})
135
136     dz_array = np.array(dz_lista)
137     nz = len(dz_array)
138     rho = np.array([m["rho"] for m in prop_mat])
139     cp = np.array([m["cp"] for m in prop_mat])
140     k = np.array([m["k"] for m in prop_mat])
141     C_celda = rho * cp * dz_array
142
143     # =====
144     # CONDICIONES INICIALES Y ARRAYS DE SALIDA
145     # =====
146     dt = 60.0
147     t_max = 24 * 3600.0
148     tiempos = np.arange(0, t_max + dt, dt)
149
150     Tp = np.ones(nz) * T_amb
151     Tm1 = T_amb
152     Tm2 = T_amb
153     Ta = T_amb
154
155     Ta_rec = np.zeros_like(tiempos)
156     Tp_surf_rec = np.zeros_like(tiempos)
157     Tm1_rec = np.zeros_like(tiempos)
158     Tm2_rec = np.zeros_like(tiempos)

```

```

154 G_rec = np.zeros_like(tiempos)
155 Gp_rec = np.zeros_like(tiempos)
156 Gm1_rec = np.zeros_like(tiempos)
157 Gm2_rec = np.zeros_like(tiempos)
158
159 # =====
160 # SOLVER THOMAS Y FUNCIONES AUXILIARES
161 # =====
162 def thomas_solver(a_inf, a_diag, a_sup, b):
163     n = len(a_diag)
164     c, d = np.zeros(n-1), np.zeros(n)
165     c[0] = a_sup[0]/a_diag[0]
166     d[0] = b[0]/a_diag[0]
167     for i in range(1, n-1):
168         denom = a_diag[i] - a_inf[i-1]*c[i-1]
169         c[i] = a_sup[i]/denom
170         d[i] = (b[i]-a_inf[i-1]*d[i-1])/denom
171     denom = a_diag[-1] - a_inf[-1]*c[-1]
172     d[-1] = (b[-1]-a_inf[-1]*d[-2])/denom
173     x = np.zeros(n)
174     x[-1] = d[-1]
175     for i in range(n-2, -1, -1):
176         x[i] = d[i] - c[i]*x[i+1]
177     return x
178
179 def calcular_k_interf(k_arr):
180     k_if = np.zeros(len(k_arr)+1)
181     if len(k_arr) > 1:
182         k_if[1:-1] = 2*(k_arr[:-1]*k_arr[1:])/((k_arr[:-1]+k_arr[1:]))
183     k_if[0], k_if[-1] = k_arr[0], k_arr[-1]
184     return k_if
185
186 def paso_pavimento(T_ant, q_surf, dt):
187     n = nz
188     a_diag = np.zeros(n)
189     a_inf = np.zeros(n-1)
190     a_sup = np.zeros(n-1)
191     b = np.zeros(n)
192     k_if = calcular_k_interf(k)
193     for i in range(n):
194         if i == 0:
195             if n > 1:
196                 G = k_if[1]/((dz_array[0]+dz_array[1])/2)
197             else:
198                 G = k_if[1]/dz_array[0]
199             a_diag[i] = C_celda[i]/dt + G
200             a_sup[i] = -G
201             b[i] = C_celda[i]*T_ant[i]/dt + q_surf
202         elif i == n-1:
203             a_diag[i] = 1.0
204             b[i] = T_fondo
205         else:
206             G1 = k_if[i]/((dz_array[i]+dz_array[i-1])/2)
207             G2 = k_if[i+1]/((dz_array[i]+dz_array[i+1])/2)
208             a_diag[i] = C_celda[i]/dt + G1 + G2
209             a_inf[i-1], a_sup[i] = -G1, -G2
210             b[i] = C_celda[i]*T_ant[i]/dt
211     return thomas_solver(a_inf, a_diag, a_sup, b)
212
213 # =====
214 # BUCLE PRINCIPAL

```

APÉNDICE B. MODELO DE CAÑON-URBANO DE UNA SIMPLE CAPA, CODIGO EN PYTHON37

```

215 # =====
216 for idx, t in enumerate(tiempos):
217     Gtot = irradiancia_solar(t)
218
219     # factores de area temporales (0-1) para cada superficie
220     area_frac_pav = float(f_area_calle(t))
221     area_frac_m1 = float(f_area_altura_edificio1(t))
222     area_frac_m2 = float(f_area_altura_edificio2(t))
223
224     # irradiancia modificada por factor de area de cada superficie
225
226     Gp = Gtot * area_frac_pav
227     Gm1 = Gtot * area_frac_m1
228     Gm2 = Gtot * area_frac_m2
229
230     # Guardar irradiancias
231     G_rec[idx] = Gtot
232     Gp_rec[idx] = Gp
233     Gm1_rec[idx] = Gm1
234     Gm2_rec[idx] = Gm2
235
236     # Radiacion larga descendente (atm)
237     Ld = L_descendente(Ta)
238
239     # Pavimento
240     q_abs_pav = (1 - albedo_pav) * Gp
241     q_long_pav = Ld - eps_pav * sigma * Tp[0]**4
242     q_surf_pav = q_abs_pav + q_long_pav - h_pavimento * (Tp[0] - Ta)
243     Tp = paso_pavimento(Tp, q_surf_pav, dt)
244     Ts = Tp[0]
245
246     # Muros
247     q_abs_m1 = (1 - albedo_muro) * Gm1
248     q_abs_m2 = (1 - albedo_muro) * Gm2
249     q_long_m1 = Ld - eps_muro * sigma * Tm1**4
250     q_long_m2 = Ld - eps_muro * sigma * Tm2**4
251     q_net_m1 = q_abs_m1 + q_long_m1 - h_muro * (Tm1 - Ta)
252     q_net_m2 = q_abs_m2 + q_long_m2 - h_muro * (Tm2 - Ta)
253     Tm1 += (q_net_m1 / C_muro1) * dt
254     Tm2 += (q_net_m2 / C_muro2) * dt
255
256     # Aire en el canon (balance convectivo simplificado)
257     sum_hA_T = h_pavimento*A_pavimento*Ts + h_muro*A_muro1*Tm1 +
h_muro*A_muro2*Tm2
258     sum_hA = h_pavimento*A_pavimento + h_muro*(A_muro1 + A_muro2)
259
260
261     Ta = (sum_hA_T + Q_antrop + sum_hA*T_amb) / (2.0 * sum_hA + 1e-12)
262
263     # Guardar
264     Tp_surf_rec[idx] = Ts
265     Tm1_rec[idx] = Tm1
266     Tm2_rec[idx] = Tm2
267     Ta_rec[idx] = Ta
268
269 # =====
270 # POSTPROCESADO Y GRAFICAS
271 # =====
272 horas = tiempos / 3600.0
273 Tp_C = Tp_surf_rec - 273.15
274 Tm1_C = Tm1_rec - 273.15

```

```

275     Tm2_C = Tm2_rec - 273.15
276     Ta_C = Ta_rec - 273.15
277
278     plt.figure(figsize=(10,6))
279     plt.plot(horas, Tp_C, label="Pavimento Ts (C)", color="#b97509",
linewidth=2)
280     plt.plot(horas, Tm1_C, label=f"Muro 1 ({altura_edificio1} m) (C)",
color="#2a9df4", linewidth=2)
281     plt.plot(horas, Tm2_C, label=f"Muro 2 ({altura_edificio2} m) (C)",
color="#7a42f5", linewidth=2)
282     plt.plot(horas, Ta_C, label="Aire Ta (C)", color="#e6d94f", linestyle=
'--', linewidth=2)
283     plt.xlabel("Hora (h)")
284     plt.ylabel("Temperatura (C)")
285     plt.title("Simulacion termica urbana: Pavimento + Dos Muros")
286     plt.grid(True)
287     plt.legend()
288     plt.tight_layout()
289     plt.savefig(nombreguard + 'temp.png') # Guarda la imagen en el archivo
290     plt.show()
291
292
293
294     # grafica de irradiancias modificadas
295     # plt.figure(figsize=(10,4))
296     # plt.plot(horas, Gp_rec, label="Gp (pavimento) [W/m2]")
297     # plt.plot(horas, Gm1_rec, label="Gm1 (muro1) [W/m2]")
298     # plt.plot(horas, Gm2_rec, label="Gm2 (muro2) [W/m2]")
299     # plt.xlabel("Hora (h)")
300     # plt.ylabel("Irradiancia modificada (W/m2)")
301     # plt.legend()
302     # plt.grid(True)
303     # plt.tight_layout()
304     # plt.show()
305
306     print(f"Tmax Pavimento = {Tp_C.max():.2f} C")
307     print(f"Tmax Muro1 = {Tm1_C.max():.2f} C")
308     print(f"Tmax Muro2 = {Tm2_C.max():.2f} C")
309     print(f"Tmax Aire = {Ta_C.max():.2f} C")

```

Listing B.1: Código Python del modelo de cañón urbano