

# **Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente**

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

## **Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables**



### **Análisis del desempeño térmico, hidrológico y estructural del material de tezontle sobrepuesto en las azoteas de vivienda existente en el Área Metropolitana de Guadalajara**

---

**TRABAJO RECEPCIONAL** que para obtener el **GRADO** de  
**MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES**

Presenta: **ING. JAVIER NAVARRO URQUÍA**

Tutor **DR. ADOLFO PRECIADO QUIROZ**

Tlaquepaque, Jalisco. enero de 2020.

### **Agradecimientos ...**

A mi madre y hermanas, por su apoyo y amor incondicional

A mis compañeros de maestría, que me enriquecieron con diferentes puntos de vista

En mi trabajo, por todas las oportunidades ofrecidas para alcanzar esta meta

Al Dr. Adolfo Preciado Quiroz, en su guía constante como tutor

Al Dr. José Manuel Ramirez de León, por las facilidades y asesoría prestada

# Resumen

---

Esta investigación trata sobre las características y el desempeño térmico, hidrológico y estructural que se obtiene al emplear una capa de tezontle sobrepuesta en azoteas de vivienda existente en el Área Metropolitana de Guadalajara. Su objetivo general es solventar en forma pasiva problemáticas de carácter bioclimático e hidrológico mediante el empleo de un material que se caracteriza por su abundancia en la zona de estudio, costo reducido y bajo peso volumétrico. Estas propiedades caracterizan al tezontle como un material ligero e interesante para su uso en azoteas. Los objetivos particulares de la investigación comprenden: identificar el impacto del empleo del material en el confort térmico de vivienda existente; experimentar con el desempeño del material en el desalojo de la escorrentía pluvial; realizar una evaluación estructural de la vivienda considerando el material en la azotea.

Respecto al confort térmico, mediante un análisis bioclimático se determinó que en el AMG este rango de temperaturas se ubica entre los 23 y 25°C. Sin embargo, se identificó que la temperatura ambiente real no se corresponde con este rango y generalmente se encuentra fluctuando por debajo o por arriba del mismo. Por otra parte, con la implementación de la propuesta de tezontle, se alcanzaron gradientes máximos de hasta 1.5°C (*i.e.* pérdida de temperatura) y mínimos de hasta -0.9°C (*i.e.* ganancia de temperatura). En cuanto al análisis hidrológico y su correspondencia con la escorrentía en una azotea, los resultados apuntan a que dicha escorrentía se acelera colocando el material de tezontle, a razón de un 33 a un 52% respecto a una superficie sin el material. Finalmente, en el análisis sísmico de la vivienda en estudio, se identifica que el peso del material tiene poco impacto respecto a la masa total de la edificación y su comportamiento ante un eventual sismo. Por el contrario, como carga gravitacional más desfavorable (*i.e.* el material en estado saturado), los resultados obtenidos si se ubican dentro de los límites estructurales del sistema constructivo analizado.

**Palabras clave:** *sustentabilidad; tezontle; azoteas; confort térmico; escorrentía pluvial; diagnostico estructural; vivienda masiva de interés social.*

# Contenido

<b>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y CONTENIDO DEL TOG .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1 <i>Origen y antecedentes</i> .....	3
1.2.2 <i>Problemática observada 1: confort térmico</i> .....	6
1.2.3 <i>Problemática observada 2: desalojo de la escorrentía pluvial</i> .....	9
1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS .....	12
1.3.1 <i>Planteamiento</i> .....	12
1.3.2 <i>Hipótesis</i> .....	14
1.3.3 <i>Objetivo general</i> .....	14
1.3.4 <i>Objetivos particulares</i> .....	14
1.4 CONTENIDO DEL TOG.....	15
<b>CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE: CONFORT TÉRMICO, DISEÑO BIOCLIMÁTICO Y ESCURRIMIENTO PLUVIAL .....</b>	<b>17</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	17
2.2 DE LA QUINTA FACHADA, EL CONFORT TÉRMICO Y EL DISEÑO BIOCLIMÁTICO .....	18
2.2.1 <i>La quinta fachada</i> .....	18
2.2.2 <i>Sobre el clima</i> .....	18
2.2.3 <i>De la transmisión de calor y el confort térmico</i> .....	22
2.2.4 <i>Diseño bioclimático y sistemas pasivos</i> .....	29
2.3 DE HIDROLOGÍA Y ESCURRIMIENTO PLUVIAL .....	34
2.3.1 <i>Conceptos básicos de hidrología</i> .....	34
2.3.2 <i>Elementos cuantitativos sobre el escurrimiento</i> .....	38
2.4 ESTADO DE ARTE Y TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN ACTUAL .....	40
2.5 RESUMEN DEL CAPITULO.....	44
<b>CAPITULO 3: ÁREA BAJO ESTUDIO, CARACTERÍSTICAS DEL TEZONTLE Y NORMATIVA REVISADA .....</b>	<b>45</b>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	45
3.2 ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (AMG).....	45
3.2.1 <i>Ubicación Geográfica</i> .....	45
3.2.2 <i>Clima, Topografía e Hidrología</i> .....	46
3.2.3 <i>Vivienda de Interés Social</i> .....	52

3.3	CARACTERÍSTICAS DEL TEZONTLE COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO.....	55
3.3.1	<i>Propuesta de capa de tezontle sobre cubierta de vivienda existente.....</i>	<i>58</i>
3.4	NORMATIVAS APLICABLES A LA PRESENTE INVESTIGACIÓN.....	61
3.5	CONCLUSIONES DEL CAPITULO .....	63
<b>CAPITULO 4: IMPLEMENTACIÓN DEL TEZONTLE PARA MEJORAR EL CONFORT TÉRMICO EN UNA VIVIENDA.....</b>		<b>65</b>
4.1	INTRODUCCIÓN.....	65
4.2	ANÁLISIS BIOCLIMÁTICO, ZONAS DE CONFORT HIGROTÉRMICO Y REGISTRO DE TEMPERATURAS .....	65
4.2.1	<i>Análisis bioclimático y zonas de confort .....</i>	<i>65</i>
4.2.2	<i>Datos de la vivienda de estudio y experimento de campo con tezontle .....</i>	<i>72</i>
4.2.3	<i>Registro de temperaturas en vivienda analizada con capa de tezontle .....</i>	<i>76</i>
4.2.4	<i>Análisis bajo la NOM-020-ENER-2011 de la propuesta implementada.....</i>	<i>86</i>
4.3	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	91
<b>CAPITULO 5: DEL AMORTIGUAMIENTO DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL Y EL EMPLEO DEL TEZONTLE.....</b>		<b>93</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	93
5.2	ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN Y MODELO EXPERIMENTAL DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL .....	93
5.2.1	<i>Análisis hidrológico de la precipitación y escorrentía para una azotea.....</i>	<i>93</i>
5.2.2	<i>Sobre el comportamiento hidráulico del tezontle.....</i>	<i>101</i>
5.2.3	<i>Experimento con simulador de lluvia.....</i>	<i>106</i>
5.3	CONCLUSIONES DEL CAPITULO .....	113
<b>CAPITULO 6: DE LA EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA DESDE EL PUNTO DE VISTA ESTRUCTURAL.....</b>		<b>114</b>
6.1	INTRODUCCIÓN.....	114
6.2	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA AZOTEA EXISTENTE.....	115
6.2.1	<i>Teoría estructural .....</i>	<i>115</i>
6.2.2	<i>Formulación de las cargas y esfuerzos a los que se somete la azotea existente .....</i>	<i>117</i>
6.2.3	<i>Análisis sísmico de la azotea existente .....</i>	<i>124</i>
6.3	CONCLUSIONES DEL CAPITULO .....	129
<b>CAPITULO 7: CONCLUSIONES FINALES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....</b>		<b>130</b>
7.1	CONCLUSIONES FINALES .....	130
7.1.1	<i>Del confort térmico.....</i>	<i>131</i>
7.1.2	<i>Del desempeño hidrológico .....</i>	<i>133</i>
7.1.3	<i>De la viabilidad estructural de la propuesta.....</i>	<i>134</i>

7.2	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS .....	135
-----	---------------------------------------	-----

## Anexos

<b>ANEXO A1: CONCEPTOS DE BIOCLIMATISMO E HIDROLOGÍA.....</b>	<b>138</b>	
A1.1	SOBRE BIOCLIMATISMO Y CONCEPTOS AFINES.....	138
A1.2	DE HIDROLOGÍA Y ESCURRIMIENTO PLUVIAL .....	140
<b>ANEXO A2: DATOS DE CLIMATOLOGÍA, TEMPERATURA Y CONDUCTIVIDAD .....</b>	<b>143</b>	
A2.1	NORMALES CLIMATOLÓGICAS .....	143
A2.2	HOJA DE CÁLCULO BIOCLIMARQ .....	145
A2.3	ESPECIFICACIONES Y CALIBRACIÓN DE SENSORES DE TEMPERATURA.....	146
A2.4	REGISTRO DE TEMPERATURAS .....	146
A2.5	VALORES DE CONDUCTIVIDAD $\Lambda$ .....	151
<b>ANEXO A3: DATOS DE HIDROLOGÍA Y REGISTROS CON EL SIMULADOR DE LLUVIAS .....</b>	<b>154</b>	
A3.1	COEFICIENTES DE ESCURRIMIENTO .....	154
A3.2	REGISTRO DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO EN EL SIMULADOR DE LLUVIAS .....	155
<b>ANEXO A4: DE LA REVISIÓN ESTRUCTURAL.....</b>	<b>159</b>	
A4.1	DETERMINACIÓN DEL VALOR INICIAL DE CARGA LIMITE EN LA AZOTEA .....	159
A4.2	REQUERIMIENTOS PARA LA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS SIMPLIFICADO.....	160

## Bibliografía

<b>TRABAJOS CITADOS .....</b>	<b>163</b>
-------------------------------	------------

# Capítulo 1

## *Introducción, objetivos y contenido del TOG*

---

### 1.1 Introducción

Sustentabilidad y desarrollo sustentables son conceptos que se trabajan ampliamente en la actualidad por parte de investigadores, sociedad civil y gobiernos, nombrándoles continuamente en los medios de comunicación con diferentes definiciones y alcances. **Tetreault (2008)** hace una diferenciación a su vez entre *escuelas de pensamiento* y *modelos de desarrollo sustentable*. Haciendo referencia a dicha clasificación, el marco conceptual de este trabajo considera el denominado *modelo dominante de desarrollo sustentable*, el cual es el modelo de aplicación generalizado en las denominadas naciones desarrolladas y en los países que aspiran a este nivel. Tetreault argumenta que este modelo se basa en las ideas plasmadas en el Informe Bruntland (1987) y la Agenda 21 (1992), ambos trabajos auspiciados por la Organización de las Naciones Unidas.

*“Un desarrollo sustentable es aquel que satisface las necesidades del presente sin disminuir la habilidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”.* (WCED citado en Tetreault, 2008)

En el modelo dominante, el desarrollo sustentable se da a partir de tres pilares, siendo estos el *“crecimiento económico, las tecnologías ecológicamente racionales y una mejor gestión de los recursos disponibles”* (Tetreault, 2008). Al día de hoy, la hoja de ruta de este modelo comprende los objetivos propuestos en la *Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible* <sup>(1)</sup>, la cual se define en primer término como *“un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad”* (ONU, 2015).

---

<sup>1</sup> La agenda establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible y 169 metas conexas de carácter integrado e indivisible (ONU, 2015).

Centrándonos en el universo de la construcción y muy en particular, la construcción de vivienda, la sustentabilidad comprende tanto el origen de los materiales y su huella ecológica (e.g. *Alvarez-Partida, et al., 2016*), como el desempeño energético e hídrico de las edificaciones ya terminadas (e.g. *Orozco-Carrillo, 2016*) o su disposición final concluida su vida útil (e.g. *Ayala-Rodríguez, 2015*). A su vez, existen muchas posibilidades de índole sustentable en las fases iniciales de un proyecto de vivienda nueva, ya sea que hablemos de tecnología de punta (e.g. paneles y calentadores solares, materiales especializados, diseño de vivienda pasiva) o bien, enfoques prácticos que tienen su origen en la observación y la necesidad (e.g. uso de materiales de origen natural, reciclado de productos desechados). Sin embargo, cuando hablamos del funcionamiento de la vivienda existente y acotamos la misma a ciertos sectores económicos, el abanico de propuestas sustentables puede reducirse. En este caso, nos encontraremos con que inicialmente el diseño y construcción de la vivienda se reduce a solventar un problema de espacios e infraestructura en un área mínima determinada, donde *“el problema es el uso de los mismos patrones constructivos de las viviendas, con condiciones térmicas y energéticas desfavorables y, en consecuencia, ambientales”* (*Morillón-Gálvez, 2012*).

México es un país cuya vivienda no es ajena al planteamiento expuesto, particularmente la denominada *vivienda de interés social*. En ese sentido, el desarrollo de este *Trabajo de Obtención de Grado (TOG)* comprende investigación bibliográfica, observaciones, análisis teórico, experimentos de campo y experimentos en laboratorio. Lo anterior tiene como objetivo general el aportar en la solución de problemáticas de carácter bioclimático e hidrológico en la vivienda existente del *Área Metropolitana de Guadalajara (AMG)*, situación que se identifica como resultado de la carencia de un diseño sustentable inicial. La solución propuesta comprende el empleo de material de *tezontle* sobrepuesto en la azotea de la vivienda, sobre lo cual se trabaja una investigación del desempeño térmico,



hidrológico y estructural, argumentado su operación como una *solución pasiva* <sup>(2)</sup>. Se propone dicho material, debido a su abundancia en el área de estudio, costo reducido y un bajo peso volumétrico, características que lo convierten en un material ligero e interesante para su uso en azoteas de forma sustentable. El uso de este material se ajusta a los pilares del desarrollo sustentable expuesto en párrafos iniciales.

Partiendo del empleo del tezontle, los objetivos particulares del TOG comprenden en forma desglosada el registrar los cambios de temperatura y su impacto en el confort térmico en una vivienda del AMG. Adicionalmente, se experimentará mediante un modelo en laboratorio, con las posibles mejoras que se obtienen en el desalojo de la escorrentía pluvial. A continuación, y previendo las afectaciones generadas por una carga no considerada en un diseño original, se realizará una evaluación de las implicaciones estructurales que se tiene en la vivienda. Finalmente, se describen los principales hallazgos, recomendaciones y líneas de investigación futura derivadas del uso del tezontle en la azotea de la vivienda.

## 1.2 Planteamiento del problema

### 1.2.1 Origen y antecedentes

El crecimiento de las ciudades y principales centros urbanos es un fenómeno que se puede rápidamente verificar con diferentes censos y encuestas en este siglo y el anterior. En el caso del AMG, tal situación podemos constatarla en la [Tabla 1.1](#), donde no solo verificamos el aumento de la población, también observamos que el mismo no es uniforme entre los diferentes municipios que componen la metrópoli.

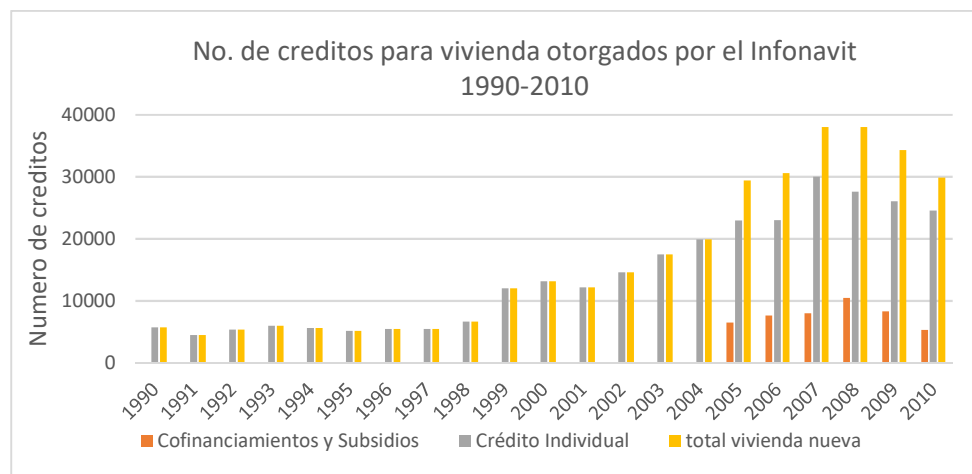
---

<sup>2</sup> Para efectos del TOG, se le denominara “solución pasiva” a aquel material o sistema que por sí solo o en conjunto con otros elementos permita captar y regular, sin necesidad de una fuente convencional de energía (e.g. electricidad, gas, etc.), los aporte térmicos e hídricos recibidos en forma externa.

**Tabla 1. 1 Incremento poblacional 1980-2010 en municipios del AMG. Fuente: elaboración propia con datos del Instituto de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2019)**

Población en el AMG 1980-2010					
ENTIDAD/AÑO	1980	1990	2000	2010	% incr.pob.
Guadalajara	1,626,152.00	1,650,205.00	1,646,319.00	1,495,189.00	92%
Ixtlahuacán	12,310.00	16,674.00	21,605.00	41,060.00	334%
Juanacatlán	8,081.00	10,068.00	11,792.00	13,218.00	164%
El Salto	19,887.00	38,281.00	83,453.00	138,226.00	695%
Tlajomulco	50,697.00	68,428.00	123,619.00	416,626.00	822%
Tlaquepaque	177,324.00	339,649.00	474,178.00	608,114.00	343%
Tonalá	52,158.00	168,555.00	337,149.00	478,689.00	918%
Zapopan	389,081.00	712,008.00	1,001,021.00	1,243,756.00	320%
Zapotlanejo	35,588.00	39,902.00	53,461.00	63,636.00	179%

Respecto a las cifras indicadas, si bien es correcto señalar que ha existido una oferta de vivienda acompañando al crecimiento poblacional (ver [Fig. 1.1](#)), hay que señalar que aquella que se construyó a fines del siglo pasado y principios de este debe caracterizarse de una forma muy particular, con diferentes problemáticas asociadas. Este tipo de edificación generalmente conforme *desarrollos habitacionales* que se describen como “*ámbitos planificados que, por su tamaño y número de pobladores, se asemejan a ciudades medias, más no tienen el equipamiento y servicios de una ciudad y presentan características distintas a las estructuras de sitios urbanos tradicionales*” (Nuñez-Miranda, 2007).



**Figura 1.1 Número de créditos otorgados por el Instituto Nacional de Fomento a la Vivienda de los Trabajadores (INFONAVIT), periodo 1990-2010. Fuente: elaboración propia con datos del Sistema Nacional de Información e Indicadores de Vivienda (SNIIV) (CONAVI, 2019)**

La distinción mencionada anteriormente podemos ubicarla en el modelo de negocio que se siguió para la construcción de estos desarrollos y sobre lo cual varios autores han escrito (e.g. Shimbo, 2011; Rodríguez-Chumillas, 2006; Merchand-Rojas, 2017; Orozco-Ochoa, 2015). En dicho modelo, se prioriza el costo de producción sobre un precio de venta, pasando desafortunadamente a segundo plano cualquier otra consideración.

*“Evidentemente, para llegar a reducir tanto los costos han tendido que rebajar hasta el límite la calidad de vivienda en todos los aspectos: materiales, localización, superficie mínima, etc. y a su vez, en el conjunto habitacional: equipamientos, servicios e infraestructuras”.* (Pina-Fernández, 2013)

Sobre lo expuesto anteriormente podemos inferir que, tanto en la vivienda como en el conjunto de estas, el diseño sustentable es mínimo o inexistente, al tener este último un costo adicional asociado que no es fácilmente asumido por el empresario constructor. Pina-Fernández (2013) puntualiza, los conjuntos masivos solo repiten un modelo estandarizado de vivienda y materiales de dudosa calidad, en zonas inicialmente de uso agrícola y expuestas a riesgos naturales (e.g. inundaciones).

*“... por consiguiente, este modelo que incorpora rasgos ensayados en las urbanizaciones privadas de lujo tipo country a conjuntos populares, genera muchos conflictos y dificultades. Sus déficits en todos los campos acaban provocando problemas de movilidad, accesibilidad, segregación social, deterioro de los espacios públicos, transformación de usos de suelos, actividades derivadas, etc.”.* (Pina-Fernández, 2013)

De lo anterior, debemos subrayar: *los problemas que se observan no se limitan al perímetro de la vivienda o los fraccionamientos que conforman; estas problemáticas generalmente terminan por afectar otros servicios de uso común para varios sectores o la ciudad en su conjunto.* Entre la infraestructura de uso común (e.g. agua, drenaje y luz), se aumenta el riesgo para que varios sistemas se vean sobrepasados y colapsen al no poder solventar lo

que no se resolvió en primera oportunidad en el proyecto de vivienda. Las *inundaciones* consecutivas y el fenómeno *isla de calor* son excelentes ejemplos al respecto.

### 1.2.2 Problemática observada 1: confort térmico

Se identifican dos problemáticas del amplio abanico anteriormente expuesto. Por una parte, a escala de vivienda, el confort térmico no es una situación que se resuelva en forma adecuada, particularmente al no tomar en cuenta las condiciones medioambientales y repetir determinados modelos de construcción. Siendo más específicos, en México se da una convergencia de situaciones relacionadas con su ubicación en el globo terrestre (*i.e.* entre los 32°43'06" de latitud Norte y 114° 45' longitud Oeste y los 14°32'27" de latitud Norte y 92°13'0" longitud Oeste) y el hecho de que la mayoría de los techos de la vivienda son planos y emplean concreto (*i.e.* techos identificados en la Encuesta Nacional de los Hogares 2017 del INEGI).

*“El ángulo entre la radiación solar directa y la superficie exterior de los techos es casi normal y eso, sumado a la baja resistencia térmica de los materiales de construcción, implica que el techo sea la parte de la envolvente donde se generan los mayores flujos de calor hacia el interior de la vivienda”.* (Martín-Domínguez, 2016)

Revisemos las [Fig. 1.2](#) donde se ejemplifican los procesos de transmisión de calor en una cubierta.

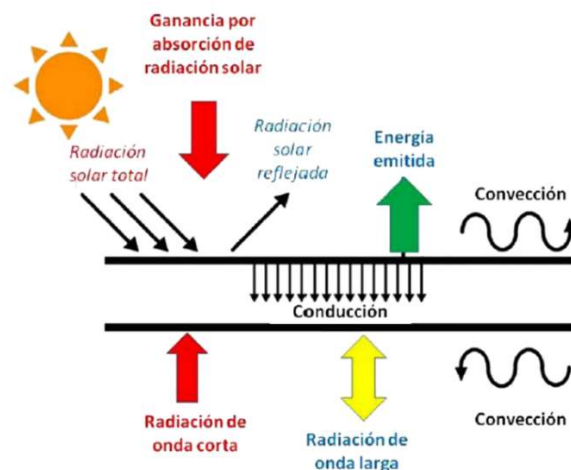


Figura 1.2 Mecanismos de transferencia de calor a través del techo de una edificación. Fuente: (Martín-Domínguez, 2016)

Martín-Domínguez (2016) ejemplifica como en un clima extremo siempre existe un gradiente de temperatura entre el ambiente interno y el externo de una edificación, lo que genera a su vez flujos de calor donde el interior indistintamente terminará por igualar su temperatura, la cual estará fuera de un rango de confort. Independientemente a cualquier sistema de climatización que dispongamos para atacar la problemática anterior, la misma edificación y los materiales que la conforman deberían ser una primera barrera frente al calor extremo (ver Fig. 1.3).

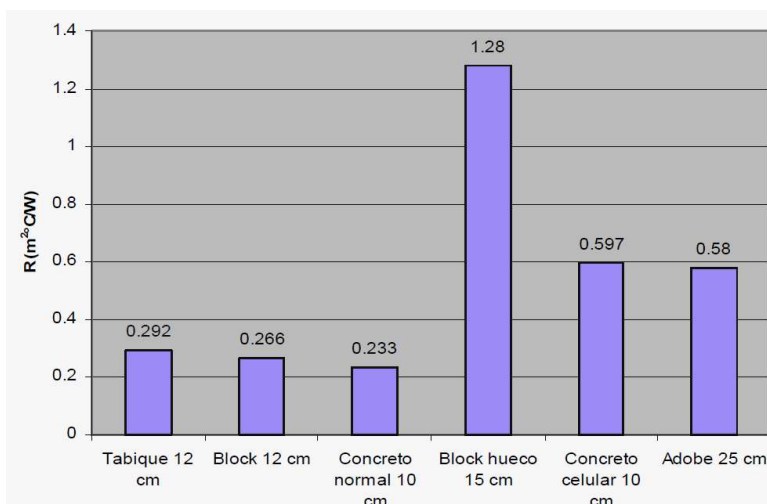


Figura 1.3 Resistencia térmica (R) de materiales típicos de la construcción. Fuente: (Morillón-Gálvez, 2007)

La *resistencia* (R), *transmitancia de calor* (U) y *conductividad* ( $\lambda$ ) son propiedades térmicas únicas de cada material en la construcción. Como nos lo hace ver Morillón-Gálvez (2007) en su investigación, el concreto y los block de cemento, los materiales más comunes en la edificación de vivienda, presentan valores tan altos de estos parámetros que los ponen en desventaja al momento de transmitir y aislar el calor (ver Tabla 1.2).

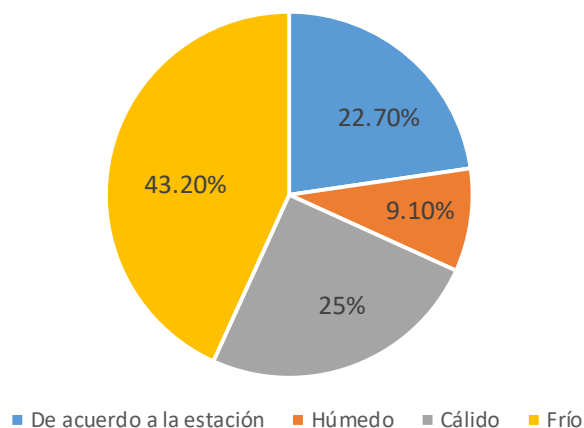
Tabla 1. 2 Características físicas y térmicas de los materiales en la construcción . Fuente: (Morillón-Gálvez, 2007)

Material	Espesor (m)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad (W/m°C)
Concreto Normal <sup>1</sup>	0.10	2400	1.5
Block hueco <sup>2</sup>	0.15	1700	1.2
Tabique rojo recocido <sup>3</sup>	0.12	2000	0.95
Adobe <sup>3</sup>	0.25	1500	0.58
Concreto de baja conductividad <sup>1</sup>	0.10	1650	0.58

Fuentes: 1) Cemex, 2) Norma NOM-008-ENER-2001, 3) Ecodiseño Fernando Tudela 1982 AUM-X

La vivienda del AMG y sobre todo la vivienda de interés social, emplea intensamente en la construcción de las azoteas el concreto. Este material por sus características físicas tiende a absorber la radiación solar durante el día y eliminarle lentamente durante la noche, originando situaciones de incomodidad al no poder estabilizarse la temperatura interior a un nivel que permita a los inquilinos desarrollar sus actividades o descansar. Esta problemática se acentúa cuando el diseño de la vivienda tampoco incluye la suficiente ventilación, sistemas pasivos (e.g. protecciones solares) o sistemas activos (e.g. aire acondicionado) que la regulen. [Hernández & Velásquez \(2010\)](#) y [Prado-León & Zambrano-Prado \(2015\)](#) son coincidentes con estas afirmaciones al evaluar en sus trabajos las percepciones sobre la habitabilidad y calidad de vida en vivienda del AMG (ver [Fig. 1.4](#)).

Percepción del ambiente interior



**Figura 1.4 Percepción del ambiente interior predominante** <sup>(3)</sup>. Fuente: [\(Prado-León & Zambrano-Prado, 2015\)](#)

Otra forma de ejemplificar lo anterior es mediante el fenómeno de *isla de calor*, el cual se ha vuelto recurrente en los entornos urbanos y con alta densificación. Este tipo de problemáticas se enmarca en aquellas situaciones que rebasan los límites de la vivienda. Hablando en específico del AMG, las áreas techadas en la zona metropolitana cada vez tienen mayores repercusiones sobre el fenómeno citado, tal y como lo reporta [Carrillo](#)

---

<sup>3</sup> Las autoras aclaran que el AMG no experimenta temperaturas bajas en extremo, pero contrariamente, en los últimos años se ha observado un aumento en las temperaturas de verano, llamando la atención que en el estudio halla más reportes de clima frío que cálido ([Prado-León & Zambrano-Prado, 2015](#)).

(2005) con temperaturas alrededor de los 40°C y diferencias entre los 6 y 8 °C respecto a las áreas rurales cercanas.

### *1.2.3 Problemática observada 2: desalojo de la escorrentía pluvial*

La segunda problemática que se particulariza en la vivienda masiva de interés social tiene que ver con afectaciones a la infraestructura de la ciudad. Los sistemas empleados para el desalojo de la escorrentía pluvial en la vivienda generalmente son canalizados únicamente a una red principal y de uso común para todos, lo que da pie a que la misma se sature en tiempos de lluvias. Esta situación de riesgo es observada por **Valdivia-Órnelas & Suárez-Plascencia (s.f.)**, quienes puntualizan que se trata de una incapacidad de la ciudad para desalojar la totalidad de las aguas producto de una tormenta torrencial. Valdivia y Suárez apuntan que el diseño y antigüedad de la red sanitaria, el estado de las bocas de tormenta, el desconocimiento del relieve del AMG y el aumento de las áreas impermeables (con el consecuente incremento de la escorrentía y abatimiento de la infiltración), como el origen de dicha problemática.

A su vez, las inundaciones ya no son solo exclusivas de un sistema viejo o de infraestructuras básicas, como pudiera ser el caso de los fraccionamientos de interés social (ver *Fig. 1.5*), ya que en los últimos años incluso se presentan en desarrollos que se esperaría fueran diseñados con mejores prestaciones (ver *Fig. 1.6*), siendo que *“otra de las causas que generan altos índices de inundaciones, son la urbanización en zonas topográficamente bajas (antiguos lagos), como las localizadas al sureste de la ciudad ...”* (**Valdivia-Órnelas & Suárez-Plascencia, s.f.**).



**Figura 1.5 Inundaciones en fraccionamientos de Interés Social acaecidas en octubre del 2016. Fuente: (Martínez, 2016)**

Comenta Alberto Uribe, alcalde Tlajomulco en el año 2016:

*“... se necesitan medidas de ingeniería urgentes para evitar inundaciones tan graves como la que ocurrió este fin de semana, que mantiene al municipio en estado de emergencia ... hasta el momento se tiene afectado a más de 200 casas de más de 20 fraccionamientos ...”.* (Uribe citado en Martínez, 2016)



**Figura 1.6 Inundaciones en fraccionamientos tipo Residencial Plus acaecidas en agosto del 2019. Fuente: (Vásquez, 2019)**

Leemos a su vez en un reportaje del año 2019:

*“La tormenta de este domingo provocó ríos de agua que bajaron hacia Bosques de Santa Anita, Club de Golf Santa Anita y la avenida López Mateos, que presentaron fuertes inundaciones”.* (Vásquez, 2019)



La problemática de las inundaciones lleva décadas en el AMG. En entrevista efectuada al Ing. José Manuel Vargas Sánchez en el año 2000, jefe de Agua y Alcantarillado de Guadalajara y profesor del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI) de la UdeG, comenta:

*“La capacidad instalada en los colectores es como para recibir 450 metros cúbicos por segundo, pero en una lluvia típica, normal, de 51 milímetros/hora, llegan a caer 935 o hasta 1050 metros cúbicos por segundo, lo que rebasa casi al doble la capacidad que tiene nuestra ciudad”.* (Vargas citado en Carrillo-Armenta, 2000)

Ante esta problemática, existe actualmente el *Programa de Manejo Integral de Aguas Pluviales (PROMIAP)* para el AMG, desarrollado entre los años 2006 y 2007. Este programa es gestionado por el *Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA)* y su objetivo es *“la formulación de políticas y estrategias orientadas a disminuir los impactos negativos de la lluvia y llevar a cabo un manejo adecuado de las mismas”* (SIAPA, 2008). La *Figura 1.7* resume este objetivo con las acciones y obras a ejecutar.

El PROMIAP actualmente se encuentra en fase de ejecución, prosiguiendo una etapa denominada *Plan Integral para Manejo de Inundaciones (PIMI)*. Aunque se tiene un avance importante en dicha etapa, han surgido voces críticas al respecto. El Doctor Arturo Gleason Espíndola en entrevista del año 2016 expone:

*“El ciclo del agua en Guadalajara se encuentra gravemente deteriorado por la mala intervención de los seres humanos, a través de la urbanización desordenada; no es con obras de ingeniería como se logrará afrontar el problema de las inundaciones, que es efecto y no causa de ese deterioro”.* (Gleason, citado en Del Castillo, 2016)

En carta abierta dirigida al entonces Presidente Municipal de Guadalajara y hoy Gobernador del Estado, Enrique Alfaro, el Doctor Gleason expone como la disminución de la infiltración, evotranspiración y recarga de los mantos acuíferos se corresponden con la citada interferencia en el ciclo del agua. Esta interferencia prosigue Gleason, a su vez es la que

propicia las inundaciones, que no haya una correcta regulación de la temperatura y que aumente más la deforestación de las cuencas.

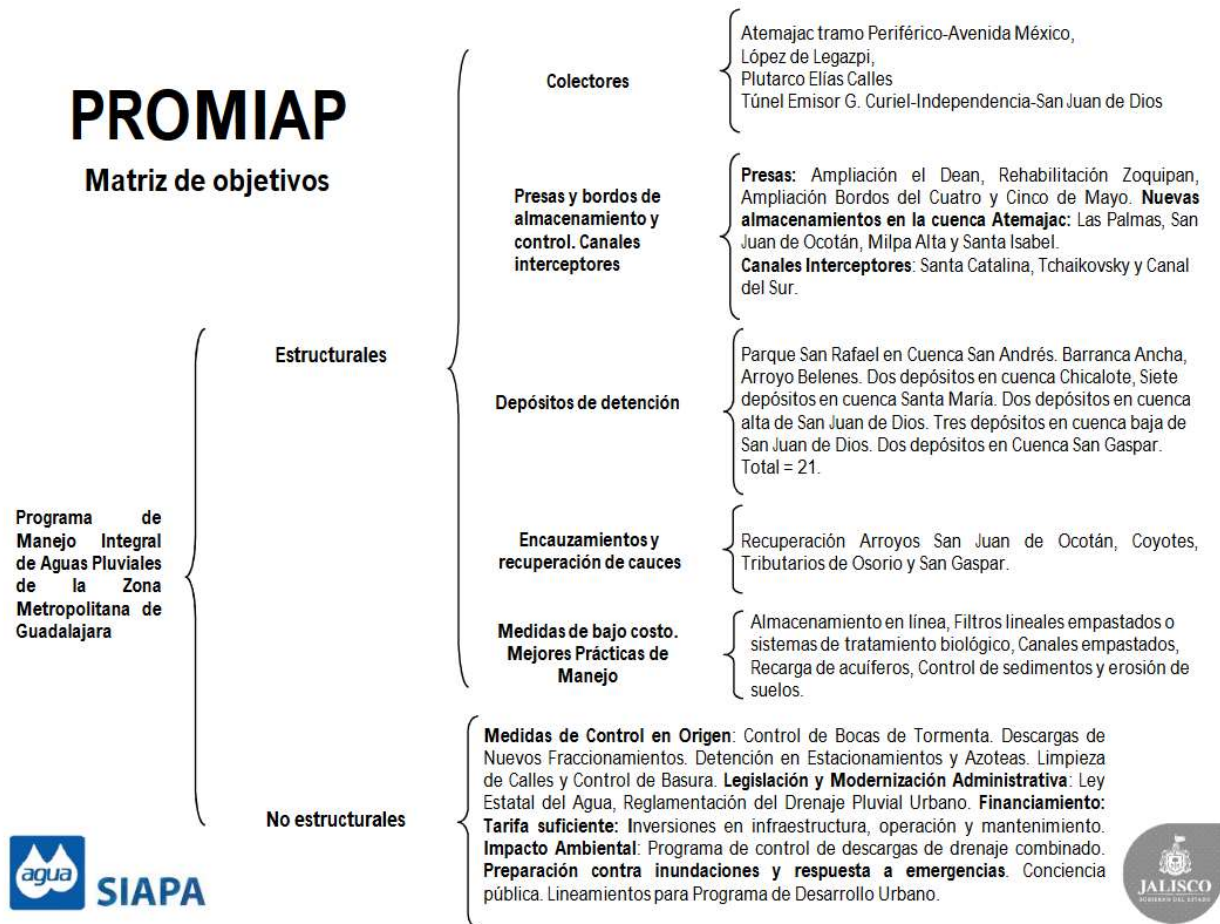


Figura 1.7 Matriz de objetivos del PROMIAP. Fuente: (SIAPA, 2016)

## 1.3 Hipótesis y Objetivos

### 1.3.1 Planteamiento

Este TOG se centra en dos problemáticas de la vivienda masiva construida en el AMG en las últimas décadas:

- La falta de confort térmico en la vivienda del AMG originada por la combinación del clima, los materiales y técnicas constructivas.
- Las inundaciones anuales en muchos puntos del AMG propiciadas por el cambio de uso de suelos, infraestructura mínima y el incremento de áreas impermeables.

A este respecto, se considera que el material de tezontle extendido sobre una azotea pudiera ayudar a resolver y/o aminorar dichas problemáticas. Si revisamos los listados de bancos de materiales oficiales (e.g. SCT, 2017), el material de tezontle es abundante en la periferia del AMG y en general, en todo el Estado de Jalisco. Por su naturaleza, el mismo es ligero y se le atribuyen ciertas propiedades en cuanto a la absorción de calor y agua, de lo que se presupone que una capa de este material en las azoteas puede ofrecer mejoras en el desempeño térmico y pluvial de las mismas, sin afectar su estabilidad estructural. Cedeño-Valdiviezo (2010) lo clasifica como una *materia bioclimática*<sup>(4)</sup> por sus propiedades térmicas (0.16 W/m<sup>2</sup>°C), mientras que históricamente su uso está documentado en tiempos *Prehispánicos* y en *La Colonia*: “... durante los siglos XVI al XIX fue determinante sobre todo para resolver varios problemas constructivos de la ciudad, como cimientos, muros, bóvedas, techumbres, terraplenes, etc.” (Rodríguez-Morales, 2011).

Entre la investigación científica inicial que se documentó para este TOG sobre el material, se encontró que la misma se centra en su utilización como material de rellenos o terraplén, particularmente como filtro o capa estabilizadora para el desplante de las estructuras y edificaciones (e.g. González-Martín, 2016); como agregado en los concretos (e.g. Gómez Domínguez, S.F.; Tena, et al., 2017); como elemento filtrante o depurador (e.g. Valdivia-Soto, et al., s.f.; Otazo-Sánchez, et al., s.f.); o bien, como capa de sustratos (e.g. Rodríguez-Díaz, et al., 2013; Trejo-Tellez, et al., 2013; Angeles-Hernández, et al., 2003).

De lo anterior, una investigación sobre el empleo del tezontle en la forma que se propone resulta inicialmente justificado, ya que es de gran interés documentar su desempeño térmico, hidrológico y estructural en azoteas de vivienda existente como sistema pasivo. Extender este material en una capa uniforme, solventado el detalle de elevarlo hasta el nivel de azotea, es sencillo, ya que no se requiere de mucha inversión económica, personal

---

<sup>4</sup> Cedeño Valdiviezo marca 3 requisitos para un diseño bioclimático: 1) sustitución de fuentes no renovables por renovables; 2) elección de materiales de menor contenido energético; 3) elaboración de formas, tipologías y elementos constructivos que requieran menos energía para su construcción y almacenamiento (Cedeño-Valdiviezo, 2010)

técnico especializado o mayores adecuaciones a la estructura existente, lo que lo hacen ideal para la vivienda de interés social.

### *1.3.2 Hipótesis*

Dada las características físicas del material de tezontle, se considera que una capa sobrepuesta de este material sobre las azoteas de la vivienda existente en el AMG puede mejorar su operación en los rubros de:

- Confort térmico de la vivienda, al trabajar como una capa aislante inicial que absorbe el calor que se genera por radiación solar durante el día y liberarlo con mayor prontitud durante la noche.
- Disminución de riesgos por inundaciones, al aminorar la escorrentía pluvial y/o retrasarla, esto como consecuencia del paso del agua a través del tezontle y dando mayor tiempo al desalojo del agua en el drenaje existente.

Los beneficios mencionados se asocian en lo particular con vivienda cuyas azoteas empleen sistemas donde prevalece el empleo de concreto y donde la densidad de las mismas implique pérdida de áreas permeables.

### *1.3.3 Objetivo general*

Analizar el desempeño térmico, hidrológico y estructural de azoteas de vivienda existente en el AMG con el uso del material de tezontle como solución pasiva.

### *1.3.4 Objetivos particulares*

En los siguientes apartados de este TOG se propone desarrollar una serie de objetivos particulares necesarios para argumentar la hipótesis y desarrollar su objetivo general, los cuales enlistamos a continuación:

1. Establecer el área y sector de la población al que va dirigido el presente trabajo.
2. Establecer las problemáticas de índole sustentable que se busca resolver.
3. Establecer los antecedentes científicos y estado del arte relacionados con:

- a. *Bioclimatismo* y *soluciones pasivas* aplicadas en la denominada *quinta fachada*.
  - b. Otras investigaciones con objetivos afines al planteado en este trabajo.
4. Delimitar las variables y constantes que engloban los objetivos del estudio:
  - a. Ubicación geográfica y climatología del AMG.
  - b. Características del material de tezontle en el AMG.
5. Diseñar los experimentos y cálculos que permitan obtener datos cualitativos y cuantitativos relacionados con:
  - a. El impacto térmico en la vivienda.
  - b. La escorrentía pluvial en la azotea de la vivienda.
  - c. El impacto estructural en la vivienda.

#### 1.4 Contenido del TOG

Esta investigación es de carácter teórico y experimental. Comprende una evaluación de una propuesta empírica sobre el material de tezontle y las repercusiones de su implementación para dar solución a problemáticas de carácter sustentable observadas en vivienda de interés social. A continuación, se mencionan los diferentes apartados por los que se encuentra conformado este TOG:

- ❖ **Capítulo 1**, se establece la introducción de esta investigación, se determina la corriente de pensamiento sustentable en que se enmarca, el ámbito de la construcción, región geográfica y sector de población al que va dirigido. Se expone la problemática de índole sustentable detectada, sus antecedentes y situación actual, así como la hipótesis con la que se propone darle solución. Se presenta el objetivo general de la investigación y se desglosan los objetivos particulares que ayudarán a completar el objetivo principal.
- ❖ **Capítulo 2**, se presenta en primera instancia la teoría y antecedentes científicos en los que se fundamenta la investigación, en específico aquellos relacionados con el diseño bioclimático, el confort térmico y la escorrentía pluvial. A continuación, se hace un repaso del estado del arte o investigación actual que corresponda con el tema.

- ❖ **Capítulo 3**, se presenta el AMG como la zona geográfica donde se aplica el presente proyecto y se identifican las características climatológicas de la región. Se hace una descripción de la vivienda de interés social y su contexto dentro del AMG. Se exponen las características físicas del material de tezontle que se investiga y algunas de sus propiedades determinadas en laboratorio. Finalmente, se hace un compendio de las normativas más relevantes y que se correspondan con los objetivos del estudio.
- ❖ **Capítulo 4**, comprende un análisis bioclimático del AMG en base a información del Servicio Meteorológico Nacional y la hoja de cálculo *Bioclimart 2016*, determinando la zona de confort. Complementariamente se registran variaciones de temperatura y humedad en una cubierta existente de azotea con la capa tezontle instalada. Se presenta un ejemplo de evaluación de la NOM-020-ENER-2011 considerado la azotea intervenida.
- ❖ **Capítulo 5**, se ejecuta un análisis teórico sobre el desempeño del escurrimiento en la azotea considerando el método racional y la velocidad de infiltración del material. Se contrasta los resultados obtenidos al experimentar con un modelo de laboratorio (*i.e.* simulador de lluvias), registrando el tiempo y el periodo en que se estabiliza un caudal determinado, considerando diferentes combinaciones de pendiente y espesor de la capa de material.
- ❖ **Capítulo 6**, se avalúa estructuralmente la vivienda donde se propone la instalación de la capa de tezontle. Partiendo de una breve descripción del análisis estructural, se plantea un modelo matemático corroborado con la reglamentación de construcción y se desglosa el análisis de la estructura de la vivienda ante cargas gravitacionales y sísmicas.
- ❖ **Capítulo 7**, se resumen los diversos resultados obtenidos y se analiza el comportamiento de la vivienda y su respuesta con la cubierta de tezontle. Se presentan las conclusiones y se hacen recomendaciones para trabajos de investigación futura.

# Capítulo 2

## *Estado del Arte: confort térmico, diseño bioclimático y escurrimiento pluvial*

---

### 2.1 Introducción

El desarrollo de este TOG busca investigar y experimentar con una propuesta de solución pasiva aplicada en la azotea de vivienda (*i.e.* el empleo de material de tezontle sobre la cubierta). Esta solución involucra dos posibles beneficios, siendo uno relacionado con el confort térmico y el otro con el desalojo de la escorrentía pluvial.

*Solución pasiva* es una clasificación, no siempre del todo clara, que se utiliza dentro de la arquitectura bioclimática para distinguir ciertos elementos y sistemas propios o complementarios a la edificación. La *azotea* por otra parte, es el elemento de cubierta con el que generalmente se termina o corona toda construcción y que afortunadamente desde hace unas décadas, ha comenzado a tomar una función más amplia que el solo protegernos del intemperismo. El *confort térmico* o *higrotérmico*, así como la *escorrentía pluvial*, son conceptos muy específicos y bien estudiados por diferentes áreas de la ciencia moderna.

Este capítulo tiene el objetivo de presentar el marco teórico, estado de arte y trabajos de investigación que involucran los conceptos anteriormente mencionados. Para ello, los primeros subcapítulos tratan sobre la historia, teoría y conceptos básicos tal y como son definidos por la bibliografía referenciada. Se exponen primero lo que corresponde a la quinta fachada, el clima, el confort térmico y el diseño bioclimático. A continuación, se exponen conceptos generales sobre hidrología y en particular, la precipitación y la escorrentía pluvial. Finalmente, se hace un repaso del estado del arte e investigación actual que ha tenido a bien estudiar sistemas pasivos en conjunto con la azotea de construcciones.

## 2.2 De la quinta fachada, el confort térmico y el diseño bioclimático

### 2.2.1 La quinta fachada

Es a *Le Corbusier* que se le atribuye el término *quinta fachada* cuando se hace referencia a la azotea de una edificación. Si bien es cierto que históricamente existen referencias al uso de las azoteas con otros fines distintos a ser solo la cubierta de la construcción, en específico las denominadas *azoteas verdes* (e.g. *Magill, 2011*), es a partir del manifiesto *Los Cinco Puntos de la Arquitectura* <sup>(5)</sup> que la azotea retoma un papel clave en la construcción como un espacio aprovechable y no solo como un plano aislante del exterior.

La postura de *Le Corbusier* en su manifiesto originalmente iba dirigida a devolver a la azotea el área verde que la edificación ocupa. Este planteamiento sin embargo también abre nuevas posibilidades, donde la función original de la azotea puede ser potenciada y ampliada (e.g. al trabajar como elemento que facilite el confort térmico o permitir la evacuación del agua de lluvia de forma más natural). Trabajar este espacio y proponerle un uso que no solo lo situé como un área adicional para alojar instalaciones o contener elementos recreativos debe ser una prioridad en el diseño de toda edificación.

*“Ya sea usadas como un espacio de carácter paisajístico o como un área habitable, la utilización de la quinta fachada surge como un mecanismo eficaz para lograr una mayor aislación térmica, mejora de la protección contra el sol, la lluvia y los cambios de temperatura, absorción de CO2 y la posibilidad de la retención del agua de lluvia, entre otros usos”. (Weiss, 2018)*

### 2.2.2 Sobre el clima

No se puede concebir el diseño bioclimático sin antes hablar del clima. El clima es el *“proceso que resulta de la interacción (en términos de masa y/o energía) entre la superficie terrestre y la atmósfera, determinado por el desigual reparto de la energía solar que recibe*

---

<sup>5</sup> Charles-Edouard Jeanneret *“Le Corbusier”*, 1926. Estos son: *“la planta libre, la terraza-jardín, los pilotis, la ventana longitudinal y la fachada libre”*.



nuestro planeta” (Tudela, 1982). Históricamente, la humanidad ha buscado siempre protegerse del clima y el medio ambiente y fruto de su ingenio surgió la construcción de edificaciones, las cuales se han desarrollado en innumerables variedades y diseños, dependiendo de la mano que las construye, con menor o mayor integración al clima.

Lo ideal sería que toda edificación tuviera en cuenta el clima en su diseño, como lo asevera Fuentes-Freixanet (2002) cuando explica que este determina arquitectónicamente desde la forma, orientación y materiales constructivos, hasta los colores y las texturas. La edificación es un “elemento protector y regulador que rechaza o transforma la acción de los elementos ambientales naturales de un lugar” (Rodríguez-Viqueira, 2001). Por su naturaleza, el clima no es un estado fijo. Es un proceso dinámico y en constante transformación de un momento a otro, de un lugar a otro e incluso, con diferencias significativas dentro de las mismas áreas geográficas así sean de dimensiones reducidas.

Para Rodríguez-Viqueira (2001), los *factores climáticos* son aquellas *condiciones físicas* que determinan y distinguen un clima dentro de un área geográfica; estas se corresponden a una latitud, altitud y periodo de tiempo en lo general, mientras en lo particular se ajustan a determinadas condiciones del relieve existente o sus modificaciones, la distribución de masas de tierra y agua circundante o afectaciones por corrientes oceánicas. Por otra parte, las *propiedades físicas* de la atmosfera, denominadas *elementos del clima*, son las magnitudes promediadas que tomamos de dichos elementos, siendo las más comunes los grados de temperatura, el porcentaje de humedad, la altura de precipitación, la velocidad del viento, la presión atmosférica, la radiación solar, los niveles de nubosidad en el cielo y de visibilidad a nivel de tierra.

Para representar estas magnitudes de manera visual, generalmente se agrupan las mismas por rangos de valores similares y se representan en planos mediante líneas continuas o colores representativos (e.g. *isotermas* donde se muestra la distribución de la temperatura, *isobaras* que caracterizan la variación de la presión media e *isoyetas* con la distribución de la precipitación). En el caso de México, la *Figura 2.1* nos muestra la precipitación media

anual acumulada, destacando los estados en el sur con las mayores lluvias y como del centro hacia el norte geográfico estas disminuyen.

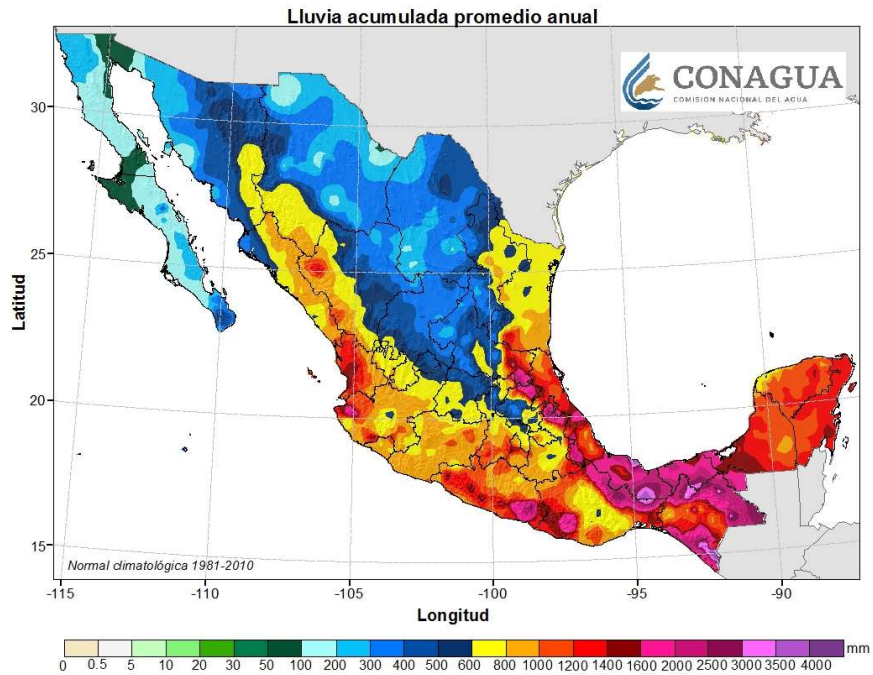
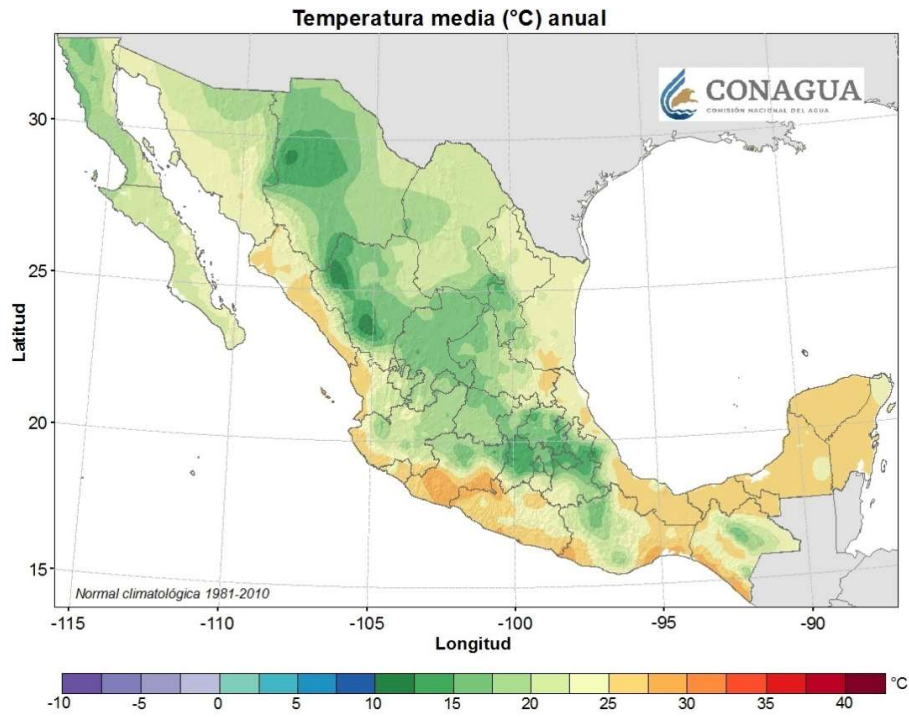
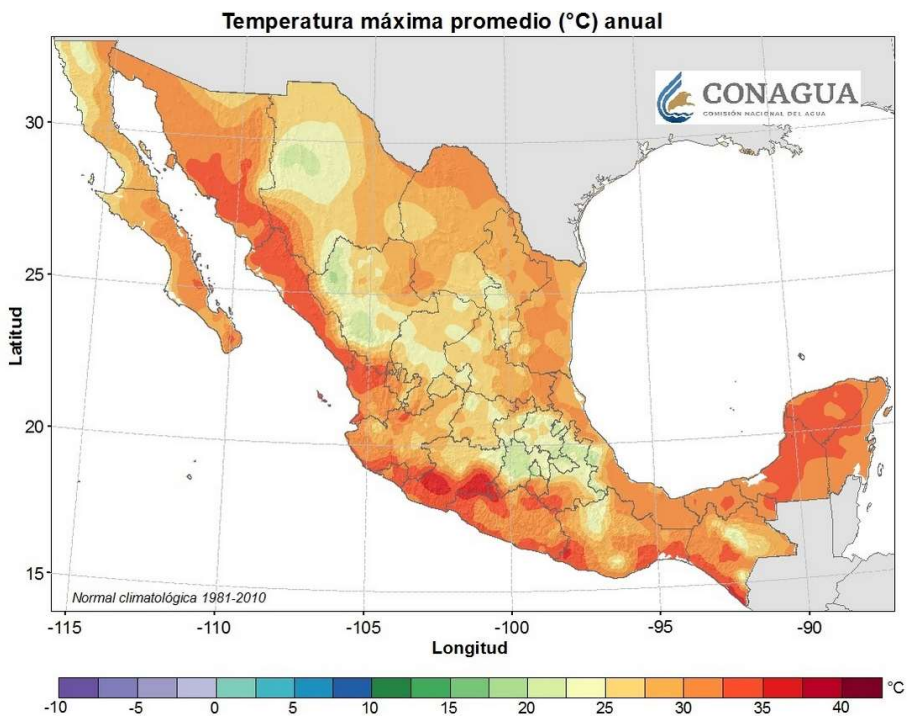


Figura 2.1 Precipitación media anual en mm. Fuente: (CONAGUA, 2019)

Tratándose de la temperatura, la *Figura 2.2* denota una distribución más o menos uniforme y que se corresponde con la precipitación, oscilando esta entre los 15 y 30°C. Sin embargo, la *Figura 2.3*, donde se representan los datos máximos anuales, indica que hay picos de 35 a 40°C para casi toda la república, siendo una excepción los estados del centro y algunas zonas aisladas.



**Figura 2.2** Temperaturas medias anuales, en °C. Fuente: (CONAGUA, 2019)



**Figura 2.3** Temperaturas máximas anuales, en °C. Fuente: (CONAGUA, 2019)

Prosiguiendo con lo expuesto por [Rodríguez-Viqueira \(2001\)](#), el análisis de las condiciones climáticas con fines de edificación se hace a dos niveles: el macro climático o regional y el micro climático o local. De estos dos enfoques, las variaciones climáticas dentro de una región o *microclima*, son las que pueden ser trabajadas y modificadas por la edificación (*e.g.* con la construcción misma, con la ubicación de masas de tierra, con cuerpos de agua o con la vegetación).

Para poder diseñar tomando en cuenta estos escenarios, arquitectos e ingenieros deben hacer uso de los datos de las disciplinas respectivas. Diferentes autores definen a la *climatología* como la ciencia que estudia el clima en general por periodos largos de tiempo, mientras que la *meteorología* se especializa en los cambios diarios de las condiciones atmosféricas (*e.g.* [Tudela, 1982](#); [Breña-Puyol & Jacobo-Villa, 2006](#)). La *hidrología* por otra parte es una rama de las ciencias más especializada en el agua que trataremos en secciones más adelante.

Finalmente, un *estado de confort* dentro de una edificación va más allá de la simple ausencia o permanencia de determinados estados climáticos en el exterior y se centra más en la percepción de los ocupantes al interior. [Tudela \(1982\)](#) identifica al respecto ciertos estados en el individuo, trabajables por el bioclimatismo, siendo estas las afectaciones a la respiración y las molestias asociadas a la presencia excesiva de frío o calor. Estos dos últimos estados son los que se asocian con el *confort térmico*, también conocido como *confort higrotérmico*, que detallaremos a continuación.

*“... la arquitectura bioclimática es aquella arquitectura que tiene en cuenta el clima y las condiciones del entorno para ayudar a conseguir el confort higrotérmico interior y exterior ...”.* ([Garzón, 2007](#))

### 2.2.3 De la transmisión de calor y el confort térmico

Tal y como nos lo hace ver [Simancas-Yovane \(2003\)](#), la palabra *confort* en un término que utilizamos generalmente para referirnos a un estado ideal de bienestar, desempeño y comodidad de un individuo o el grupo de estos, respecto a una situación en particular,

teniendo continuidad en la misma y sin interferencias físicas o mentales de por medio. Para [Rojas-Tavera \(2018\)](#) el *comfort ambiental* en una edificación (entendiéndolo como el estado y desempeño del individuo como usuario de la vivienda), involucra diferentes clasificaciones y variables de estudio (e.g. térmico, lumínico, acústico, psicológico, etc.), por lo que para efectos de este TOG dichas variables se corresponderán con lo que señala la normativa del *Código de Edificación de Vivienda (CEV)*. [CONAVI \(2017\)](#) especifica que la calidad ambiental y el confort se evalúa en términos de temperatura, acústica, aire e iluminación. Considerando solo el *comfort térmico*, se hace necesario para la comprensión de dicho concepto que primero entendamos como se transmite el calor, tanto para los materiales de la construcción como en el individuo dentro de esta.

*“Desde el punto de vista físico y energético, la adaptación de una edificación al microclima local se refiere primordialmente a dos parámetros: el proceso físico de la transferencia de calor y el estado de confort del ser humano”.* ([Marban, s.f.](#))

En el diseño bioclimático, nuestra principal fuente de calor es la radiación solar y el calor generado por el cuerpo humano (ver [Fig. 2.4](#)). El calor, como nos lo detallan [Marban \(s.f.\)](#) y [Tudela \(1982\)](#), se transmite por los principios físicos de la *conducción*, la *radiación*, y la *convección*, sumándoseles a estos de manera muy particular la *evaporación* <sup>(6)</sup>, los cuales en su conjunto representan los *mecanismos asociados a la transferencia de calor* <sup>(7)</sup>.

*“Todos los mecanismos de transmisión térmica se encuentran con distinta variable e importancia relativa, en la interacción del cuerpo humano con su entorno”.* ([Tudela, 1982](#))

---

<sup>6</sup> Los cambios de fase del agua, aunque no corresponda propiamente a los mecanismos de transferencia de calor, si involucran la absorción o desprendimiento de energía (Fuentes-Freixanet, 2011)

<sup>7</sup> Para una descripción completa de estos conceptos, consultar el [Anexo A1.1 - Sobre bioclimatismo y conceptos afines](#)

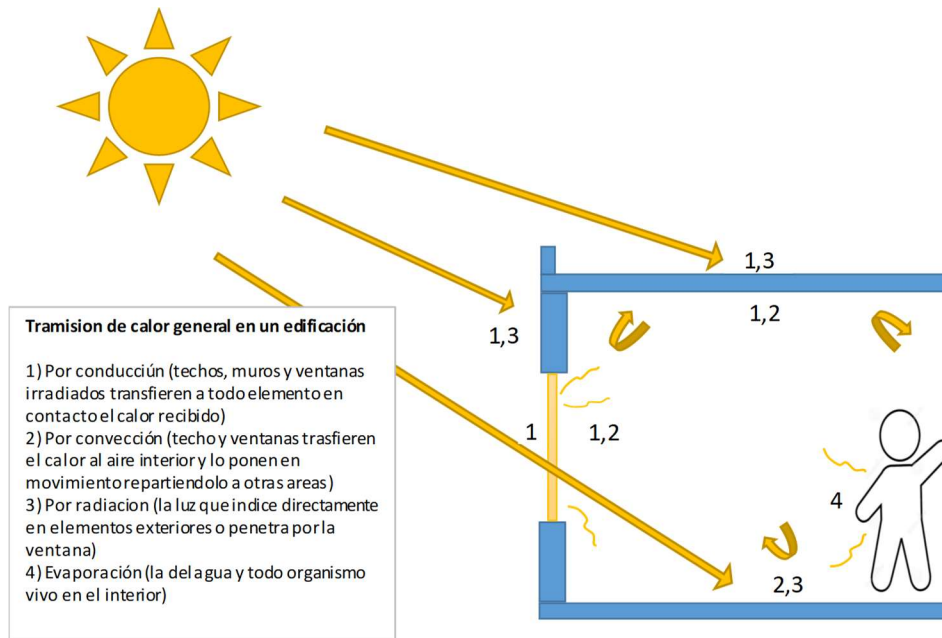


Figura 2.4 Esquema de la transmisión de calor en una edificación. Fuente: elaboración propia.

López de Asían-Alberich (2003) distingue la interacción entre el individuo y el entorno identificando *fuentes* y *sumideros* de la energía calorífica (ver Fig. 2.5). Las fuentes más identificables sería la radiación solar durante el día, el aire (por arriba de 24°C) y el metabolismo (en personas) u operación interna (en electrodomésticos). Por sumideros podríamos ejemplificar con el espacio exterior durante la noche, el aire (por debajo de 24°C) y las superficies húmedas (artificiales o naturales).

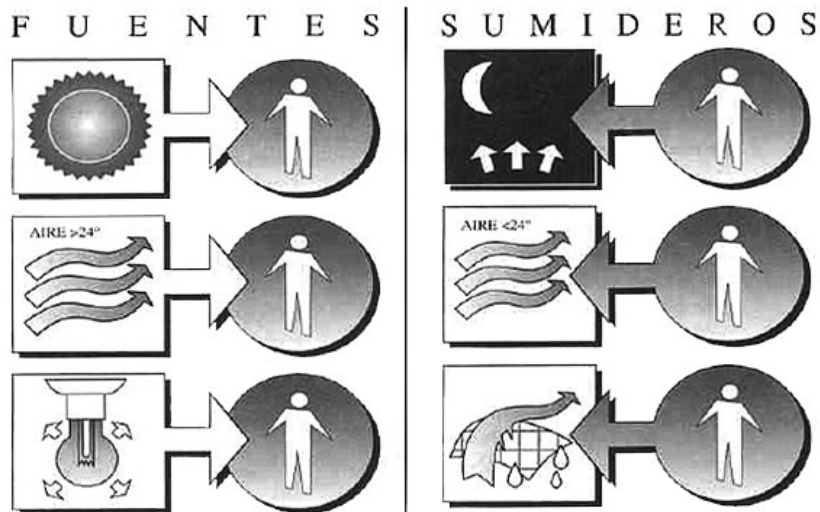


Figura 2.5 Fuentes y sumideros de energía calorífica. Fuente: (López de Asian-Alberich, 2003)

Si concluimos que el *confort térmico* es el estado donde el ser humano desarrolla sus actividades sin que la temperatura ambiental y corporal sea un impedimento para ello, fisiológicamente este estado puede variar de un individuo a otro. Esto agrega variables adicionales a considerar en un diseño bioclimático. En su tesis doctoral, [Simancas-Yovane \(2003\)](#) indica por lo menos seis *factores básicos* relacionados con las pérdidas de calor en el cuerpo humano, siendo estos la temperatura del aire, la temperatura radiante, la humedad relativa, la velocidad del aire, el metabolismo individual y el aislamiento de la ropa (ver [Fig. 2.6](#)). Los primeros cuatro son identificados por Simancas como *parámetros ambientales*, mientras los dos últimos se identificarían como *factores individuales*, siendo necesario evaluar variables complementarias como serían el sexo, edad, peso, salud, color de piel y la aclimatación.

*“El confort térmico busca esencialmente el equilibrio térmico entre el hombre y su medio para lo cual se requiere de una serie de mecanismos reguladores como la producción o la pérdida de cierta cantidad de calor, dependiendo de los procesos metabólicos, del desprendimiento de calor por evaporación o de los intercambios por radiación, convección o conducción que se dan entre el cuerpo humano y los elementos que conforman el entorno inmediato”.* ([Simancas-Yovane, 2003](#))



**Figura 2.6** Principales factores y parámetros que afectan el confort térmico. Fuente: ([Simancas-Yovane, 2003](#))

De los factores que intervienen principalmente en el intercambio de energía entre el cuerpo y el ambiente <sup>(8)</sup>, hay que destacar la *temperatura del aire* (seca y húmeda en el ambiente), *temperatura radiante* (elementos de la edificación), *humedad del aire* (absoluta y relativa) y *ventilación* (velocidad del aire). Es con base en estos parámetros, que se ha podido desarrollar una serie de gráficas y diagramas donde es posible determinar *zonas de confort*. Existen dos modelos mayoritariamente reconocidos, identificados como gráficas de Olgay y de Givoni.

- *Carta bioclimática de Olgay* (ver Fig. 2.7) – en esta gráfica aparece una zona de confort central predefinida, sobre la que se grafican valores de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y niveles de radiación solar adecuados (e.g. *Simancas-Yovane, 2003; Rojas-Tavera, 2018; López de Asian-Alberich, 2003*). Por su parte, *Lacomba (1991)* señala que actualmente esta gráfica es válida principalmente para exteriores.

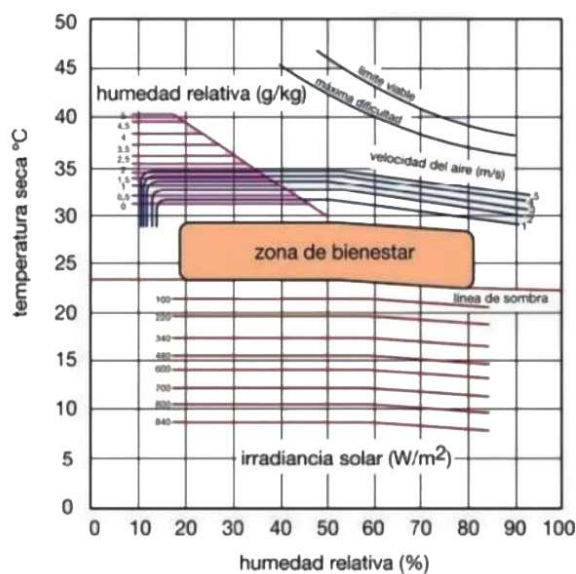
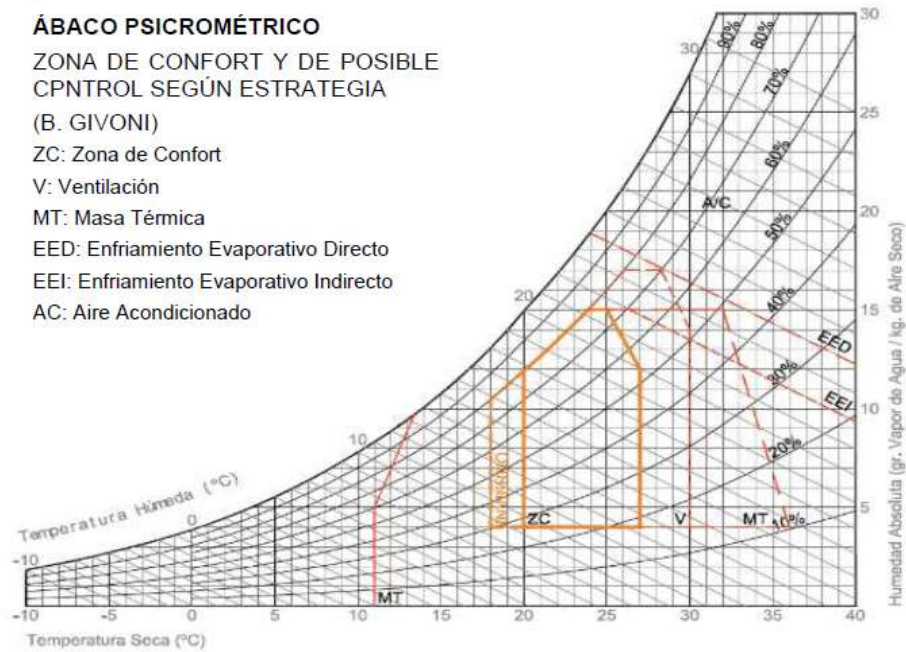


Figura 2.7 Diagrama bioclimático de Olgay. Fuente: (Olgay citado en Rojas-Tavera, 2018)

<sup>8</sup> Para una descripción completa de estos conceptos, consultar el [Anexo A1.1 - Sobre bioclimatismo y conceptos afines](#)



- **Diagrama psicrométrico Givoni** (ver [Fig. 2.8](#)) – partiendo de los parámetros ya indicados, es posible determinar zonas de confort variable y señalar con ciertas adecuaciones a la ventilación, la masa térmica o mediante un enfriamiento evaporativo, entre otras estrategias, zonas que podrán ser mejoradas (*e.g.* [Simancas-Yovane, 2003](#); [Rojas-Tavera, 2018](#); [López de Asian-Alberich, 2003](#)).



**Figura 2.8** Diagrama psicrométrico de Givoni. Fuente: (Givoni citado en [Rojas-Tavera, 2018](#))

Mientras los dos sistemas mencionados se enfocan en los parámetros ambientales del confort térmico, existe un método denominado *Fanger* (ver [Fig. 2.9](#)), que se identifica con los factores individuales y que agrega a los parámetros ya descritos variables relacionadas con la “*actividad, resistencia térmica de la ropa y el factor de cubierta de la misma*” ([Simancas-Yovane, 2003](#)). Este método “*define el confort térmico como una manifestación subjetiva de la satisfacción con el ambiente*”, en el que a su vez deben existir condiciones tales como “*un equilibrio térmico y que la tasa de sudoración y temperatura media de la piel estén dentro de los límites de confort*” ([Rojas-Tavera, 2018](#)).

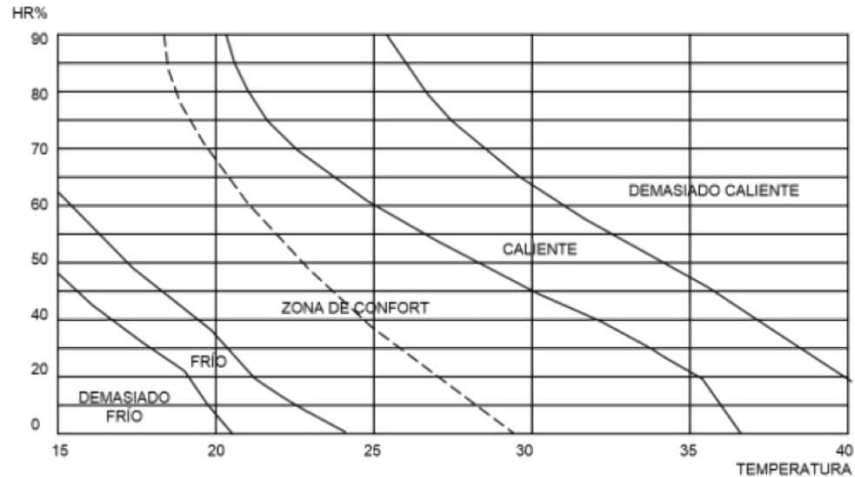


Figura 2.9 Curvas de confort de Fanger. Fuente: (Mondelo et al., citado en Rojas-Tavera, 2018)

Aparte de los sistemas anteriores, Fuentes-Freixanet (2002) identifica las *tablas de Mahoney*, donde se establecen diferentes grados de confort en función de la humedad, así como los *triángulos de Evans*, en los cuales toma especial interés la oscilación térmica. Como comentamos, los factores individuales conllevan variables adicionales a considerar y esto ha originado que en la actualidad existe un debate entre un enfoque cuantitativo y uno cualitativo para poder determinar cuál es la temperatura ideal de confort, independientemente al método utilizado (e.g. Gómez-Azpetia, et al., 2007).

Para efectos de este TOG, se hará referencia en los cálculos de los rangos de confort a los que se obtienen con la hoja de calculo “*Bioclimart 2016*” (Gómez-Azpetia, 2016). Por otra parte y con fines comparativos, se presentan los valores de confort expuestos por Darío-Ibargüengoitia (2011) y López de Asiain-Alberich (2003), mismos que la *Tabla 2.1* resume.

Tabla 2.1 Valores recomendados de confort. Fuente: (Darío-Ibargüengoitia, 2011; López de Asian-Alberich, 2003)

Parámetro	Valores	Observaciones
Temperatura	de los 20/21°C a los 25/26°C	dependiendo de la localización geográfica, el clima de la zona y estación del año
Humedad Absoluta	entre 5 y 12 gr de agua por kg de aire seco	
Humedad Relativa	entre el 30/40% y el 60/65%	
Presión del aire	Entre un 5% y un 10%	presión positiva (i.e. que se inyecte más aire del que se extrae)
Ventilación	1 m/s	a esta velocidad, se generan sensaciones de 2 a 3°C menores, pero a 2m/s se tornara molesto

#### 2.2.4 *Diseño bioclimático y sistemas pasivos*

Considerando los principios de bioclimática señalados por [Garzón \(2007\)](#), podemos asegurar que la *arquitectura e ingeniería bioclimática* es una especialización dentro de las disciplinas de la construcción que, ya sea a través del diseño de espacios y sus envolventes o bien mediante la implementación de sistemas y equipos especializados, su objetivo es hacer un uso más eficiente del ambiente mediante la integración de la edificación con el entorno, al mismo tiempo que genera condiciones de bienestar y comodidad para los usuarios y un consumo energético moderado y de menor impacto.

*“Una adecuación bioclimática consiste en la adaptación del diseño bioclimático a las necesidades del usuario para obtener el confort, tomando en cuenta el medio ambiente y el uso eficiente de los recursos naturales (como sol y el viento), así como beneficios ambientales, sociales y económicos producidos por su implementación”*  
([Cayeros-Robles, 2016](#)).

Para lograr condiciones de confort ambiental (e.g. térmico, acústico o visual), [Fuentes-Freixanet \(2002\)](#) señala algunos elementos importantes a tomar en cuenta en el diseño bioclimático, siendo estos: *orientación, forma, ubicación de los espacios y el diseño de ventanas*. Estos cuatro elementos deben trabajar de manera ideal en armonía y en forma conjunta.

[Ortiz-Arnau \(2016\)](#) nos aclara con mayor detalle la implementación de los anteriores conceptos. Así tenemos que la orientación facilita el funcionamiento energético de la vivienda, en específico al considerar la *trayectoria solar* (ver [Fig. 2.10](#)). Si nos ubicamos en el hemisferio norte, conviene dejar las estancias que requieran luz por la mañana al este y si es por la tarde al oeste. Las estancias diurnas por otra parte se ubican al sur y al norte las que queramos evitar el máximo de radiación solar. La forma y los espacios también nos ayuda con las ganancias y pérdidas de calor, así como también nos permite conseguir una *ventilación cruzada* (ver [Fig. 2.11](#)) que considere los vientos dominantes y faciliten la regeneración del ambiente. Un patio interior o espacios a doble altura es otro aporte en ese

sentido. Las ventanas por otra parte se corresponden con la *iluminación* y *asoleamiento* (ver [Fig. 2.12](#)) y forzosamente van ligadas a la orientación y forma de la edificación. Lo anterior busca hacer llegar la mayor cantidad de luz posible cuidando no elevar la temperatura, para lo cual estudiamos la *incidencia solar* (i.e. gráficas solares y asoleamiento) para colocar protecciones en forma eficiente (e.g. voladizos y marquesinas). Estrategias complementarias implican considerar la vegetación (original o nueva) y fuentes de agua (estanques o similares), las cuales nos ayudarían a regular la humedad en la edificación.

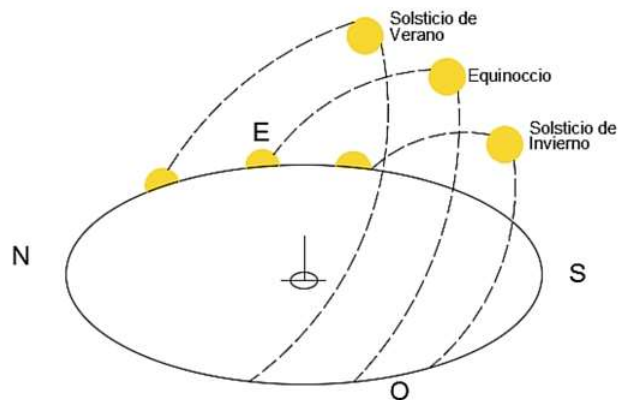


Figura 2.10 Recorrido del sol respecto a un punto ubicado en el hemisferio norte del planeta. Fuente: ([Arquinetpolis, 2019](#))

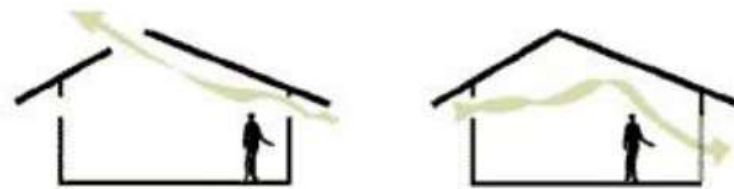


Figura 2.11 Ejemplo de ventilación cruzada para una edificación. Fuente: ([Ortiz-Arnau, 2016](#))

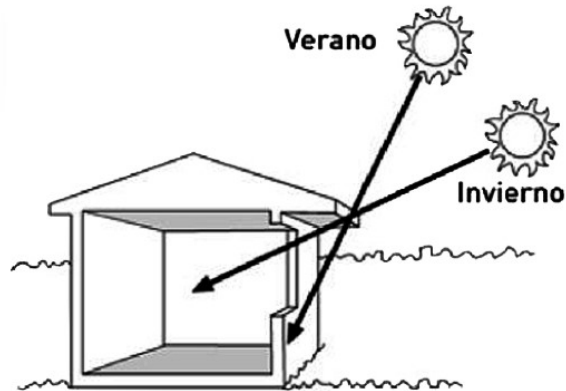


Figura 2.12 Ejemplo del empleo de protección solar verano/invierno. Fuente: (Ortiz-Arnau, 2016)

Una consideración adicional con el diseño bioclimático implica el origen, forma y propiedades de los materiales y como estos interactúan en elementos más complejos dentro de la edificación (ver [Tabla 2.2](#)).

Tabla 2.2 Propiedades térmicas de algunos materiales. Fuente: (Cedeño-Valdiviezo, 2010)

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica* (W/m <sup>2</sup> °C)
Acero	7800	60
Piedra Natural	2700	3
Concreto	2300	1.7
Ladrillo	1700	0.6
Madera	700	0.14
Lana mineral	50	0.04
Aire		0.021
Agua		0.5
Ladrillo		0.63
Piedra		1.56
Concreto		1.3 - 1.5
Tezontle		0.16
Adobe		0.5 - 0.7
Tierra seca		0.5
Madera seca		0.1 - 0.12
Madera prensada		0.07
Corcho		0.037
Vidrio		1.25
Fibra de vidrio		0.03

\* La transmitancia térmica "K" es la "cantidad de calor que se transmite en la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de un elemento constructivo (muro o tabique de cierto espesor), cuando la diferencia de temperatura entre las masas de aire es igual a la unidad" (Cedeño-Valdiviezo, 2010). Identificado como "U" en las normativas ISO, en la normatividad mexicana se denomina como coeficiente de transferencia de calor (valor K) y se expresa también en Watt por metro cuadrado · Kelvin. Otras definiciones como conductividad "λ" y resistencia "R" (valor M) se discuten en el Anexo A1.1 - Sobre bioclimatismo y conceptos afines.

Una acertada elección de los materiales mejora el confort térmico y permite aprovechar en forma óptima la radiación solar, no dejando de lado que las características de casi todos los materiales se pueden modificar "dependiendo de su calidad, espesor, dimensiones y

ubicación” (Rojas-Tavera, 2018). Además, en el diseño bioclimático es fundamental tener en cuenta cómo trabaja el sistema constructivo en su conjunto (e.g. trabajando como aislante acústico o difuminando la luz), ya que “*distintos materiales funcionarían de manera diferente según sus características y según se utilicen en sistemas constructivos concretos*” (López de Asian-Alberich, 2003).

Dentro del diseño bioclimático, existe una serie de medidas que por sus características de implementación y operación son conocidas como *diseño pasivo*. Aunque por lo general se aplica dicho término a la interacción entre la edificación y la radiación solar sin el empleo de por medio de sistemas convencionales, diferentes autores detallan que se trata del control y aprovechamiento de toda energía natural (e.g. Fuentes-Freixanet, 2002; Marban, s.f.), pudiendo detallar que se trata del sol, el viento, la vegetación o el agua, siempre y cuando no se dependa de sistemas electromecánicos (e.g. Lacomba, 1991).

Un *diseño pasivo* es entonces *aquel que se adapta al clima y entorno aprovechando los recursos naturales sin hacer uso de dispositivos electromecánicos*. Entre las ventajas económicas inherentes a estos sistemas (i.e. no consumen combustibles), Lacomba (1991) nos menciona un mayor bienestar ambiental, agua caliente, buena temperatura, luz natural y estupenda comodidad fisiológico y psicológica.

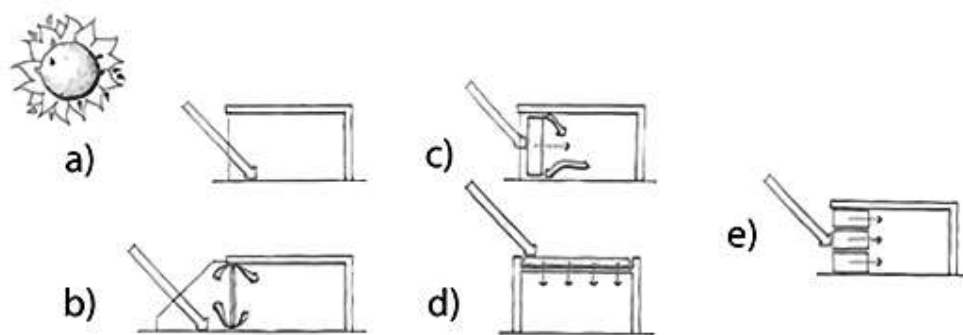
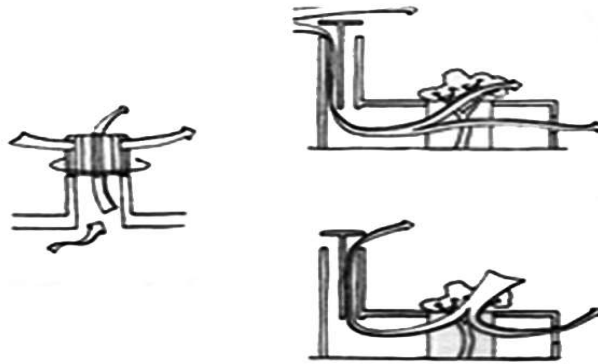


Figura 2.13 Sistemas pasivos de captación solar: a) directa en ventanal; b) directa con convención controlada; c) indirecta con convención y captación retardada de acumulación; d) horizontal con retardo de acumulación; e) vertical con retardo de acumulación. Fuente: (Marban, s.f.)

En construcción, los sistemas pasivos se emplean básicamente para *recibir, almacenar y repartir el calor* proveniente de la energía solar o bien *disiparlo facilitando su pérdida*.

Cuando lo que se busca es el *calentamiento*, [Marban \(s.f.\)](#) detalla que los sistemas se clasifican conforme a la forma en que se capta la energía solar, pudiéndose darse básicamente en forma directa (e.g. ventanal), indirecta (e.g. *muro trombe* <sup>(9)</sup>) o mediante ganancias aisladas de un sistema combinado (e.g. invernaderos adosados y/o sistemas con retardo de acumulación). Podemos ver esquemas de estos sistemas en la [Figura 2.13](#).

Cuando se trata de *enfriamiento*, los sistemas pasivos lo que buscan es modificar la velocidad del aire o la humedad del ambiente para alcanzar el confort deseado, aunque igualmente se puede recurrir a elementos constructivos o materiales específicos para aislar la construcción de la radiación solar. [Lacomba \(1991\)](#) y [Marban \(s.f.\)](#) recomiendan en los climas cálido húmedos las barreras de aire (i.e. techos o muros con espacios de aire), materiales aislantes o chimeneas que hagan uso del efecto *Venturi* (i.e. de sección cambiante), como lo podemos apreciar en la [Figura 2.14](#). Ambos autores también indican que, para climas secos y áridos, hay que humidificar el ambiente aprovechando las brisas, fuentes de agua y proyectando sombras.



**Figura 2.14 Ejemplos de enfriamiento pasivo mediante ventilación y chimeneas de efecto Venturi. Fuente: [\(Marban, s.f.\)](#)**

Tal y como lo observa [Fuentes-Freixanet \(2002\)](#), las estrategias de climatización se relacionan íntimamente con los mecanismo de transferencia de calor y básicamente, siempre

---

<sup>9</sup> Toma su nombre del francés Félix Trombe. Es básicamente un invernadero de dimensiones diminutas, ya que consta de un vidrio, una pequeña masa de aire y un elemento confinador.

se tendrá dos tipos de acondicionamiento. Esto es, favorecer las ganancias de calor en clima frío o bien, promover su pérdida cuando se trate de clima cálido (ver [Tabla 2.3](#)).

**Tabla 2.3 Estrategias básicas de diseño. Fuente: (Fuentes-Freizanet, 2011)**

<b>Mecanismos de transferencia de calor</b>					
		CONDUCCIÓN	CONVECCIÓN	RADIACIÓN	EVAPORACIÓN
<b>FRIO</b>	<i>Promover las ganancias</i>			Promover ganancia solar	
	<i>Evitar pérdidas</i>	Minimizar el flujo conductivo de calor	Minimizar el flujo de aire externo		
<b>CALOR</b>			Minimizar la infiltración		
	<i>Evitar las ganancias</i>	Minimizar el flujo conductivo de calor	Minimizar la infiltración	Minimizar la ganancia de calor	
	<i>Promover las pérdidas</i>	Promover el enfriamiento terrestre	Promover la ventilación	Promover el enfriamiento radiante	Promover el enfriamiento evaporativo

## 2.3 De hidrología y escurrimiento pluvial

### 2.3.1 Conceptos básicos de hidrología

Para las ciencias de la tierra nuestro planeta se divide en por lo menos cuatro esferas geográficas, siendo estas la *atmósfera*, la *hidrosfera*, la *litosfera* y la *biosfera*, pudiéndose considerar una quinta, la *magnetósfera*, como el límite superior a partir del cual inicia el espacio exterior. Mientras la atmósfera es la región que abarca la masa gaseosa que cubre el planeta, la hidrosfera es la que incluye toda el agua (líquida, sólida o gaseosa), la litosfera la materia sólida o mineral y la biosfera lo que se corresponde con la vida u orgánico, siendo la magnetosfera un campo magnético propio de la tierra. La interacción entre todas estas capas es la que da origen a fenómenos físicos, químicos y biológicos únicos de nuestro planeta, un intercambio entre materia y energía cuyo principal motor se origina en nuestra estrella, el sol.

**Fuentes-Freixanet (2002)** nos menciona que la *hidrosfera* juega un importante papel climático y ambiental (e.g. los océanos cubren la mayor parte del planeta y almacenan grandes cantidades de calor). El *ciclo hidrológico* es la forma en que el agua interactúa con las demás esferas terrestres, un sistema que tiene como límites “*las capas altas de la atmósfera y los sistemas geológicos profundos*” (**Breña-Puyol & Jacobo-Villa, 2006**). Este ciclo podemos visualizar en forma sencilla partiendo del agua cuando se convierte inicialmente en vapor. Esta se eleva y condensa en nubes hasta volver a caer reconvertida



en agua, escurre por una cuenca (ya sea que se consuma, permee o fluya) y finalmente vuelve a transpirarse o evaporarse reiniciando el ciclo, como podemos apreciarlo en la [Figura 2.15](#).

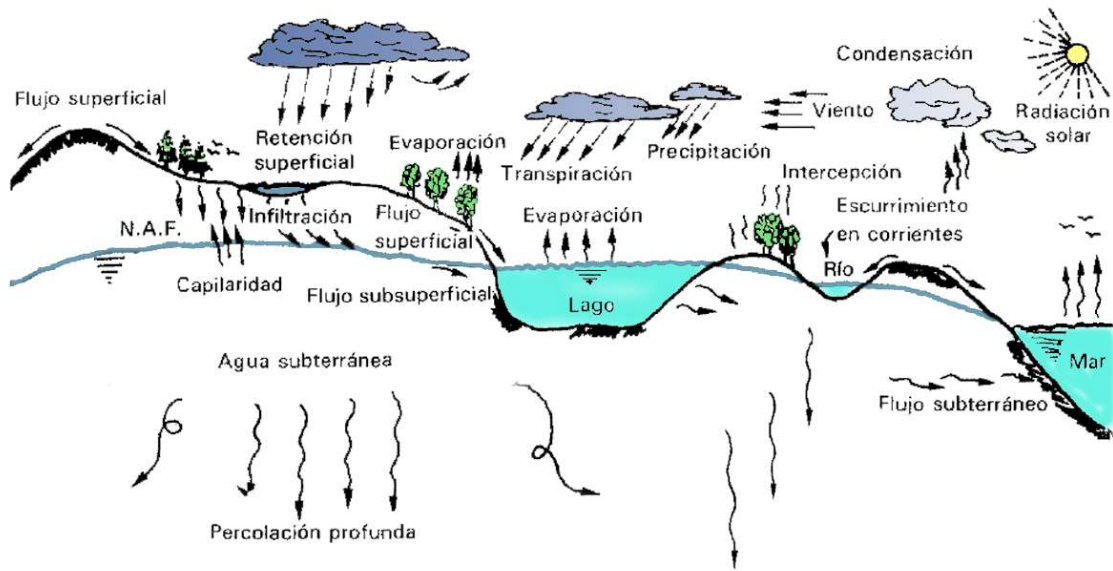


Figura 2.15 El ciclo hidrológico. Fuente: (Aparicio-Mijares, 1989)

*“La **hidrología** es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo los seres vivos”.* (Chow, citado en Aparicio-Mijares, 1989)

Para [Aparicio-Mijares \(1989\)](#), la **ingeniería hidrológica** o **hidrología aplicada**, es una especialización centrada en el diseño y la operación de las obras donde sea necesario el control y utilización de las aguas, debiendo tomar especial atención en un **análisis hidrológico** cuantitativo y la selección de un **evento de diseño**. Prosigue Aparicio, los fenómenos naturales que trata la hidrología no se apegan a un análisis mecánico riguroso, por lo que se hace necesario apoyarse en otras ciencias (e.g. geografía, meteorología, hidráulica, matemáticas y estadística entre otras) a fin de conferirle a las soluciones planteadas una certeza que este a la par de otras disciplinas exactas.

Dentro de la hidrología y en específico el ciclo hidrológico, es muy importante reconocer y entender ciertos conceptos principales como son el *escurrimiento*, la *cuenca hidrológica*, la *evaporación*, la *precipitación* y la *infiltración* <sup>(10)</sup>. Básicamente, la *cuenca* es el área donde cae el agua de lluvia o *precipitación*, misma que transita o *escurre* hacia determinado punto, se *infiltra* en el subsuelo o termina por *evaporarse*. A nivel de superficie, siempre cabra la posibilidad de cierto control y/o modificación de las condiciones del escurrimiento, pero a nivel atmosférico se está a merced de las condiciones climatológicas, por lo que debemos poner especial atención en la forma que dimensionamos la lluvia para incluir dicho valor en nuestros diseños.

*“Las características más significativas de la precipitación, desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, pueden resumirse en cuatro: su altura o intensidad, su distribución en el espacio, su distribución en el tiempo y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia” (Aparicio-Mijares, 1989).*

**Aparicio-Mijares (1989)** define a los *modelos de lluvia* como los métodos para obtener un valor aproximado de la máxima precipitación que pueda ocurrir dadas determinadas condiciones atmosféricas. Igualmente asevera el autor que en México se emplean principalmente pluviómetros y pluviógrafos para registrar la lluvia, pero estos solo registran la lluvia puntual, por lo que se requieren calculados más elaborados para obtener la lluvia media (una forma es mediante el cálculo de las la isoyetas). Sobre el agua total de una lluvia, Aparicio detalla que si bien es cierto que existen pérdidas entre el agua que escurre y la que se infiltra por una cuenca, *el volumen de escurrimiento siempre será menor al de la infiltración, salvo en zonas urbanizadas*. Lamentablemente en las relaciones *lluvia-escurrimiento* concluye **Aparicio-Mijares (1989)**, no existen actualmente registros adecuados sobre el escurrimiento en una cuenca determinada, de ahí que este se calcule en forma indirecta con los datos de precipitación, topografía y características del suelo.

---

<sup>10</sup> Para un desglose más detallado de estos términos y conceptos afines, referirse al [Anexo A1.2 - De hidrología y escurrimiento pluvial](#)



**Figura 2.16** Regiones Hidrológicas “Administrativas” en México. Fuente: (CONAGUA, 2016)



**Figura 2.17** Subdivisión de regiones hidrológicas y que conforman las cuencas y subcuencas “reales” en México. Fuente: (CONAGUA, 2018)

Como nota aclarativa, nuestro país se ha dividido en trece Regiones Hidrológico Administrativas (RHA) para la gestión de sus recursos hídricos (ver Fig. 2.16). Aunque los límites de estas regiones respetan la división política municipal, Breña-Puyol & Jacobo-Villa (2006) nos aclara que también agrupan 37 regiones hidrológicas (ver Fig. 2.17), determinadas en su momento mediante datos orográficas e hidrografías planteados en la

década de 1960. Las 37 regiones están conformadas por las cuencas hidrológicas reales, variando su número entre 731 y 757 de acuerdo a las fuentes consultadas (e.g. CONAGUA, 2016; CONAGUA, 2018).

### 2.3.2 Elementos cuantitativos sobre el escurrimiento

Considérense las siguientes definiciones como base para los cálculos que se desarrollara más adelante en este TOG. Breña-Puyol & Jacobo-Villa (2006) señalan que dentro del sistema y subsistemas del ciclo hidrológico se presenta siempre una capacidad de retención de volúmenes de agua (i.e. *almacenamiento*) en cualquiera de sus fases, misma que ocurre durante un determinado intervalo de tiempo (i.e. *residencia*). Para medir la relación entre estos dos elementos haremos uso del concepto de gasto. El *gasto* ( $Q$ ) se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo (i.e.  $m^3/s$ ) que transita por una sección hidráulica dada. Una forma de calcularlo, teniendo una sección hidráulica determinada, es mediante la siguiente expresión:

- $Q = V \cdot A$

Ecuación 2.1

Donde  $Q$  es el gasto, en  $m^3/s$ ,  $V$  es la velocidad representativa del flujo, en  $m/s$ , y  $A$  es el valor de área de la sección tipo, siendo perpendicular a la dirección del flujo, en  $m^2$ . Un *hidrograma* es la representación gráfica de los gastos en el tiempo. La *Figura 2.18* representa un hidrograma anual, mientras que la *Figura 2.19* es la representación ampliada en la primera figura del escurrimiento producido por una sola tormenta. Las variables indicadas de esta última figura son:  $t_0$  (tiempo de inicio del escurrimiento directo);  $t_p$  (el tiempo pico, definido como el tiempo entre el inicio del escurrimiento y el gasto máximo o pico);  $t_b$  (tiempo base, equivalente al tiempo en el que ocurre el escurrimiento directo); y  $Q_b$  (gasto base).

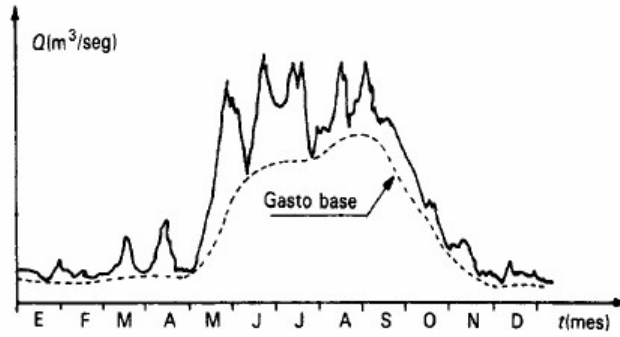


Figura 2.18 Hidrograma anual. Fuente: (Aparicio-Mijares, 1989)

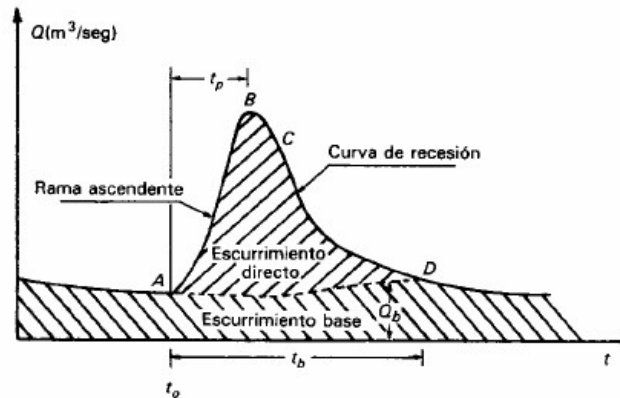


Figura 2.19 Hidrograma aislado de tormenta. Fuente: (Aparicio-Mijares, 1989)

Se le denomina *aforar* o *aforo* de una corriente a medir el gasto en una sección determinada. Para Aparicio-Mijares (1989), en México se emplean tres métodos para ello: sección de control, relación sección con pendiente y relación sección con velocidad. Por otra parte, la *lluvia efectiva* es la que genera la escorrentía o flujo superficial: “suele ser el 30% de la lluvia total en terrenos sin afectación antropogénica y hasta de 80% en terrenos impermeables” (Landa, et al., 2008). Como lo indica la cita anterior, la disminución de áreas permeables por efecto del quehacer del hombre es lo que genera mayores volúmenes de escurrimiento.

*“Anualmente México recibe aproximadamente 1 449 471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos”.* (CONAGUA, 2018)

## 2.4 Estado de arte y trabajos de investigación actual

Actualmente los trabajos de investigación que involucran la azotea de edificaciones son variados. Sin embargo, la mayoría de los estudios documentados para esta investigación van encaminados a observar características relacionadas con el desempeño térmico y ninguno en lo particular hace referencias a una función adicional como podría ser el trabajar la escorrentía pluvial captada en la azotea.

Partiendo de azoteas planas, [Abuseif & Gou \(2018\)](#) identifica 10 sistemas azoteas (*i.e.* azotea de concreto sola, de techo frío o “*cool roof*”, con aislantes térmicos, azotea verde, con paneles solares, sistema biosolar, dobles techos, techos húmedos o “*roof ponds*”, sistemas entreabiertos con pérgolas o tragaluces y, las chimeneas de viento). Su investigación hace una descripción amplia de cada sistema y la metodología con que fueron analizados. Ofrece pautas a seguir sobre en qué tipo de climas emplearlos y cuando no, así como las posibles ganancias en cuanto confort térmico y ahorro energético.

Con resultados más cuantitativos, [Gupta & Tiwari \(2016\)](#) hace referencia a los *sistemas pasivos de calefacción y enfriamiento* concluyendo que, en el caso de la calefacción, los sistemas de ganancia directa son los más convenientes, mientras que para reducir temperaturas, una combinación de enfriamiento evaporativo y torres de viento son ideales. Mención especial tienen aquellas construcciones que integran los sistemas fotovoltaicos en su estructura (*BiSPVT* por sus siglas en inglés), si bien cabe recordar que los mismos no son del todo pasivos, al requerir elementos electromecánicos en su operación.

Por otra parte [Chan et al. \(2010\)](#), consideran que *los sistemas pasivos tienen varias limitaciones y no ofrecen suficiente confort térmico en áreas de clima extremo*, por lo que deben llevarse a cabo mayores investigaciones dirigidas a mejorar su rendimiento, operación e integración con la construcción.

[Hernández-Pérez et al. \(2014\)](#) realizó un estudio sobre el desempeño térmico de azoteas de concreto tratadas con recubrimientos reflejantes (“*cool roof*”) en diferentes climas de México. Su evaluación parte de los valores teóricos atribuidos a los materiales y sus

resultados reflejan una mejora con un  $\Delta T_{\max}$  de  $14^{\circ}\text{C}$  en la Ciudad de México (clima invernal seco de la clasificación Köppen), hasta un  $\Delta T_{\max}$  de  $28^{\circ}\text{C}$  en la ciudad Mérida (clima de sabana tropical), en la cubierta. Estos son resultados muy por encima de los obtenidos con cualquier otro sistema pasivo reseñado en las investigaciones consultadas.

Hablando de sistemas constructivos, [Martínez-Martínez et al. \(2010\)](#) encontraron en su análisis del sistema de vigueta y bovedilla empleado en México, que el mayor flujo de calor se da en el alma de la vigueta, misma que actúa como un *puente térmico*, por lo que recomiendan aislar la cara expuesta de esta antes que aumentar el espesor del sistema.

Entrando en un ámbito más innovador y experimental en cuanto a materiales a utilizar, [Muralimanohar et al. \(2017\)](#), empleo cascara de coco y una capa final de conchas marinas como aislamiento térmico en su propuesta de azotea, buscando reducir así la *carga térmica* en la construcción y disminuir el consumo energético (ver [Fig. 2.20](#)). Finalmente obtuvo un  $\Delta T_{\max}$  de hasta de  $9^{\circ}\text{C}$  respecto a un techo tradicional de concreto sin aislamiento.



**Figura 2.20** Propuesta de aislamiento térmico con coco (a) y conchas marinas (b). Fuente: ([Muralimanohar, et al., 2017](#))

[Guillén-Guillén et al. \(2018\)](#) a su vez, evaluaron las propiedades térmicas de materiales alternativos como aislantes en cubiertas en México. Obtuvieron valores medios de *conductividad térmica* de  $0.059 \text{ W/mK}$  para la caña de maíz y  $0.122 \text{ W/mK}$  para el carrizo. En comparación, el aire como buen aislante tiene un valor de  $0.026 \text{ W/mK}$ , contra los  $0.814 \text{ W/mK}$  de un ladrillo de arcilla o los  $0.500 \text{ W/mK}$  del acero, materiales considerados como malos aislantes.

Otro material distinto a emplear como aislante es la ceniza del carbón (*i.e.* carbón ya quemado), identificada como “*fly ash pieces*” en inglés. [Mozumder & Kumar-Singh \(2012\)](#) en su investigación (*i.e.* 3 años), encontró una demora de hasta 6 horas entre las máximas temperaturas registradas en el exterior y su contraparte en el interior de la construcción, contra las 4 horas que obtenía en una azotea con un aislamiento más tradicional.

Sobre materiales granulares o de origen geológico, [Al-Turki et al. \(1997\)](#) llevaron a cabo un estudio sobre el impacto de la grava en las azoteas para el enfriamiento de los edificios. Una conclusión importante de esa investigación fue el observar que *la masa total de la grava influía más en las variaciones de temperatura que el tamaño de cada partícula de grava*, con  $\Delta T$  cercanos a los  $3^{\circ}\text{C}$ , si bien sus conclusiones consideran ecuaciones propuestas por los mismos investigadores.

Contrastando en cierta forma los resultados anteriores, [Pisello et al. \(2014\)](#) encontraron que el *albedo* (*i.e.* radiación reflejada) del material de grava *aumenta cuanto más fino fuera el tamaño de la partícula* (hasta 62% de reflectancia). Estos resultados los corroboraron tanto en campo como en laboratorio, observándose que los mismos tenían mucho que ver con las características del material de la zona que emplearon y que variaban cuando emplearon material importado de otra parte.

Sobre las dos anteriores investigaciones hay que señalar, aunque existen normas para determinar y efectuar pruebas de temperatura y reflectancia, tratándose de medios porosos como la grava o similares, la evidencia expuesta indica cierta variabilidad en los resultados. [Weber \(2006\)](#) por ejemplo, en su investigación empleó 4 métodos distintos para calcular la transferencia de calor al suelo a través de una masa de grava y obtuvo en correspondencia diferencias en los resultados.

Otra posibilidad que se encontró en las investigaciones consultadas, es que el rango de beneficios no se restringe al día cuando hablamos de sistemas solares pasivos, lo cual es importante en climas desérticos. [Pearlmuter & Rosenfeld \(2008\)](#) lo descubrieron al evaluar los cambios de temperatura que resultaban al colocar una masa de tierra sobre una



cubierta y otra similar, solo que irrigada, cubierta con una malla o bien grava. La opción con grava ofrece mejores prestaciones considerando el ciclo del día completo y no solo las horas iluminadas.

Si consideramos un *análisis de ciclo de vida* (ACV) de diferentes sistemas constructivos para azoteas, **Carretero-Ayuso (2018)** considera precisamente que una azotea plana conformada por concreto, aislamiento y una capa final de grava se encuentra entre los sistemas de mayor sustentabilidad.

En el ámbito nacional, **Silva-Treviño et al. (2018)** desarrollan una investigación en cuanto el confort térmico que se tiene en vivienda de interés social al colocar diferentes materiales porosos sobre las cubiertas de dicha vivienda. Para esto, desarrollaron modelos a escala que se mantuvieron a la intemperie. Trabajando con jal, grava y tezontle, sus resultados indican que los materiales no se desempeñan con iguales prestaciones dependiendo de la época del año. Así, el material que ofrecía mejores características en tiempo de secas modificaba sus resultados en temporada de lluvias. Los  $\Delta T$  de la investigación oscilo entre 1°C y los 3°C.

Ya para concluir , si bien no está en los alcances de este TOG valores relacionados al área de la *climatización* (*i.e.* HVAC por sus siglas en inglés), llama la atención la investigación de **Lucero-Álvarez, et al. (2014)** sobre las azoteas en las diferentes *zonas térmicas* <sup>(11)</sup> de México. Aquí concluyen que el nivel de aislamiento térmico en la cubierta solo se vuelve importante cuando los valores de *reflectancia solar* (SR) y *emisividad infrarroja* (IE) no se corresponda con el clima local. Así tenemos que en las zonas 1 y 2 (*e.g.* Guadalajara corresponde a esta última), si la azotea ya cuenta con altos valores de SR e IE (*i.e.* 0.9), aumentar el nivel de aislamiento no reducirá la carga térmica.

---

<sup>11</sup> Las “zonas térmicas” es una clasificación con base a la Norma NMX-C-460-ONNCCE-2009 respecto a las distintas áreas climatológicas de la república, empleando el valor de “grados días” como unidad.

## 2.5 Resumen del capítulo

La *quinta fachada* o cubierta de azotea es un elemento de la construcción que puede y debe ofrecer funciones adicionales encaminadas a volverlo un sistema sustentable o que coadyuvé en la *sustentabilidad* de la edificación. Entre los aspectos más importantes que podemos mejorar es el *confort térmico* ofrecido por la estructura, para lo cual podemos ayudarnos del *bioclimatismo* a la hora de proponer un diseño *pasivo*. Particularmente, los *mecanismos de transferencia de calor* juegan un papel primordial, en conjunto con las propiedades físicas del material constructivo y la disposición de espacios en la edificación, elementos con los cuales estamos tratando de modificar las *condiciones climatológicas* imperantes del exterior y las ajustamos a un microclima al interior.

Complementariamente a ese objetivo, la azotea también juega un papel principal en cuanto a la captación y conducción del *escurrimiento pluvial*. En este capítulo identificamos como podemos dimensionarlo al momento que se da la *precipitación* y se establecieron ciertas relaciones matemáticas iniciales con las que se evaluará el *escurrimiento*.

Finalmente, la revisión del estado que guarda la investigación científica respecto a la propuesta de este TOG (*i.e.* empleo de material de tezontle), apunta a una reducción de temperaturas, si bien los rangos que se mejoraron son del orden de pocos grados en comparación de otros sistemas (*i.e.* techos reflectantes). El consenso es que los sistemas pasivos ofrecen mejores prestaciones en climas extremos, mientras que las mejoras producto de un material terreo/pétreo sobre la cubierta quedan acotados por las propiedades físicas del mismo, granulometría y espesor de la capa.

# Capítulo 3

## *Área bajo estudio, características del tezontle y normativa revisada*

---

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se hace una descripción del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) como la zona geográfica donde se ubica el presente proyecto, identificando en lo particular las características climatológicas, topográficas e hidrológicas de la región. Se describen a continuación las características de la vivienda de interés social y su contexto dentro de las urbanizaciones en el AMG. Posteriormente, y como objeto de estudio en esta investigación, se exponen los resultados sobre la revisión bibliográfica a la que se tuvo acceso referente al material de tezontle, detallando particularmente las propiedades físicas y los informes granulométricos del material que se empleará en los experimentos. Complementariamente, se identifican los espesores de la capa de material que se propondrá para su instalación en la vivienda. Finalmente, se hace un resumen de las normativas a las que se considera necesario referirse y que se correspondan con los objetivos del estudio.

### 3.2 Área Metropolitana de Guadalajara (AMG)

#### *3.2.1 Ubicación Geográfica*

El Estado de Jalisco se ubica al occidente de México y su capital es Guadalajara. En el año 2009 el Congreso del Estado establece el AMG, el cual consistente de 8 municipios conurbanos: Guadalajara, Zapopán, Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco Zúñiga, El Salto, Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos. En el año 2015 se suma el municipio de Zapotlanejo, quedando el área conformada por los 9 municipios indicados en la [Figura 3.1](#). **IMEPLAN (2018)** considera que de éstos, solo los seis primeros son continuos en la

urbanidad. Ribas-Uribe (2019), reporta a su vez que en el año 2019 se ha discutido y promovido la inclusión de un décimo municipio, Acatlán de Juárez, como parte del AMG.



Figura 3.1 Conformación y ubicación del AMG a nivel estatal. Fuente: (IMEPLAN, 2018)

Tomando la ciudad de Guadalajara como epicentro del AMG, el sitio oficial del Gobierno de Jalisco detalla su ubicación en las coordenadas 20°36'40" a los 20° 45'00" de latitud norte y 103°16'00" a los 103° 24'00" de longitud oeste, con una altitud de 1700 m sobre el nivel del mar. La población y superficie total de los municipios se desglosa en la [Tabla 3.1](#)

Tabla 3.1 Superficie y población total del AMG. Fuente: (INEGI, 2019)<sup>1</sup> (Gobierno de Jalisco, 2019)<sup>2</sup>

Municipio	Superficie (Km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	Población Total (No. habitantes) <sup>2</sup>
Guadalajara	150.36	1,460,148.00
Ixtlahuacán de los Membrillos	184.32	53,045.00
Juanacatlán	141.22	17,955.00
El Salto	92.39	183,437.00
Tlajomulco de Zúñiga	682.50	549,442.00
San Pedro Tlaquepaque	118.60	664,193.00
Tonalá	156.50	536,111.00
Zapopan	1,017.24	1,332,272.00
Zapotlanejo	722.33	68,519.00
Totales	3,265.45	4,865,122.00

1) Censo Intercensal 2015  
2) Mapa general de Jalisco 2012 modificado por Decreto 26837

### 3.2.2 Clima, Topografía e Hidrología

Como podemos inferir de capítulos anteriores, el clima se identifica por determinadas características atmosféricas y geográficas regionales, siendo necesario clasificarlo de acuerdo a las mismas. En el caso de México, se emplea generalmente una variación del

sistema *Köppen*, sistema que parte de las condiciones imperantes de temperatura, humedad y lluvias de la región analizada, pero que no necesariamente se corresponde con niveles de confort para los seres humanos, como lo señala [Gomez-Amador \(2009\)](#). Sobre esta última aseveración, podemos constatar que [CONAVI \(2008\)](#) maneja diez tipos de climas concentrados en cuatro *regiones ecológicas* (ver [Fig. 3.2](#)), misma clasificación que se reflejaban en la edición del *Código de Edificación de Vivienda (CEV)* del año 2010 e igualmente son consideradas por el *INFONAVIT* en el año 2019 para sus manuales de vivienda ecológica. Por otra parte, la edición 2017 del *CEV* solo considera siete áreas principales, a las que denomina *zonas bioclimáticas* (ver [Fig. 3.3](#)).



**Figura 3.2** Regiones ecológicas de México señaladas por CONAVI (2008) y que a su vez incluyen las 10 regiones climatológicas o bioclimas referenciados por CONAVI (2010). Fuente: [\(CONAVI, 2008\)](#)

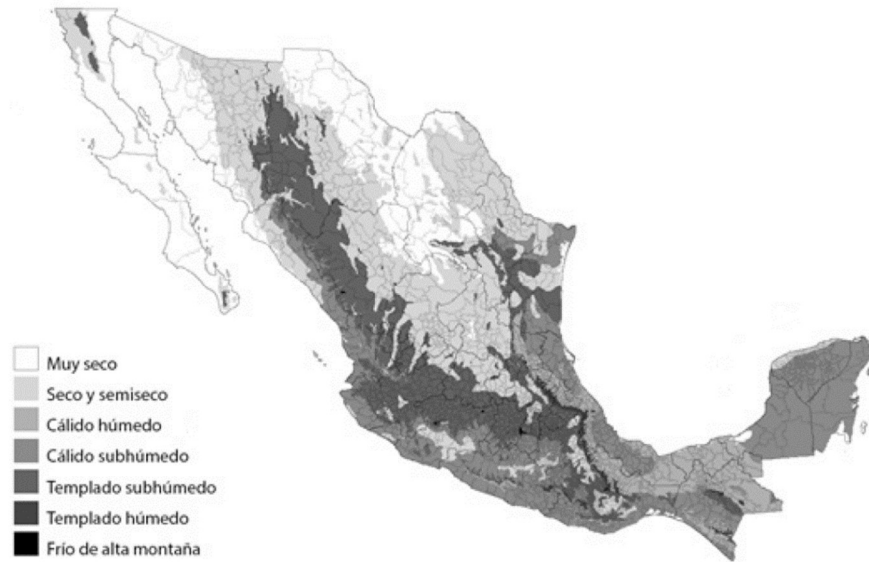


Figura 3.3 Reclasificación de las Regiones Bioclimáticas en México. Fuente: (CONAVI, 2017)

A nivel regional, UdeG (2019) y CEA-Jalisco (2015) clasifican el clima del AMG como templado, fluctuando el mismo en los rangos de semiseco-semihúmedo o semicálido-semihúmedo, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen. La variabilidad de este rango podemos apreciarlo con mayor detalle en la Figura 3.4, que abarca el clima para la totalidad del Estado.



Figura 3.4 Climas del Estado de Jalisco de acuerdo a la clasificación de Köppen adaptada para México. Fuente: (Gómez-Amador, 2009)

Gómez-Amador (2009) indica que para el Estado de Jalisco las temperaturas anuales promedio varía entre los 14 y 28°C, con una humedad relativa entre el 22 y 67%. Para el AMG, CEA-Jalisco (2015) especifica que la temperatura media anual puede manejarse sobre los 21.7°C, con máximos y mínimos de 32.0 y 9.9 °C respectivamente, con una precipitación media de 998 mm y evaporación de 700 mm. Estos valores son consistentes a los indicados en la *Tabla 3.2* elaborada con datos del Servicio Meteorológico Nacional para una de sus estaciones meteorológicas ubicadas en la zona metropolitana. Los meses más cálidos son entre abril y junio, disminuyendo la temperatura con la temporada de lluvias ubicada entre junio y septiembre. Se considera a su vez que “predominan los vientos del este en los meses de julio y octubre y en los demás meses, los vientos del oeste” (Gobierno de Jalisco, 2019b).

**Tabla 3.2 Resumen de Normales Climatológicas Est. 14065. Fuente: (CNA, 2019)**

NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE: JALISCO					LATITUD: 20-42'23" N.	PERIODO: 1981-2010							
ESTACION: 00014065	GUADALAJARA (OBS)				LONGITUD: 103-23'32" W.	ALTURA: 1,551.0 MSNM.							
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMP. MÁXIMA °C	24.5	26.8	29.2	31.7	33	30.9	27.8	27.8	27.5	27.2	26.4	24.8	28.1
TEMP. MEDIA °C	15.4	16.8	18.7	21.2	23.2	23.7	22	21.9	21.6	20.2	17.7	15.8	19.9
TEMP. MÍNIMA °C	6.3	6.9	8.2	10.6	13.4	16.4	16.2	16	15.8	13.2	8.9	6.9	11.6
PRECIPITACIÓN mm	16.7	11.9	6.8	5.3	16.4	135.1	179.3	163.7	137	47	11.5	6.2	736.9
EVAPORACIÓN TOTAL	95.9	123.7	178.7	194.8	190	127.7	93.2	98.4	96.6	104.7	96.6	82.9	1,483.20
<b>NUMERO DE DÍAS CON:</b>													
LLUVIA	2.4	1.7	0.8	1.2	3.4	15.3	19.7	19	15.2	6.6	2	2	89.3
NIEBLA	1.5	0.5	0.3	0	0.2	1.4	3.1	5.4	4.5	3.2	2.7	1.2	24
GRANIZO	0	0	0	0.1	0.1	0.3	0.2	0.7	0.2	0.1	0.1	0	1.8
TORRENTA E.	0.2	0.2	0.1	0.3	1.2	5.5	7.3	9.5	5.1	2.5	0.5	0	32.4

En el *Capítulo 1* tomamos nota de cómo ha sido reportado que el AMG ha sufrido picos de temperatura cercanos a los 40°C. Como podemos apreciarlo en la *Tabla 3.3*, dicha aseveración es correcta, llamando la atención que en el registro de la estación consultada los datos de esas máximas corresponden a la última década y muchos a un año en específico. Consultando varias fuentes (e.g. EFE, 2006), efectivamente se tiene registrado el año 2005 con uno de los más calurosos en la historia del planeta.

**Tabla 3.3 Temperaturas Máximas registradas periodo 1981-2010. Fuente: (CNA, 2019)**

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
<b>TEMPERATURA MAXIMA ESTACION: 00014065</b>												
<b>MAXIMA MENSUAL</b>	26.6	28.7	31.4	34.5	34.6	34.6	29.7	29.2	29.1	28.5	27.8	26.4
<b>AÑO DE MAXIMA</b>	1989	2008	2009	2005	1998	2005	2005	2004	2005	2004	2005	1998
<b>MAXIMA DIARIA</b>	33.6	35.9	36	37.5	38.2	39.5	37	32.2	36	36.2	31	29.8

En [UdeG \(2019\)](#) se señala como el clima de Guadalajara está íntimamente relacionado con su relieve. Topográficamente, el perfil general del AMG es plano hacia el interior (municipio de Guadalajara), ya que elevaciones, hondonadas y barrancas se ubican mayoritariamente hacia el exterior en los municipios conurbados. Algunos de los accidentes topográficos más sobresalientes del AMG son: la barranca de Oblatos/Huentitán al Norte; el cerro de la Reina al noreste; el cerro del Cuatro y el cerro del Tesoro hacia el sureste; La Primavera y el Cerro del Collí al suroeste. Complementariamente a lo descrito, en [Suarez-Plascencia \(2015\)](#) se destaca que la mayoría de cerros del AMG y particularmente el área de La Primavera son de origen volcánico, si bien se le considera como un áreas inactivas o dormidas desde hace miles de años.

En cuanto a escurrimientos principales, en el AMG destacan el río Santiago que discurre hacia el norte sobre la barranca de Oblatos/Huentitán, el río San Juan de Dios (actualmente entubado en su tránsito por Guadalajara) y los Arroyos de Atemajac, Osorio, San Gaspar y San Andrés. [SIAPA \(2017\)](#) indica que el AMG se ubica en la Región Hidrológica 12 (*i.e.* cuenca Lerma-Santiago) y se considera que en la misma intervienen nueve subcuencas (ver [Fig. 3.5](#)), de las que sobresalen las de Atemajac, San Juan de Dios y el Ahogado, por ser en las que cuentan con mayor densidad poblacional. Partiendo del municipio de Guadalajara, SIAPA describe el valle de Atemajac como un valle alto cuyas aguas escurrían por cinco cauces principales, ya absorbidos por la urbanización y encauzados actualmente por siete colectores, quedando solo al extremo norte, oeste y sureste del mismo, áreas donde aún persisten los cauces naturales.



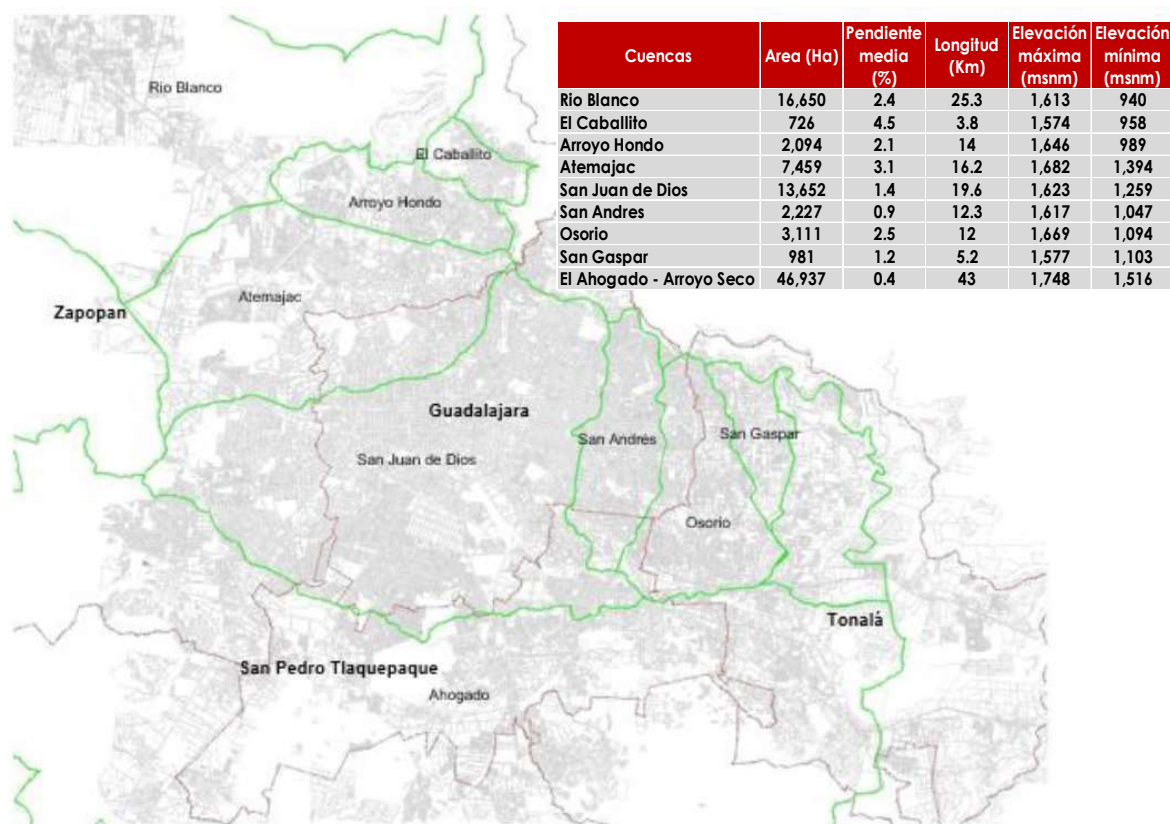


Figura 3.5 Detalle parcial de subcuencas dentro del AMG. Fuente: (SIAPA, 2017)

Como se especificó en párrafos anteriores, CEA-Jalisco (2015) tiene registrado una media anual de 998 mm de lluvia, cifra que contrasta un poco con el dato de 808 mm registrado en CONAGUA (2016) para la totalidad de la cuenca Lerma-Santiago (ver Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Precipitación pluvial normal mensual en las RHA, 1981-2010 (mm). Fuente: (CONAGUA, 2016)

Clave	RHA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
I	Península de Baja California	20	19	14	4	1	1	10	26	32	11	10	20	168
II	Noroeste	24	21	12	6	4	19	108	103	58	25	17	31	428
III	Pacífico Norte	31	16	8	6	9	66	194	188	142	52	26	29	765
IV	Balsas	12	8	6	11	48	179	199	197	194	84	15	6	962
V	Pacífico Sur	8	8	6	15	71	230	200	219	242	113	20	7	1139
VI	Río Bravo	19	11	11	17	28	40	63	61	64	32	12	15	372
VII	Cuencas Centrales del Norte	18	9	6	12	27	56	79	71	67	29	11	13	398
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	22	11	4	6	23	131	197	180	153	60	13	10	808
IX	Golfo Norte	26	20	19	38	67	120	137	119	166	89	30	23	855
X	Golfo Centro	51	40	30	43	84	222	261	264	293	179	97	64	1626
XI	Frontera Sur	65	54	36	49	135	276	223	265	331	224	109	76	1842
XII	Península de Yucatán	45	35	31	39	90	167	153	173	208	147	72	49	1207
XIII	Aguas del Valle de México	11	11	12	28	51	109	126	115	110	57	13	6	649
	<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>17</b>	<b>13</b>	<b>18</b>	<b>42</b>	<b>102</b>	<b>134</b>	<b>134</b>	<b>135</b>	<b>69</b>	<b>27</b>	<b>23</b>	<b>740</b>

### 3.2.3 Vivienda de Interés Social

Sirva este subcapítulo para definir y caracterizar la *vivienda de interés social*, concepto que se cita continuamente en este TOG. Para [Sánchez-Corral \(2012\)](#) la *vivienda social* surge con la Revolución Industrial, donde era preocupación de las autoridades y primeros urbanistas acabar con el hacinamiento y mejorar las condiciones higiénicas de los sectores sociales más bajos y la clase trabajadora, buscando básicamente cumplir con el mínimo indispensable en cuanto a espacios y materiales empleados. [Higuera-Zimbrón & Rubio-Toledo \(2011\)](#) consideran que el acercamiento a dicha situación surgió por cuestiones políticas y éticas, buscando resolver problemáticas de salud pública, integración familiar y control de movimientos sociales. Higuera y Rubio también señalan que este enfoque cambió con el pasar de las décadas, ya que se ha pasado de resolver un problema de demanda a resolver cuestiones relacionadas con la calidad de los espacios habitados.

En nuestro país, la construcción de esta vivienda se gestiona por organismos como el *Instituto Nacional de Fomento a la Vivienda de los Trabajadores* (INFONAVIT) y la *Comisión Nacional de Vivienda* (CONAVI). Esta vivienda se destina principalmente a la clase trabajadora que cotiza en el *Instituto Mexicano del Seguro Social* (IMSS) y que cuenta con ahorros en cuentas concentradoras. El *Código de Edificación de Vivienda* (CEV) es el documento creado por la CONAVI que tiene por propósito “regular el proceso de la edificación de vivienda, en el contexto urbano, con una adecuada infraestructura en su conjunto ... ” ([CONAVI, 2017](#)). Como nota complementaria, las políticas de vivienda sustentable por parte del gobierno tienen su origen en el *Programa de vivienda sustentable de México* del año 2001 y la *Ley de Vivienda* del año 2006.

El CEV establece que la vivienda de interés social en México queda definida por el valor del inmueble en el mercado, que debe corresponder a determinado número de veces la *Unidad de Medida y Actualización* (UMA), como podemos apreciarlo en la [Tabla 3.5](#). Dentro de esta clasificación, [CONAVI \(2017\)](#) identifica los subtipos económica, popular y tradicional como aquellos que corresponden a la vivienda de interés social.

**Tabla 3.5 Clasificación de la vivienda por precio promedio. Fuente (CONAVI, 2017)**

	Económica	Popular	Tradicional	Media	Residencial	Residencial Plus
Superficie construida promedio	30 m2	42.5 m2	62.5 m2	97.5 m2	145 m2	225 m2
Costo Promedio						
UMA	Hasta 118	De 118.1 a 200	De 200.1 a 350	De 350.1 a 750	De 750.1 a 1,500	Mayor a 1,500
Numero de cuartos	Baño Cocina Área de usos múltiples	Baño Cocina Estancia-comedor De 1 a 2 recámaras	Baño Cocina Estancia-comedor De 2 a 3 recámaras	Baño ½ baño Cocina Sala Comedor De 2 a 3 recámaras Cuarto de servicio	De 3 a 5 baños Cocina Sala Comedor De 2 a 3 recámaras Cuarto de servicio Sala familiar	De 3 a 5 baños Cocina Sala Comedor De 2 a 3 recámaras Cuarto de servicio Sala familiar
Notas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los conceptos de vivienda económica, popular y tradicional, son considerados como vivienda de Interés Social.</li> <li>• El cambio de VSMGM (Veces Salario Mínimo General Mensual) a UMA responde al "DECRETO por el que se declara reformadas y adicionadas diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia del Salario Mínimo".</li> </ul>						

Obviando dimensiones y cantidad total de espacios, podemos concluir que la vivienda de interés social cuenta con la siguiente distribución: 1 o 2 recámaras, un baño, un espacio de usos múltiples, patio de servicio, jardín, estacionamiento y en algunos casos, una futura ampliación para una recamara y otro baño. Otra característica importante de la vivienda de interés social es que la misma es generalmente masiva (ver [Fig. 3.6](#)). Estamos hablando de fraccionamientos con cientos y hasta miles de casas, que si bien cuentan con servicios básicos (*e.g.* agua, luz eléctrica, drenaje, etc.), también llegan a carecer de servicios complementarios (*e.g.* educación, abasto de víveres y transporte).

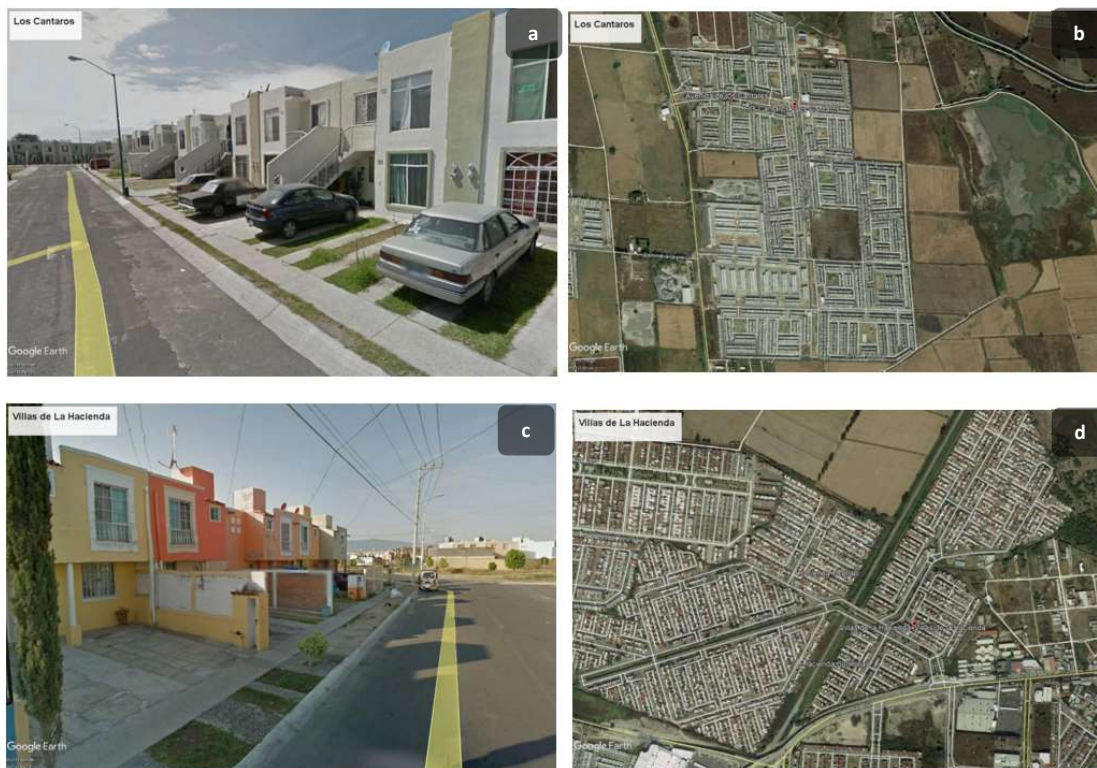


Figura 3.6 Vistas sobre viviendas y fraccionamientos de interés social típicos de Tlajomulco de Zúñiga, AMG: (a) y (b) Fraccionamiento La Canteras; (c) y (d) Fraccionamiento Villas de la Hacienda. Fuente: elaboración propia, software (Google Earth Pro®, 2019)

Lamentablemente, muchos de estos *desarrollos habitacionales* han dado origen a varios problemas de índole económico, social y ambiental. Referencias a este respecto podemos encontrar en varios estudios e investigaciones (e.g. Brito, 2010; Merchand-Rojas, 2017; Nuñez-Miranda, 2007; Pina-Fernández, 2013). En la *Tabla 3.6* podemos observar la concentración de la población en el área metropolitana respecto al resto del estado, mientras que en la *Tabla 3.7* se desglosa el crecimiento poblacional por municipio metropolitano y la tasa de crecimiento que han experimentado en tres décadas.

Tabla 3.6 Población del Estado y del AMG. Fuente: elaboración propia con datos de (INEGI, 2019)

ENTIDAD/AÑO	1980	1990	2000	2010
<b>POBLACIÓN DEL AMG RESPECTO AL ESTADO</b>				
JALISCO	4,371,998.00	5,302,689.00	6,322,002.00	7,350,682.00
AMG	2,371,278.00	3,043,770.00	3,752,597.00	4,498,514.00
<b>Pob.AMG / Pob.JALISCO</b>	<b>54%</b>	<b>57%</b>	<b>59%</b>	<b>61%</b>

**Tabla 3.7** Porcentaje de crecimiento poblacional respecto al periodo anterior. Fuente: elaboración propia con datos de (INEGI, 2019).

POBLACIÓN POR MUNICIPIO DEL AMG					TASA DE CRECIMIENTO RESPECTO AL PERIODO ANTERIOR		
ENTIDAD/AÑO	1980	1990	2000	2010	1990 / 1980	2000 / 1990	2010 /1990
Guadalajara	1,626,152.00	1,650,205.00	1,646,319.00	1,495,189.00	1%	0%	-9%
Ixtlahuacán	12,310.00	16,674.00	21,605.00	41,060.00	35%	30%	90%
Juanacatlán	8,081.00	10,068.00	11,792.00	13,218.00	25%	17%	12%
El Salto	19,887.00	38,281.00	83,453.00	138,226.00	92%	118%	66%
Tlajomulco	50,697.00	68,428.00	123,619.00	416,626.00	35%	81%	237%
Tlaquepaque	177,324.00	339,649.00	474,178.00	608,114.00	92%	40%	28%
Tonalá	52,158.00	168,555.00	337,149.00	478,689.00	223%	100%	42%
Zapopan	389,081.00	712,008.00	1,001,021.00	1,243,756.00	83%	41%	24%
Zapotlanejo	35,588.00	39,902.00	53,461.00	63,636.00	12%	34%	19%

Orozco (2015) observa como solo en Tlajomulco de Zúñiga el 7% de su territorio se urbanizo entre 1998 y 2006 (i.e. 293 fraccionamientos equivalentes a 4521 Ha), urbanizaciones que se encuentran muy desconectadas unas de otras (ver Fig. 3.7).



**Figura 3.7** Fraccionamientos Los Encinos, Colinas del Roble y Lomas del Sur. Tlajomulco de Zúñiga. Fuente (Orozco, 2015)

### 3.3 Características del tezontle como material constructivo

De acuerdo a La Academia Mexicana de la Lengua (2019), la palabra *tezontle* deriva del náhuatl “*tetzontli*” (tetl = piedra; tzontli = cabellera) y es el termino más utilizado en México para referirse a la *escoria volcánica* que se diferencia de la piedra pómez. Blyth & de Freitas

(1989) explican que el origen y composición de este material lo encontramos en las *rocas ígneas de tipo extrusivo* (i.e. lavas), siendo aquel material donde los gases en expansión del magma durante su extrusión originen la aparición de cavidades, oquedades o vesículas. Huang (1968) detalla que la estructura vesicular en la roca son burbujas atrapadas por la expansión de vapor de agua y otros gases de la lava, siendo *escoria* como se denomina a la *lava basáltica* en la cual las oquedades son numerosas y de forma irregular. Distingue Huang a su vez, la *piedra pómez* es *lava silíceo*, aquella con aspecto de espuma donde el escape de gases generó innumerables cavidades aisladas unas de las otras, permitiéndole ser más ligera y con la posibilidad de flotar en el agua.

Tamari et al. (2004) señalan que el tezontle en México se localiza particularmente en la zona centro del país y regiones aledañas correspondientes con el *Eje Volcánico Transversal*, denotando que el material se presenta en colores tales como rojos, negros y grises (ver Fig. 3.8). Por su parte, Rodríguez-Morales (2011) reseña el uso del tezontle y piedras volcánicas varios siglos atrás, coincidiendo con asentamientos humanos en regiones donde abunda el material (e.g. Teotihuacán y México-Tenochtitlán), continuando su empleo aún durante la Colonia (siglos XVI al XVIII) en casi la totalidad del Valle de México. A diferencia de otras piedras que podemos clasificar como *pesadas y sólidas*, la naturaleza *liviana y porosa* del tezontle lo convirtió en un material práctico, de fácil obtención y trabajabilidad, que se usó en rellenos, pisos, muros, columnas, entortados de techumbres, ya sea solo o conformando mamposterías y morteros. De lo anterior, no resulta difícil asegurar que literalmente fue utilizado en casi toda construcción de la región, si bien desde principios del siglo XX su uso decayó, hasta terminar casi desapareciendo en la actualidad, reemplazado por materiales industrializados y elementos prefabricados.



Figura 3.8 Ejemplo de banco de tezontle “negro” (a) y “rojo” (b). Fuente (González-Martín, 2016)

Como se mencionó en el [Capítulo 1](#), la investigación bibliográfica a la que se tuvo acceso sobre este material se centra en su empleo como rellenos, agregado en mezclas, filtro de aguas y capa de sustratos en cultivos. También se tuvo acceso a información donde se considera que el material no es permeable ni aislante (*e.g.* [Wikipedia, 2019](#)), lo cual contradice otras fuentes investigadas y denota un desconocimiento general sobre las propiedades físicas, químicas y mecánicas reales del material. Respecto a su impermeabilidad, [Olivera-Bustamante \(1999\)](#) sugieren que el material sea empleado en la estructuración de pavimentos a fin de disminuir los problemas de fallas de fondo y bombeo del agua que brote, mientras que al revisar a [Rico-Rodríguez \(2005\)](#) entendemos que por su granulometría, el mismo material funciona como capa filtrante que bien puede drenar el agua o trabajar como rompedora de capilaridad, algo que [González-Martín \(2016\)](#) sostiene en los lineamientos de su investigación. En cuanto a sus propiedades térmicas, en [Materioteca ITESO \(2019\)](#) encontramos que la muestra de material identificada como 0012MPERTN (*i.e.* recinto tezontle negro) se caracteriza por ser un aislante térmico, acústico y resistente al fuego.



Figura 3.9 Comparativa de partículas de tezontle negro (a) y rojo (b). Fuente (Chávez & Arreygüe, 2011)

Entendiendo el origen volcánico del material, se debe hacer notar que las características físicas y mecánicas del tezontle varían en función del sitio de extracción, identificado como *banco de material*. Incluso en el mismo sitio (ver Fig. 3.9), el material puede presentar diferencias entre un frente de extracción y uno contiguo. González-Martín (2016) reporta diferencias en el color en función de los contenidos de minerales y Chávez & Arreygüe (2011) identifica cambios en el tamaño y forma de las partículas. Si nos atenemos el peso específico del material, los valores documentados varían entre los 1000 kg/m<sup>3</sup> y los 2000 kg/m<sup>3</sup>, siendo necesario analizar cada banco y material en específico para poder determinar correctamente sus características (ver Tabla 3.8).

Tabla 3.8 Comparativa de propiedades físicas entre tres tezontles de bancos en el Estado de Michoacán. Fuente (Chávez & Arreygüe, 2011)

Material (No. muestra)	1	2	3
Densidad relativa aparente (gr/cm <sup>3</sup> )	2.05	1.29	1.29
Densidad relativa de sólidos (S <sub>s</sub> )	2.642	2.561	2.583
Peso específico de las partículas (gr/cm <sup>3</sup> )	2.176	1.518	1.495
Absorción (%)	4.54	20.35	20.22
Porosidad (%)	21.1	40.7	42.1
Índice de resistencia de carga puntual (kg/cm <sup>2</sup> )	46.3	17.49	13.67

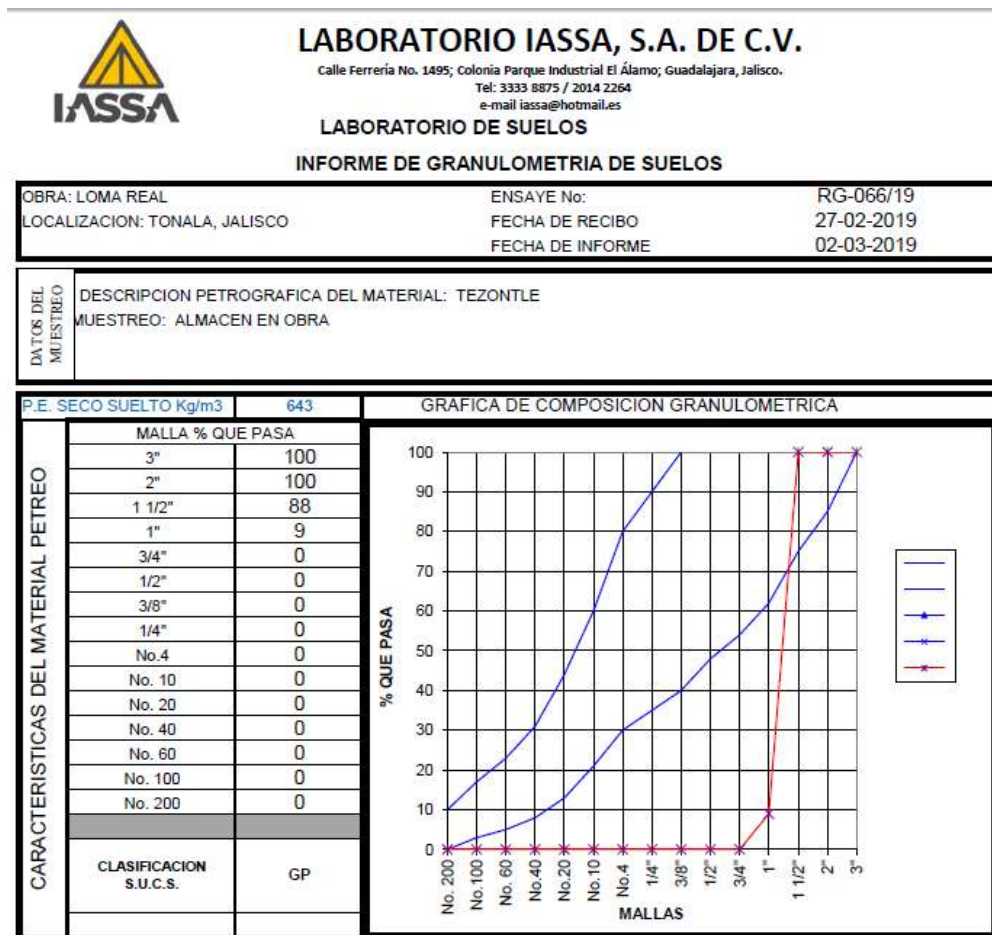
### 3.3.1 Propuesta de capa de tezontle sobre cubierta de vivienda existente

Entre los objetivos de este TOG está la caracterización del material que se empleará para demostrar o refutar la hipótesis planteada. El material que se seleccionó en este caso es



uno ligero y de granulometría uniforme, correspondiente al *Banco San Bartolo* <sup>(12)</sup> ubicado en el municipio de El Salto. La granulometría del material es de 1 ½", misma que se corrobora en la *Figura 3.10*, donde se presenta su curva granulométrica y peso volumétrico. Dicho peso originalmente fue tasado en 643 kg/m<sup>3</sup>, mientras que un análisis final arrojó los siguientes valores:

- Peso volumétrico seco suelto (a granel) = 722 kg/m<sup>3</sup>
- Peso volumétrico seco compacto (a granel) = 780 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad relativa = 1.38
- Absorción = 29.1%



**Figura 3.10** Resultados de Granulometría de materiales tezontle Banco San Bartolo. Fuente: ensaye particular solicitado a Laboratorio de Mecánica de Suelos acreditado.

<sup>12</sup> El inventario de Bancos de la SCT año 2017 identifican 2 bancos de tezontle en las inmediaciones del AMG, San Bartolo y Club de Leones. El autor de este TOG señala la existencia de varios más entre las carreteras Guadalajara-Colima y Guadalajara-Tepic, en un arco que comprendería las inmediaciones de La Primavera.

Abundando en las características de selección del material. Un tamaño menor o inferior a 3/4" se considera que obstruiría los bajantes de aguas pluviales comunes en las azoteas de vivienda con techos planos, a la vez que sería más susceptible de ser levantada por la lluvia o el viento, situación que se correspondería con estudios del desempeño de la grava en cubiertas y su incidencia en accidentes en presencia de viento moderado (*e.g. Masters & Gurley, 2007*). Por otra parte, tamaños mayores 1 1/2" no son comerciales al menudeo, ya que después de las 3" se le considera material en greña propio para rellenos, lo que implica que el material no es cribado, con presencia de finos y sobretamaños, lo que lo vuelven impráctico para el fin buscado.

Otras propiedades volumétricas medidas en laboratorio y que se corresponden a su comportamiento en presencia del agua serán tratadas en el *Capítulo 5*. El peso al que se hará referencia en este TOG será los 722 kg/m<sup>3</sup> (material sin compactación) y tamaño de partícula de 1 1/2". Dicho peso es un valor por debajo de los documentados en otras investigaciones e ideal en el sentido de no imponer una sobrecarga a la cubierta. Es importante recalcar que este peso es característico del material seleccionado y como hemos reseñado en párrafos anteriores, el mismo varía entre los 1000 a 2000 kg/m<sup>3</sup>. No se debe obviar que el peso volumétrico del material acota el tamaño de la partícula y el espesor total de la capa de material que se podría manejar sobre una cubierta.

Partiendo de estos datos, en la *Tabla 3.9* se señalan los pesos o cargas muertas que se obtienen sobre la azotea en función de espesores propuestos de una capa de este material. Con fines comparativos, se indican variaciones en el peso del material de 1000, 1500 y 2000 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 3.9 Configuraciones de tezontle en diferentes espesores y pesos por m<sup>2</sup>. Fuente: elaboración propia**

Espesor de la capa sobre la azotea (m) en partículas 1 1/2"		Peso volumétrico del material (kg/m <sup>3</sup> )			
		722.00	1,000.00	1,500.00	2,000.00
		Peso del material o carga muerta generada (kg/m <sup>2</sup> )			
1 capa	<u>0.0381</u>	<u>27.51</u>	38.10	57.15	76.20
2 capas	<u>0.0762</u>	<u>55.02</u>	76.20	114.30	152.40
3 capas	0.1143	82.52	114.30	171.45	228.60
4 capas	0.1524	110.03	152.40	228.60	304.80

Respecto a las consideraciones que se expusieron para el uso de este material, el anterior ejercicio sirve como parámetro inicial para identificar un *rango de operación seguro* para la realización del experimento en una vivienda existente. Con fines normativos y de seguridad, los Reglamentos de Construcción tanto de los municipios del AMG como el Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF), indican que en las azoteas con pendientes menores al 5% se debe considerar en su diseño una carga viva de 100 kg/m<sup>2</sup> (en el [Anexo 4.1](#) se dan mayores detalles respecto a esta carga límite). Por otra parte, la normativa NADF-011-AMBT-2007 sobre azoteas verdes de la Ciudad de México señala que, para un sistema de naturación tipo extensivo (*i.e.* no más de 18 cm de espesor), el peso de este debe situarse entre los 110 a 140 kg/m<sup>2</sup>, un valor límite que considera las capacidades estructurales de las azoteas.

Nunca se debe subestimar el hecho que *toda carga impuesta adicionalmente a una estructura debe ser analizada cuando la misma sobrepasa el diseño original del elemento constructivo que la soporta* (un análisis más explícito sobre el comportamiento estructural de una azotea se expone en el [Capítulo 6](#)). Tomando en cuenta las normativas señaladas y los datos en la [Tabla 3.9](#), se concluyó que el experimento de campo se efectuaría en un primer término con una capa de 0.0381 m de espesor (*i.e.* 27.51 kg/m<sup>2</sup>) y posteriormente una segunda capa para completar los 0.0762 m de espesor (*i.e.* 55.02 kg/m<sup>2</sup>). Dentro de estos márgenes, se operaría por debajo de los 100 kg/m<sup>2</sup> solicitados por reglamentación en toda azotea, considerando adicionalmente que la propuesta presente sobrecargas por un material saturado (lluvias) o tránsito de personas (carga concentrada).

### 3.4 Normativas aplicables a la presente investigación

La propuesta planteada en este TOG es de carácter práctico. Se consideran los materiales comunes en la región de estudio, sus condiciones ambientales y el hecho de que no existe reglamentación en específico que regule la implementación del material propuesto. Por consiguiente, se hace necesario el uso de distintas normas y especificaciones e interpretarlas con la mayor consistencia posible, a fin de no poner en riesgo la estabilidad de la edificación y la seguridad de sus habitantes. En ese sentido, las normas y

reglamentaciones a las que se harán referencia son de índole técnico, quedando aquellas relacionadas con los entornos económico y social más allá del alcance de este trabajo.

Como se reseñó en secciones anteriores, el *Código de Edificación de Vivienda* (CEV) Edición 2017 es nuestro primer documento regulatorio con respecto a lo que podemos y no podemos hacer con el diseño, construcción y/o modificación de una vivienda. Adicionalmente, el CEV enumera las siguientes normas de índole térmico que se hace necesario consultar:

- *NMX-C-460-ONNCCE-2009* “Industria de la Construcción - Aislamiento Térmico - Valor “R” para las envolventes de Vivienda por Zona Térmica para la República Mexicana. - Especificaciones y Verificación.”
- *NOM-018- ENER-2011* “Aislantes Térmicos para Edificaciones. - Características y Métodos de Prueba.”
- *NOM-020- ENER-2011* “Eficiencia Energética en Edificaciones. – Envoltorio de Edificios para Uso Habitacional.”
- *NMX-AA-164-SCFI-2013* “Edificación sustentable. - criterios y requerimientos ambientales mínimos.”

En términos hidrológicos, se hace mención con carácter consultivo en este trabajo a la norma *N-CMT-3-04-001-05 - Materiales para subdrenes* <sup>(13)</sup>, si bien hay que aclarar que esta norma corresponde a la Normativa para la Infraestructura Carretera. Igualmente se hace consulta de lo enunciado en los *Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidad*, en sus apartados de alcantarillado pluvial, hidrología superficial urbana e infiltración pluvial, documento elaborado por el SIAPA y que es el organismo facultado para regular los proyectos hidrosanitarios en el AMG. También se consulta del *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* editado por la CNA.

En términos constructivos y estructurales, cada municipio del AMG cuenta con su propio reglamento de construcción en diferentes ediciones, por lo que en específico se consultara

---

<sup>13</sup> Normativa oficial elaborada y avalada por el Instituto Mexicano del Transporte y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) - Gobierno de México.

el *Reglamento de Construcción del Municipio de Zapopán* del año 2003 <sup>(14)</sup> y el *Reglamento de Construcción del Municipio de Guadalajara* del año 1997, ambos en sus apartados de seguridad estructural. Se considera a su vez que estos documentos están regidos por lo señalado en el *Reglamento de Construcción para el Distrito Federal (RCDF)* y sus *Normas Técnicas Complementarias (NTC)* de los años 2004 y 2017. Otros documentos de carácter consultivo son la *NADF-013-RNAT-2017 Especificaciones Técnicas para la Instalación de Sistemas de Naturación en el Distrito Federal* y la *NMX-C-406-1997-ONNCCE*<sup>(15)</sup> *Sistema de Vigüeta y Bovedilla y Componentes Prefabricados Similares para Losas*.

### 3.5 Conclusiones del capítulo

El AMG cuenta con un clima templado de acuerdo a la clasificación Köppen (*i.e.* semiseco-semihúmedo y semicálido-semihúmedo), con una temperatura promedio de 22°C, con máximas y mínimas de 32.0 y 10 °C respectivamente. Sin embargo y como se puede constatar en los registros meteorológicos, se tiene picos de temperatura de hasta 40° C, siendo los meses más calurosos entre abril y julio. A nivel de lluvias, se documenta un valor entre los 800 y los 1000 mm de precipitación acumulada anual, siendo los meses de junio a septiembre donde se concentra el temporal de lluvias. Se constata a su vez que las principales cuencas que reciben dicha precipitación se encuentran mayoritariamente urbanizadas, lo que avala la problemática de inundaciones indicada en el [Capítulo 1](#).

El crecimiento y urbanización acelerada del AMG en las últimas décadas queda igualmente documentado, resaltando que haya tasas de crecimiento que superan el 200% tan solo en la década del año 2000 al 2010, atribuible mayoritariamente a vivienda masiva. Se distingue particularmente la vivienda de interés social dentro de este crecimiento, identificada como un tipo de construcción de dimensiones y espacios reducidos dirigido a los sectores trabajadores de la población.

---

<sup>14</sup> Existe una edición correspondiente al año 2017, pero la misma se encontró reducida en comparación de los lineamientos indicados en 2003.

<sup>15</sup> Existen versiones más actualizadas correspondientes a los años 2014 y una en trámite del año 2019.

El material de tezontle se identifica como material de escoria volcánica, abundante en la periferia del AMG, en concordancia geológica con el origen volcánico de muchos accidentes topográficos en la zona. Se identifica que el material a emplear en este TOG posee un peso específico de  $722 \text{ kg/m}^3$ , un valor ideal para utilizarse como capa de recubrimiento sobre la azotea de viviendas de interés social, pero que igualmente dista de los valores promedios indicados en otras investigaciones. Sobre la implementación del tezontle en una vivienda existente, se expusieron los criterios iniciales en los que se fundamenta el espesor propuesto para la capa de estudio sobre la azotea. Se observa que la combinación del *peso volumétrico del material* y las *capacidades estructurales de la azotea* son una limitante a revisar detalladamente, optándose en este caso por instalar no más de dos capas en la vivienda, lo que equivale a un espesor de 0.0762 m.

Finalmente, se señala el CEV como la normativa principal a revisar en este TOG, atendiendo particularmente lo señalado en dicho documento respecto a normas de índole térmico como son la NMX-C-460-ONNCCE-2009 y la NOM-020- ENER-2011. En el apartado pluvial, se revisará principalmente lo señalado en los Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidad del SIAPA, mientras que para la evaluación estructural se revisará los reglamentos municipales locales y el Reglamento de Construcción del Distrito Federal, entre otras normativas y especificaciones afines.

# Capítulo 4

## *Implementación del tezontle para mejorar el confort térmico en una vivienda*

---

### 4.1 Introducción

En este capítulo se plasman los resultados obtenidos de la experimentación con el tezontle en la azotea de una vivienda existente. Se describen inicialmente los datos de temperatura y humedad que permitan determinar una *zona de confort térmico* característica del AMG y que sirvan como valor de referencia. A continuación, se exponen los resultados de la medición de temperaturas en la vivienda donde se implementa la propuesta de tezontle y las particularidades del experimento (periodo de tiempo, material empleado, etc.). Se cierra el capítulo con una evaluación teórica de la propuesta bajo la *NOM-020-ENER-2011*, norma que se describe en el presente Capítulo.

### 4.2 Análisis bioclimático, zonas de confort higrotérmico y registro de temperaturas

#### 4.2.1 Análisis bioclimático y zonas de confort

Un *análisis bioclimático* implica analizar con detalle diferentes parámetros descritos en el *Capítulo 2*. Como se señaló en dicho capítulo, algunas de las magnitudes físicas del clima son la temperatura, la humedad y la precipitación, entre otros. Estos elementos a su vez se corresponden con un *grado de confort higrotérmico*, dato que debemos determinar para contrastar con la información experimental que estamos analizando. La información base que se recabó para determinar dicho grado de confort corresponde a las *normales climatológicas* del periodo 1981-2010<sup>(16)</sup>. Se trata de los datos registrados en tres estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) identificadas como 14065, 14066 y 14132, ubicadas respectivamente al norponiente, centro y suroriente de Guadalajara (ver

---

<sup>16</sup> Para CNA (2019), estas normales son datos calculados con registros de por lo menos 10 años de antigüedad.

Fig. 4.1). Los datos completos de dichas normales pueden ser consultados en el [Anexo A2.1](#), mientras que un resumen promediado de los mismos se presenta en la [Tabla 4.1](#)

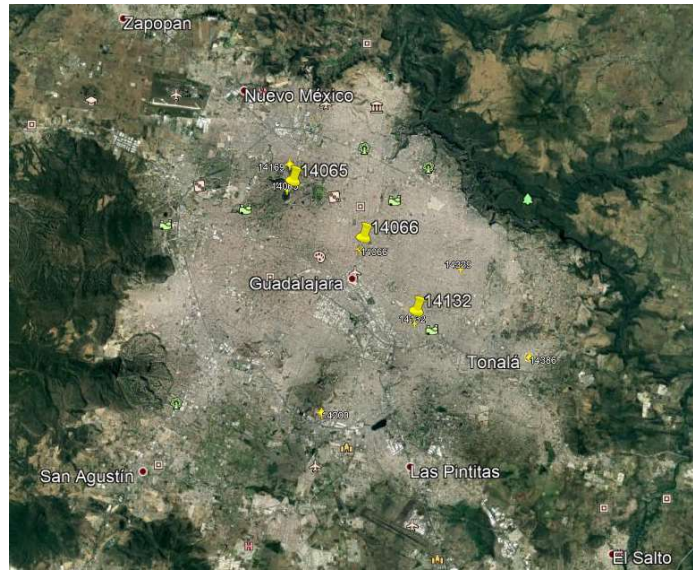


Figura 4.1 Estaciones meteorológicas consultadas para datos de normales climatológicas en el AMG. Fuente: (CNA, 2019; Google Earth Pro®, 2019)

En la [Tabla 4.1](#), los datos de temperatura son el promedio calculado entre las tres estaciones, mientras que la humedad relativa, al no ser un dato registrado, se calcula en forma indirecta mediante las expresiones:

- $RH = 98.4554 - 2.618 O_sT$  Ecuación 4.1

- $O_sT = T_{max} - T_{min}$  Ecuación 4.2

Donde  $RH$  es la humedad relativa y  $O_sT$  es la oscilación de temperatura. La [Ecuación 4.2](#) es utilizada por [Gómez-Amador \(2009\)](#) y es retomada por [Ramírez-Sánchez et al. \(2012\)](#). Para la determinación del área de confort, este trabajo hace uso de la hoja de cálculo "[Bioclimart 2016](#)" (e.g. [Gómez-Azpeitia, 2016](#)). En dicha hoja es posible graficar los datos registrados en la [Tabla 4.1](#), a la vez que es posible considerar valores relacionados con la vestimenta y ventilación de las edificaciones, datos que como también mencionamos en el [Capítulo 2](#), impactan con nuestra sensación de confort. El llenado de esta hoja se puede consultar en el [Anexo A2.2](#). Los resultados de este cálculo se presentan a su vez en la [Tabla 4.2](#) y en los [Gráficos 4.1, 4.2 y 4.3](#).



**Tabla 4.1 Normales promedio de las estaciones climatológicas revisadas. Fuente: (CNA, 2019)**

NORMALES CLIMATOLÓGICAS PROMEDIO AMG 1981-2010

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMP. MÁXIMA °C	24.6	26.6	29.0	31.4	32.7	30.8	28.0	27.8	27.4	27.3	26.5	24.8
MÁXIMA MENSUAL	27.3	28.8	31.5	34.3	35.1	34.6	30.0	29.4	29.2	29.0	28.3	27.3
TEMP. MEDIA °C	16.5	18.0	20.0	22.5	24.2	23.9	22.1	22.0	21.7	20.8	18.8	16.9
TEMP. MÍNIMA °C	8.5	9.4	11.0	13.5	15.7	16.9	16.3	16.2	16.1	14.3	11.0	9.1
MÍNIMA MENSUAL	6.2	5.5	8.1	10.1	13.6	15.0	14.7	14.3	13.8	11.1	8.6	6.3
OSCILACIÓN (Tmax-Tmin)	16.0	17.2	18.0	17.9	17.0	14.0	11.7	11.6	11.4	12.9	15.4	15.7
HR (98.4554 - 2.618*OsT)	56.5	53.4	51.3	51.6	53.9	61.9	67.8	68.1	68.7	64.6	58.1	57.4
PRECIPITACIÓN mm	16.6	8.6	4.2	4.1	21.9	180.8	238.0	196.5	160.6	56.5	12.6	6.0
MÁXIMA MENSUAL	216.1	100.5	59.8	63.8	99.3	471.1	466.2	372.8	411.0	174.9	83.8	36.4

Álvarez-Partida (2017) detalla la existencia de por lo menos tres modelos matemáticos que intentan relacionar el clima con la sensación de confort, siendo estos de *neutralidad térmica*, *adaptativo* y *voto promedio predicho*. En el modelo de neutralidad, Álvarez señala que dicha sensación se establece con una temperatura del aire en la cual la gente no siente ni frío ni calor, pudiendo ser expresada mediante la fórmula:

- $T_n = 17.6 + 0.31 T_m$  **Ecuación 4.3** <sup>(17)</sup>

Donde  $T_n$  es una temperatura neutra o de confort y  $T_m$  es la temperatura media (Szokolay, citado en Fuentes-Freixanet, 2002). Cabe aclarar sin embargo que en la hoja *Bioclimart 2016*, dicho valor se calcula con una variación en la expresión (*i.e.*  $T_n=17.8+0.31 T_m$ ). A su vez, sobre el valor de temperatura de confort calculado, diferentes autores manejan rangos que van de los  $\pm 2.5$  a los  $\pm 1.75$  °C. Estas holguras adicionales funcionan como límites mínimos y máximos respectivos de la zona de confort (*e.g.* Fuentes-Freixanet, 2002; Álvarez-Partida, 2017). En todo caso, se debe considerar que la zona de confort no es estática en todo el año, ya que el cuerpo humano se aclimata al frío y al calor, por lo que la temperatura estimada debe revisarse para cada mes (ver *Tabla 4.2*).

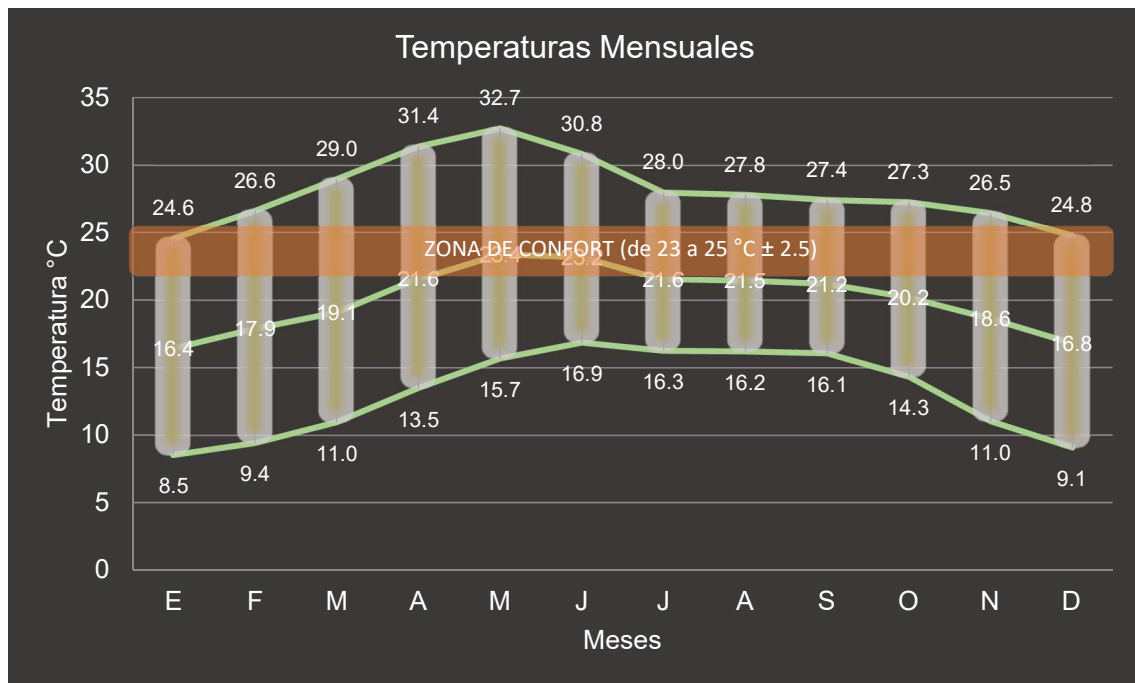
---

<sup>17</sup> Fe de erratas: En el trabajo de Fuentes-Freixanet (Fuentes-Freixanet, 2002), la fórmula es indicada como  $17.6*0.31 T_m$ , debiendo ser  $17.6+0.31 T_m$

**Tabla 4.2 Temperaturas y humedades relativas horarias, oscilación de temperatura y temperatura de confort calculada por mes en el AMG. Cálculo: "Bioclimart 2016"**

		TEMPERATURAS Y HUMEDADES RELATIVAS HORARIAS																						
HORA	TEMPERATURA °C												HUMEDAD RELATIVA %											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	11.9	12.9	13.2	15.6	17.6	18.4	17.6	17.5	17.5	16.1	14.3	12.5	69.3	66.7	67.6	68.1	70.5	78.4	83.6	83.7	83.8	80.0	70.7	70.1
2	11.2	12.1	12.7	15.1	17.1	18.0	17.3	17.2	17.1	15.7	13.6	11.8	71.4	68.5	68.9	69.3	71.6	79.5	84.7	84.8	85.0	81.4	72.7	72.1
3	10.6	11.5	12.3	14.7	16.8	17.8	17.0	17.0	16.9	15.4	13.1	11.2	73.0	70.1	69.9	70.2	72.5	80.4	85.5	85.6	85.9	82.4	74.3	73.8
4	10.2	11.1	12.0	14.4	16.5	17.5	16.8	16.8	16.7	15.1	12.6	10.7	74.3	71.3	70.7	70.9	73.2	81.0	86.2	86.3	86.6	83.2	75.6	75.1
5	9.8	10.7	11.7	14.2	16.3	17.4	16.7	16.6	16.5	14.9	12.2	10.3	75.3	72.3	71.3	71.4	73.7	81.5	86.7	86.8	87.2	83.8	76.6	76.2
6	9.5	10.4	11.5	14.0	16.2	17.3	16.6	16.6	16.4	14.8	12.0	10.1	76.1	73.0	71.7	71.7	74.0	81.8	86.9	87.1	87.6	84.3	77.4	77.0
7	9.4	10.3	11.5	15.1	17.7	18.6	17.6	17.2	16.4	14.7	11.8	9.9	76.5	73.2	71.7	69.2	70.3	77.8	83.4	84.7	87.6	84.4	77.8	77.4
8	9.7	11.3	15.3	19.0	21.6	21.9	20.3	19.8	18.8	16.5	12.2	10.1	75.5	70.7	62.7	59.9	60.5	67.9	74.1	75.9	79.2	78.5	76.8	76.8
9	12.6	14.7	19.9	23.6	26.0	25.5	23.4	22.8	21.7	19.7	14.9	12.8	67.5	62.1	51.5	48.7	49.4	57.0	63.5	65.4	68.8	68.1	69.0	69.2
10	16.3	18.8	24.3	27.7	29.8	28.5	25.9	25.4	24.5	23.0	18.5	16.4	57.1	51.6	41.0	38.9	40.0	47.8	54.6	56.1	59.0	57.4	58.8	58.9
11	20.0	22.5	27.5	30.6	32.2	30.5	27.6	27.3	26.5	25.6	22.0	20.0	46.9	41.8	33.2	32.1	33.7	41.8	48.7	49.7	51.8	48.8	48.7	48.7
12	22.9	25.4	29.3	32.0	33.3	31.4	28.4	28.2	27.6	27.2	24.8	22.9	38.8	34.5	28.9	28.8	30.9	39.2	46.0	46.6	47.8	43.6	40.7	40.4
13	24.7	27.1	29.7	32.0	33.3	31.3	28.3	28.2	27.9	27.8	26.6	24.8	33.7	30.2	27.8	28.6	31.1	39.5	46.2	46.4	46.9	41.7	35.6	35.0
14	25.5	27.6	29.1	31.2	32.3	30.4	27.7	27.6	27.5	27.5	27.3	25.6	31.6	28.8	29.4	30.7	33.5	41.9	48.5	48.4	48.4	42.6	33.5	32.7
15	25.3	27.2	27.7	29.6	30.8	29.2	26.6	26.7	26.6	26.7	27.2	25.5	32.2	29.8	32.7	34.3	37.3	45.7	52.1	51.8	51.5	45.4	34.0	33.1
16	24.4	26.1	25.9	27.8	29.0	27.7	25.4	25.4	25.5	25.4	26.3	24.7	34.7	32.6	37.1	38.8	41.8	50.2	56.4	56.0	55.5	49.4	36.5	35.4
17	23.0	24.6	23.9	25.8	27.1	26.1	24.1	24.2	24.2	24.0	25.0	23.4	38.5	36.6	41.9	43.6	46.6	54.9	60.9	60.5	60.0	54.0	40.2	39.1
18	21.4	22.8	21.9	23.8	25.3	24.7	22.8	22.9	23.0	22.6	23.4	21.8	43.0	41.2	46.7	48.2	51.2	59.5	65.3	64.9	64.4	58.7	44.7	43.6
19	19.7	21.0	20.0	22.1	23.6	23.3	21.7	21.7	21.8	21.2	21.8	20.1	47.7	45.9	51.1	52.5	55.4	63.6	69.3	69.0	68.5	63.1	49.4	48.3
20	18.0	19.2	18.4	20.5	22.1	22.1	20.7	20.7	20.7	20.0	20.2	18.5	52.4	50.4	55.2	56.4	59.2	67.3	72.9	72.6	72.3	67.2	54.0	53.0
21	16.5	17.6	16.9	19.1	20.8	21.0	19.8	19.8	19.8	18.9	18.7	17.0	56.7	54.6	58.6	59.7	62.4	70.5	75.9	75.7	75.5	70.8	58.2	57.3
22	15.1	16.1	15.7	17.9	19.8	20.2	19.0	19.1	19.1	18.0	17.3	15.6	60.6	58.3	61.6	62.5	65.1	73.1	78.5	78.4	78.2	73.8	62.1	61.3
23	13.8	14.9	14.7	17.0	18.9	19.4	18.4	18.4	18.4	17.2	16.2	14.4	64.0	61.6	64.0	64.7	67.3	75.3	80.6	80.5	80.5	76.3	65.5	64.7
24	12.8	13.8	13.9	16.2	18.2	18.9	18.0	17.9	17.9	16.6	15.1	13.3	66.9	64.4	66.0	66.6	69.1	77.0	82.3	82.3	82.3	78.4	68.3	67.6
Promedio	16.4	17.9	19.1	21.6	23.4	23.2	21.6	21.5	21.2	20.2	18.6	16.8	56.8	53.8	53.4	53.6	55.8	63.8	69.7	70.0	70.6	66.6	58.4	57.8
Oscilación	16.1	17.3	18.2	18.0	17.1	14.1	11.8	11.7	11.5	13.1	15.5	15.7	44.8	44.4	43.9	43.2	43.0	42.6	40.8	40.7	40.7	42.7	44.3	44.7
Confort	22.9	23.4	23.7	24.5	25.1	25.0	24.5	24.5	24.4	24.1	23.6	23.0												

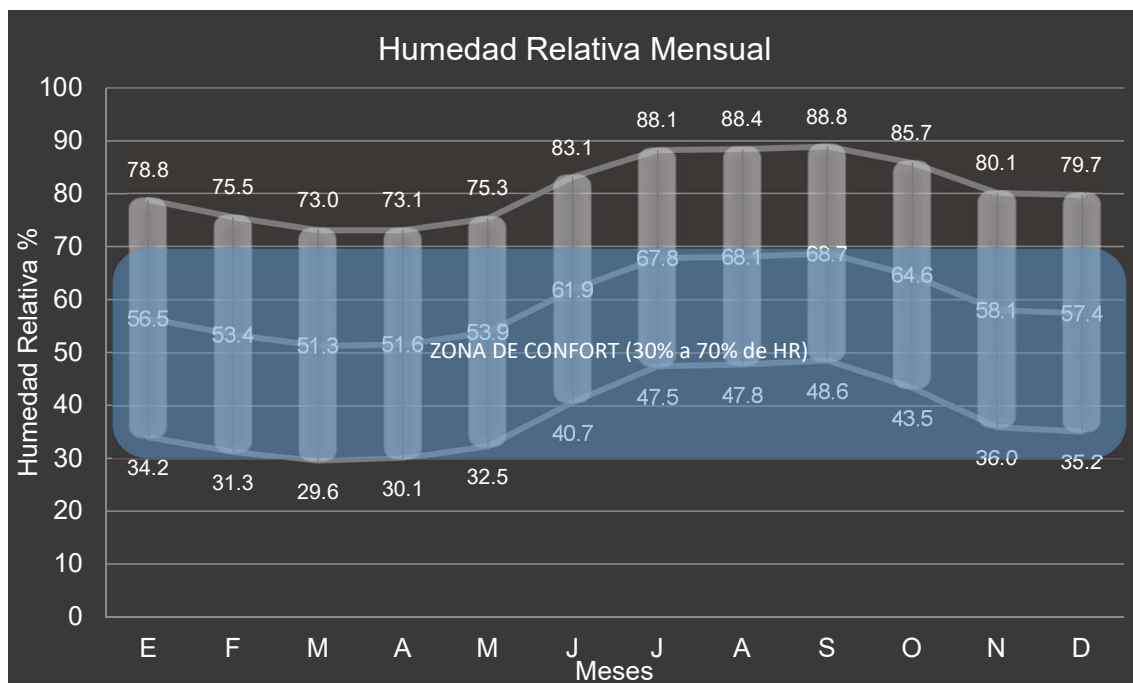
**Gráfico 4.1 Temperaturas mensuales AMG y área de confort estimada ya sobrepuesta. Cálculo: "Bioclimart 2016"**



Para determinar nuestra *temperatura de confort*, de la [Tabla 4.2](#) y la variante de la [Ecuación 4.3](#) empleada por [Bioclimart 2016](#), obtenemos que el rango de esta en el AMG se ubica entre los 23°C (*i.e.* 22.9 °C en enero) y los 25°C (*i.e.* 25.1 °C en mayo).

Observando la [Gráfica 4.1](#), podemos constatar que incluso con rangos de  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$  (*e.g.* [Fuentes-Freixanet, 2002](#)) sumados a los 25 y 23°C estimados, las temperaturas máximas y mínimas siempre se encuentra fluctuando por arriba o por debajo de la zona de confort que calculamos, (*i.e.* en mayo de hasta  $32.7-27.5 = 5.2^{\circ}\text{C}$  por encima del rango de confort; al otro extremo en enero de  $20.5-8.5 = 12^{\circ}\text{C}$  por debajo). Considerando solo la temperatura promedio, la gráfica apunta una tendencia hacia un ambiente frío, el cual cambia solo en los meses de marzo a junio.

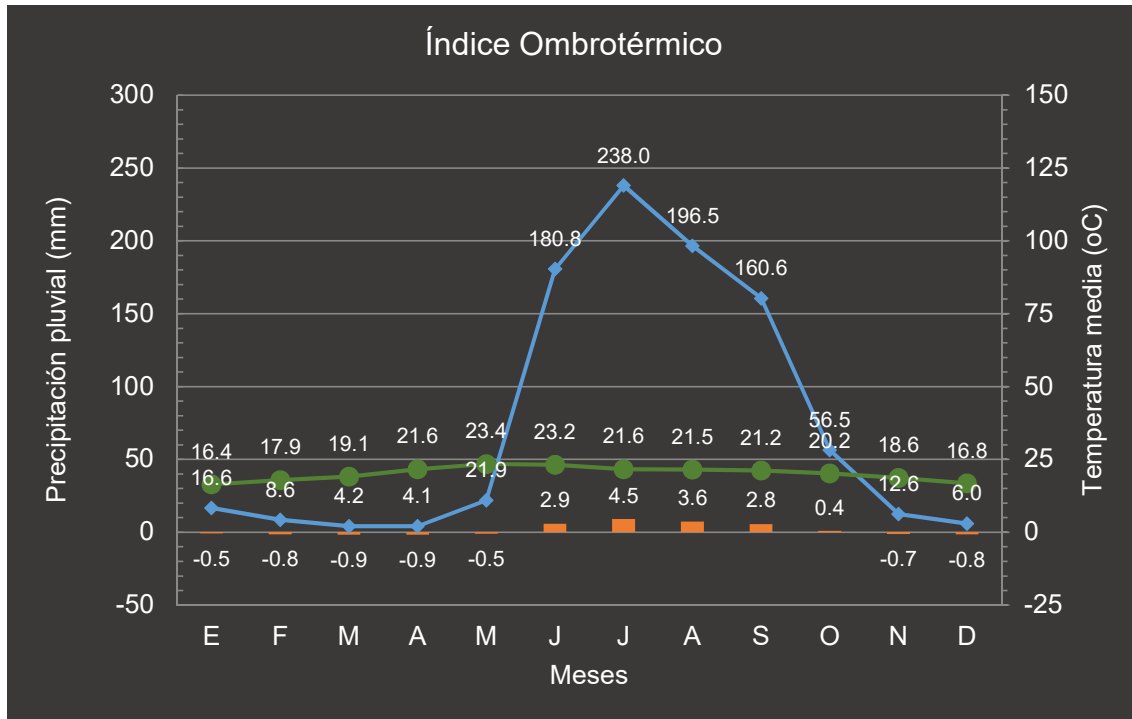
**Gráfico 4.2 Humedad Relativa Mensual AMG y área de confort sobrepuesta. Cálculo: “Bioclimart 2016”**



Sobre la *humedad relativa*, [Fuentes-Freixanet \(2002\)](#) considera que los rangos de confort son muy variables, debiendo marcar como límites rangos que se sitúan entre el 30% y 70% de humedad. Considerando dichos límites en la [Gráfica 4.2](#), se aprecia que el AMG se encuentra mayoritariamente en una zona confort, cambiando dicha situación solamente en los meses de junio a octubre. Este comportamiento de la lluvia se ve reflejado en la [Gráfica](#)

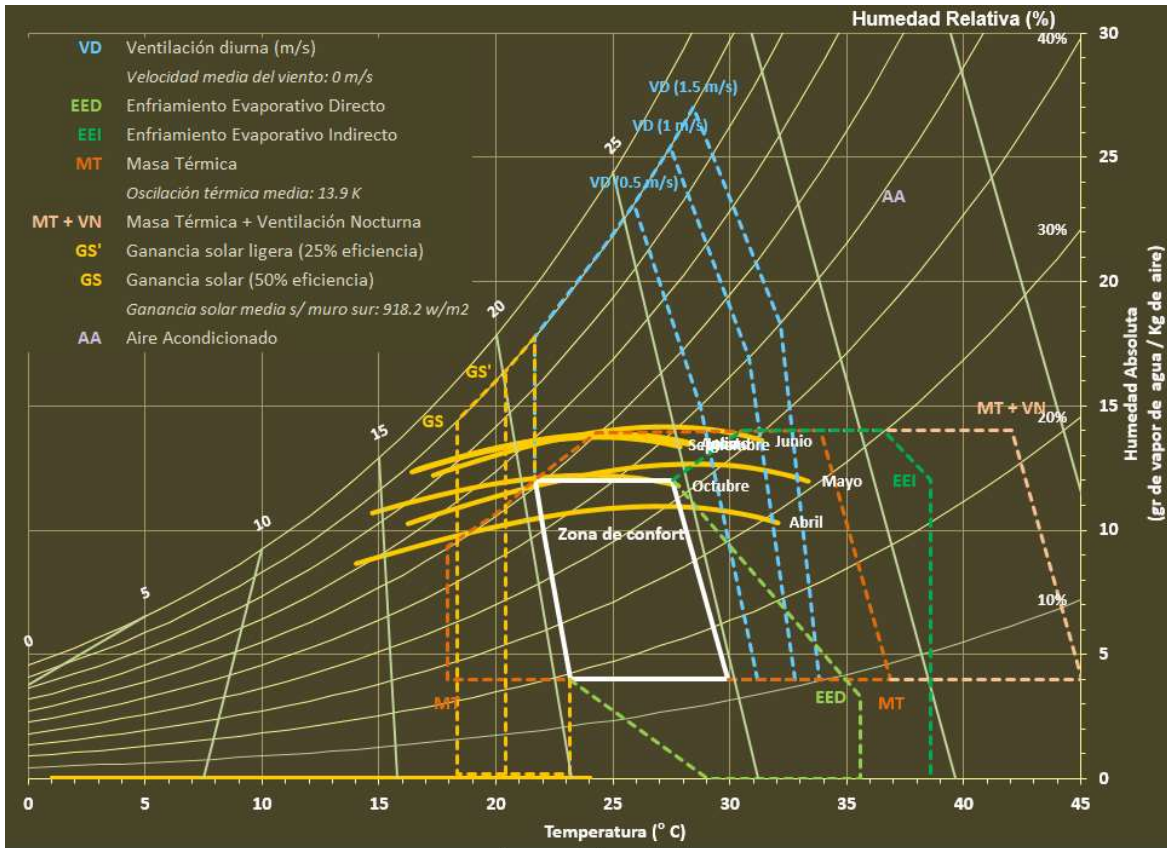
4.3 que presenta el *índice ombrotérmico*, siendo este el cociente de relacionar la altura de precipitación con la temperatura media.

Gráfico 4.3 Índice ombrotérmico AMG. Cálculo: "Bioclimart 2016"



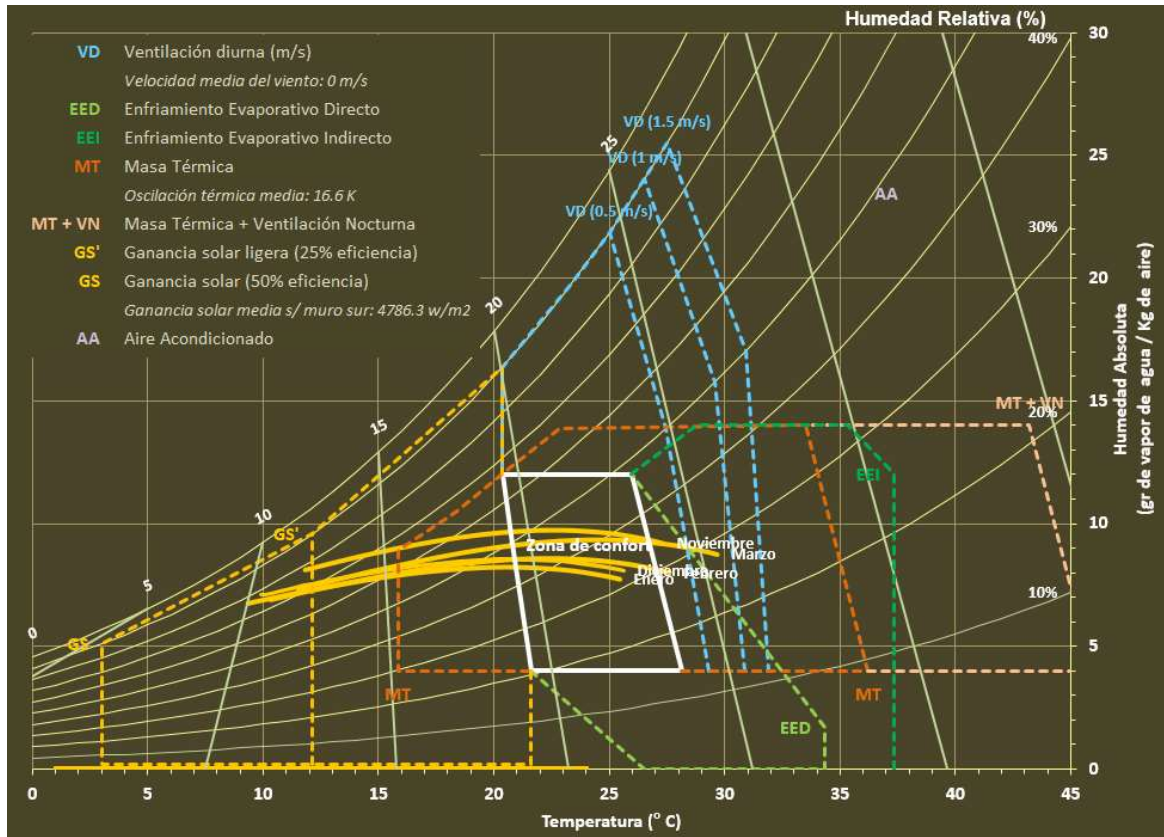
La parte final del análisis con la hoja *Bioclimarq 2016* grafica el *diagrama psicrométrico de Givoni-Szokolay* desarrollado por [Gómez-Azpeitia \(2016\)](#). En el *Grafico 4.4*, se presenta el diagrama que corresponde a los meses cálidos-subhúmedos, pudiendo apreciar que la relación temperatura/humedad de cada mes (*i.e.* líneas parabólicas amarillas) se desplazan por encima de la zona de confort, con temperaturas y humedades relativas aproximadamente por encima de los 28°C y 30% respectivamente. Como se indica en el *Capítulo 2*, este tipo de grafico cuenta con zonas de confort ajustables. En este caso, la interpretación del *Gráfico 4.4* propone soluciones que implican bajar la temperatura, tales como generar ventilación diurna, aumentar la masa térmica o generar un enfriamiento evaporativo. Estas estrategias deben analizarse con más detalle con un desglose horario por día, lo que nos permite ser más específicos.

Gráfico 4.4 Diagrama psicrométrico de Givoni-Szokolay. Temporada cálida – subhúmeda del AMG. Cálculo: “Bioclimart 2016”



Por su parte, el [Gráfico 4.5](#) corresponde al diagrama de los meses con clima templado-subhúmedo. Aquí encontramos que una buena parte de las relaciones temperatura/humedad se sitúan en áreas de confort, si bien un área inicial está desplazada a la izquierda, con temperaturas aproximadamente por debajo de los 20°C. En este caso, entre las diferentes estrategias propuestas por el gráfico, debemos destacar aquellas encaminadas a generar masa térmica y ganancia solar.

Gráfico 4.5 Diagrama psicrométrico de Givoni-Szokolay. Temporada templada – subhúmeda del AMG. Cálculo: “Bioclimart 2016”



#### 4.2.2 Datos de la vivienda de estudio y experimento de campo con tezontle

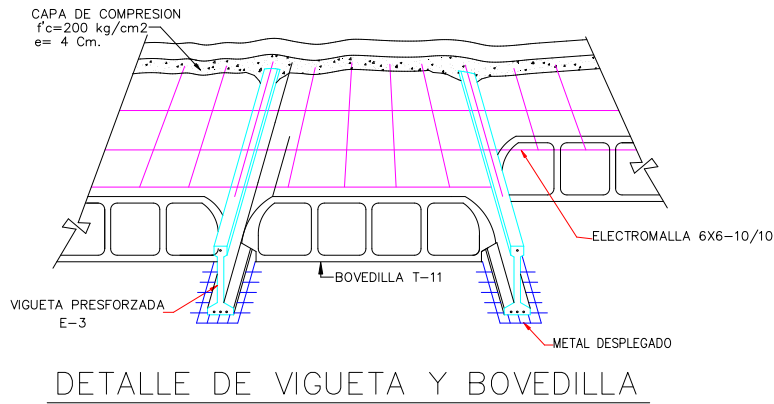
Los sistemas de azoteas a los que hace referencia este trabajo en el AMG se pueden clasificar en tres tipos: *piso de vigueta y bovedilla*, de *losa maciza* y de *losa aligerada de concreto*. Este dato se puede corroborar con información del INEGI resumida en la [Tabla 4.3](#). Como podemos observar en la tabla, estos sistemas constructivos son los que mayoritariamente se identifican en la vivienda habitada.

En el [Capítulo 3](#) se estableció que la capa a emplear en la vivienda de estudio tendría un espesor inicial de *0.0381 m* (i.e. *una capa de material*) y posteriormente una segunda capa para completar los *0.0762 m* de espesor (i.e. *dos capas de material*). Los planos de la vivienda donde se realiza el experimento y el área de la azotea donde se colocó el tezontle se presentan en la [Figura 4.3](#). Estos planos corresponden a la planta de azotea, planta alta y corte longitudinal de la vivienda. A su vez, se presenta el detalle estructural del sistema

de azotea con vigueta y bovedilla (ver *Fig. 4.2*). Dicho detalle corresponde a la casa habitación donde se colocó el tezontle.

**Tabla 4.3 Distribución porcentual del tipo de azotea empleado en la vivienda habitada del AMG, año 2010.**  
Fuente: (INEGI, 2019)

Municipio	Viviendas particulares habitadas y su distribución porcentual según resistencia de los materiales en techos					
	Viviendas particulares habitadas	Material de desecho o lámina de cartón	Lámina metálica, de asbesto, palma, paja, madera o tejamanil	Teja o terrado con vigería	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Material no especificado
El Salto	31,939	0.86	2.47	0.49	95.96	0.22
Guadalajara	381,300	0.10	0.73	2.42	95.90	0.83
Ixtlahuacán del Río	4,546	0.09	5.02	1.58	92.78	0.53
Juanacatlán	3,282	0.24	5.45	3.56	90.62	0.12
Tlajomulco de Zúñiga	97,448	0.27	1.32	1.48	95.46	1.47
Tlaquepaque	146,278	0.20	5.79	1.94	91.14	0.93
Tonalá	105,920	0.24	5.24	0.90	92.84	0.79
Zapopan	318,505	0.12	1.65	1.07	96.46	0.69
Zapotlanejo	15,766	0.00	5.21	4.83	89.69	0.27



**Figura 4.2 Detalle estructural de losa de vigueta y bovedilla, siendo este sistema uno de los más utilizados en vivienda del AMG. Fuente: elaboración propia.**

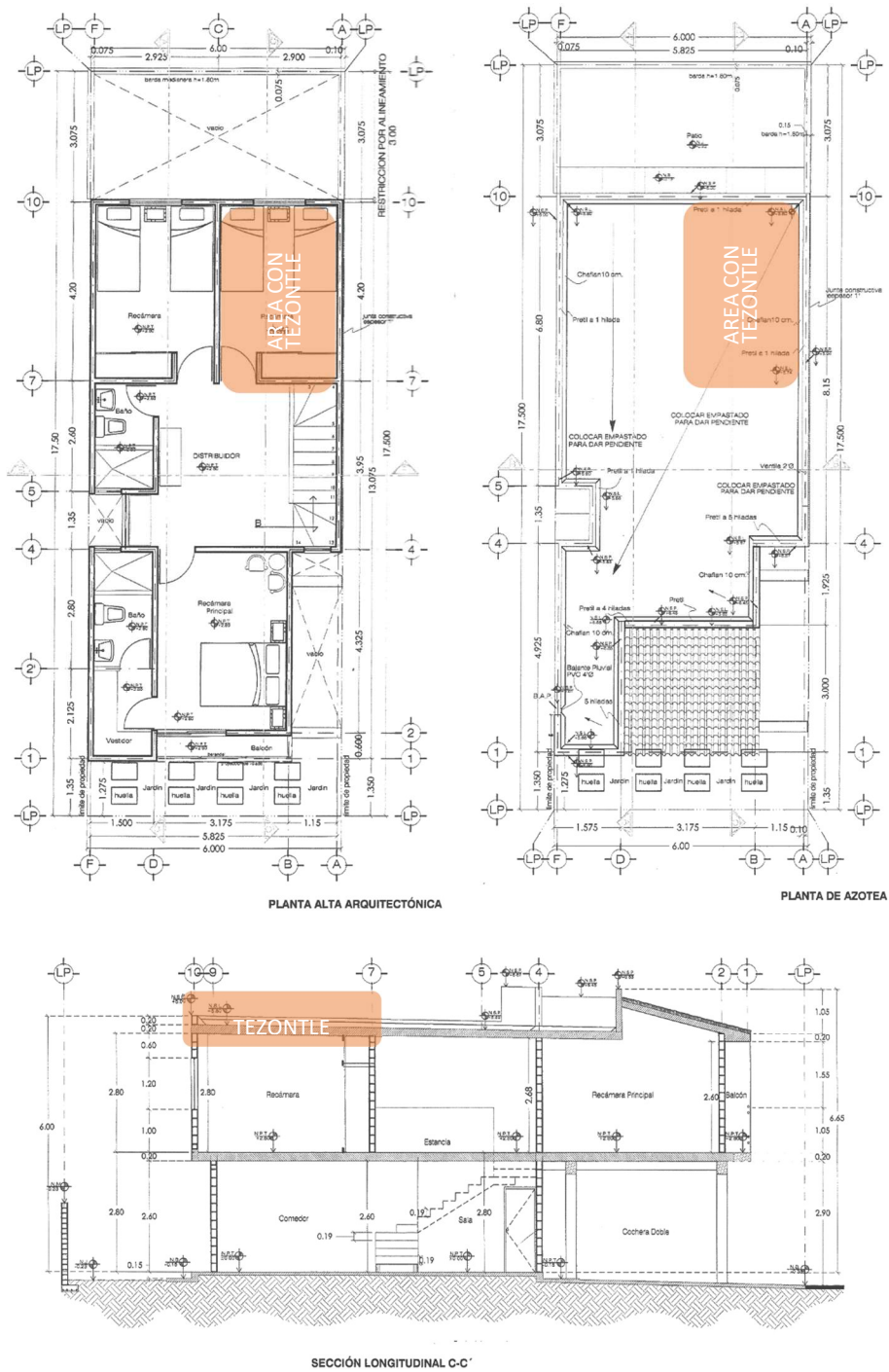


Figura 4.3 Detalles arquitectónicos de la vivienda para la prueba de campo y ubicación del tezontle. Fuente: elaboración propia

Sobre la ubicación del tezontle en la [Figura 4.3](#), se detallan en las [Figuras 4.4 \(detalles a y b\)](#) y en la [Figura 4.5 \(detalles a, b, c y d\)](#) imágenes de la cubierta durante el experimento y



los espesores que en forma manual se registraron, mismos que se corresponden con los señalados en párrafos anteriores.



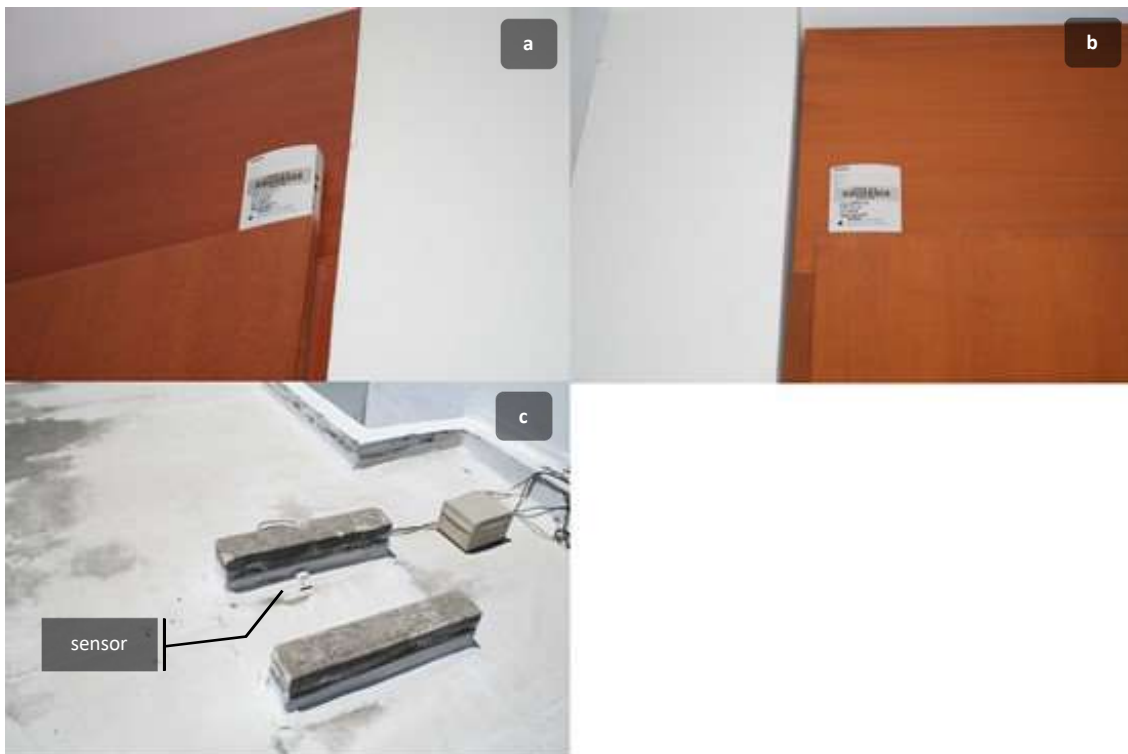
**Figura 4.4** Vista de la azotea: a) antes de colocar el tezontle; b) ya colocado sobre la recámara donde se medirán las temperaturas. Fuente: elaboración propia



**Figura 4.5** Vista de la azotea: a) primera capa; b) medición del espesor de la primera capa de 4.0 cm aprox.; c) segunda capa; d) medición del espesor de la segunda capa de 8.0 cm aprox. Fuente: elaboración propia

#### 4.2.3 Registro de temperaturas en vivienda analizada con capa de tezontle

El registro de temperatura se realizó con el empleo de tres sensores marca Hobo®, modelo U12-013 “External data logger”. La especificaciones y rangos de operación de los aparatos se detallan en el [Anexo A2.3](#), al igual que el proceso de calibración/validación de los datos registrados. Los sensores de temperatura fueron colocados en la vivienda en dos recamaras gemelas, una con el tezontle cubriendo la azotea y la otra con su azotea sin modificaciones para operar como testigo. Los sensores se dispusieron aproximadamente a 25 cm de distancia respecto al cielo raso y sobre una superficie de madera sin contacto directo con el techo. A su vez, un tercer sensor fue colocado en el exterior, permaneciendo en dicho lugar hasta que la temporada de lluvias lo permitió. Posteriormente, dicho sensor fue colocado en la recamara principal, a fin de que operara como un segundo testigo (ver [Fig. 4.6 detalles a, b y c](#)). Los sensores fueron programados para registrar datos cada 30 minutos. Los registros completos de dichos sensores se indican en los [Gráficos 4.6, 4.7 y 4.8](#), gráficos generados directamente por el software HOBOWare®.



**Figura 4.6** Posicionamiento de los sensores en las recamaras y la azotea: a) recamara con tezontle; b) recamara libre; c) azotea. Fuente: elaboración propia

Gráfico 4.6 Registros de temperatura completos en recamara con tezontle. Calculo: software HOBOWare®

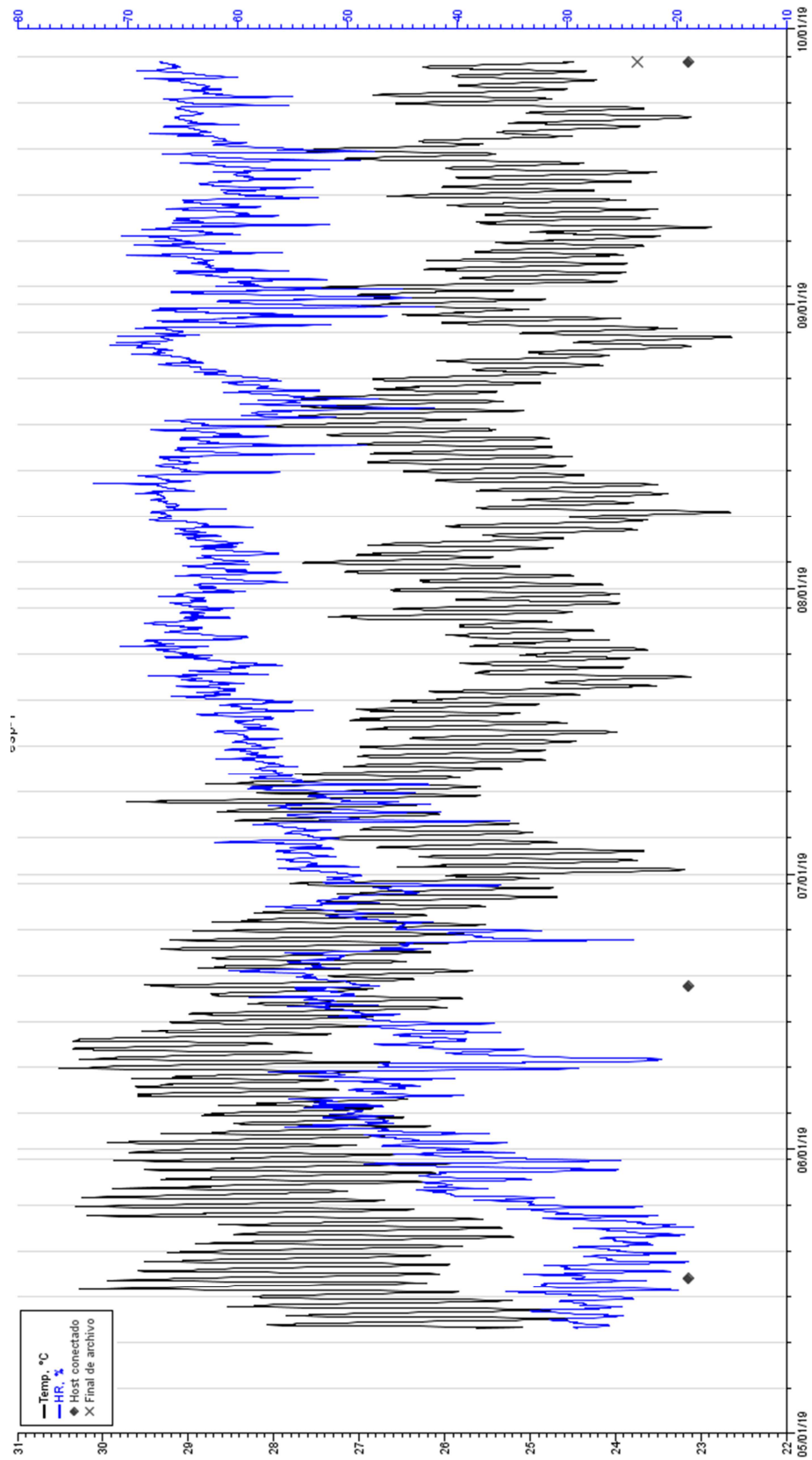


Gráfico 4.7 Registros de temperatura completos en recamara sin tezontle. Calculo: software HOBOWare®

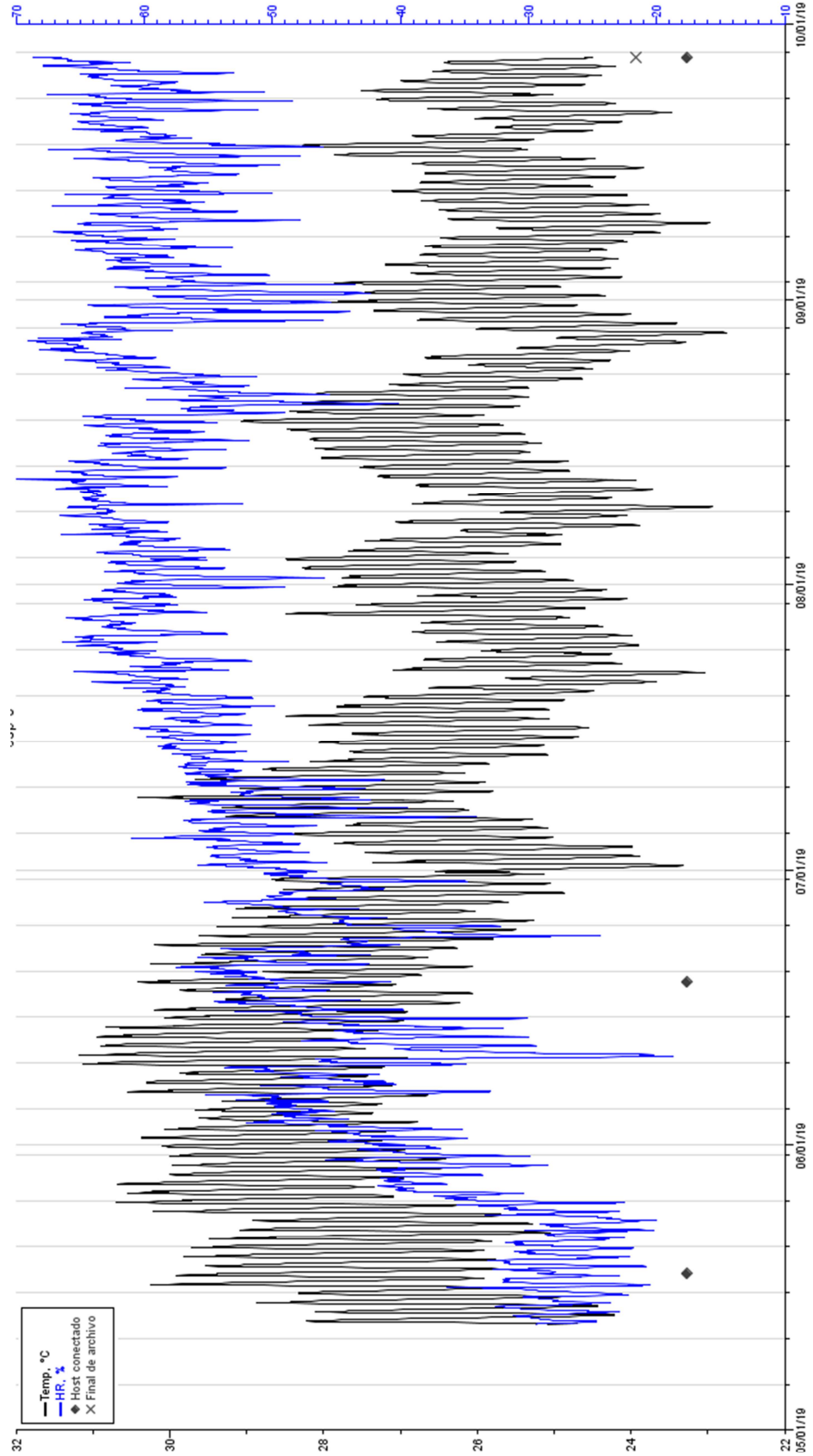
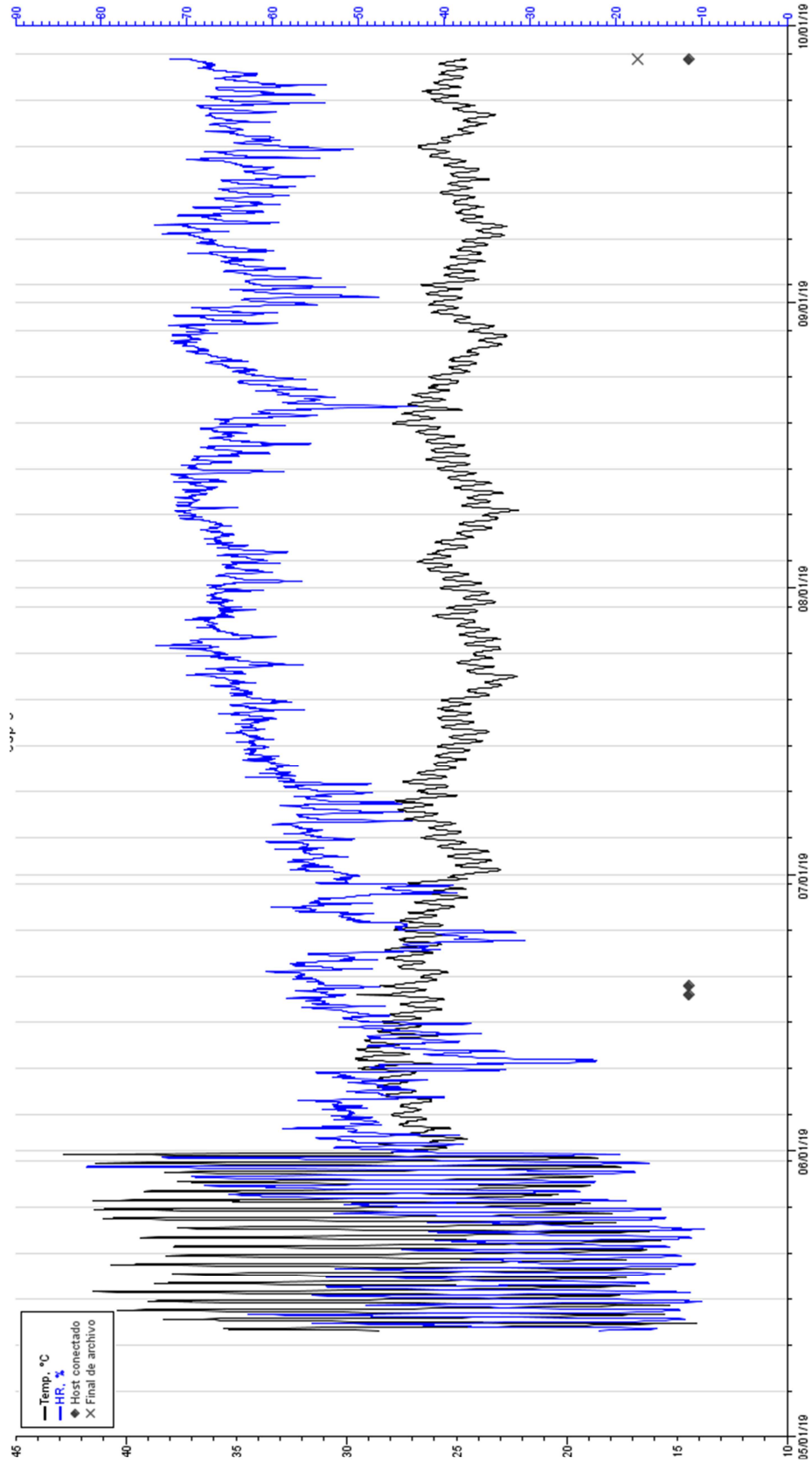


Gráfico 4.8 Registros de temperatura completos sensor en exterior/interior. Cálculo: software HOBOWare®



La [Tabla 4.4](#) y [4.5](#) resume los valores de temperatura y humedad registrados en un periodo que abarca respectivamente mayo-junio y julio-agosto del año 2019, diferenciando tres etapas: *periodo de secas con una capa de tezontle*, *periodo de secas con dos capas de tezontle* y *periodo de lluvias con dos capas de tezontle*. Las tablas consideran, en el periodo registrado, el valor por día de temperaturas y humedades (*i.e.* valores máximos, mínimos y el promedio de estos). El cálculo de dichas tablas se puede consultar en forma desglosada en el [Anexo A2.4](#), valores que a su vez se obtuvieron de los datos presentados en los [Gráficos 4.6](#), [4.7](#) y [4.8](#).

**Tabla 4.4 Resumen de registros promediados mayo-junio. R1: recamara con capa de tezontle. R2: recamara de referencia. R3: sensor adicional en el exterior/interior de la vivienda. Fuente: elaboración propia.**

No. sensor / Identificador	Ubicación en la vivienda	Inicio de registro	Final de registro	Temp Max °C	Temp Min °C	Temp Prom °C	HR Max %	HR min %	HR Prom %	
<b>Temporada seca 1 capa</b>										
52744	R1	Recamara con tezontle	12-may	21-may	29.03	25.53	27.28	31.96	22.42	27.70
52749	R2	Recamara libre	12-may	21-may	29.19	25.23	27.21	32.11	22.38	27.79
52745	R3	Exterior	12-may	21-may	38.90	16.78	27.35	51.04	12.70	29.18
				$\Delta T_{MAX}$	$\Delta T_{MIN}$	$\Delta T_{PROM}$	$\Delta HR_{MAX}$	$\Delta HR_{MIN}$	$\Delta HR_{PROM}$	
<b>Variaciones R2 vs R1 (Temp=<math>\Delta T</math>; RH=<math>\Delta RH</math>)</b>				<b>0.16</b>	<b>-(0.30)</b>	<b>-(0.08)</b>	<b>0.15</b>	<b>-(0.03)</b>	<b>0.10</b>	
<b>Temporada seca 2 capa</b>										
52744	R1	Recamara con tezontle	21-may	01-jun	29.61	26.09	27.79	38.85	26.79	33.21
52749	R2	Recamara libre	21-may	01-jun	30.02	26.32	28.20	38.16	28.12	33.66
52745	R3	Exterior	21-may	01-jun	40.02	18.08	27.58	58.95	16.81	36.82
				$\Delta T_{MAX}$	$\Delta T_{MIN}$	$\Delta T_{PROM}$	$\Delta HR_{MAX}$	$\Delta HR_{MIN}$	$\Delta HR_{PROM}$	
<b>Variaciones R2 vs R1 (Temp=<math>\Delta T</math>; RH=<math>\Delta RH</math>)</b>				<b>0.41</b>	<b>0.23</b>	<b>0.41</b>	<b>-(0.69)</b>	<b>1.32</b>	<b>0.45</b>	
<b>Temporada c/lluvia 2 capas</b>										
52744	R1	Recamara con tezontle	01-jun	30-jun	29.05	26.34	27.65	52.07	41.09	46.91
52749	R2	Recamara libre	01-jun	30-jun	29.85	26.50	28.16	50.59	38.26	45.37
52745	R3	Interior	01-jun	30-jun	28.19	25.94	26.99	53.64	42.10	48.30
				$\Delta T_{MAX}$	$\Delta T_{MIN}$	$\Delta T_{PROM}$	$\Delta HR_{MAX}$	$\Delta HR_{MIN}$	$\Delta HR_{PROM}$	
<b>Variaciones R2 vs R1 (Temp=<math>\Delta T</math>; RH=<math>\Delta RH</math>)</b>				<b>0.81</b>	<b>0.16</b>	<b>0.50</b>	<b>-(1.48)</b>	<b>-(2.83)</b>	<b>-(1.54)</b>	

**Tabla 4.5 Resumen de registros promediados jul-ago. R1: recamara con capa de tezontle. R2: recamara de referencia. R3: sensor adicional en el exterior/interior de la vivienda. Fuente: elaboración propia.**

No. sensor / Identificador	Ubicación en la vivienda	Inicio de registro	Final de registro	Temp Max °C	Temp Min °C	Temp Prom °C	HR Max %	HR min %	HR Prom %	
<b>Temporada c/lluvia 2 capas</b>										
52744	R1	Recamara con tezontle	01-jul	31-jul	27.03	24.54	25.69	62.04	53.95	58.43
52749	R2	Recamara libre	01-jul	31-jul	27.93	24.73	26.25	59.94	50.41	56.10
52745	R3	Interior	01-jul	31-jul	25.93	24.06	24.90	64.12	56.94	60.76
				$\Delta T_{MAX}$	$\Delta T_{MIN}$	$\Delta T_{PROM}$	$\Delta HR_{MAX}$	$\Delta HR_{MIN}$	$\Delta HR_{PROM}$	
<b>Variaciones R2 vs R1 (Temp=<math>\Delta T</math>; RH=<math>\Delta RH</math>)</b>				<b>0.91</b>	<b>0.20</b>	<b>0.56</b>	<b>-(2.10)</b>	<b>-(3.54)</b>	<b>-(2.33)</b>	
<b>Temporada c/lluvia 2 capas</b>										
52744	R1	Recamara con tezontle	01-ago	31-ago	26.61	24.35	25.40	66.32	56.60	62.32
52749	R2	Recamara libre	01-ago	31-ago	27.44	24.59	25.97	64.34	53.65	59.96
52745	R3	Interior	01-ago	31-ago	25.96	24.24	25.04	68.23	60.42	65.00
				$\Delta T_{MAX}$	$\Delta T_{MIN}$	$\Delta T_{PROM}$	$\Delta HR_{MAX}$	$\Delta HR_{MIN}$	$\Delta HR_{PROM}$	
<b>Variaciones R2 vs R1 (Temp=<math>\Delta T</math>; RH=<math>\Delta RH</math>)</b>				<b>0.83</b>	<b>0.24</b>	<b>0.57</b>	<b>-(1.98)</b>	<b>-(2.95)</b>	<b>-(2.37)</b>	

Si analizamos en primera instancia las diferencias entre los dos espesores de material utilizado. En la [Tabla 4.4](#), en el periodo anterior a las lluvias, la diferencia entre colocar una o dos capas de tezontle tiene un impacto aproximado de 0.5°C adicionales (*i.e.* 29.03 vs 29.61 en  $T_{\max}$ ; 25.53 vs 26.09 °C en  $T_{\min}$ ). En cuanto a humedad, las diferencias fueron del orden del 7% y 4% aproximado (*i.e.* 31.96 vs 38.85 % en  $HR_{\max}$ ; 22.42 vs 26.79 % en  $HR_{\min}$ ).

Respecto al diferencial de temperatura (*i.e.*  $\Delta T$ ) entre la recamara con tezontle y aquella que no lo tiene, los valores más significativos son aquellos que se obtuvieron al emplear las dos capas de tezontle. En la [Tabla 4.4](#), las mayores diferencias registradas se ubican entre los 0.4 y el 0.8°C aproximadamente ( $\Delta T_{\max}=0.41$  °C antes de las lluvias;  $\Delta T_{\max}=0.81$  °C con lluvias), destacando que la recamara con tezontle tiende a igualarse con la recamara de referencia conforme baja la temperatura en el transcurso del día ( $\Delta T_{\min}=0.23$  °C antes de las lluvias;  $\Delta T_{\min}=0.16$  °C con lluvias). A su vez, en la [Tabla 4.5](#) las variaciones en los periodos de julio ( $\Delta T_{\max}=0.91$  °C y  $\Delta T_{\min}=0.20$  °C) y agosto ( $\Delta T_{\max}=0.83$  °C y  $\Delta T_{\min}=0.24$  °C) fueron coincidentes.

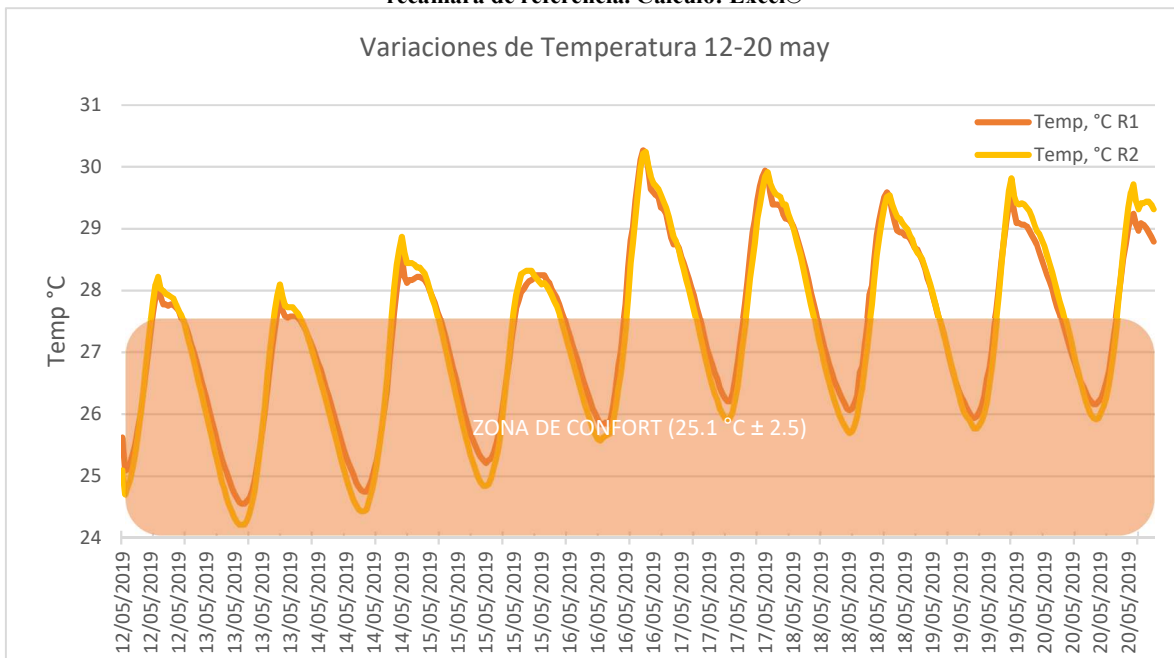
En el caso de la humedad y considerando también solo la opción con dos capas de tezontle, los datos en la [Tabla 4.4](#) no reflejan una variación pronunciada entre la recamara con tezontle respecto a la recamara libre tanto en sus valores máximos (38.85 vs 38.16 %  $HR_{\max}$  antes de las lluvias; 52.07 vs 50.59 %  $HR_{\max}$  con lluvias) como en los mínimos (26.79 vs 28.12 %  $HR_{\min}$  antes de las lluvias; 41.09 vs 38.26 %  $HR_{\min}$  con lluvias). Las anteriores tendencias se mantuvieron en los meses de julio y agostos indicados en la [Tabla 4.5](#), con un ligero aumento en el diferencial de la humedad (*i.e.*  $\Delta HR_{\max}$  de 2.1% y 1.98%;  $\Delta HR_{\min}$  de 3.54% y 2.95%), por parte de la recamara con tezontle.

Como se observa en las tablas referidas, el sensor colocado en la tercera recamara iniciada la temporada de lluvias presenta menores temperaturas y mayores humedades en comparación de las otras dos recamaras. Esta situación se atribuye a poseer un techo inclinado, mayor altura libre interior y un cuarto de baño incluido, a diferencia de las recamaras de referencia. Estas últimas si mantuvieron características similares durante

todo el estudio (*i.e.* mobiliario, pintura, distribución, asoleamiento, ventilación y ocupación, esta última solo por las noches).

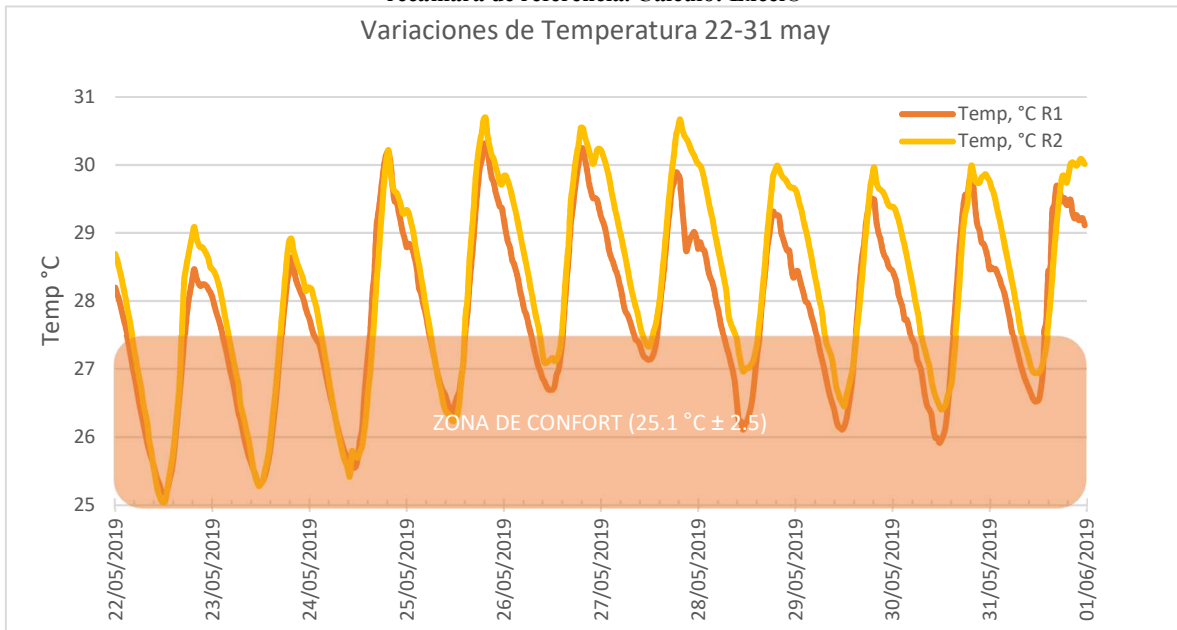
Los resultados mostrados son valores promedio por día. Si se hace un análisis registro a registro (*i.e.* datos que se recolectaban cada 30 min), podemos constatar que hay momentos en que los diferenciales positivos entre la recámara con tezontle y la recámara libre llegan a superar el  $1.5^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, también se observa diferenciales negativos de hasta  $-0.9^{\circ}\text{C}$ , lo que implica que la habitación con tezontle gana calor respecto a la habitación que no lo tiene (ver ejemplo en [Tabla A2.9](#) en el [Anexo 2](#)). En las [Gráficas 4.9](#) (temporada de secas con una capa de tezontle), [4.10](#) (temporada de secas con dos capas de tezontle) y [4.11](#) (temporada de lluvias con dos capas de tezontle) se expone con mayor claridad la variación de temperatura entre una y otra recámara durante periodos contiguos. Particularmente, se distingue en los periodos del 22 al 31 de mayo un  $\Delta T_{\text{max}}$  que ha alcanzado los  $1.6^{\circ}\text{C}$ , mientras que del 13 al 22 de junio el  $\Delta T_{\text{max}}$  llegó a los  $1.5^{\circ}\text{C}$ . Esta diferencia de 1.5 grados es significativa, pues nos ubica más cerca del *rango de confort* de los meses de mayo y junio (*i.e.*  $25.1$  y  $25^{\circ}\text{C}$  respectivamente  $\pm 2.5$ ).

**Gráfico 4.9 Variaciones de temperatura periodo 12-20 mayo (secas). R1: recámara con 1 capa de tezontle. R2: recámara de referencia. Cálculo: Excel®**

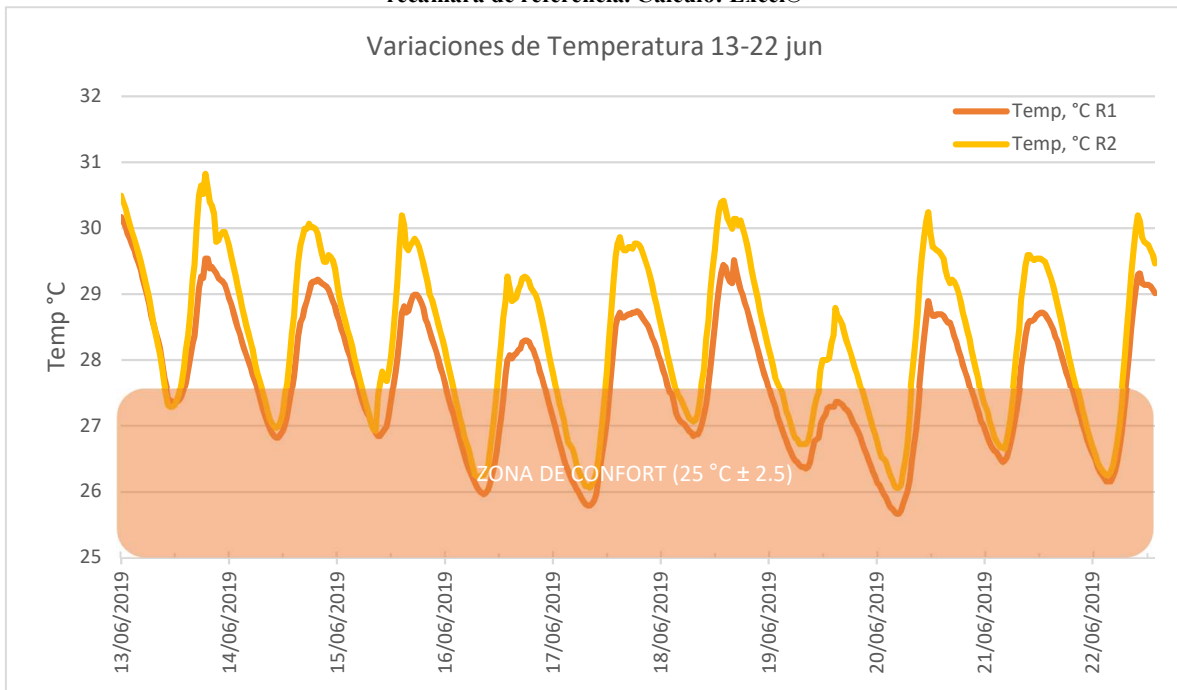




**Gráfico 4. 10 Variaciones de temperatura periodo 22-31 mayo (secas). R1: recamara con 2 capas de tezontle. R2: recamara de referencia. Calculo: Excel®**



**Gráfico 4. 11 Variaciones de temperatura periodo 13-22 junio (lluvias). R1: recamara con 2 capas de tezontle. R2: recamara de referencia. Calculo: Excel®**



Otra forma de dimensionar el aporte de las capas de tezontle lo tenemos en la [Tabla 4.6](#), donde constatamos una disminución de las horas no confortables (*i.e.* las horas que durante el día nos encontramos fuera del rango de confort). En promedio empleando las dos capas

de tezontle, observamos un aumento de dos horas dentro del rango de confort antes de las lluvias (*i.e.* 15.6-13.6) y de hasta cuatro horas durante estas (*i.e.* 16.8-12.9).

**Tabla 4.6 Comparativo de horas no confortables en diferentes fechas. R1: recamara con capa de tezontle. R2: recamara de referencia. Calculo: elaboración propia.**

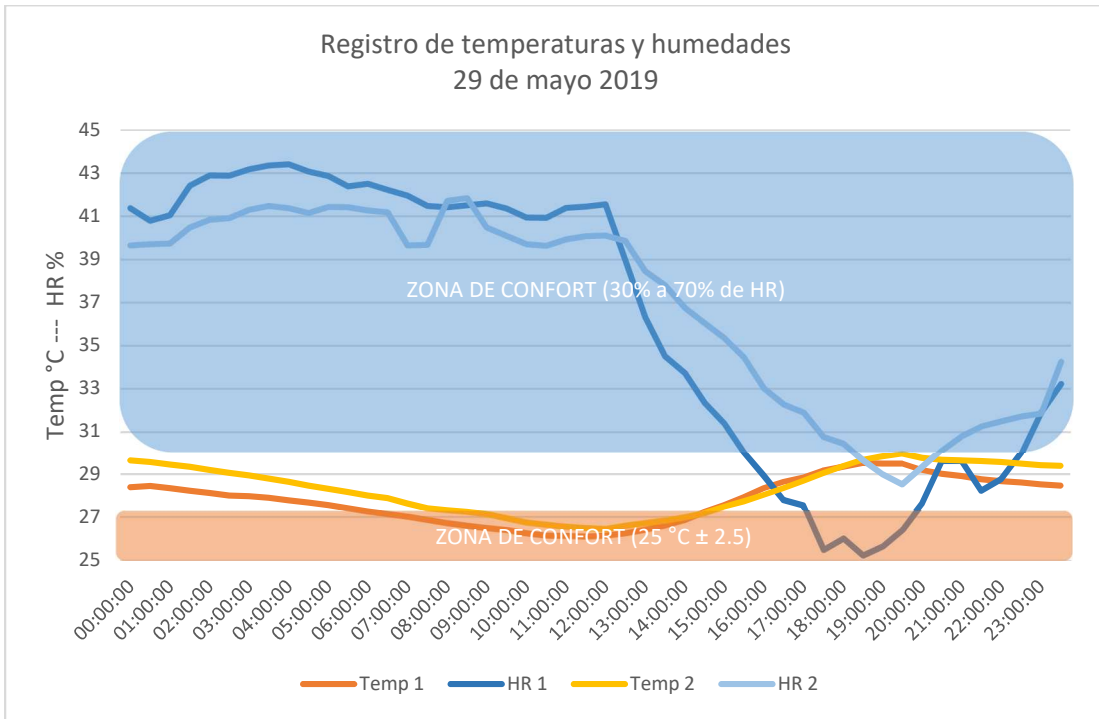
Horas al día fuera del rango de confort ( $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ )											
Temporada seca 1 capa				Temporada seca 2 capa				Temporada lluvias 2 capa			
Temp confort	25.1°C			Temp confort	25.1°C			Temp confort	25°C		
Fecha	Hrs no confortables			Fecha	Hrs no confortables			Fecha	Hrs no confortables		
	R1	R2	dif		R1	R2	dif		R1	R2	dif
12/05/2019	5.5	5.5	-	22/05/2019	9.5	12.0	2.5	13/06/2019	20.5	20.5	-
13/05/2019	6.0	6.5	0.5	23/05/2019	9.5	11.5	2.0	14/06/2019	16.5	18.5	2.0
14/05/2019	6.0	6.5	0.5	24/05/2019	10.5	11.0	0.5	15/06/2019	16.5	20.5	4.0
15/05/2019	9.5	9.5	-	25/05/2019	15.5	15.5	-	16/06/2019	11.0	14.5	3.5
16/05/2019	12.5	11.0	- 1.5	26/05/2019	16.0	18.5	2.5	17/06/2019	9.0	13.0	4.0
17/05/2019	15.5	14.5	- 1.0	27/05/2019	18.5	21.5	3.0	18/06/2019	15.5	18.5	3.0
18/05/2019	14.0	13.0	- 1.0	28/05/2019	15.0	18.5	3.5	19/06/2019	6.5	16.0	9.5
19/05/2019	13.0	13.0	-	29/05/2019	14.5	16.0	1.5	20/06/2019	7.0	13.0	6.0
20/05/2019	13.5	14.0	0.5	30/05/2019	13.5	15.5	2.0	21/06/2019	13.5	16.5	3.0
<b>Promedio:</b>	<b>10.6</b>	<b>10.4</b>	<b>- 0.2</b>	<b>Promedio:</b>	<b>13.6</b>	<b>15.6</b>	<b>1.9</b>	<b>Promedio:</b>	<b>12.9</b>	<b>16.8</b>	<b>3.9</b>

En el [Gráfico 4.12](#) observamos a su vez con mayor detalle las diferencias de temperatura y humedad en el transcurso de un solo día. Refiriéndonos exclusivamente a la temperatura, el 29/mayo (temporada de secas y dos capas de tezontle), el  $\Delta T$  se hace presente después de las 18:00 hrs, alcanzando su mayor nivel hacia las 0:00 hrs, procediendo a decrecer hasta las 14:00 del día siguiente. En el [Gráfico 4.13](#) del día 17/junio (temporada de lluvias y dos capas de tezontle), el  $\Delta T$  comienza hacia las 14:00 hrs, ubicando su cúspide hacia las 19:00 hrs, manteniéndose esta diferencia hasta las 0:00 hrs y desapareciendo hacia las 14:00 hrs del día siguiente. En ambas graficas se expone a su vez el rango de confort.

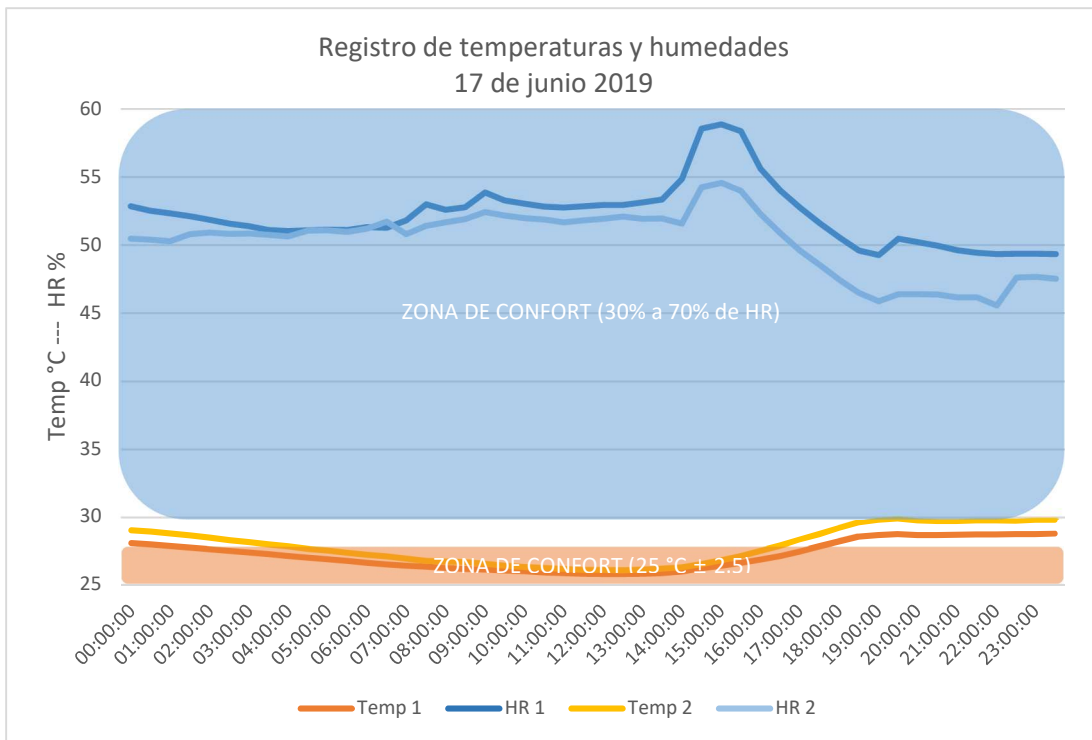
Al no haber contado con mayor tiempo de exposición del sensor exterior, lamentablemente no se pudo hacer una correlación directa entre la temperatura registrada en el exterior y la interior a fin de dimensionar el retardo térmico. Aun así, los registros que se tomaron apuntan a cierta *inercia térmica* <sup>(18)</sup> por parte de la recamara con tezontle.

<sup>18</sup> Consultar el Anexo 1.1 para mayor detalle de este concepto.

**Gráfico 4. 12 Variaciones de temperatura y humedad del día 29 de mayo (secas). Temp 1 y HR1: recamara con 2 capas de tezontle. Temp 2 y HR2: recamara de referencia. Calculo: Excel®**



**Gráfico 4. 13 Variaciones de temperatura y humedad del día 17 de junio (lluvias). Temp 1 y HR1: recamara con 2 capas de tezontle. Temp 2 y HR2: recamara de referencia. Calculo: Excel®**



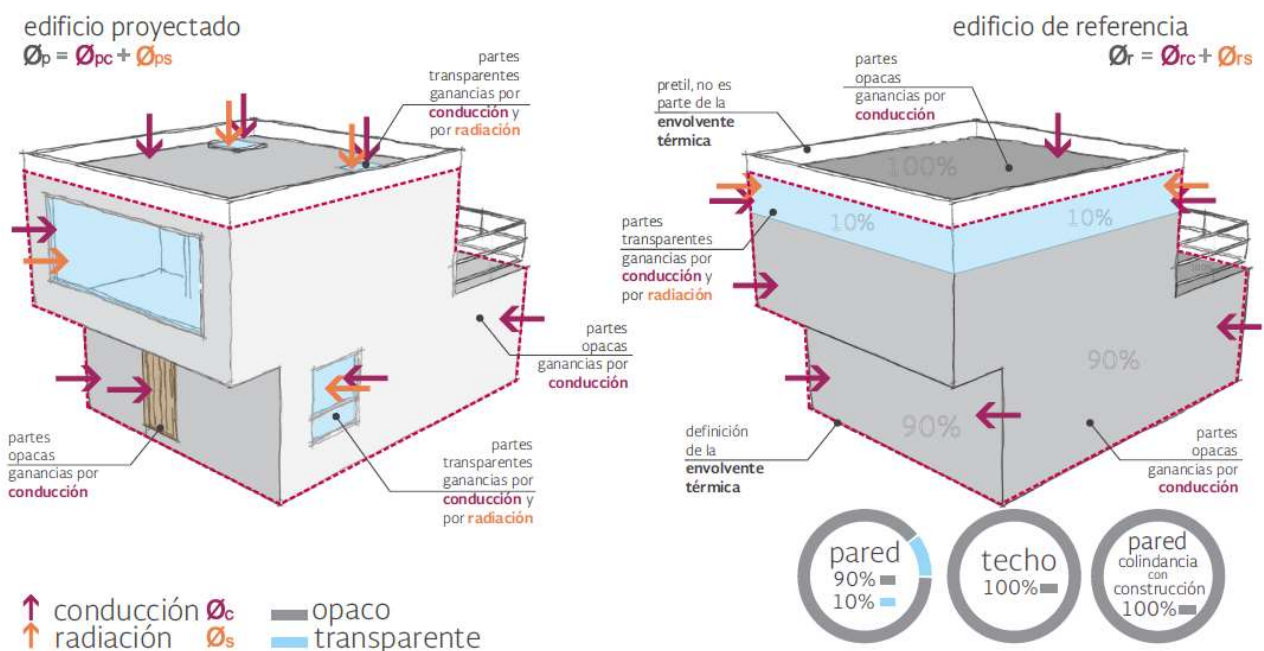
#### 4.2.4 Análisis bajo la NOM-020-ENER-2011 de la propuesta implementada

En este subcapítulo se presenta una evaluación de la propuesta de tezontle bajo la norma *NOM-020-ENER-2011*. Esta norma es de carácter obligatorio en México y promueve una disminución en el consumo energético en edificios de uso habitacional. Esto se logra mediante el mejoramiento de las características de la envolvente de la edificación que propicien el confort térmico al interior. La norma implica evaluar los niveles de *transferencia de calor por conductividad y radiación* en una *vivienda proyectada* (i.e.  $\Phi_p$ ), mismos que deben estar por debajo de una evaluación de esa misma edificación ajustando ciertos valores como *vivienda de referencia* (i.e.  $\Phi_r$ ). Esto se formula en la *Ecuación 4.4*.

- $\Phi_p < \Phi_r$

**Ecuación 4.4**

Para una mejor comprensión de esta formulación, véase la *Figura 4.7*



**Figura 4.7** Esquema que ejemplifica una edificación proyectada y la edificación de referencia conforme a la NOM-020-ENER-2011. Fuente: (SENER-CONUEE, s.f.)

Como se desprende de la figura anterior, la evaluación se hace sobre todas las caras expuestas de la edificación (frentes, costados y azoteas), identificando y separando las áreas de los distintos elementos opacos y transparentes, sus materiales constitutivos, espesores y valores de *conductividad térmica* (i.e.  $\lambda$ ) y *coeficiente de sombreado* (i.e.  $CS$ ) según

corresponda. Con estos datos, se determina el *coeficiente global de transferencia de calor* (i.e. valor **K**), mismo que multiplicado por el área sobre la que actúa y un gradiente de temperatura señalado por la misma norma, nos da como resultado la ganancia de calor por conducción o por radiación, valores que se expresan en watts. Se hace notar que esta evaluación es por cada elemento constructivo, siendo los valores a comparar el sumatorio total de los mismos. El resultado final es una etiqueta indicando el porcentaje de ganancia entre el edificio proyectado y el edificio de referencia.

Para nuestro caso de estudio, haremos referencia únicamente a la azotea y no a un análisis completo de la edificación, ya que esta es el área afectada por la propuesta. Los valores resultantes de la evaluación son los indicados a continuación y se corresponde con la metodología indicada por **SENER-CONUEE** (s.f.).

El valor **K** para el caso de la edificación de referencia se determina mediante tablas señaladas en la norma de referencia. Para el edificio proyectado, se calcula partiendo de la *Ecuación 4.5*.

- **$K = 1/M$**  **Ecuación 4.5**

Donde **M** es el aislamiento térmico de lado a lado de una sección determinada, determinado por la *Ecuación 4.6*.

- **$M = \frac{1}{h_i} + \frac{l_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}$**  **Ecuación 4.6**

Donde  **$l_n$**  es el espesor parcial del material con conductividad  **$\lambda_n$**  mientras que  **$h_i$**  y  **$h_e$**  son la conductancia superficial interior y exterior respectivamente indicadas en la *Tabla 4.7*

**Tabla 4.7 Valores de conductividad superficial. Fuente: (SENER-CONUEE, s.f.)**

Conductividad superficial	Dirección del flujo de calor		
	hacia arriba	horizontal	hacia abajo
$h_i$ (W / m <sup>2</sup> ·K)	9.4	8.1	6.6
$h_e$ (W / m <sup>2</sup> ·K)		13	

Como se detalló en subcapítulos anteriores, nuestra azotea es un sistema de viga y bovedilla. Este presenta una sección transversal no uniforme, lo que implica un análisis en dos etapas, el cual queda esquematizado en la *Figura 4.8* y la *Tabla 4.8*.

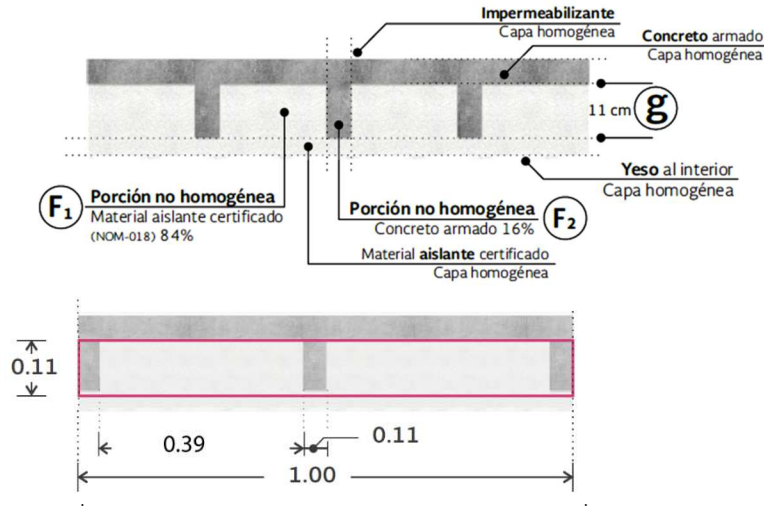


Figura 4.8 Detalle de la sección idealizada de viga y bovedilla para el análisis del valor K. Fuente: (SENER-CONUEE, s.f.)

Tabla 4.8 Calculo del valor K para la azotea (ver Fig. 4.8). Fuente: elaboración propia.

1) Losa de viga y bovedilla: Sección homogénea (Mparcial)

$$M = 1/h_i + l_n / \lambda_n + 1/h_e$$

Elemento analizado		espesor (l)	conductividad ( $\lambda$ )	M
** convección exterior	$1/h_i$	1	13.000	0.077
* capa de tezontle	$l_n / \lambda_n$	0.07	<b>0.186</b>	0.376
Impermeabilizante		0.002	0.170	0.012
Concreto armado		0.05	1.750	0.029
Material aislante		0.038	0.040	0.950
Yeso al interior		0.005	0.372	0.013
** convección interior	$1/h_e$	1	6.600	0.152
<b>Mparcial</b>				<b>1.609</b>

2) Losa de viga y bovedilla: Sección NO homogénea

$$M = 1 / \Sigma [F_n / [M_{parcial} + (g_n / \lambda_n)]]$$

Elemento analizado	sección parcial	sección total (1*0.11)	proporcional (F)	espesor (g)	conductividad ( $\lambda$ )	$F_n / [M_{parcial} + (g_n / \lambda_n)]$
Material aislante F <sub>1</sub> (0.11X0.39*2)	0.0858	0.11	0.78	0.11	0.040	0.179
Concreto armado F <sub>2</sub> (0.11*0.11*2)	0.0242	0.11	0.22	0.11	1.740	0.132
$\Sigma$						<b>0.31</b>
$M=1/ \Sigma$						<b>3.22</b>
$K=1/M$						<b>0.31</b>

Los valores  $\lambda$  de conductividad en la [Tabla 4.8](#) corresponden a los señalados en la NOM-008-ENER-2001 y la NOM-020-ENER-2011 <sup>(19)</sup>, mismos que pueden ser consultados para más detalle en el [Anexo A2.5](#).

Sobre el valor  $\lambda$  del tezontle, se encontró referencias que ubican su conductividad de 0.040 W/m°C (e.g. [Estecha Diseño, s.f.](#)) hasta los 2.9 W/m°C (e.g. [Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, s.f.](#)). Por su parte, [Silva-Treviño et al. \(2018\)](#) obtuvieron 0.287 W/m°C en su estudio. Sobre esta evidencia, adicionalmente al valor de 0.186 del tezontle que se emplea en este cálculo, se consideran valores adicionales entre 0.582 y 2.326 para materiales similares (ver [Tabla A2.10](#) en el [Anexo A2.5](#)). Los resultados con estos valores se exponen en la sección final de este subcapítulo. Una vez determinado el valor K de nuestra edificación proyectada, se procede a determinar la ganancia por conducción tanto para el edificio de referencia como nuestro edificio proyectado, empleando para ello las [Ecuaciones 4.7 y 4.8](#).

- $\varphi_{rci} = \sum_{j=1}^n [K_j * A_{ij} * (t_{ei} - t)]$  **Ecuación 4.7**

- $\varphi_{pci} = \sum_{j=1}^n [K_j * A_{ij} * (t_{ei} - t)]$  **Ecuación 4.8**

Donde  $\varphi_{rci}$  es la ganancia por conducción en el edificio de referencia y  $\varphi_{pci}$  es la ganancia en el edificio proyectado. En el caso del primero, el valor K corresponde al indicado en la [Tabla 4.9](#), mientras que resultados finales se indica en la [Tabla 4.10](#)

**Tabla 4.9** Valores resumidos valor K de referencia y temperaturas de confort. Fuente: NOM-020-ENER-2011

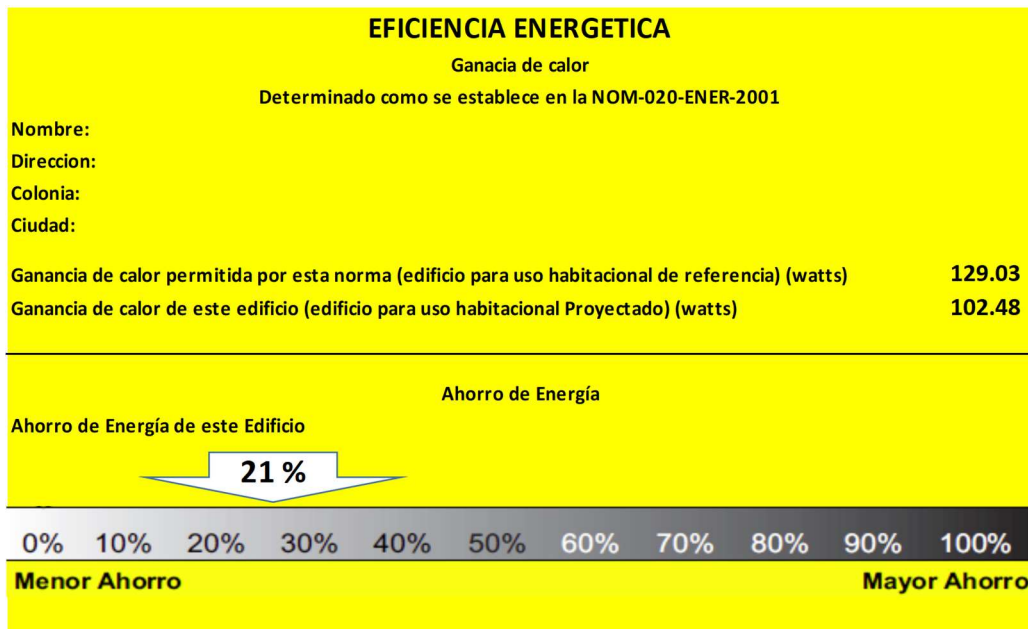
Estado	Ciudad	Conducción		
		K de referencia hasta 3 niveles solo techos	Zona opaca	
Temp. equivalente promedio °C				
T interior	Techo			
Jalisco	Guadalajara	0.391	26	37

<sup>19</sup> En la NOM-020-ENER-2001 el tezontle aparece bajo la categoría de aplanados. Sin embargo, en la NOM-008-ENER-2001 se le ubica como relleno. En la NMX-C-460-ONNCE-2009 el valor  $\lambda$  del tezontle es de 0.12

**Tabla 4.10 Ganancia por conducción entre el edificio de referencia y el edificio proyectado con tezontle (análisis de la azotea únicamente). Fuente: elaboración propia**

Elemento analizado	Coefficiente global de transferencia	Área proyectada	Fración de la componente	Temperatura equivalente	Temperatura interior	Ganancia por conducción
	K	A	F	te	t	$\Phi_{rci}$ $\Phi_{pci}$
Edificio de referencia	0.391	30	1	37	26	129.03
Edificio proyectado	0.31	30		37	26	102.48

Como podemos ver en la [Tabla 4.9](#), la [Ecuación 4.4](#) se cumple (*i.e.*  $\Phi_p < \Phi_r$ ), por lo que de presentarse una etiqueta de eficiencia, esta se mostraría similar a la que se ejemplifica en la [Figura 4.9](#), siendo el 21% indicado en la misma, la diferencia porcentual entre 102.48 watts de nuestra edificación y los 129.03 watts de la edificación de referencia.



**Figura 4.9 Etiqueta de eficiencia que correspondería a nuestra propuesta analizada. Fuente: elaboración propia.**

Como se comentó párrafos atrás, en el ejercicio anterior se considera un valor de conductividad  $\lambda$  de 0.186 para el tezontle, lo que representa un ahorro energético final del 21%. Empleando otros valores  $\lambda$  señalados en la NOM-020-ENER-2011 de 0.582 (*i.e.* para terrados secos en azoteas) y 2.326 (*i.e.* para grava expuesta a la lluvia), el ahorro energético va del 12% al 8%, respectivamente. En ambos casos, seguimos ofreciendo un ahorro energético respecto a nuestra edificación de referencia.



### 4.3 Conclusiones del capítulo

Resultado del análisis de *zonas de confort* para el AMG podemos concluir que, si bien mayoritariamente las relaciones entre temperatura y humedad sitúan el ambiente existente muy cercano a dicha zona, existe una clara desviación durante los meses cálidos (con temperaturas hasta 5°C por encima del rango de confort), mientras que en los otros meses se observan tendencias a un ambiente frío (hasta 12°C por debajo del rango). Entre las estrategias que el análisis propone para solventar estas desviaciones (*i.e.* diagrama psicométrico de Givoni), los sistemas relacionados con aumentar la *masa térmica* son señalados. Dadas las características de estos son sistemas, los mismos se corresponde con la propuesta objetivo de este TOG.

Se identificó el sistema de azoteas a base de *vigueta y bovedilla* como uno de los más utilizados en el AMG y se validó la vivienda sobre la que se realiza el experimento, al presentar los detalles constructivos de la misma y que son afines con el sistema constructivo mencionado. Se detalló la colocación y ubicación del material de tezontle en la azotea, así como el equipo y características de los sensores con los que se recabó la información de temperatura y humedad.

Sobre el registro de temperatura, se constató que efectivamente existe una *mejora de temperatura* entre contar con la capa de tezontle o carecer de ella. Las magnitudes de las variaciones de temperatura únicamente son significativas empleando dos capas de tezontle (*i.e.* 0.0762 m de espesor), promediando  $\Delta T$  del orden de 0.41°C en la temporada de secas y de 0.81, 0.91 y 0.83°C en la temporada de lluvias. Por otra parte, en un análisis registro a registro (*i.e.* datos que se recolectaban cada 30 min), se observó que estas variaciones pueden tener máximos de hasta 1.5°C, si bien por el contrario en los mínimos se tienen variaciones de hasta -0.9°C, es decir, se tienen ganancias de temperatura en la habitación con tezontle, lo que apunta a un aumento en la inercia térmica de la edificación. Revisando la [Tabla 4.6](#), tenemos una mejora en el tiempo que se encuentra la habitación dentro del rango de confort de entre 2 y 4 horas al día.

De los resultados también se observa que las magnitudes y la proporción en que varían entre la temporada de secas y la de lluvias son coincidentes con los resultados obtenidos por [Silva-Treviño et al. \(2018\)](#), si bien los  $\Delta T$  registrados por ellos fueron mayores en un material similar (de 1.5°C en temporada seca y de 3°C en temporada de lluvias).

Respecto a la *humedad*, considerando la estructura de dos capas, se observa mayor prevalencia de esta en la recámara con tezontle respecto a la recámara libre, tanto en sus valores máximos (38.85 vs 38.16 %  $HR_{max}$  antes de las lluvias; 52.07 vs 50.59 %  $HR_{max}$  con lluvias) como en los mínimos (26.79 vs 28.12 %  $HR_{min}$  antes de las lluvias; 41.09 vs 38.26 %  $HR_{min}$  con lluvias).

Finalmente, una evaluación de la propuesta bajo la *NOM-020-ENER-2011* concluye que se pueden tener ganancias en cuanto a consumo energético que pueden variar entre el 21% al 8%, obedeciendo esta variación a la magnitud que determinemos para valor  $\lambda$ .

En conclusión, los resultados obtenidos validan la implementación de propuestas similares a las planteadas en esta investigación, si bien se hace necesario una recolección de datos durante un periodo mucho más amplio de tiempo. Cuantitativamente, se observa que el  $\pm 1^\circ C$  (*i.e* de -0.9 a 1.5°C) que se obtiene al recubrir la azotea con tezontle puede repercutir no solo durante temporada de calor o de lluvias, ya que igualmente puede afectar a las temporadas con menores temperaturas, lo cual tendría que corroborarse con un estudio en dichas fechas.

# Capítulo 5

## *Del amortiguamiento de la escorrentía pluvial y el empleo del tezontle*

---

### 5.1 Introducción

En este capítulo se plasman los resultados obtenidos de la experimentación con el tezontle en laboratorio, en lo particular, la interacción del material dentro de un simulador de lluvia. Se presentan en primer término el modelo teórico y la evaluación del mismo a partir de la información con la que se cuenta sobre el material y sus *propiedades volumétricas*, a fin de estimar el desempeño hidrológico que tendría una capa de tezontle para aminorar la escorrentía pluvial en la azotea. Dicha evaluación teórica considera la estimación del caudal en base al *método racional* y *coeficientes de escurrimiento*, tomando el valor de dichos coeficientes considerando las superficies más identificables con el tezontle. Igualmente, se estima la *velocidad de infiltración*, como una medida indirecta de la *permeabilidad* del material. Finalmente, se registra en un laboratorio los *tiempos de concentración* que se obtienen en una mesa de simulación de lluvias cuando se coloca la capa de tezontle.

### 5.2 Análisis de la precipitación y modelo experimental de la escorrentía pluvial

#### *5.2.1 Análisis hidrológico de la precipitación y escorrentía para una azotea*

Entre los objetivos de este TOG se encuentra el determinar los posibles beneficios en cuanto a un retardo en el flujo de la escorrentía pluvial como consecuencia de la instalación de una capa de tezontle en la azotea. Dentro de la hipótesis inicial planteada, se considera que dicha capa puede contribuir a dar mayor tiempo al drenaje del agua, lo que implica que no se saturen los sistemas de alcantarillado existentes. Para validar esta hipótesis, se hace necesario primero analizar matemáticamente cual es el comportamiento del agua al transitar por una superficie. Esto es, debemos hacer un *aforo* y medir su variación en el tiempo.

Como se recordará de capítulos anteriores, la *Ecuación 2.1* (i.e.  $Q = A \cdot V$ ) es la expresión con la que se relaciona el gasto, un área y la velocidad del flujo hidráulico. En el caso de relacionar la *precipitación* con el *escurrimiento*, tal y como nos lo indica Aparicio-Mijares (1989), la anterior expresión se ha desarrollado con diferentes aproximaciones<sup>(20)</sup>, destacando en nuestro país aquellos métodos que hacen uso del análisis de registros pluviales, la topografía y las características el suelo. Este sistema se denomina *método racional*, siendo el procedimiento indicado a seguir por diferentes normativas y reglamentos (e.g. SIAPA, 2014; CNA, 2007; SEMARNAT-CNA, 2016) y al que se remiten especialistas para el diseño del drenaje pluvial (e.g. Aparicio-Mijares, 1989). La *Ecuación 5.1* define dicho método.

$$\bullet \quad Q_p = 0.278 C_e i A_t \quad \text{Ecuación 5.1}$$

donde  $Q_p$  es el gasto pico expresado en  $m^3/s$ ,  $C_e$  es un factor adimensional denominado *coeficiente de escurrimiento*,  $i$  es la *intensidad de la lluvia* en mm/h, la que debe darse en determinado *tiempo de concentración*, mientras que  $A_t$  es el área de la cuenca en  $km^2$ , siendo **0.279** el factor de conversión entre las distintas unidades.

SEMARNAT-CNA (2016) detalla que el empleo de esta fórmula se fundamenta en el cumplimiento de hipótesis bien definidas. Estas son que se considere una lluvia y un coeficiente de escurrimiento uniformes en el tiempo, con un gasto pico que se corresponde con el tiempo de concentración, periodo en el cual se da la aportación de toda el área a drenar. Estos planteamientos se detallan en la *Figura 5.1*. La dependencia también indica que la aplicación de la fórmula puede considerarse para áreas no mayores a  $0.89 km^2$ , si bien otros autores señalan su validez hasta los  $12.59 km^2$  (e.g. Campos-Aranda y López, citados en SEMARNAT-CNA, 2016).

---

<sup>20</sup> Consultar el Anexo 1.II para una descripción breve de los distintos métodos para el análisis lluvia-escurrimiento.

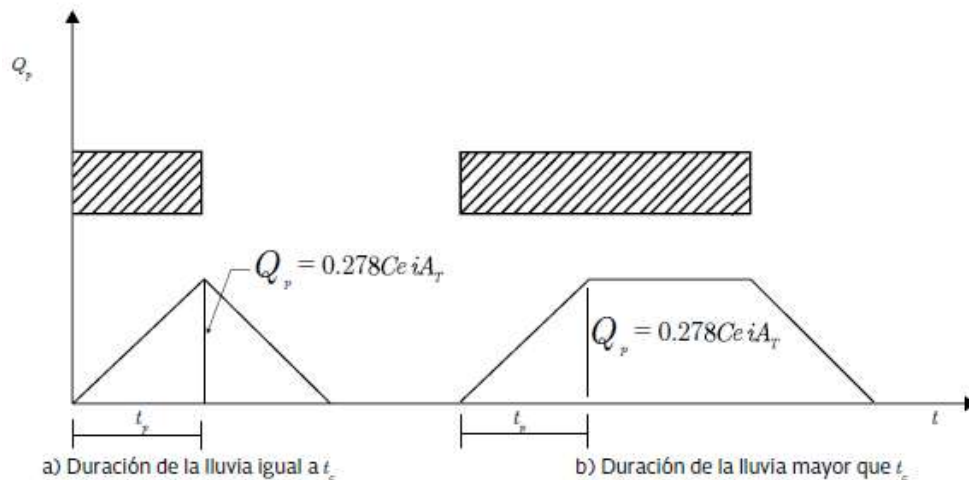


Figura 5.1 Representación gráfica del método racional. Fuente: (SEMARNAT-CNA, 2016)

El *coeficiente de escurrimiento* en la fórmula racional es un valor adimensional sobre el que intervienen  $n$  número de variables, como pudieran ser:

*“Tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo), cantidad, intensidad y distribución en el tiempo; humedad del suelo; tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación, pendiente, micro relieve, rugosidad) o cobertura vegetal y la intercepción que generen ...” (Martínez de Azagra, 2006)*

De acuerdo con [Martínez de Azagra \(2006\)](#), la capacidad de *infiltración* y la *permeabilidad* son las propiedades físicas que mejor explican la forma en que opera la escorrentía pluvial, a fin de definir un coeficiente de escurrimiento. Sin embargo, Martínez de Azagra también expone que en la práctica los valores de los coeficientes son tomados directamente de tablas ya predefinidas, existiendo variación entre estas y dando pie a cierta imprecisión por parte del método racional (*i.e.* los valores señalados en dichas tablas integran márgenes de seguridad que dan pie a resultados sobredimensionados).

Los coeficientes a los que se hará referencia en este TOG se indican en la [Tabla 5.1](#), siendo los utilizados en las normativas consultadas. Adicionalmente, se da la opción a confrontarlos con datos de otras tablas expuestas en el [Anexo A3.1](#). Para este análisis, interesan aquellos valores relacionados con las azoteas, superficies de concreto y superficies rugosas.

Tabla 5.1 Valores del coeficiente de escurrimiento para periodos de retorno de 5 a 10 años. Fuente: (Aparicio, citado en SEMARNAT-CNA, 2016)

Tipo de área drenada	Coeficiente de escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
<b>Zonas comerciales:</b>		
Zona comercial	0.75	0.95
Zonas mercantiles	0.7	0.9
Vecindarios	0.5	0.7
<b>Zonas residenciales:</b>		
Unifamiliares	0.3	0.5
Multifamiliares, espaciados	0.4	0.6
Multifamiliares, compactos	0.6	0.75
Semiurbanas	0.25	0.4
Casas habitación	0.5	0.7
<b>Zonas industriales:</b>		
Espaciado	0.5	0.8
Compacto	0.6	0.9
Cementerios y parques	0.1	0.25
Campos de juego	0.2	0.35
Patios de ferrocarril y terrenos sin construir	0.2	0.4
Zonas suburbanas	0.1	0.3
<b>Calles:</b>		
Asfaltadas	0.7	0.95
De concreto hidráulico	0.8	0.95
Adoquinadas o empedradas, junteadas con cemento	0.7	0.85
Adoquín sin juntear	0.5	0.7
Terracerías	0.25	0.6
<b>Estacionamientos</b>	0.75	0.85
<b>Techados</b>	0.75	0.95
<b>Praderas:</b>		
Suelos arenosos planos (pendientes < 0.02)	0.05	0.1
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.1	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 o más)	0.15	0.2
Suelos arcillosos planos (0.02 o menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02 - 0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más)	0.25	0.35

La *intensidad de la lluvia* es un valor que también se calcula empleando diferentes metodologías, muchas de las cuales hacen uso de hidrogramas y métodos estadísticos, destacando los modelos de curvas *IDF* (*i.e.* intensidad-duración-frecuencia) o *i-d-Tr* (*i.e.* intensidad-duración-periodo de retorno). El desglose de dichas metodologías no se presenta en este trabajo, por lo que únicamente se resumen los valores de intensidad que corresponden al AMG empleados en las normativas vigentes, mismos que pueden ser consultados en las [Tablas 5.2](#) (intensidades de diseño para dimensionamiento de obras) y [5.3](#) (resultante de curva de intensidad-duración-frecuencia en la Cuenca del Ahogado).

Tabla 5.2 Intensidad y periodo de retornos empleados por el SIAPA para el AMG. Fuente: (Infraestr.Sustentable, 2017)

Subcuenca	Periodo de retorno	Intervalo de tiempo a considerar	Intensidad
	Años	Minutos	mm/hr
<b>Programa de Manejo Integral de Agua Pluvial</b>			
ATEMAJAC	10	10	179.5
SAN JUAN DE DIOS	10	10	177.8
SAN ANDRES	10	10	176.1
OSORIO	10	10	166.3
SAN GASPAR	10	10	166.1
<b>Manual del CEA</b>			
RIO BLANCO	10	15	119.86
DEL CABALLITO	10	15	108.49
ARROYO HONDO	10	15	116.27

Tabla 5.3 Intensidad y periodo de retornos empleados por el SIAPA para la subcuenca del Ahogado en el AMG. Fuente: (Infraestr.Sustentable, 2017)

VALORES RESULTANTES DE CURVAS DE INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA EN LA SUBCUENCA DEL AHOGADO							
Periodo de Retorno (años)	Duración (minutos)						
	5	15	30	45	60	90	120
	Intensidad de lluvia (mm/h)						
2	109.78	69.77	47.25	35.56	30.17	22.77	18.54
5	135.82	86.12	58.32	45.16	37.31	28.20	22.99
10	155.52	98.48	66.70	51.67	42.70	32.30	26.35
15	167.04	105.71	71.60	55.48	45.86	34.70	28.31
20	175.22	110.84	75.08	58.18	48.10	36.41	29.71
25	181.56	114.82	77.77	60.27	49.84	37.73	30.79
50	201.26	127.19	86.15	66.78	55.23	41.83	34.15
100	220.96	139.55	94.53	73.29	60.63	45.94	37.52
500	266.70	168.26	113.98	88.41	73.16	55.46	45.32
1000	286.40	180.62	122.36	94.91	78.55	59.57	48.68

Como se observa en la [Tabla 5.2](#), los valores de diseño son altos y con intervalos cortos para las cuencas urbanizadas (e.g. Atemajac, San Juan de Dios), respecto a las que no lo están (e.g. Del Caballito). A su vez, en el desglose intensidad-duración-frecuencia de la [Tabla 5.3](#), queda patente que las intensidades aumentan conforme al periodo de retorno, valor que solo se reduce considerando la duración del *tiempo de concentración*. Cuando se describió los elementos que constituyen la [Ecuación 5.1](#) (i.e. el método racional), se hizo hincapié en dicho concepto. La fórmula más empleada para calcular dicho periodo se le atribuye a *Kirpich*, si bien originalmente se recomienda para pendientes de 3 a 10%, a la vez que es posible emplear variantes a la misma (e.g. SEMARNAT-CNA, 2016). La fórmula a la que haremos nosotros referencia es:

- $T_c = 0.0003245 \left( \frac{L_T}{\sqrt{S_{LT}}} \right)^{0.77}$

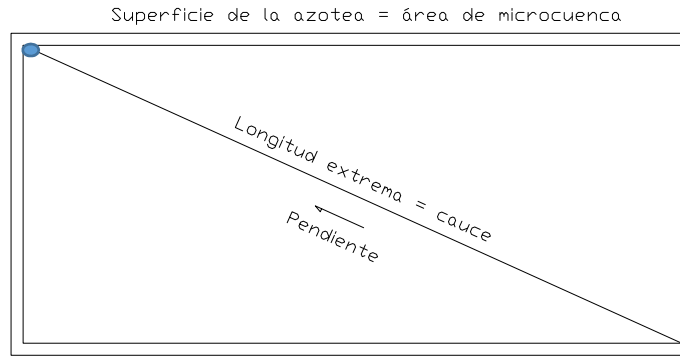
## Ecuación 5.2

donde  $T_c$  es el tiempo de concentración en horas,  $L_T$  es la longitud del cauce principal en m y  $S_{LT}$  es la pendiente media del cauce. La determinación de este tiempo determina nuestra intensidad de lluvia, en conjunción con un periodo de diseño.

El *periodo de diseño* para un sistema pluvial debe estar en función de una evaluación técnica y económica. En el caso del AMG, cuando no existiera un análisis detallado que lo determine, [SIAPA \(2014\)](#) señala que el periodo de diseño se establece en función de la ubicación dentro del área urbana de la zona de estudio. A este respecto, se identifican periodos de 5 a 10 años para zonas centrales, de 2 a 5 años para zonas periféricas y de 1 a 2 años en áreas suburbanas.

Tomando en cuenta lo expuesto hasta aquí, se considera el siguiente escenario de evaluación. En primer término, buscamos determinar un tiempo de concentración, en base a la [Ecuación 5.2](#). En nuestro caso, dada el área de construcción para vivienda de interés social, se asume la misma como área de microcuenca, misma que tendrá una pendiente mínima del 2% de acuerdo a la normatividad del CEV. Para la longitud del cauce, se asume que todas las viviendas cuentan con un bajante colocado a un extremo, por lo que el recorrido más largo será el que se da entre extremos opuestos de la azotea. Los anteriores supuestos se indican en la [Figura 5.2](#) y se resumen en la [Tabla 5.4](#), donde se determina el tiempo de concentración para las áreas de los tres tipos de vivienda de interés social.





**Figura 5.2 Interpretación de la azotea como microcuenca, así como la longitud y pendientes aplicables hasta llegar a un bajante de aguas pluviales. Fuente: elaboración propia**

**Tabla 5.4 Cálculo del tiempo de concentración con la Ecuación 5.2. Fuente: elaboración propia.**

Tipo de vivienda		Económica	Popular	Tradicional
Área construcción	m <sup>2</sup>	30	42.5	62.5
Frente	m	5	5	6
Largo	m	6.00	8.50	10.42
L (Long. Cauce)	m	7.81	9.86	12.02
S (pendiente)		0.02	0.02	0.02
<b>Tc (tiempo concentr.)</b>	hrs	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>
	min	<b>0.43</b>	<b>0.51</b>	<b>0.60</b>

En la [Tabla 5.4](#), los valores obtenidos de  $T_c$  son mínimos y en todo caso, inferiores a los 5 minutos, que sería nuestro valor inmediato superior más cercano en términos de los valores tabulados en la [Tabla 5.3](#). Si adicionalmente consideramos un periodo de retorno de 5 años en dicha tabla, obtenemos como  $i$  un valor de 135.82 mm/h.

Antes de continuar con la determinación de nuestro aforo (*i.e.* caudal pico en la fórmula racional), cabe hacer notar lo siguiente: 1) se considera los 5 minutos como tiempo de concentración mínimo por ser coincidente con lo que señala la literatura consultada para el drenaje de una azotea y su conducción a la calle (*e.g.* [Department of Irrigation and Drainage, s.f.](#)); 2) la precipitación con la que se trabaja en estos cálculos corresponde a criterios de diseño de drenaje pluvial por parte de las normativas existentes, esto es una lluvia máxima. Si recordamos lo valores promedio, la precipitación acumulada en el AMG en los meses más lluviosos es de 180.8, 238.0 y 196.5 mm (*i.e.* [Tabla 4.1](#) en el [Capítulo 4](#)), mientras una lluvia típica fue estimada 51 mm/hr (*i.e.* Vargas citado por Carrillo-Armenta, en el [Capítulo 1](#)).

Teniendo definida la intensidad, los coeficientes de escurrimiento que se analizan de la [Tabla 5.1](#) son los que corresponden a una azotea (constatando a su vez que dicho valor se asemeja con el indicado para superficies de concreto) y empedrados (por ser este el que físicamente más se correspondería a una capa suelta encima de una superficie solida). Se toman tanto sus valores mínimos como máximos para establecer un rango amplio en cuanto a resultados esperados. Con todas las variables ya definidas, evaluamos la [Ecuación 5.1](#), siendo los resultados obtenidos los que se indican en la [Tabla 5.5](#)

**Tabla 5.5 Variación del flujo estimada en función de la colocación de la capa de tezontle aplicando la Ecuación 5.1.**  
Fuente: elaboración propia.

Tipo de vivienda		Económica	Popular	Tradicional
Intensidad de lluvia i	mm	135.82	135.82	135.82
C (para superficie Sin tezontle)	Max	0.95	0.95	0.95
	Min	0.75	0.75	0.75
Q (aforo sin tezontle)	m3/s	<b>1,076.10</b>	<b>1,524.48</b>	<b>2,241.88</b>
	m3/s	<b>849.55</b>	<b>1,203.53</b>	<b>1,769.90</b>
C (para superficie Con tezontle)	Max	0.85	0.85	0.85
	Min	0.70	0.70	0.70
Q (aforo con tezontle)	m3/s	<b>962.83</b>	<b>1,364.01</b>	<b>2,005.89</b>
	m3/s	<b>792.92</b>	<b>1,123.30</b>	<b>1,651.91</b>
% variación/reducción del aforo entre la azotea libre y la que llevaría tezontle	Max	<b>89%</b>	<b>89%</b>	<b>89%</b>
	Min	<b>93%</b>	<b>93%</b>	<b>93%</b>

Como se observa de la [Tabla 5.5](#), los caudales picos a manejar por el drenaje son menores por el solo hecho de alterar la superficie sobre la que habrá de transitar el agua (*i.e.* modificando el coeficiente de escurrimiento). Estamos hablando de cuando menos un 10% menos de agua a manejar por parte del drenaje.

Ahora bien, esta primera aproximación no deja de ser teórica, ya que como se mencionó líneas atrás, el coeficiente de escurrimiento no deja de ser un valor protegido en las tablas de diseño. Adicionalmente en el caso de esta propuesta, se tendría que considerar el flujo del agua a través del material de tezontle, ya que el valor  $C_e$  propuesto es solo una aproximación respecto al volumen de agua que se infiltra/retiene en la capa. Dicho comportamiento se trata en el siguiente apartado.

### 5.2.2 Sobre el comportamiento hidráulico del tezontle

En mecánica de suelos, existe un valor  $e$  denominado *relación de vacíos* y un valor  $n$  que indica porcentualmente la *porosidad* de un material. Por su parte  $G_w$  se refiere al *grado de saturación* de un material (valor entre cero y uno), mientras que  $w$  se describe como el *contenido de agua o humedad* (teóricamente entre cero y un valor infinito). Estas relaciones volumétricas y gravimétricas son dimensionadas de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

- $e = V_v/V_s$  Ecuación 5.3

- $n(\%) = V_v/V_m$  Ecuación 5.4

- $G_w(\%) = V_w/V_v$  Ecuación 5.5

- $w(\%) = W_w/W_s$  Ecuación 5.6

En las ecuaciones anteriormente descritas,  $V_m$  es el volumen completo de la masa del material, mientras que  $V_v$ ,  $V_a$ ,  $V_w$  y  $V_s$  son los volúmenes de vacíos, aire, agua y sólidos respectivamente. Se entiende que  $V_m = V_s + V_v$  para  $V_v = V_a + V_w$ . Por otra parte,  $W_m$  es el peso completo de la masa, compuesto por una parte sólida ( $W_s$ ), una parte líquida ( $W_w$ ) y una parte vacía ( $W_v$ ), considerando que esta última tiene un peso igual a cero. Las anteriores relaciones se pueden apreciar mejor en la *Figura 5.3*

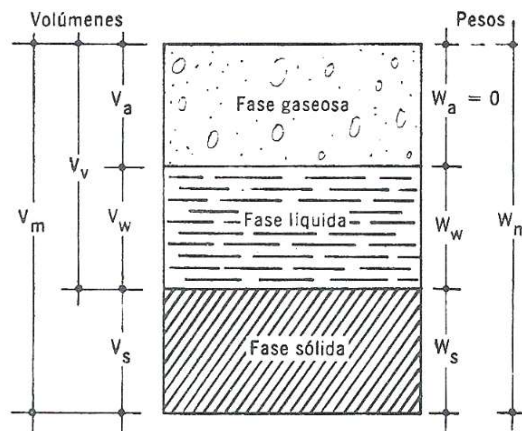


Figura 5.3 Esquema de un suelo o muestra de material idealizado. Fuente (Juárez-Badillo & Rico-Rodríguez, 1974):

Los anteriores valores se determinan generalmente en un laboratorio de mecánica de suelos acreditado, siendo que en el caso de nuestro material de tezontle los valores obtenidos son los indicados en la [Tabla 5.6](#).

**Tabla 5.6 Relaciones volumétricas y gravimétricas básicas del material de tezontle. Fuente: ensaye particular solicitado a Laboratorio de Mecánica de Suelos acreditado.**

Propiedad		Valor
Relación de vacíos	$e$	0.9
Porosidad	$n$ (%)	46
Grado de saturación	$G_w$ (%)	1.2
Humedad natural	$w$ (%)	0.7

En las relaciones anteriormente expuestas, se considera que la relación de vacíos y la porosidad se relacionan mediante las [Ecuaciones 5.7 y 5.8](#).

- $n = e / (1+e)$

**Ecuación 5.7**

- $e = n / (1-n)$

**Ecuación 5.8**

Las anteriores ecuaciones son las relaciones que se emplean cuando se intenta plantear la forma en que el agua interactúa con los vacíos que puede ocupar en un material. Ahora bien, [Juárez-Badillo & Rico-Rodríguez \(1974\)](#) nos explica que el flujo de agua a través de un medio poroso se rige mediante [Ley de Darcy](#), misma que se expresa de la siguiente manera:

- $Q = k i A$

**Ecuación 5.9**

Donde  $Q$  es el *caudal o gasto* en  $m^3/s$ ,  $k$  es constante identificada como *coeficiente de permeabilidad* en  $m/s$ ,  $A$  es el *área total de la sección* por la que atraviesa el agua en  $m^2$ , siendo  $i$  el gradiente hidráulico del flujo, esto es la diferencia de las alturas piezométricas alcanzadas por el agua una vez atravesado el medio (no confundir con la “i” de intensidad de lluvia expuesta en párrafos anteriores). La anterior ecuación se ejemplifica mediante un experimento con un permeámetro, siendo este un dispositivo donde se hace pasar agua de un punto a otro a través una sección rellena con determinado material (ver [Fig. 5.4](#)) y donde

es posible medir la pérdida de carga (*i.e.* alturas piezométricas) que experimenta el líquido entre el punto inicial y el punto final.

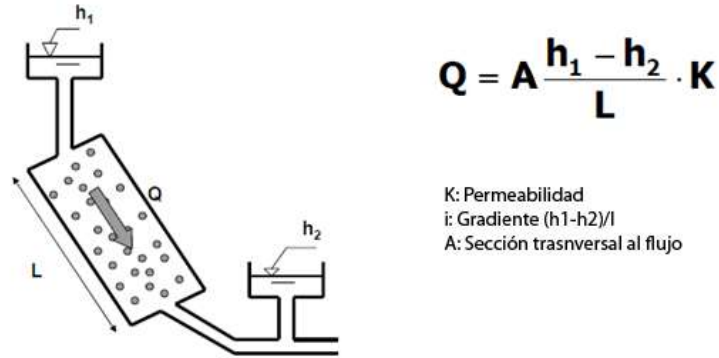


Figura 5.4 Esquemización de la Ley de Darcy. Fuente: (Universidad de Coruña, s.f.)

Si revisamos la [Ecuación 5.9](#) al mismo tiempo que la [Ecuación 2.1](#) (*i.e.*  $Q = A \cdot V$ ), podemos establecer la [Ecuación 5.10](#).

- $v = k i$

**Ecuación 5.10**

Donde  $v$  se identifica con una *velocidad de Darcy, velocidad de descarga o simplemente velocidad*, aclarando que la misma es válida para un flujo laminar, que es el flujo que se da entre arenas y materiales finos.

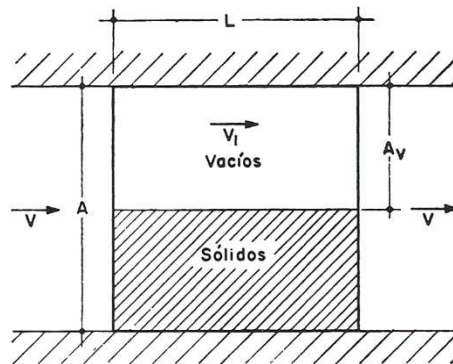


Figura 5.5 Esquema para distinguir entre velocidad de descarga ( $A \cdot v$ ) y velocidad de infiltración ( $A_v \cdot v_1$ ). Fuente: (Juárez-Badillo & Rico-Rodríguez, 1974)

En la [Figura 5.5](#), detallan Juárez-Badillo & Rico-Rodríguez (1974) que, para un flujo establecido ( $Q = A \cdot V$ ), el caudal de entrada debe ser igual al de salida. Esto es:

- $A v = A_v v_1$  **Ecuación 5.11**

Al desarrollar el anterior planteamiento y relacionarlo con las *Ecuaciones 5.7* y *5.8*, obtenemos:

- $V_1 = A/A_v \cdot v$  **Ecuación 5.12**

- $A/A_v = 1/n = \frac{(1+e)}{e}$  **Ecuación 5.13**

- $V_1 = \frac{(1+e)}{e} \cdot v$  **Ecuación 5.14**

En la *Ecuación 5.14*,  $v$  es la velocidad producto de la Ley de Darcy y  $v_1$  quedaría definido como *velocidad de infiltración*. Juárez-Badillo & Rico-Rodriguez (1974) sin embargo aclaran que esta última velocidad supone una trayectoria recta del flujo ( $L$ ), siendo que en la realidad sigue una trayectoria sinuosa e irregular ( $L_m$ ). Una ecuación final de infiltración entonces resulta más elaborada y en términos de exactitud, requeriría de identificar incluso las variaciones del área en los poros del material. La Ley de Darcy es producto del análisis de un material fino con una granulometría uniforme (arenas) y por ello no necesariamente se corresponde con materiales más gruesos.

*“Las investigaciones realizadas a partir de la publicación de la Ley de Darcy, indican que esa ley sólo es aplicable a suelos de partículas no muy gruesas, quedando desde luego excluidas, las gravas limpias, cantos rodados, etc.”. (Juárez-Badillo & Rico-Rodriguez, 1974)*

Podemos concluir del planteamiento anterior, que la *Ecuación 5.9* no es suficiente para determinar el retraso en la escorrentía producto de su paso a través del tezontle, siendo este un material grueso. Esto podemos ejemplificarlo considerando la relación de vacíos del material (valor  $e$ ) y aplicando la *Ecuación 5.14*. Así tenemos que igualando la velocidad inicial con nuestra intensidad de lluvia (*i.e.*  $v$ ), la velocidad de infiltración resultante (*i.e.*  $v_1$ ) duplica a la primera (ver *Tabla 5.7*), suponiendo que el flujo se diera en forma constante y en dirección perpendicular a una capa del material.

Tabla 5.7 Ejemplo de evaluación teórica de la velocidad de infiltración en el tezontle, consideran un flujo constante a través del material. Cálculo: elaboración propia

Si $v =$ 135.82 mm/h	<b>Ecuación 5.13</b>	Para $e =$ 0.9
$v =$ 3.77E-05 m/s	$V_1 = \frac{(1+e)}{e} * v$	$v_1 =$ 7.96E-05 m/s

Respecto a la [Ecuación 5.9](#), aunque existen ciertos métodos que intentan relacionar el valor  $k$  de porosidad con una curva granulométrica, [Juárez-Badillo & Rico-Rodriguez \(1974\)](#) señalan que los mismos en la práctica varían considerablemente, al estar seguramente influenciadas por otros factores adicionales al tamaño de las partículas.

Como lo refiere literatura especializada (*e.g. Borfitz, 2008*), el valor  $k$  es definido en la actualidad en un laboratorio mediante pruebas con un permeámetro de carga constante (materiales de alta permeabilidad como gravas y arenas) o bien de carga variable (materiales de baja permeabilidad, tales como arcillas y limos). [González-Martín \(2016\)](#) obtiene en su análisis de tezontle mediante un permeámetro de carga constante valores de  $k$  que varían entre  $1.5 \times 10^{-1}$  y los  $3.5 \times 10^{-1}$  cm/s, valores que señala el autor son coincidentes con bibliografía consultada que sitúa dicho valor alrededor de los  $1.1 \times 10^{-1}$  cm/s. Sobre dicha bibliografía, podemos apreciar en la [Figura 5.6](#) que de igualar nuestro valor obtenido en la [Tabla 5.7](#) con el valor  $k$ , una velocidad  $7.96 \times 10^{-5}$  m/s es equivalente a  $7.96 \times 10^{-3}$  cm/s. Esto sitúa al tezontle de la propuesta como un material con características de buen drenaje, en el límite entre las gravas y arenas limpias con materiales más finos.

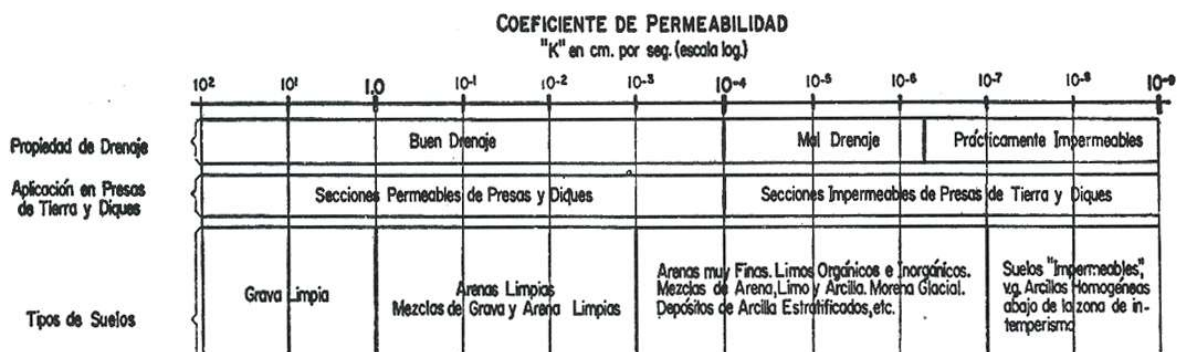


Figura 5.6 Coeficiente de permeabilidad general (k) de acuerdo al tipo de material. Fuente: [\(Juárez-Badillo & Rico-Rodriguez, 1974\)](#)

### 5.2.3 Experimento con simulador de lluvia

En los subcapítulos anteriores se hizo una evaluación teórica del posible comportamiento del agua y el material de tezontle, propuesto este último como capa retardadora de la escorrentía pluvial. En esta sección, se procede a hacer una evaluación experimental de la hipótesis, empleando para ello un simulador de lluvias ubicado en el laboratorio de hidráulica del ITESO.

El equipo utilizado es el modelo S12MKII, el cual se presenta en la [Figura 5.7](#). El sistema comprende a grandes rasgos una mesa de trabajo/cajón metálico con dimensiones de 2.0x1.0x0.20m interiores, elevada 1.50 m sobre el piso. Mediante su estructura de soporte, la mesa es capaz de ajustar una pendiente longitudinal de 0 hasta el 5%. Sobre la mesa se ubican a su vez una serie de aspersores con posibilidades de proporcionar un flujo de agua de hasta 3.0 lts/min. Llegado a cierto nivel sobre el fondo de la mesa, el agua fluye por un vertedor al extremo, donde puede ser medido el gasto en forma visual en un recipiente graduado para tal fin. Saliendo de dicho recipiente, el agua es captada en la parte inferior de la estructura y re bombeada a los aspersores nuevamente. El sistema es capaz de realizar una gran variedad de evaluaciones de carácter hidrológico e hidráulico, como son:

- Determinación de hidrogramas de escorrentía de cuencas modelo, incluyendo tormentas múltiples, tormentas móviles, efecto del almacenamiento del reservorio y desagües.
- Construcción de curvas de descenso para sistemas de uno o dos pozos en una cama de arena.
- Gradientes hidráulicos en el flujo de agua subterránea.
- Investigación del flujo de la corriente en un modelo de material aluvial.
- Formación de características fluviales y su desarrollo a lo largo del tiempo.
- Transporte de sedimentos, movimiento, socavación y erosión.

Los datos anteriores son listados en el folleto técnico del fabricante [Armfield \(s.f.\)](#).





Figura 5.7 Simulador de lluvia S12MKII. Fuente: (Armfield, s.f.)

Respecto al experimento propuesto. Este implica inicialmente medir la operación del simulador de lluvia con un flujo constante de agua en pendientes de 1 y 2%, registrando el *tiempo de concentración* ( $T_c$ ) característico de cada situación. Posteriormente, se procede a colocar una capa de tezontle (*i.e.* 0.0381 m de espesor), volviendo a poner en operación el simulador y replicando tanto el flujo como las pendientes iniciales, registrando los tiempos que se den en estos escenarios. Finalmente se repite el experimento por una tercera ocasión, modificando únicamente el espesor del tezontle al considerar una segunda capa (*i.e.* 0.0762 m de espesor total). Los espesores de capa de tezontle propuesto, son los estimados en el [Capítulo 3](#) como las capas factibles de instalar en una azotea existente. Las pendientes escogidas se corresponden con las indicadas en normativas de construcción (*e.g.* [CONAVI, 2017](#)). El tiempo de concentración ( $T_c$ ) registrado, será aquel en que el caudal de salida coincida o se aproxime en forma estable al caudal de entrada.

Considerando la porosidad y absorción del material, para que el sistema registre en cada evento los tiempos de concentración sin que estas propiedades generen variaciones entre los primeros registros (*e.g.* material seco) y los últimos registros (*e.g.* material húmedo), el material se satura con antelación. Adicionalmente, antes de empezar con la recolección de datos, se deja el sistema operando 30 minutos. Con este procedimiento, se busca asegurar que todos los registros operen en igualdad de condiciones y reflejen un resultado que se

corresponda con el coeficiente de escurrimiento del material. Los caudales de entrada fueron fijados entre los 2.2 a 2.4 l/min, lo que equivaldría dada las dimensiones de la mesa, a una lluvia con intensidad de 66 a 72 mm/hr (como punto de comparación, la intensidad con la que se trabajó la [Ecuación 5.1](#) es de 135.82 mm/hr). Por limitaciones del sistema, los caudales indicados son los máximos que se podían conseguir durante los experimentos. Imágenes del equipo antes y durante la ejecución de las pruebas se muestran en las [Figuras 5.8 y 5.9](#).



**Figura 5.8** Mesa de trabajo libre y medición de caudales iniciales. Fuente: elaboración propia



**Figura 5.9** Mesa con dos capas de tezontle. Fuente: elaboración propia

En el experimento, originalmente se buscó una recolección de datos auxiliados de la instrumentación electrónica del sistema, pero esto no fue posible por una falla técnica del mismo. En su lugar, se procedió a hacer grabaciones de video sobre el recipiente graduado

del vertedor de salida (ver [Figs. 5.10](#) y [5.11](#)), mismas que posteriormente se revisaron a fin de vaciar los datos del gasto conforme este avanzaba con el tiempo. Estos datos posteriormente se grafican en relaciones gasto-tiempo transcurrido (*i.e.* escurrimiento vs tiempo de concentración).



Figura 5.10 Registro de caudales de entrada  $Q$  (l/min): a) al iniciar; b) al terminar. Fuente: elaboración propia

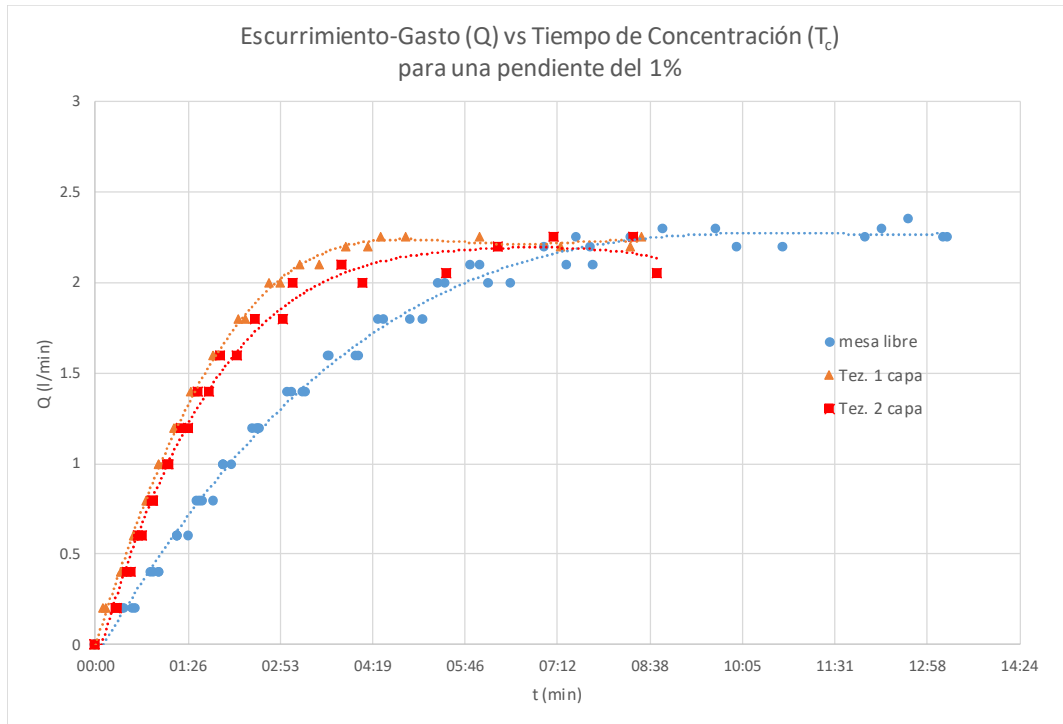


Figura 5.11 Registro de caudales de salida  $Q$  (l/min): a) al iniciar; b) al terminar. Fuente: elaboración propia

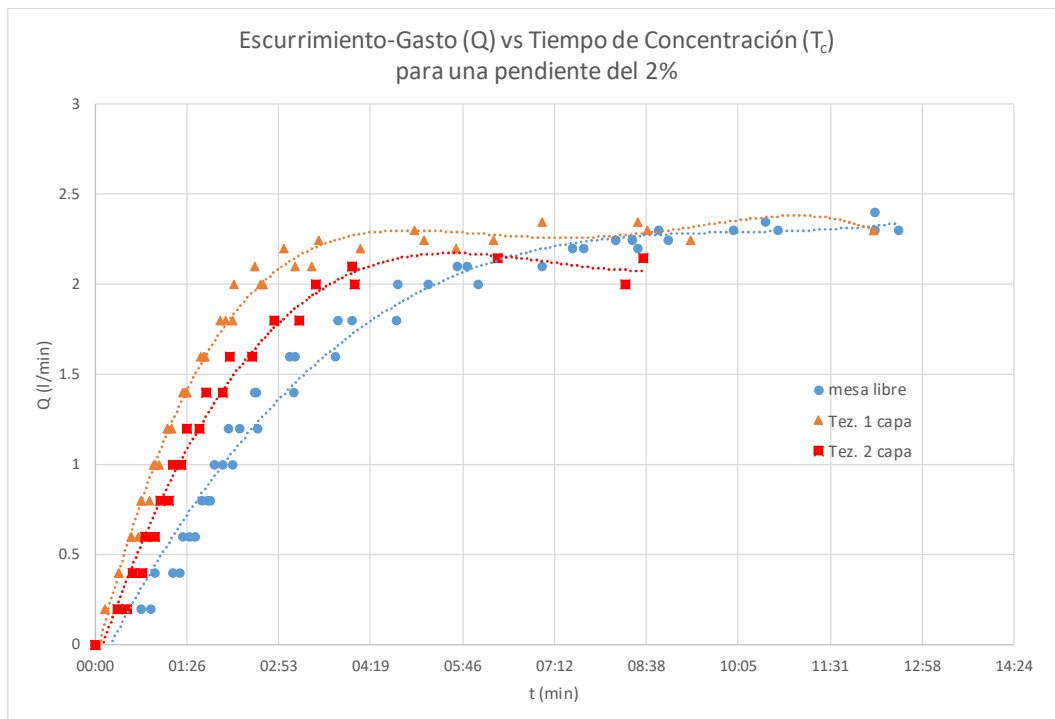
De la [Ecuación 2.1](#), sabemos que un caudal de entrada debe de corresponderse con el caudal de salida. El periodo de tiempo en que esto ocurre representa un *tiempo de concentración* ( $T_c$ ), dato que en forma gráfica se aprecia cuando la curva de la relación gasto-tiempo se normaliza (*i.e.* tiende a la horizontal). En las [Gráficas 5.1](#) y [5.2](#) se encuentran vaciados los registros del experimento efectuado en el simulador de lluvias,

considerando los diferentes escenarios propuestos. Los resultados de los registros completos se incluyen en el el [Anexo A3.2](#).

**Gráfico 5.1 Registro de datos en el simulador de lluvias con pendiente al 1%. Fuente: elaboración propia.**



**Gráfico 5.2 Registro de datos en el simulador de lluvias con pendiente al 2%. Fuente: elaboración propia.**



Ya que todo el registro se hizo en forma visual (*i.e.* videos) y la lectura del recipiente graduado no es precisa, no es posible determinar el  $T_c$  en forma exacta. Sin embargo, como los apreciamos tanto el [Gráfico 5.1](#) como en el [Gráfico 5.2](#), cuando la mesa se encuentra libre, el flujo adopta una curva suave que se llega a normalizar sobrepasado los ocho minutos. Por el contrario, cuando agregamos la primera capa de tezontle, la pendiente de la curva en su parte inicial se vuelve mucho más pronunciada (*i.e.* se acorto el  $T_c$ ), tendiendo a la vertical cuando se aumenta la pendiente al 2%. En estos escenarios, los tiempos de concentración son inferiores a los cuatro minutos. Solo cuando consideramos una segunda capa de tezontle la curva vuelve a relajarse, si bien los  $T_c$  continúan siendo menores con respecto a la superficie de la mesa libre, quedando sobre los cinco minutos.

**Tabla 5.8 Tiempos promedios de concentración alcanzados para flujos de uno y dos litros por minuto. Fuente: elaboración propia.**

<b>Pendiente</b>	<b>Gasto</b>	<b>mesa libre</b>	<b>tezontle 1 capa</b>		<b>tezontle 2 capas</b>	
		<b>Tiempo prom. registrado</b>	<b>Tiempo prom. registrado</b>	<b>Variación (%)</b>	<b>Tiempo prom. registrado</b>	<b>Variación (%)</b>
<b>con 1%</b>	1 lt/min	00:02:02	00:01:00	51%	00:01:08	44%
	2 lt/min	00:05:51	00:02:48	52%	00:03:38	38%
<b>Reducción promedio del <math>T_c</math> respecto a la mesa libre:</b>				<b>52%</b>		<b>41%</b>
<b>con 2%</b>	1 lt/min	00:02:00	00:00:57	53%	00:01:17	36%
	2 lt/min	00:05:20	00:02:28	54%	00:03:46	29%
<b>Reducción promedio del <math>T_c</math> respecto a la mesa libre:</b>				<b>53%</b>		<b>33%</b>

En la [Tabla 5.8](#) podemos apreciar en forma más concisa esta disminución en el tiempo de concentración considerando solo el tiempo en que los diferentes escenarios alcanzaron el uno y los dos litros por minuto. Así tenemos en promedio que, la propuesta con una capa de tezontle alcanza el mismo caudal que la mesa libre en alrededor del 52% del tiempo de la primera, para ambos casos de pendiente. Para dos capas de material, se consigue un 41% de ganancia respecto al tiempo de la mesa libre con el 1% de pendiente, siendo del 33% con el 2% de pendiente.

Los resultados anteriores son consistentes en una disminución del tiempo de concentración. Esto implica que *la escorrentía, estando el material ya saturado, tiende a acelerar su paso antes que retrasarse*. Se hace entonces necesario un análisis hidráulico

adicional sobre la respuesta obtenida en el experimento, para lo cual se plantean las siguientes hipótesis:

- El modelo del experimento es demasiado reducido como para efectivamente reproducir una escorrentía fluyendo sobre una azotea. En este caso, atendiendo a un comportamiento hidráulico antes que hidrológico sobre la mesa de trabajo, lo que acontece es una disminución del área hidráulica visto en planta (*i.e.* el agua cuenta con menos área donde distribuirse) y una reducción de la sección hidráulica en el sentido del flujo transversal (*i.e.* se trata del mismo flujo atravesando por un área que ha sido disminuida). Con el material ya saturado, el agua incrementa su velocidad en su tránsito hacia la salida, entendiendo que el sistema trabaja hacia un régimen estable entre el caudal de entrada y el caudal de salida.
- La fórmula racional implica un modelo de recorrido del agua de forma superficial, pero en el caso del experimento, esta se concentra en un vertedero de salida. Expresado también en términos hidráulicos, existe un incremento en la altura del tirante del vertedero entre un régimen mayoritariamente horizontal y coincidente con el borde de salida, y aquel que se eleva producto de las sucesivas capas de tezontle (*i.e.* la sección de salida del vertedero en ancho es la misma, pero en altura se modifica).
- Como lo señala la literatura consultada, las fórmulas de velocidad de infiltración en medios porosos parecen corresponderse mejor con materiales finos, donde el espesor completo de la capa efectivamente genere un gradiente hidráulico entre el punto de entrada y la sección de salida. En el caso del tezontle, existe suficiente espacio entre las partículas como para que el agua lo recienta en su velocidad final dentro de la masa del material (*i.e.* opera como dren).
- Por último, el experimento trabajó con un material completamente saturado. Esto implica que, con el material seco, existe un periodo de tiempo en que el material se humedece, absorbe y retiene el agua. En una situación real, se esperaría que hubiera un retraso inicial en los tiempos de concentración.

### 5.3 Conclusiones del capítulo

Las fórmulas estudiadas para determinar las variaciones de la escorrentía pluvial como resultado de colocar una capa de tezontle sobre la azotea no son consistentes con el fin buscado. En el caso del tiempo de concentración, el *método racional* arroja resultados del orden del 10% en reducción del caudal empleando el tezontle respecto a una superficie de concreto. Se aclara, este método tiene una alta dependencia de un *coeficiente de escurrimiento*, mismo que varía entre diferentes autores y su propósito es ofrecer gastos con los cuales se diseñan las obras de drenaje. Por otra parte, un análisis del proceso de infiltración con las ecuaciones existentes para estudiar el flujo del agua no resulta aplicables en materiales gruesos, ya que resulta en mayores velocidades de flujo. Si bien se estima que el material posee buenas características drenantes dada su *velocidad de infiltración*, un estudio más preciso implicaría determinar el *coeficiente de permeabilidad  $k$*  y la determinación de la velocidad y caudal mediante la *fórmula de Darcy*. La literatura consultada también señala que dicha fórmula es de aplicación en materiales finos y no se tienen en la actualidad una fórmula consistente con variaciones en la granulometría del material.

Finalmente, el experimento en laboratorio arrojó incertidumbre sobre la conveniencia de colocar el material propuesto sobre la superficie de la azotea, si el propósito es retrasar la escorrentía pluvial. Los resultados registrados apuntan a que una vez se encuentre saturado el material, el tiempo de concentración se reduce, propiciado por una reducción del área o sección hidráulica y un aumento en el tirante sobre el vertedor de salida. Aun así, el experimento fue consistente en los resultados entre poner una y dos capas de material (se amplió el  $T_c$ ) y las diferentes pendientes (a mayor pendiente, se redujo el  $T_c$ ). Se observó que el material se trabajó completamente saturado, esperando observar el comportamiento del agua afectado únicamente por el coeficiente de escurrimiento y las propiedades volumétricas del mismo (porosidad y vacíos), pero posiblemente este aspecto del experimento también influyó en los resultados finales.

# Capítulo 6

## *De la evaluación de la propuesta desde el punto de vista estructural*

---

### 6.1 Introducción

Como se hiciera mención en el [Capítulo 3](#), toda carga impuesta adicionalmente a una estructura debe ser analizada cuando la misma sobrepasa el diseño original del elemento constructivo que la soporta. Complementariamente, esta revisión debe de incluir toda la estructura en su conjunto. Como se explicó en dicho capítulo, se propone la instalación de una capa de tezontle (*i.e.* capa de 0.0762 m de espesor total) sobrepuesta en las azoteas de vivienda de interés social del AMG. Sin embargo, en el [Capítulo 1](#) se señaló que dentro de los criterios que norman la construcción de este tipo de edificaciones, impera la economía en cuanto a materiales y sistemas constructivos, lo cual puede generar incertidumbre sobre la factibilidad estructural de la propuesta planteada en esta investigación (*i.e.* resistencia ante la nueva carga impuesta).

Aunque los experimentos de campo se plantearon de tal forma que la capa propuesta de material se mantuviera por debajo de los 100 kg/m<sup>2</sup> (*e.g.* [NTC, 2004](#)), se hace necesario una exposición más amplia de las implicaciones estructurales de la propuesta y la metodología necesaria para evaluarla. Para ello, partiendo de la teoría básica del diseño estructural, se evalúa un modelo de la propuesta conforme a la normativa consultada. Se pone especial atención en: el peso del material y sus posibles variaciones; el tipo de carga y esfuerzo de orden gravitacional que genera, así como las implicaciones de carácter transitorio o accidental (*i.e.* respuesta sísmica). El modelo de evaluación propuesto considera que el mismo se implementa en una azotea de vigueta y bovedilla de concreto soportada por muros de mampostería.



## 6.2 Análisis estructural de la azotea existente

### 6.2.1 Teoría estructural

El *diseño o análisis estructural* son las actividades (ensayos y cálculos) que nos permiten formular y proyectar la operación de una estructura (cualquiera que fuera el material, el arreglo de este y su operación junto a otros elementos) ante las cargas y esfuerzos que se le impongan en determinado tiempo, ya sean de carácter estático o bien dinámico. El término *estructura* se utiliza en la construcción para definir los elementos básicos y de soporte vertical y horizontal de una edificación (e.g. el armazón o sistema resistente: cimentación, columnas, muros, vigas, losa), aunque también se da el caso donde el término abarque la totalidad de la misma (e.g. canales, presas y puentes son estructuras *per se*). Una estructura es además un conjunto de subsistemas que deben trabajar en forma coordinada, de ahí que una modificación en una de sus partes implique una revisión del todo.

El objetivo del *diseño estructural* es “*producir estructuras con un mejor rendimiento, es decir, que sean seguras, económicas, funcionales y duraderas (Gallo-Ortiz, et al., 2005)*”. No teniendo contemplado en este *TOG* una descripción detallada de esta disciplina, citando a *Hill (1978)* resumiremos que el planteamiento básico del análisis estructural es:

1. Las estructuras tienen solo *dos formas de falla* y;
2. Existen solo *dos tipos de esfuerzos* <sup>(21)</sup>.

En la forma que la estructura responde a estos dos planteamientos podremos acusar *fallas estructurales* tales como grietas y fisuras o bien, en el peor de los casos, el colapso y derrumbe de la edificación. Una descripción sobre los tipos de falla y sus manifestaciones se indican en la *Tabla 6.1*.

---

<sup>21</sup> Un esfuerzo se define como la “intensidad de las fuerzas o componentes internas que resisten un cambio en la forma de un cuerpo” (Suárez-Montes, 1993). Se expresa como carga o fuerza por unidad de área (Kg/cm<sup>2</sup> o N/cm<sup>2</sup>)

Tabla 6.1 Tipos de falla. Fuente: (Hill, 1978)

a) <b>Por Resistencia insuficiente ante una carga:</b> el material se desplaza, desgarrar, rasga o rompe.
b) <b>Por Rigidez insuficiente ante un esfuerzo, lo que provoca deformación excesiva:</b> la estructura se deforma en demasía, tiene curvatura excesiva, “vibra extensamente” o se pandea.

Aunque podemos agregar variables adicionales que generen o modifiquen una falla (*e.g.* vida útil de la estructura u edad, acción de la temperatura, la aplicación de cargas vivas o cargas dinámicas adicionales, etc.), lo ideal es que dichas variables se incluyan de una u otra forma en el análisis estructural, como podría ser al aplicar determinados *factores de seguridad o de incertidumbre razonable*.

Sobre los *dos tipos de esfuerzos*, Hill (1978) los identifica como esfuerzo *normal* (*i.e.* axial) y esfuerzo *tangencial* (*i.e.* cortante). El autor aclara que los esfuerzos de flexión (*i.e.* esfuerzo “normal” inducido por la flexión), el esfuerzo de contacto (*i.e.* esfuerzo “normal” inducido por el contacto de un cuerpo sobre otro) y el esfuerzo de torsión (*i.e.* esfuerzo “tangencial” inducido por la torsión), son manifestaciones adicionales de los dos primeros.

Esta reducción de esfuerzos puede resultar sobre simplificada. Funciona para edificaciones sencillas y de baja altura. En nuestro país, no debemos perder de vista sus características geofísicas, donde el riesgo por sismicidad es alto. Aquí debemos complementar el análisis de la estructura para que el mismo sea sismo resistente. Gomez-Tremari (1988) nos detalla que las fuerzas inerciales generadas por un movimiento sísmico varían en una estructura en función de que la misma no es infinitamente rígida y puede presentar deformaciones.

Matemáticamente, los esfuerzos son formulados para que representen la respuesta de un material, acorde a las propiedades mecánicas del mismo (*i.e.* resistencia, rigidez, elasticidad, plasticidad, etc.). Hill (1978) ubica que esta formulación obedece a criterios de *Diseño por Esfuerzos de Trabajo* (DET) o de *Resistencia Ultima* (DRU). Este último criterio es el que hace uso de los factores de seguridad mencionados párrafos atrás, siendo también

el utilizado en en el Reglamento de Construcción del Distrito Federal (*e.g. NTC, 2004*), tal y como nos lo hace ver [Gallo-Ortiz et al. \(2005\)](#). El *Diseño por Resistencia Ultima (DRU)* plantea:

- $FR (AR) \geq FC (AS)$

### Ecuación 6.1

Donde **AR** (acción resistente) es el valor de la resistencia esperada multiplicado por un factor de reducción **FR**. A su vez, **AS** (acción de servicio) es el valor de la carga de servicio que se incrementa por un factor de carga **FC**. Esto es, continua [Gallo-Ortiz et al. \(2005\)](#), la primera parte de la ecuación genera un valor conservador, mientras que la segunda parte considera la posibilidad de combinaciones desfavorables de las acciones.

#### 6.2.2 Formulación de las cargas y esfuerzos a los que se somete la azotea existente

En toda evaluación estructural debe existir una guía o planteamiento inicial sobre que vamos a revisar y como lo vamos a revisar. Nuestra propuesta va encaminada a instalar una capa de material sobrepuesta en una azotea existente, por lo que vale la pena revisar en qué forma se abordan intervenciones de este tipo en proyectos similares, como pudiera serlo la instalación de una azotea verde (ver [Tabla 6.2](#)).

**Tabla 6.2 - Evaluaciones clave para el diseño del soporte estructural en azoteas verdes. Fuente ([United States General Services Administration, 2011](#))**

- Las variaciones del peso de diseño de un techo pueden provocar fallas estructurales.
- La carga muerta de un conjunto de techo verde debe determinarse según el proyecto específico.
- Los ingenieros deberían evaluar la probabilidad de que un techo verde tenga un impacto material en otras áreas de carga, incluidas cargas sísmicas, derrumbes de nieve y retención intencional de agua de lluvia.
- Los diseñadores deben revisar los planos arquitectónicos para determinar las capacidades de carga de diseño, o volver a calcularlos a partir de una evaluación de la estructura existente.
- Se pueden tomar medidas de refuerzo suplementarias para permitir que un edificio admita un techo verde, pero estos pueden tener un costo prohibitivo.

Podemos concluir de la tabla anterior, los aspectos básicos que debemos tener en cuenta para evaluar una propuesta como la nuestra son: la *determinación de la carga que afecta la estructura existente*; su *impacto en combinación con fenómenos naturales* (*e.g.* agua que pudiera retener; aceleraciones laterales por sismo) y; la *capacidad real de la estructura partiendo de la revisión de un proyecto estructural existente*. Para [Gallo-Ortiz et al. \(2005\)](#),

las *acciones* (i.e. cargas) que afectan una estructura pueden ser de índole *permanente* (e.g. peso propio de la estructura o carga muerta), *variable* (e.g. la ocupación del inmueble o carga viva) y *accidentales* (e.g. las que presentan valores significativos en tiempos relativamente cortos, tales como el viento o un sismo). Para la evaluación de las cargas en esta propuesta, partamos de la *Tabla 3.9* en el *Capítulo 3* y ampliémosla considerando adicionalmente la presencia de agua en temporada de lluvias.

**Tabla 6.3 Pesos por m<sup>2</sup> de material seco y húmedo que se pueden generar en la azotea en función del peso volumétrico de un material sobrepuesto. Fuente: elaboración propia.**

Espesor propuesto de la capa sobre la azotea (m)		Peso volumétrico del material seco (kg/m <sup>3</sup> )						
		722.00	750.00	1,000.00	1,250.00	1,500.00	1,750.00	2,000.00
		Carga generada (kg/m <sup>2</sup> )						
1 capa	0.0381	27.51	28.58	38.10	47.63	57.15	66.68	76.20
<b>2 capas</b>	<b>0.0762</b>	<b>55.02</b>	57.15	76.20	95.25	114.30	133.35	152.40
3 capas	0.1143	82.52	85.73	114.30	142.88	171.45	200.03	228.60
4 capas	0.1524	110.03	114.30	152.40	190.50	228.60	266.70	304.80
Espesor de la capa sobre la azotea (m)		Peso del material húmedo (kg/m <sup>3</sup> ) para:			e =	0.90		
		794.20	825.00	1,100.00	1,375.00	1,650.00	1,925.00	2,200.00
		Carga generada (kg/m <sup>2</sup> )						
1 capa	0.0381	30.26	31.43	41.91	52.39	62.87	73.34	83.82
<b>2 capas</b>	<b>0.0762</b>	<b>60.52</b>	62.87	83.82	104.78	125.73	146.69	167.64
3 capas	0.1143	90.78	94.30	125.73	157.16	188.60	220.03	251.46
4 capas	0.1524	121.04	125.73	167.64	209.55	251.46	293.37	335.28
Espesor de la capa sobre la azotea (m)		Peso del material húmedo (kg/m <sup>3</sup> ) para:			e =	0.70		
		938.60	975.00	1,300.00	1,625.00	1,950.00	2,275.00	2,600.00
		Carga generada (kg/m <sup>2</sup> )						
1 capa	0.0381	35.76	37.15	49.53	61.91	74.30	86.68	99.06
2 capas	0.0762	71.52	74.30	<b>99.06</b>	123.83	148.59	173.36	198.12
3 capas	0.1143	107.28	111.44	148.59	185.74	222.89	260.03	297.18
4 capas	0.1524	143.04	148.59	198.12	247.65	297.18	346.71	396.24
Espesor de la capa sobre la azotea (m)		Peso del material húmedo (kg/m <sup>3</sup> ) para:			e =	0.50		
		1,083.00	1,125.00	1,500.00	1,875.00	2,250.00	2,625.00	3,000.00
		Carga generada (kg/m <sup>2</sup> )						
1 capa	0.0381	41.26	42.86	57.15	71.44	85.73	100.01	114.30
2 capas	0.0762	82.52	85.73	114.30	142.88	171.45	200.03	228.60
3 capas	0.1143	123.79	128.59	171.45	214.31	257.18	300.04	342.90
4 capas	0.1524	165.05	171.45	228.60	285.75	342.90	400.05	457.20

La *Tabla 6.3* trabaja con el peso suelto del material de tezontle de 722 kg/m<sup>3</sup> y hace una aproximación a su peso completamente saturado, en función de su relación de vacíos de  $e = 0.9$  (relación volumétrica expuesta en el *Capítulo 5*). Igualmente, se presentan corridas adicionales con pesos volumétricos hasta los 2000 kg/m<sup>3</sup> (e.g. gravas) y relación de vacíos hasta los 0.5 (e.g. arenas).

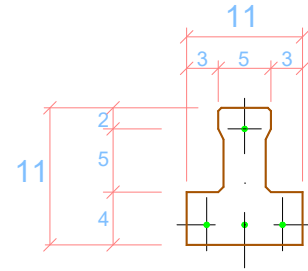
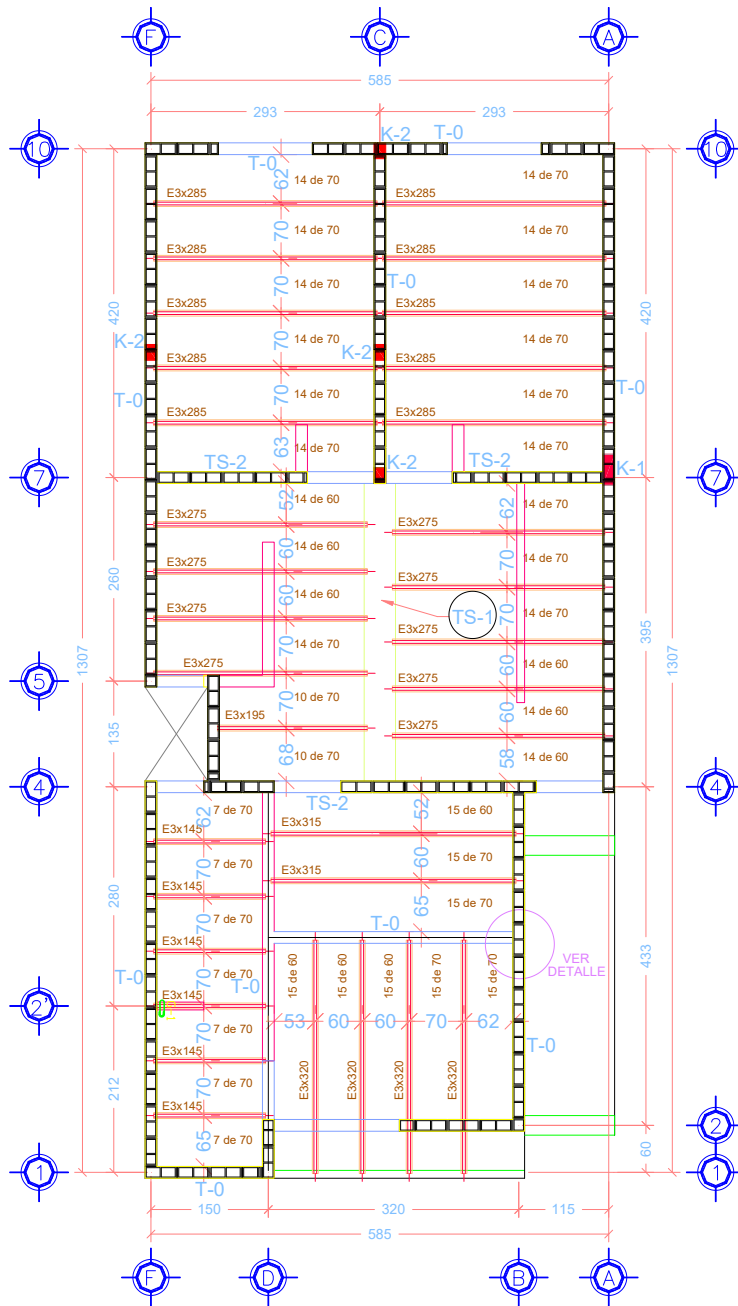
Como podemos observar, tomado como valor límite  $100 \text{ kg/m}^2$  identificado en diferentes reglamentaciones para azoteas planas (e.g. *NTC, 2004*)<sup>22</sup>, el tezontle de esta propuesta incluso saturado se mantiene en un margen estructural seguro con un espesor de  $0.0762 \text{ m}$  (i.e.  $55.02 \text{ kg/m}^2$  en estado seco y  $60.52 \text{ kg/m}^2$  en estado saturado). De emplear otro material, considerando el espesor de capa señalado, éste preferentemente deberá contar con un peso volumétrico inferior a los  $1000 \text{ kg/m}^3$  y una relación de vacíos por encima del  $0.7$  para mantenernos dentro del valor límite indicado (ver variaciones en la *Tabla 6.3* identificando por colores los incrementos obtenidos).

Ahora bien, definido la *carga adicional* que actúa en la estructura, se hace necesario evaluar la forma en que se modifican los esfuerzos a los que se ve sometida. Esto verificaría nuestra primera aseveración en cuanto el espesor del material a utilizar o nos permite modificarlo. Una edificación se analiza para resistir cargas gravitacionales de servicio (i.e. cargas muertas y vivas) y accidentales (i.e. de viento y por sismo). Las de viento no se tratarán en este trabajo (aunque vale la pena recordar las observaciones de estudios sobre la afectación del viento en cubiertas con grava mencionadas en el *Capítulo 2*). Las cargas por sismo se analizarán en el subcapítulo siguiente.

Tratándose de una edificación existente, debemos evaluar la *información estructural* con que la misma fue construida. En este caso, se presenta la *Figura 6.1*, donde se muestra el detalle estructural del sistema de azotea y un resumen de los datos que para el análisis sísmico se emplearon en dicha edificación. Complementariamente, en la *Tabla 6.4* se resumen las especificaciones del sistema de vigueta empleado en la azotea y que se corresponde con lo señalado en la *Figura 6.1*.

---

<sup>22</sup> En el Anexo 4, se transcribe la Tabla de Cargas Vivas Unitarias planteadas como base para determinar los  $100 \text{ kg/m}^2$  como valor límite.



### VIGUETA DE PATIN RECTO E-11 MCA. NAPRESA

- 1.- DIMENSIONES EN CENTIMETROS EXCEPTO INDICADAS
  - 2.- CHECAR COTAS, NIVELES Y EJES CON PLANOS ARQUITECTONICOS
  - 3.- LAS COTAS RIGEN AL DIBUJO, CUALQUIER MEDIDA TOMADA A ESCALA SERA BAJO RESPONSABILIDAD DEL CONSTRUCTOR
  - 4.- CALIBRES DE VARILLAS EN NUMEROS DE OCTAVOS DE PULGADA
  - 5.- CUMPLIR CON LAS ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCION A.C.I. 318-05
  - 6.- CONCRETO :
    - EN DALAS Y CASTILLOS  $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$
    - EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES  $f'c = 200 \text{ kg/cm}^2$
  - 7.- ACERO DE REFUERZO  $f'y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ , EXCEPTO PARA VARILLAS DEL NUMERO 2, QUE SERA  $f'y = 2,300 \text{ kg/cm}^2$
  - 8.- LOS ESTRIBOS INDICADOS EN LAS TRABES IRAN APARTIR DEL PAÑO DE LA COLUMNA.
  - 9.- COEFICIENTE SISMICO UTILIZADO  $C = 0.36$
- ESTRUCTURA DEL GRUPO B**
- 10.- FACTOR DE COMPORTAMIENTO SISMICO  $Q = 2.0$
  - 11.- CARGAS VIVAS UTILIZADAS EN EL PROYECTO
 



PARA ENTREPISO	190.00 $\text{kg/m}^2$
PARA AZOTEA PLANA	100.00 $\text{kg/m}^2$
PARA AZOTEA INCLINADA	60.00 $\text{kg/m}^2$
  - 12.- ESFUERZO EN EL TERRENO
 

TERRENO DE DESPLANTE	0.80 $\text{kg/cm}^2$
----------------------	-----------------------

## ESTRUCTURACION PLANTA AZOTEA

Figura 6.1 Detalles estructurales de la planta de azoteas empleadas en este TOG. Fuente: elaboración propia

Tabla 6.4 Especificaciones de vigueta T-11 empleada en el sistema constructivo de la azotea en estudio. Fuente: NAPRESA®

Vigueta	Armado $f_s=16,000 \text{ kg/cm}^2$	Momento Flector útil	Momento en sección compuesta	Cortante en sección compuesta
T11 E-2	2 $\emptyset$ inf.5mm + 1 $\emptyset$ sup. 3 mm	235 kg·m	395 kg·m	650 kg
<b>T11 E-3</b>	3 $\emptyset$ inf.5mm + 1 $\emptyset$ sup. 3 mm	250 kg·m	<b>545 kg·m</b>	<b>705 kg</b>
T15 A-3	3 $\emptyset$ inf.5mm + 1 $\emptyset$ sup. 5 mm	520 kg·m	720 kg·m	850 kg
T15 A-4	4 $\emptyset$ inf.5mm + 1 $\emptyset$ sup. 5 mm	650 kg·m	880 kg·m	950 kg
T20 M-5	4 $\emptyset$ inf.5mm + 1 $\emptyset$ sup. 5 mm	1000 kg·m	1300 kg·m	1200 kg
<b>Vigueta Preesforzada T-11</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Base</b>	<b>Altura</b>	<b>Peso</b>	
E-2	11 cm	11 cm	19 kg/ml	
E-3				
* De concreto pretensado $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$ y acero $f_s=16,000 \text{ kg/cm}^2$				
<b>Bovedilla de jalcreto T-11</b>				
<b>Tipo (ancho)</b>	<b>Medidas</b>		<b>Peso</b>	
60	h = 11 cm		10 kg/pza	
70	b = 20 cm		12.5 kg/pza	

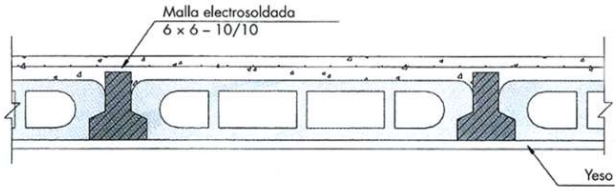
En la *Figura 6.1*, la planta de azoteas indicada hace referencia a un *sistema de vigueta y bovedilla*, soportado por *muros de mampostería*. La vivienda a su vez cuenta con una cimentación a base de *losa maciza de concreto*. Para resistir las cargas gravitacionales en una azotea, particularmente una como a la que hacemos referencia, los esfuerzos que se generan son de tensión en su parte inferior y de compresión en la parte superior. Las ecuaciones que se desarrollan para representarlos comprenden a su vez la determinación de un *cortante último ( $V_U$ )* y *momento último ( $M_U$ )*, considerando una *carga ( $w$ )* que actúa sobre una *viga simplemente apoyada*. Partiendo de la *Ecuación 6.1*, tenemos:

$$\bullet \quad V_R \geq V_U \quad \text{donde } V_U = \frac{wl}{2} \quad \text{Ecuación 6.2}$$


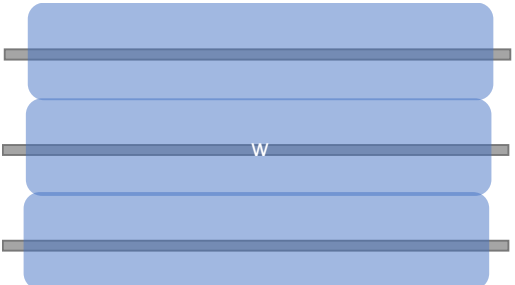
$$\bullet \quad M_R \geq M_U \quad \text{donde } M_U = \frac{wl^2}{8} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Al tratarse de una viga compuesta (*i.e.* la sección requiere de cálculos elaborados a fin de obtener la distribución de esfuerzos), tanto  $V_R$  como  $M_R$  (*i.e.* los esfuerzos resistentes) lo tomaremos directamente de los valores indicados en la *Tabla 6.4* (*i.e.* 545 kg·m y 705 kg respectivamente de la viga T11-E3). Por otra parte, el valor de  $w$ , corresponde a una *carga uniformemente distribuida* (expresado en kg/m), misma que obtenemos al repartir el peso total de la azotea entre el área tributaria que cada viga soporta (*i.e.* el área entre cada viga por la longitud de cada una de estas). Recordemos que este carga deberemos afectarla por

un **factor de 1.4** conforme a los lineamientos de las **NTC (2004)**. El desglose del valor  $w$  se presenta en la **Figura 6.2** y **Figura 6.3**.

Peso total del sistema	kg/m <sup>2</sup>	Detalle del sistema de piso
Vigueta, bovedilla, malla y losa de compresión	240	
Entortado, nivelación e impermeabilizante exterior	36	
Cielo raso y terminado interior (yeso)	20	
Carga Muerta (Sumatoria anterior)	296	
Carga Viva (Normativa vigente)	100	
<b>Pesos total por m<sup>2</sup></b>	<b>396</b>	
<b>Peso considerado para cálculos (redondeo)</b>	<b>400</b>	

**Figura 6.2** Pesos considerados para el sistema de azotea con vigueta y bovedilla. Imagen: (Gallo-Ortiz, et al., 2005)  
Pesos: calculo propio.

Distribución de la carga en la azotea (i.e. viga simplemente apoyada)	Pesos obtenidos para una carga total de 400 kg/m <sup>2</sup> más tezontle, distribuida por cada vigueta en la separación más corta (i.e. 0.53m) y más larga (i.e. 0.70) de la Fig. 6.1																																								
<p>Vista en alzado</p>  <p>Vista en planta</p> 	<p>Con el tezontle seco</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Peso de la losa</th> <th>Peso del tezontle seco</th> <th>Peso Total</th> <th>Separación entre vigas</th> <th>Carga uniformemente distribuida</th> </tr> <tr> <td>kg/m<sup>2</sup></td> <td>kg/m<sup>2</sup></td> <td>kg/m<sup>2</sup></td> <td>m</td> <td>kg/ml</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>400.00</td> <td>55.02</td> <td>455.02</td> <td>0.53</td> <td><b>241.16</b></td> </tr> <tr> <td>400.00</td> <td>55.02</td> <td>455.02</td> <td>0.70</td> <td><b>318.51</b></td> </tr> </tbody> </table> <p>Con el tezontle húmedo</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Peso de la losa</th> <th>Peso del tezontle saturado</th> <th>Peso Total</th> <th>Separación entre vigas</th> <th>Carga uniformemente distribuida</th> </tr> <tr> <td>kg/m<sup>2</sup></td> <td>kg/m<sup>2</sup></td> <td>kg/m<sup>2</sup></td> <td>m</td> <td>kg/ml</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>400.00</td> <td>60.52</td> <td>460.52</td> <td>0.53</td> <td><b>244.08</b></td> </tr> <tr> <td>400.00</td> <td>60.52</td> <td>460.52</td> <td>0.70</td> <td><b>322.36</b></td> </tr> </tbody> </table>	Peso de la losa	Peso del tezontle seco	Peso Total	Separación entre vigas	Carga uniformemente distribuida	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	m	kg/ml	400.00	55.02	455.02	0.53	<b>241.16</b>	400.00	55.02	455.02	0.70	<b>318.51</b>	Peso de la losa	Peso del tezontle saturado	Peso Total	Separación entre vigas	Carga uniformemente distribuida	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	m	kg/ml	400.00	60.52	460.52	0.53	<b>244.08</b>	400.00	60.52	460.52	0.70	<b>322.36</b>
Peso de la losa	Peso del tezontle seco	Peso Total	Separación entre vigas	Carga uniformemente distribuida																																					
kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	m	kg/ml																																					
400.00	55.02	455.02	0.53	<b>241.16</b>																																					
400.00	55.02	455.02	0.70	<b>318.51</b>																																					
Peso de la losa	Peso del tezontle saturado	Peso Total	Separación entre vigas	Carga uniformemente distribuida																																					
kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	m	kg/ml																																					
400.00	60.52	460.52	0.53	<b>244.08</b>																																					
400.00	60.52	460.52	0.70	<b>322.36</b>																																					

**Figura 6.3** Distribución de la carga por viguetas y cálculo de la carga uniformemente distribuida. Fuente: elaboración propia

Con los datos anteriores, procedemos a la evaluación de la **Ecuación 6.2** y **6.3**. El cálculo de  $V_U$  y  $M_U$  se presenta condensado en la **Tabla 6.5**. En dicha tabla, se manejaron dos escenarios (i.e. con el tezontle seco y con el tezontle saturado), mismos que se evalúan considerando una combinación de separación y claro más cortos entre vigas ( $c1$ ), hasta



aquella combinación con mayor extensión (c3). La combinación intermedia (c2) corresponde a la habitación donde se colocó el tezontle para el experimento del [Capítulo 4](#). Como se puede observar, la **carga última** considerando el tezontle tanto en estado seco como húmedo, se comporta de manera segura respecto al **valor resistente** del sistema (33% en cortante y 16% del momento en c1; 86% en cortante y 81% en momento para c2). Hay que señalar sin embargo que en la combinación con la mayor separación entre viguetas y el claro libre más largo (c3), los valores están al límite del valor resistente. En este último caso, vale consultar las especificaciones del proveedor del sistema constructivo, a fin de confirmar dichos límites<sup>(23)</sup>.

**Tabla 6.5 Valores estimados de cortante y momentos para la azotea. Fuente: elaboración propia**

Opción tezontle en 2 capas con material seco														
Caso	Separ. entre vigas	Peso total	Factor de carga	Carga Última	Long. Claro Analizada	$V_R \geq V_U$				$M_R \geq M_U$				
			FC	w	l	VR		VU	Cumple si/no		MR		MU	Cumple si/no
	m	kg/ml		kg/ml	m	kg		kg			kg·m		kg·m	
c1	0.53	241.16	1.40	337.62	1.45	705.00	≥	244.78	Ok	35%	545.00	≥	88.73	Ok 16%
c2	0.70	318.51	1.40	445.92	2.85	705.00	≥	635.44	Ok	90%	545.00	≥	452.75	Ok 83%
c3	0.70	318.51	1.40	445.92	3.15	705.00	≥	702.32	Ok	100%	545.00	<	553.08	N/A 101%
Opción tezontle en 2 capas con material saturado														
Caso	Separ. entre vigas	Peso total	Factor de carga	Carga Última	Long. Claro Analizada	$V_R \geq V_U$				$M_R \geq M_U$				
		w	FC	w	l	VR		VU			MR		MU	
	m	kg/ml		kg/ml	m	kg		kg			kg·m		kg·m	
c1	0.53	244.08	1.40	341.71	1.45	705.00	≥	247.74	Ok	35%	545.00	≥	89.80	Ok 16%
c2	0.70	322.36	1.40	451.31	2.85	705.00	≥	643.12	Ok	91%	545.00	≥	458.22	Ok 84%
c3	0.70	322.36	1.40	451.31	3.15	705.00	<	710.81	N/A	101%	545.00	<	559.76	N/A 103%

Revisada la azotea, toca el caso de los muros. Estos deben resistir una carga vertical generado por el peso propio y el de las estructuras superiores. En este caso, teniendo que responder a una relación  $P_R \geq P_U$  (i.e. carga resistente  $\geq$  carga última). Este desarrollo no se desglosa por practicidad. Bastara decir que el peso total de la azotea dividido en áreas

<sup>23</sup> NAPRESA® específica para el sistema de vigueta E3, carga permisible entre los 450 kg/m<sup>2</sup> y 4.00 m de claro hasta los 700 kg/m<sup>2</sup> y 2.95 m de claro. Los pesos incluyen “cargas de pisos, aplanados, relleno para pendientes, etc., así como las cargas vivas de acuerdo con el reglamento de construcción” Fuente: (NAPRESA, 2018)

tributarias y que a su vez se distribuye entre la totalidad de muros de carga, se corresponde con la capacidad de la mampostería para resistirlo. La expresión para calcular  $P_R$  es:

- $P_R = FR \cdot F_E \{f_m^* + 4\text{kg/cm}^2\}$  **Ecuación 6.4**

Nos dice [Gallo-Ortiz et al. \(2005\)](#) de la ecuación anterior,  $FR$  es el factor de reducción (*i.e.* 0.6 para muros confinados),  $F_E$  es el factor por excentricidad y esbeltez del muro (*i.e.* 0.7 para muros interiores y 0.6 para muros extremos) y  $f_m^*$  es el esfuerzo a compresión de diseño de la mampostería.

La cimentación y capacidad de carga del suelo son los elementos finales de esta evaluación, pero siendo que el total de sobrecarga impuesta a la edificación por el tezontle es despreciable en comparación con el peso total de la estructura (ver [Tabla 6.7](#)), se entiende cuáles son los resultados de dicho análisis.

### 6.2.3 Análisis sísmico de la azotea existente

Cuando el suelo está en movimiento, este provoca una aceleración en las estructuras. Este fenómeno se corresponde con la segunda Ley de Newton:

- $F = m \cdot a$  **Ecuación 6.5**

Siendo  $F$  la fuerza sísmica,  $m$  la masa sísmica del edificio y  $a$  la aceleración del terreno. Por otra parte:

Si  $m = \frac{W}{g} = \frac{\text{peso del edificio}}{\text{aceleración gravitacional}}$  entonces  $F = \frac{W}{g} a = \frac{a}{g} W \quad \therefore$

- $F = C \cdot W$  **Ecuación 6.6**

Se define a  $C$  como *coeficiente sísmico*, un valor que como la fórmula lo indica, considera la aceleración sobre la gravedad por el peso del edificio. Este valor actualmente lo podemos consultar en las normativas vigentes para el diseño sísmico (*e.g.* [NTC, 2004](#)), donde se indica su magnitud en función de la ubicación geográfica, tipo de terreno y tipo de construcción. En el RCDF se clasifican las estructuras según su uso en: Grupo A, estructuras de

funcionamiento primordial antes y después de un sismo (*e.g.* hospitales); Grupo B, estructuras cuya pérdida en un sismo sea intermedia (*e.g.* comercio, casa habitación); Grupo C, estructuras cuya pérdida no afecte a los otros dos grupos (*e.g.* bardas, bodegas temporales). A su vez, los terrenos de acuerdo a su rigidez se clasifican en I, II y III, correspondiendo a suelos firmes, de moderada compresibilidad y de alta compresibilidad respectivamente.

Existen diferentes metodologías para el análisis sísmico de una estructura que hacen uso del valor C, pudiendo distinguirse básicamente *sistemas estáticos* (*i.e.* emplean la rigidez de los elementos estructurales) y *sistemas dinámicos* (*i.e.* hacen uso de periodos, frecuencia y modo de vibrar).

**Gallo-Ortiz et al. (2005)** distingue en el análisis sísmico la necesidad de que una estructura presente cierta *resistencia*, *rigidez* y *ductilidad*. Desafortunadamente, la mayoría de los sistemas constructivos solo llegan a presentar uno o dos de estas características, requiriéndose una mayor inversión y tecnología si se pretenden las tres. En un sismo, las *ondas sísmicas* se propagan desde el epicentro generando movimiento en todas las direcciones. Desde su origen, la fuerza sísmica se ve afectada por la distancia que recorre y el espesor de los estratos que atraviesa, además de verse amortiguada o amplificada por las características mecánicas del material donde se desplanta la edificación analizada.

Así como el suelo tiene una forma de responder o *vibrar*, **Gomez-Tremari (1988)** señala que la inercia del edificio responde con componentes horizontales y verticales a dicho movimiento. Si visualizamos el edificio como una estructura esbelta y alta, esta tiene un *periodo fundamental* (T) durante el que presenta una oscilación completa, lo cual se da con determinada *frecuencia* (f) y *amplitud* ( $\Delta$ ). La resistencia de una edificación al desplazamiento se consigue preferentemente mediante la rigidez de la misma, la cual se da en una estructura a partir de un sistema resistente horizontal y vertical (*e.g.* *marcos o pórticos*, *diafragmas rígidos* y *muros de cortante*). La altura de la edificación, simetría tanto en planta como alzado y la distribución de la masa deben a su vez obedecer ciertas pautas

a fin de no generar *torsiones* o incluso una respuesta de *resonancia* con la vibración del suelo (e.g. Gomez-Tremari, 1988; Gallo-Ortiz, et al., 2005).

Hasta el año 2004, en el Reglamento de Construcción del Distrito Federal se reconocían los siguientes métodos de análisis sísmico (e.g. NTC, 2004):

1. Método simplificado de análisis
2. Método estático de análisis
3. Método dinámico de análisis
4. Método dinámico paso a paso

Con el reglamento del año 2017, los métodos dinámicos tomaron preponderancia y los sistemas estáticos solo pueden emplearse con ciertas restricciones (e.g. NTC, 2017). Sin embargo, para fines exclusivos de este TOG, se presenta a continuación el *análisis simplificado*<sup>(24)</sup>, considerando que el mismo fue planteado originalmente para estructuras no mayores a 13 m de altura y en los cuales se cumplieran requisitos estrictos en cuanto a su simetría y distribución de muros. Estos aspectos suelen cumplirse en la vivienda de interés social al ser esta de características repetitivas y simétricas. Los requisitos que se deben cumplir para su aplicación se exponen el *Anexo A4.2*.

En una casa habitación, estructura rígida y poco esbelta, Gallo-Ortiz et al. (2005) considera que en ausencia de torsiones y flexiones importantes, tenemos que:

$$\bullet \quad V_s = C_s \cdot P \quad \text{Ecuación 6.7}$$

$$\bullet \quad V_u = F_C \cdot V_s = F_C \cdot C_s \cdot P \quad \text{Ecuación 6.8}$$

Siendo  $C_s$  el *coeficiente sísmico reducido* (ver *Tabla 6.6*) y  $P$  el peso sísmico del edificio.  $V_s$  es el *cortante basal*, esto es, el cortante directo en la base del edificio. Este último se afecta

---

<sup>24</sup> La metodología planteada en ningún momento sustituye o reemplaza aquella que señale la normatividad vigente. En los Reglamentos de Construcción del AMG consultados (e.g. Guadalajara, 1997; Zapopán, 2002), el método simplificado todavía es listado para su aplicación, situación que seguramente cambiara en el futuro inmediato.

por un factor de carga  $F_c$  (i.e. **1.1**) a fin de obtener  $V_u$  o *cortante último*. Por otra parte, para evaluar el aspecto resistente tenemos:

$$\bullet \quad V_{mR} = F_R(0.5v_m^* \cdot A_T + 0.3P) \leq 1.5F_R \cdot v_m^* \cdot A_T \quad \text{Ecuación 6.9}$$

Siendo  $V_{mR}$  el cortante resistente,  $F_R$  el factor de reducción (i.e. **0.7** para mampostería confinada),  $v_m^*$  la resistencia al cortante de la mampostería (i.e. **3.0** para mampostería de block de cemento) y  $A_T$  el área en planta de los muros en la dirección analizada. Esta última variable se correspondería con:

$$\bullet \quad A_{Tx} = t \cdot \sum L_x \text{ y } A_{Ty} = t \cdot \sum L_y \quad \text{Ecuación 6.10}$$

Donde  $t$  es el espesor del muro y  $L$  la longitud total de los muros en la dirección analizada (i.e. el cortante último vs el cortante resistente en  $x$  o en  $y$ ). Los valores de las constantes  $F_R$  y  $v_m^*$  antes citados se encuentran listados en el trabajo de [Gallo-Ortiz et al. \(2005\)](#).

Tabla 6.6 Coeficientes sísmicos reducidos para el método simplificado en estructuras del Grupo B. Fuente: [\(Gallo-Ortiz, et al., 2005\)](#)

Zona	Altura de la construcción					
	Muros de piezas macizas			Muros de piezas huecas		
	h < 4 m	4 < h < 7 m	7 < h < 13 m	h < 4 m	4 < h < 7 m	7 < h < 13 m
Zona I	0.07	0.08	0.08	0.1	0.11	0.11
Zona II y III	0.13	0.16	0.19	0.15	0.19	0.23

Nota: para estructuras del grupo A, multiplicar coeficiente por 1.5

Respecto a la [Tabla 6.6](#), vale recordar que estos coeficientes están reducidos. No deben ser confundidos con los coeficientes de otras tablas dentro de la normativa vigente y que a su vez se afectan por factores adicionales (i.e. *valor Q*) a fin de emplearse en los métodos de análisis estático y dinámico.

Recordando que en la [Figura 6.1](#) ya se señalan parámetros sísmicos (e.g.  $C=0.36$ ,  $Q=2.0$ ), estos se obviarán para considerar los de la [Tabla 6.6](#) dada la metodología empleada. Se considera en este caso una edificación en zona II con una altura menor a 7 m y mayor a 4 m (i.e. **0.16** de  $C_s$ ). El desglose del peso de la edificación se da en forma aproximado en la [Tabla 6.7](#) (incluye cargas muerta, viva y la que genera la sobrecarga del tezontle), como resultado

de un análisis similar al ejemplificado en la *Figura 6.2*. El *cortante último* ( $V_u$ ) se presenta en la *Tabla 6.8*, como resultado de la aplicación de la *Ecuación 6.7*.

**Tabla 6.7 Cálculo del peso de la edificación. Fuente: elaboración propia.**

Elemento analizado	Peso aproximado		Área / Longitud		Peso Total (kg)
Peso de la azotea	400	kg/m <sup>2</sup>	72.73	m2	29,090.50
Peso de muros	1016	kg/ml	42.98	ml	43,667.68
<b>Peso Nivel 2 (planta alta)</b>					<b>72,758.18</b>
Peso del entrepiso	700	kg/m <sup>2</sup>	71.31	m2	49,919.63
Peso de muros	1188	kg/ml	28.20	ml	33,501.60
<b>Peso Nivel 1 (entrepiso)</b>					<b>83,421.23</b>

**Tabla 6.8 Cálculo del cortante último Ecuación 6.7. Fuente: elaboración propia.**

Nivel analizado	Factor de carga	Coefficiente sísmico	Peso por nivel	Cortante último
	$F_c$	$C_s$	P	$V_u$
			Kg	Kg
Nivel 2 (planta alta)	1.1	0.16	72,758.18	12,805.44
Nivel 1 (entrepiso)	1.1	0.16	83,421.23	14,682.14
<b>Cortante Basal</b>		$\Sigma$	<b>156,179.41</b>	<b>27,487.58</b>

Se identifica a su vez en la *Tabla 6.9* a  $V_{mR1}$  y  $V_{mR2}$  como los dos componentes de la *Ecuación 6.8*, tabla donde se valida el *cortante resistente* ( $V_{mR}$ ).

**Tabla 6.9 Cálculo del cortante resistente Ecuación 6.8. Fuente: elaboración propia**

Nivel analizado	Peso que aplica por nivel	Factor de reducción	cortante resistente	Long. de muros	Esp. de muros	Área de muros	Cortante Resistente		Validación				
							$V_{mR}$		$V_{mR} \geq V_u$		Cumple si/no		
							$V_{mR1}$	$V_{mR2}$	$V_{mR}$	$V_u$			
	P	$F_R$	$v_m^*$	L	t	$A_T$	$V_{mR1}$	$V_{mR2}$	$V_{mR}$	$V_u$			
	Kg		kg/cm2	m	m	cm2	kg	kg	kg	kg			
Nivel 2	72,758.18	0.7	3.0	Lx	13.97	0.15	20955	37,281.97	66,008.25	<b>37,281.97</b>	$\geq$	<b>12,805.44</b>	Ok
	72,758.18	0.7	3.0	Ly	29.01	0.15	43515	60,969.97	137,072.25	<b>60,969.97</b>	$\geq$	<b>12,805.44</b>	Ok
Nivel 1	156,179.41	0.7	3.0	Lx	9.86	0.15	14790	48,327.18	46,588.50	<b>46,588.50</b>	$\geq$	<b>27,487.58</b>	Ok
	156,179.41	0.7	3.0	Ly	18.34	0.15	27510	61,683.18	86,656.50	<b>61,683.18</b>	$\geq$	<b>27,487.58</b>	Ok

Como se puede observar del ejercicio anterior, el análisis sísmico no reciente la existencia de la carga adicional en la azotea. Esto lo podemos atribuir a que el peso del material incluso saturado (60 kg/m<sup>2</sup> solo en la azotea), no es significativo en comparación del peso total de la estructura (aproximadamente entre 1000 y 1200 kg/m<sup>2</sup> por cada nivel). Se recalca que este es un resultado producto de un análisis simplificado. La integridad de la estructura debe corroborarse por métodos más exactos que consideren las *deformaciones* o *desplazamientos* en los diferentes elementos estructurales. Aunque existe evidencia de que un sistema de vigueta y bovedilla trabaja como un diafragma rígido, particularmente con las viguetas orientas en la dirección perpendicular a la aplicación de la fuerza (*e.g. León-*

*Flores, et al., 2008; Tena-Colunga, et al., 2013*), esto sería el resultado de que el mismo se haya construido siguiendo las normatividades vigentes y cuidando la integración del sistema con las dalas y trabes perimetrales.

### 6.3 Conclusiones del capítulo

La teoría estructural es muy cuidadosa respecto al comportamiento resultante que se espera con determinadas acciones (cargas) y los esfuerzos (resistencias) que se generan. Particularmente, el *diseño por resistencia última* es conservador en cuanto a la capacidad resistente que podemos otorgarle a la estructura, a la vez que sobredimensiona las acciones solicitantes. Respecto a esto debemos considerar que, en toda estructura, son muchos los aspectos que intervienen en su construcción (*e.g.* calidad de materiales, capacidad del personal, etc.), mientras que las solicitudes a las que se somete la edificación una vez terminada pueden variar respecto a su función original (*e.g.* sobrecargar la azotea con un material adicional). Esta metodología de diseño resulta entonces el mejor camino a seguir, siendo también la que plantean las normativas y reglamentaciones consultadas.

En nuestro caso particular, la evaluación de la azotea ante cargas gravitacionales resulto exitosa, coincidiendo con la normatividad. Sin embargo, se observa en los resultados de los ejercicios realizados, que la propuesta de azotea planteada se ubica ya en los límites de la resistencia estructural calculada, si bien en las especificaciones del sistema se cuenta con margen adicional. Esto implica que no hay mucho rango para la experimentación con otros valores de carga o la implementación de la propuesta en forma definitiva, siendo necesario un *reforzamiento de la edificación* si sobrepasan los límites indicados.

Respecto al *análisis sísmico*, la metodología que se empleó para analizar la propuesta no refleja mayores afectaciones, considerando que el *aumento de masa* resulta mínimo respecto al de toda la edificación en su conjunto. Se aclara en todo caso, el éxito de la propuesta recae en que la edificación trabaje como una *estructura rígida*, particularmente la sección de la azotea.

# Capítulo 7

## *Conclusiones Finales y Líneas de Investigación Futura*

---

### 7.1 Conclusiones Finales

En este capítulo se hace un resumen general de los resultados obtenidos durante esta investigación, objetivos alcanzados y conclusiones finales, así como propuestas de trabajos y líneas de investigación futura.

El planteamiento de este TOG ha sido resolver en forma conjunta dos problemáticas detectadas en vivienda de interés social y los fraccionamientos que conforman en el AMG, problemáticas que se considera pueden ser abordadas con un enfoque de sustentabilidad. Se propuso como solución integradora, la instalación de una capa de material de tezontle sobre la azotea. Se argumentó que el material trabajaría como una protección adicional sobre esta, lo que le permitiría reducir la temperatura ambiente y reeditaría en el confort térmico prevaleciente en la vivienda. Se estimó a su vez que el material de tezontle sería capaz de aminorar los tiempos de escurrimiento durante una precipitación, lo que permitiría a los drenajes existentes tener mayor tiempo para desalojar las aguas pluviales. Dado que la propuesta planteada implica una carga adicional en una vivienda existente, se realizó un ejercicio de evaluación estructural que avalara su factibilidad.

Respecto al *confort térmico*, se concluyó que el tezontle empleado ofrece una mejora en cuanto a temperatura promedio máximas de 0.4°C en temporada de secas y 0.8°C en temporada de lluvias. Aunque son variaciones mínimas, estas implican un aumento en las horas diarias que la vivienda puede encontrarse dentro de un rango de confort. En el *aspecto hidrológico*, el experimento ejecutado arrojó un incremento en la velocidad del escurrimiento pluvial y con ello, una reducción en los tiempos de concentración respecto a una superficie sin tezontle. Sobre la *evaluación estructural* de la vivienda donde se proyectó



el tezontle, los resultados validan su instalación, al obtener valores resistentes por arriba de las cargas últimas impuestas, si bien se ubican dentro de los límites de la resistencia estructural.

Las evaluaciones y experimentos realizados son característicos del tipo de material y espesor de la capa empleado. Se debe recalcar que dicho material presentó un peso volumétrico muy bajo, en comparación con otros materiales de tezontle de los que se tuvo conocimiento en la investigación. Finalmente se concluye que, de replicar la propuesta, si bien a nivel de confort térmico resulta comprobado que es una medida adecuada, su efectividad está ligada al espesor de la capa empleado. Mejorar los resultados obtenidos con un incremento de dicho espesor implican un refuerzo estructural en la vivienda, situación que se estima alejaría esta propuesta del carácter sustentable pretendido. Adicionalmente con la evidencia actual, no se puede ser concluyente respecto a su desempeño frente a la escorrentía pluvial. Se presentan a continuación las conclusiones generales del trabajo por área evaluada.

#### *7.1.1 Del confort térmico*

Los resultados obtenidos en el experimento de campo son congruentes con los observados en investigaciones similares (*e.g. Silva-Treviño, et al., 2018*), aunque con gradientes de temperatura menores. En el caso específico del material de tezontle empleado en esta investigación, las diferencias entre la recámara que contó con tezontle y aquella que lo omitió implican un  $\Delta T_{\max}$  de 0.16 °C con el empleo de una capa de 0.0381 m de espesor (una capa) y un  $\Delta T_{\max}$  de 0.41 °C para una capa de 0.0762 m (dos capas). Estos datos se obtuvieron en temporada de secas, sobre un sistema de azotea de vigueta y bovedilla. Durante la temporada de lluvias, los  $\Delta T_{\max}$  registrados fueron del orden de 0.81, 0.91 y 0.83 °C en los distintos periodos analizados. En contraparte, los  $\Delta T_{\min}$  fueron de -0.3 °C con una sola capa y de 0.23 °C con dos capas, datos obtenidos en temporada de secas. En temporada de lluvias y con dos capas, los  $\Delta T_{\min}$  fueron de 0.16, 0.20 y 0.24 °C.

Los anteriores resultados son valores promedio por día. En un análisis registro a registro (*i.e.* datos que se recolectaban cada 30 min), podemos constatar que hay momentos en que los diferenciales entre la recámara con tezontle y la recámara libre llegan a superar el 1.5°C. Sin embargo, también se observa ganancias que llegan a situar el diferencial en -0.9°C, lo que implica que la habitación con tezontle gana calor respecto a la habitación que no lo tiene. El análisis bioclimático efectuado en este estudio determinó que la temperatura ambiente máxima en el AMG llega a estar a 5°C por arriba del *rango de confort* en temporada cálido-húmeda, mientras que hay marcada tendencia hacia un ambiente frío en el resto del año, con temperaturas mínimas hasta 12°C por debajo del rango de confort. Con el tezontle, tenemos una mejora en el tiempo que se encuentra la habitación dentro del rango de confort de entre 2 y 4 horas al día en los periodos analizados.

Respecto a la humedad, considerando la estructura de dos capas, se observa mayor prevalencia de esta en la recámara con tezontle respecto a la recámara libre, tanto en sus valores máximos como en los mínimos. Mientras en temporada de secas se observa un  $\Delta HR_{prom}$  de 0.45% (*i.e.* la recámara libre guarda mayor humedad), en la temporada de lluvias el  $\Delta HR_{prom}$  fueron de -1.54%, -2.33% y -2.37% (*i.e.* la recámara con tezontle se volvió más húmeda conforme seguía lloviendo). Salvo en algunos de sus valores mínimos, la humedad mayoritariamente se encuentra dentro de los rangos de confort estimados.

Finalmente, en un análisis de la norma *NOM-020-ENER-2011*, se concluyó que el empleo del tezontle en la azotea (capa 0.0762 m de espesor), implica un ahorro energético de 21% respecto a una azotea que no lo tuviera. Este valor se obtuvo considerando un  $\lambda$  de 0.186 para el tezontle. Empleando otros valores  $\lambda$  señalados en la *NOM-020-ENER-2011* tales como 0.582 (*i.e.* terrados secos en azoteas) y 2.326 (*i.e.* grava expuesta a la lluvia), el ahorro energético va del 12% al 8%, respectivamente.

Considerando los resultados anteriores, se estima acertado el empleo del material de tezontle analizado en un espesor de 0.0762 m sobre la azotea. Aunque las ganancias registradas son menores ( $\pm 1^\circ\text{C}$  de temperatura promedio; 21% a 8% de ganancia energética), se recabo evidencia de que el material también guarda calor, lo que resulta

beneficioso dada la tendencia marcadamente hacia temperaturas frías la mayor parte del tiempo en el AMG. Esta última ventaja debe corroborarse con un estudio más extenso durante el verano y su contraparte en invierno.

### 7.1.2 *Del desempeño hidrológico*

Los modelos teóricos analizados no son del todo coincidentes con los resultados obtenidos durante la experimentación. Mientras una evaluación empleando el *método racional* expone una variación en el caudal de por lo menos un 10% entre una superficie libre en la azotea y otra que cuenta con el tezontle, estos resultados están determinados por un *coeficiente de escurrimiento*. Por otra parte, al revisar la *velocidad de infiltración*, los resultados de la investigación únicamente ubican al tezontle analizado como un material con buenas características drenantes. Se hace necesario establecer un valor de permeabilidad  $K$  para un análisis más detallado, pero el mismo resulta cuestionable, al obtenerse por una formulación que se tiene planteada originalmente para materiales más finos. La evidencia física obtenida con el simulador de lluvias tampoco es adecuada para el propósito estimado del tezontle. Siendo que se determinó el *tiempo de concentración* en base a la estabilización de un flujo de agua en un simulador de lluvia, los resultados sugieren que una vez se encuentre saturado el material, el flujo del escurrimiento se aceleraría antes que retrasarse.

Como se observa en la *Gráfica 7.1*, los tiempos de concentración con el tezontle son menores a los tiempos registrados con la mesa libre. En términos porcentuales, hallándose el material completamente saturado, el escurrimiento se acelera y presentan un tiempo de concentración del orden del 33% al 52% menor al tiempo registrado sin el tezontle (consultar *Tabla 5.8*). Sobre el comportamiento anteriormente descrito, se plantea que el aumento en la velocidad, y con ello una disminución en el tiempo de concentración de la esorrentía, son el resultado de una disminución en el área y sección hidráulica, a la vez que se eleva la altura de vertido en la sección de salida del sistema.

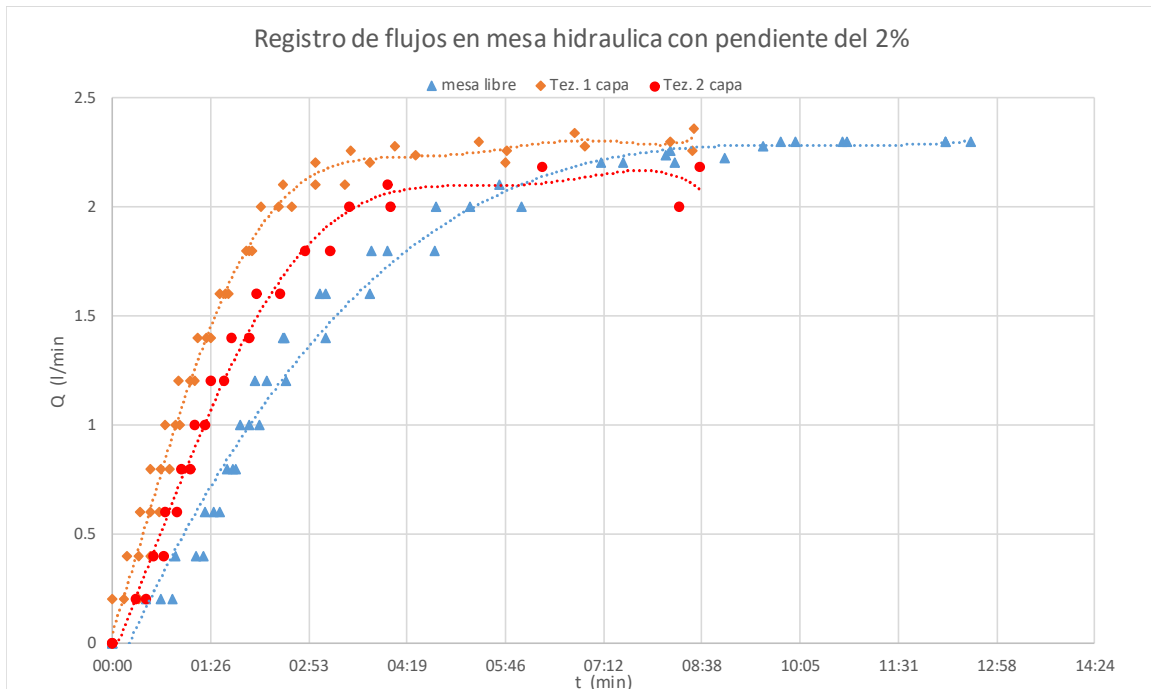


Gráfico 7.1 Variación de los registros de escorrentía. Fuente: elaboración propia.

Considerando los resultados anteriores, se estima que la utilidad del tezontle para disminuir la escorrentía pluvial en una azotea únicamente se puede ubicar en un rango previo a su saturación. Para determinar dicho rango, se hacen necesarias pruebas adicionales y correlacionarlas con intensidades de lluvia características del AMG.

### 7.1.3 De la viabilidad estructural de la propuesta

Del análisis efectuado para verificar la *estabilidad estructural* de la vivienda en estudio, se concluye que la misma es segura ante *cargas gravitacionales*, si bien los valores *límite de carga última* se encuentran muy cercanos a la *resistencia estimada* del sistema constructivo.

Los resultados del análisis son exclusivos de la vivienda estudiada. La repetición que acusan continuamente los modelos de vivienda de interés social, permite plantearnos la posibilidad de que los resultados obtenidos en este trabajo tengan coincidencias con otras viviendas con similar sistema constructivo (*i.e.* vigueta y bovedilla sobre muros de mampostería). Aunque la carga adicional que se evaluó en este estudio fue una capa de tezontle, la

metodología aquí planteada aplica para cualquier carga adicional de masa y pesos similares a los estudiados impuesta a la azotea (e.g. *techo verde* o *sistemas de paneles fotovoltaicos*).

Respecto al *análisis sísmico*, empleando el *método simplificado* para su evaluación, los resultados obtenidos cumplen estructuralmente. Mientras se mantengan los requisitos de simetría, distribución de cargas y cantidad de muros resistentes, el método planteado de evaluación señala que la masa adicional sobrepuesta en la azotea poco impacta en la respuesta sísmica de la construcción, al ser esta masa despreciable respecto a la masa total de la edificación.

Considerando lo expuesto anteriormente, se estima que es estructuralmente factible la instalación la capa de tezontle sobre la azotea de vivienda existente. Sin embargo, dicha capa queda supeditada a que el material posea características afines al estudiado (*i.e.* peso volumétrico de 722 kg/m<sup>3</sup> o menos; relación de vacíos 0.9 o mayor; espesor de capa de 0.0762 m) y que la edificación cumpla con los requisitos de simetría, cantidad de muros y rigidez de losa pertinente, así como cualquier otro requisito que se requiera por normativa de construcción vigente. Cualquier variación a este respecto, requerirá un cálculo estructural detallado e invariablemente, un reforzamiento de la estructura existente.

## 7.2 Líneas de investigación futuras

Respecto a los resultados del comportamiento térmico y estructural del tezontle sobre la azotea, estos habilitan nuevas pautas y líneas de investigación a seguir, mismas que pueden tratarse en forma independiente o conjunta. De proseguir con el planteamiento de una propuesta integral, esto es considerando el manejo de la escorrentía pluvial, se hace necesario un replanteamiento de la forma en que operaría el material y como se evaluaría su comportamiento, ya que los resultados en este trabajo no fueron concluyentes.

En conclusión, se hace necesario varios trabajos complementarios que ponga en mayor contexto la información recabada. Dichos trabajos implican la determinación de varias propiedades de los materiales mediante pruebas normalizadas, la obtención de registros con aparatos más especializados, así como periodos de registro más extensos.

Particularmente, se sugiere analizar diferentes combinaciones de materiales y estructuras de soporte, a fin de darle mayor alcance y posibilidades de mejora a la propuesta planteada.

Dentro de las líneas de investigación futura se considera:

- I. Por concepto de análisis de confort térmico:
  - a) La determinación de la *conductividad* y *reflectancia* del material propuesto. Ambas propiedades deben correlacionarse con las ganancias en cuanto a temperatura y ahorro energético.
  - b) Una ampliación en el periodo de estudio (*e.g.* registro de temperaturas durante todo un año), así como el tipo de vivienda donde se recabarían los datos (*e.g.* que sean viviendas que empleen sistemas constructivos diversos). De extenderse el periodo de estudio a la estación invernal, se debe de corroborar las ganancias de calor detectadas en el tezontle en este estudio.
  - c) Variaciones en la granulometría del material, así como su mezcla con otros materiales distintos. Particularmente, se busca una combinación con la arena y el jal, considerando a su vez las precauciones adicionales que se requieran al trabajarse con materiales más finos.
- II. Por concepto de análisis hidrológico:
  - a) La determinación de la *permeabilidad* del material. Particularmente, una evaluación con las dos pruebas reconocidas (*i.e.* permeámetro de carga constante y de carga variable). También habría que hacer las modificaciones pertinentes a dichas pruebas, considerando como opera la precipitación realmente en una azotea.
  - b) El diseño de un experimento que permita medir la saturación del material durante un evento de lluvia. Siendo patente que la mayor oportunidad del sistema para retardar la escorrentía es antes de estar saturado, se hace necesario determinar dicho periodo en función de diferentes intensidades de lluvia. La combinación con diferentes materiales también juega un papel importante dentro de este planteamiento.

- c) Medir directamente en una azotea el comportamiento del escurrimiento, a fin de poder plantear en laboratorio un comportamiento más cercano al desempeño real. En específico, la instalación de un aforador en los bajantes.
- III. Por concepto de la revisión estructural:
- a) Contar con datos más desglosados sobre el tipo de sistema constructivos empleados en vivienda de interés social de los últimos 20 años. En específico, procurar una base de datos que identifique los diferentes sistemas en la vivienda social.
  - b) Contar con una instrumentación y metodología que permita revisar la correspondencia entre la información estructural registrada en los planos y aquella que realmente existen en la edificación construida. Esto es, pruebas *in situ* con aparatos especializados o que, en forma visual, permita dimensionar la resistencia de un concreto o la cantidad de acero de un elemento, por citar algunos ejemplos.
  - c) Plantear una revisión de las especificaciones y reglamentaciones vigentes (*e.g.* los reglamentos de construcción municipales son mayoritariamente transcripciones del RCDF). Se hace necesario una regionalización real de estos códigos, a fin de identificar que normativas son factiblemente aplicables y cuales requieren ser modificadas o reinterpretadas.
  - d) Plantear un modelo digital (*i.e.* evaluación por software) que permita evaluar tanto en forma estática como en forma dinámica la estructura analizada, así como permitir la revisión de vivienda en configuraciones no necesariamente simétricas (*i.e.* esfuerzos de torsión). Dicho modelo deberá incluir un análisis de desplazamientos.
  - e) Elaborar un compendio de medidas de reforzamiento sencillas y en todo caso, de bajo impacto económico, a fin de plantear de antemano una solución a la posibilidad que la propuesta sobre la azotea supere la capacidad estructural de la vivienda existente.

# ANEXO 1

## *Conceptos de Bioclimatismo e Hidrología*

---

### A1.1 Sobre bioclimatismo y conceptos afines

Citando a varios autores (*e.g. Sanchez-Montañés, 2014; Simancas-Yovane, 2003; Fuentes-Freizanet, 2011; Cedeño-Valdiviezo, 2010*) e información de conocimiento público documentada, se detallan a continuación los siguientes conceptos básicos sobre bioclimatismo:

De *los mecanismos asociados a la transferencia de calor*. En la *conducción* el calor se transmite por el contacto directo entre cuerpos distintos producto de una diferencia de temperatura entre ellos. En la *convección*, la transferencia de calor entre dichos cuerpos se da con la intervención de un fluido (líquido o gaseoso) que opera entre estos. En la *radiación*, identificando al sol como primera fuente, todo objeto emite una radiación electromagnética en función de sus elementos constitutivos (sus átomos intercambian energía en función de la temperatura que posean) y esta energía indistintamente se irradia a otros cuerpos. En la *evaporación* los líquidos, generalmente agua, pasan a un estado gaseoso dependiendo de su temperatura, siendo que en los humanos y otros seres vivos este fenómeno se da en formas cutáneas y respiratorias (la transpiración es la evaporación de agua en la superficie de los organismos).

Cuando hablamos de *temperatura del aire*, estamos refiriéndonos básicamente la *temperatura ambiente* a la sombra, es decir, que no está expuesta directamente a la radiación solar y que podemos obtener mediante termómetros normales, mientras que la *temperatura de bulbo húmeda* requiere de instrumentos más especializados y sus valores son una medida indirecta de la humedad en el ambiente. A la temperatura del aire también podemos considerarla como *temperatura de bulbo seco* y se precisaría distinguirla de la *temperatura radiante*, término que se reserva en este



trabajo solo para aquellos elementos de la envolvente expuestos al sol o que por algún fenómeno particular irradian calor hacia el espacio interior o elementos colindantes (e.g. temperatura de muros y cubiertas tomada desde el interior de la edificación).

La *humedad absoluta* por otra parte se refiere a la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, mientras que la *humedad relativa* es la relación entre el vapor de agua indicado anteriormente y el valor total que pudiera alcanzar la misma masa de aire al estar saturado. El *metabolismo* o *tasa metabólica* se relaciona con la capacidad del organismo de generar calor y mantener cierta temperatura, partiendo de sus procesos bioquímicos internos.

[Sánchez-Montañés \(2014\)](#) nos explica que se denomina *calor específico de un material* (en Kcal/Kg °C) “a la cantidad de calor que hay que suministrarle a 1 Kg para que eleve su temperatura 1°C”, mientras que “la resistencia de la temperatura a reaccionar inmediatamente a los aportes de calor” es lo que denominamos *inercia térmica*. Una vivienda con poca inercia térmica podrá calentarse rápidamente durante el día, pero también implica que podrá perder rápidamente el calor por la noche, es decir, no hay un amortiguamiento de temperatura, lo que genera cambios bruscos al interior. La *masa térmica* (i.e. la edificación al completo) también puede provocar “un desfase entre los aportes de calor y el incremento de la temperatura”, lo que resulta beneficioso ya que podemos ayudarnos de determinados elementos constructivos y materiales para controlar la temperatura. Esto último puede funcionar a distintos niveles (ciclos diarios, inter diarios o anuales) y “la masa térmica estratégicamente colocada nos permite mantener una temperatura sin variaciones bruscas” ([Sanchez-Montañés, 2014](#)).

Algunas relaciones importantes que debemos considerar respecto a los materiales constructivos son la *conductividad térmica* “ $\lambda$ ”, expresado como  $W/m^{\circ}K$  (Watts por

metro grados Kelvin) y  $W/m^{\circ}C$  (Watts por metro grados Celsius)<sup>25</sup>, que es la propiedad que caracteriza el comportamiento térmico de un material. Los valores que tiendan a cero son los que implican mejores aislantes (e.g. los aislantes con valores  $\lambda$  entre 0,025 y 0,065  $W/m^{\circ}K$ ).

**Cedeño-Valdiviezo (2010)** nos dice que la conductividad se emplea para medir la trasmisión de calor por conducción en los materiales, mientras que la trasmisión en los elementos constructivos es mejor referirse como *transmitancia térmica "U"*, expresado en  $W/m^2 \text{ }^{\circ}K$  o  $W/m^2 \text{ }^{\circ}C$ , siendo que en la normatividad mexicana se identifica como "*valor K*" (e.g. *Low Carbon Architecture-GIZ-CONUEE, 2015*). Se trata del "*flujo de calor que atraviesa un material o elemento constructivo según su superficie, de acuerdo con el espesor y la diferencia de temperatura entre ambas caras*" (Cedeño-Valdiviezo, 2010). La *resistencia térmica "R"*, expresada en  $m^2 \text{ }^{\circ}K/W$ , es la inversa de la conductividad térmica, es decir cuanto mayor es, más aísla. En la normatividad mexicana se identifica como "*valor M*". La *transmitancia térmica U* de un elemento constructivo dado (e.g. piso, muro, etc.) es la suma de las resistencias térmicas *R* de cada componente o capa del mismo.

## A1.2 De hidrología y escurrimiento pluvial

Citando a **Aparicio-Mijares (1989)** y **Breña-Puyol & Jacobo-Villa (2006)**, se detallan a continuación los siguientes conceptos básicos sobre hidrología:

El *escurrimiento* es el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Hay escurrimiento *superficial*, *subsuperficial* (paralelo al superficial) y *subterráneo* (que permea a niveles inferiores al friático y acaba en mantos). Consideremos lo siguiente, de los tres tipos, el escurrimiento superficial (el que no permea o escurre una vez saturada la superficie) es el que más rápido llega

---

<sup>25</sup> Cuando hablamos de diferencias de temperatura, se considera que unidades indicadas tanto en  $^{\circ}K$  como  $^{\circ}C$  son iguales, ya que tienen la misma escala, aunque distinto 0 (i.e.  $0 \text{ }^{\circ}C = 273 \text{ }^{\circ}K$ ).

a la salida de una cuenca, es el que se relaciona con la *precipitación en exceso* o *efectiva* y constituye el *escurrimiento directo*. El escurrimiento subterráneo es el que más tarda en llegar a la salida, es el único que alimenta las corrientes subterráneas cuando no hay lluvias y forma el *escurrimiento base*.

Una *cuenca* es la zona de la superficie terrestre que, de ser impermeable, las gotas de lluvia caen y son conducidas hacia un mismo punto. El *parteaguas* es la línea imaginaria que une los puntos de mayor nivel topográfico en una cuenca y la separa de cuencas vecinas, siendo el *área de la cuenca* la superficie proyectada horizontalmente que está delimitada por esa línea. Hay cuencas superficiales y subterráneas y estas a su vez son endorreicas (sin salida) o exorreicas (con salida). La manera en que interactúan el agua (estimulo) y la cuenca (respuesta) se formulan mediante dos relaciones: volumen de escurrimiento (área) y velocidad de respuesta (pendientes).

La *evaporación* es el fenómeno que se da en las capas superficiales del agua que pasa a estado gaseoso. La *transpiración* es el fenómeno que se da en las hojas de las plantas en ese mismo sentido. *Evotranspiración* o *uso consuntivo* es la combinación de ambas. La evaporación se da por el aumento en la energía cinética de las moléculas de agua en presencia de radiación solar, el viento o diferencias de presión de vapor. La evaporación es proporcional al gradiente de presión de vapor entre la zona de intercambio y la atmosfera.

La *precipitación*, desde el punto de vista hidrológico, es la fuente primaria de agua sobre la superficie terrestre. Para que se formen las nubes, el agua que se evapora debe elevarse hasta que la presión y la temperatura sean las necesarias para que exista condensación (alcanzar el punto de rocío). Una vez que esta se da, existe una serie de parámetros con los cuales podemos relacionar la lluvia y el escurrimiento, siendo los principales la altura/intensidad de la precipitación, distribución en el tiempo y la probabilidad de ocurrencia de la misma, así como el área de la cuenca y sus características generales (*i.e.* forma de la misma, tipo de suelo y vegetación,

pendiente general). Entre los métodos que analizan la *relación lluvia-escurrimiento* destacan:

- Métodos de envolvente. Considera el área de la cuenca.
- Formula racional. Adiciona al método anterior la altura/intensidad de la precipitación (se emplea para el cálculo de los drenajes urbanos).
- Hidrograma unitario. Suma a los dos métodos anteriores un análisis del histograma de cuencas similares, considerando además en la revisión la cuenca elementos de su forma, pendiente, vegetación, etc.

Las *curvas de intensidad-duración-periodo de retorno* en el análisis hidrológico es el punto de partida para proyectar las obras que se requieren para desalojar las aguas en una avenida máxima. Una *avenida máxima* por tanto es un término que se emplea para referirse a un evento de escurrimiento de importancia, sin que esto implique inundaciones o circunstancias catastróficas. Se trata de un valor de diseño, empleado generalmente para dimensionar las obras en las condiciones más desfavorables, generalmente en conjunto con el termino *periodo de retorno*, el cual oscila entre los 5, 10, 25 y 50 años, de acuerdo a la especificación o norma que se emplee en el cálculo.

La *infiltración* es el agua en movimiento atravesando la superficie de los suelos como consecuencia de la gravedad y los efectos capilares. Hay que entender que el volumen de agua que cae en una cuenca no es el mismo que termina por infiltrarse, salir y/o concentrarse en determinado punto, ya que existen *pérdidas* (i.e. retenciones) que podemos contabilizar entre todos los elementos con los que tiene contacto el agua o aquellos sobre los que escurre (e.g. la vegetación, los techos de las edificaciones y los almacenajes de todo tipo como bordos, presas y lagos).

# ANEXO 2

## Datos de climatología, temperatura y conductividad

### A2.1 Normales climatológicas

Tabla A2.1 Normales climatológicas estación meteorológica 14065 “Guadalajara Norte”. Fuente: (CNA, 2019)

NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE: JALISCO												PERIODO: 1981-2010	
ESTACION: 00014065 GUADALAJARA (OBS)												ALTURA: 1,551.0 MSNM.	
LATITUD: 20°42'23" N.												LONGITUD: 103°23'32" W.	
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>TEMPERATURA MAXIMA</b>													
NORMAL	24.5	26.8	29.2	31.7	33.0	30.9	27.8	27.8	27.5	27.2	26.4	24.8	28.1
MAXIMA MENSUAL	26.6	28.7	31.4	34.5	34.6	34.6	29.7	29.2	29.1	28.5	27.8	26.4	
AÑO DE MAXIMA	1989	2008	2009	2005	1998	2005	2005	2004	2005	2004	2005	1998	
MAXIMA DIARIA	33.6	35.9	36.0	37.5	38.2	39.5	37.0	32.2	36.0	36.2	31.0	29.8	
FECHA MAXIMA DIARIA	30/1987	28/2009	03/2009	22/2005	21/1989	07/2010	19/2010	02/1986	30/1991	14/2006	27/2004	16/2000	
AÑOS CON DATOS	27	26	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	
<b>TEMPERATURA MEDIA</b>													
NORMAL	15.4	16.8	18.7	21.2	23.2	23.7	22.0	21.9	21.6	20.2	17.7	15.8	19.9
AÑOS CON DATOS	27	26	27	27	27	26	27	27	27	27	27	27	
<b>TEMPERATURA MINIMA</b>													
NORMAL	6.3	6.9	8.2	10.6	13.4	16.4	16.2	16.0	15.8	13.2	8.9	6.9	11.6
MINIMA MENSUAL	3.8	3.2	5.5	7.0	11.3	15.0	15.1	14.5	14.3	9.4	6.8	4.3	
AÑO DE MINIMA	1999	1998	1983	1983	1987	1983	1982	1986	1985	1987	1982	2010	
MINIMA DIARIA	-3.1	-12.0	-1.0	1.3	0.5	1.5	1.6	1.0	5.5	3.5	1.5	-1.0	
FECHA MINIMA DIARIA	19/1988	03/1998	06/1983	16/1990	08/2005	20/2006	29/1984	27/2007	20/2006	25/1999	23/1990	27/2006	
AÑOS CON DATOS	27	26	27	27	27	26	27	27	27	27	27	27	
<b>PRECIPITACION</b>													
NORMAL	16.7	11.9	6.8	5.3	16.4	135.1	179.3	163.7	137.0	47.0	11.5	6.2	736.9
MAXIMA MENSUAL	254.2	142.1	81.6	61.3	78.8	469.5	454.1	348.6	359.6	156.8	84.0	38.1	
AÑO DE MAXIMA	1992	2010	1984	1997	2004	2004	2010	2006	2004	2006	1982	1989	
MAXIMA DIARIA	58.2	71.0	68.0	38.6	36.0	85.2	68.8	77.5	79.3	48.2	68.1	15.9	
FECHA MAXIMA DIARIA	26/1992	18/1990	22/1984	23/1991	09/1997	22/1999	23/2007	08/1985	20/2008	03/2006	26/1982	07/1989	
AÑOS CON DATOS	25	24	24	25	25	28	27	28	27	28	26	25	
<b>EVAPORACION TOTAL</b>													
NORMAL	95.9	123.7	178.7	194.8	190.0	127.7	93.2	98.4	96.6	104.7	96.6	82.9	1,483.2
AÑOS CON DATOS	27	27	28	27	27	28	28	28	28	28	27	28	
<b>NUMERO DE DIAS CON LLUVIA</b>													
NORMAL	2.4	1.7	0.8	1.2	3.4	15.3	19.7	19.0	15.2	6.6	2.0	2.0	89.3
AÑOS CON DATOS	25	24	24	25	25	28	27	28	27	28	26	25	
<b>NIEBLA</b>													
NORMAL	1.5	0.5	0.3	0.0	0.2	1.4	3.1	5.4	4.5	3.2	2.7	1.2	24.0
AÑOS CON DATOS	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	
<b>GRANIZO</b>													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.2	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	1.8
AÑOS CON DATOS	27	26	28	26	28	28	26	27	27	28	28	26	
<b>TORRENTA E.</b>													
NORMAL	0.2	0.2	0.1	0.3	1.2	5.5	7.3	9.5	5.1	2.5	0.5	0.0	32.4
AÑOS CON DATOS	27	26	28	26	28	28	27	28	28	28	27	26	

**Tabla A2.2 Normales climatológicas estación meteorológica 14065 “Guadalajara Centro”. Fuente: (CNA, 2019)**

ESTADO DE: JALISCO													PERIODO: 1981-2010
ESTACION: 00014066 GUADALAJARA (DGE)													ALTURA: 1,550.0 MSNM.
LATITUD: 20°40'35" N.													LONGITUD: 103°20'46" W.
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	24.1	26.1	28.4	30.7	31.9	30.0	27.1	27.0	26.7	26.7	26.0	24.4	27.4
MAXIMA MENSUAL	26.5	28.0	30.5	32.7	34.2	33.1	28.8	28.2	28.1	28.1	27.5	26.2	
AÑO DE MAXIMA	1982	1982	1991	1982	1998	1982	1994	1997	2000	1995	1981	1994	
MAXIMA DIARIA	29.5	32.5	34.5	36.0	38.0	37.0	32.5	36.5	32.0	34.5	31.0	29.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	31/1996	20/1986	31/1982	30/1983	19/2005	04/1982	17/1989	27/2003	10/2000	16/1995	18/1986	16/1994	
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	17.2	18.8	20.8	23.1	24.6	23.8	21.8	21.8	21.7	21.0	19.4	17.8	21.0
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
TEMPERATURA MINIMA													
NORMAL	10.4	11.5	13.1	15.6	17.4	17.5	16.6	16.6	16.7	15.4	12.8	11.1	14.6
MINIMA MENSUAL	7.8	7.8	9.8	12.5	15.2	15.8	14.9	15.0	15.9	13.9	11.4	9.2	
AÑO DE MINIMA	1981	1983	1983	1983	1981	2004	1982	1983	2008	2010	1982	1982	
MINIMA DIARIA	1.0	4.0	5.5	9.0	9.5	12.5	9.0	11.0	10.0	9.0	5.0	-0.5	
FECHA MINIMA DIARIA	20/1996	05/1986	16/1983	09/1983	29/1983	02/1996	05/1982	14/1982	27/2008	29/2007	25/1983	14/1997	
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
PRECIPITACION													
NORMAL	17.4	8.0	3.7	4.0	22.9	193.6	272.2	211.3	176.0	57.3	11.5	6.0	983.9
MAXIMA MENSUAL	238.9	117.0	70.3	63.7	104.0	440.9	465.5	353.9	447.5	162.2	85.4	36.6	
AÑO DE MAXIMA	1992	2010	1997	1997	2004	2004	1991	2006	2004	2006	1982	1982	
MAXIMA DIARIA	57.0	49.1	38.0	36.2	50.2	87.6	114.8	74.7	88.0	61.7	70.5	17.4	
FECHA MAXIMA DIARIA	26/1992	02/2010	07/1997	28/1992	31/2004	22/1984	27/1983	21/2004	24/1997	12/2006	26/1982	16/2009	
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
EVAPORACION TOTAL													
NORMAL	155.2	189.1	274.9	309.4	323.6	243.0	191.2	181.7	163.8	172.1	163.0	144.9	2,511.9
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
NUMERO DE DIAS CON LLUVIA													
NORMAL	2.2	1.3	0.7	0.8	3.4	15.1	20.7	19.8	15.3	5.9	1.6	1.4	88.2
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
NIEBLA													
NORMAL	7.8	5.3	4.8	2.9	4.5	4.0	4.2	5.1	5.4	5.4	7.1	7.8	64.3
AÑOS CON DATOS	26	27	27	27	27	26	27	27	27	26	27	28	
GRANIZO													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.7	0.5	0.1	0.0	0.0	2.2
AÑOS CON DATOS	26	27	27	27	27	26	27	27	27	27	27	28	
TORRENTA E.													
NORMAL	0.9	0.2	0.1	0.1	0.3	1.3	1.9	1.1	1.4	0.9	0.6	0.1	8.9
AÑOS CON DATOS	26	27	27	27	27	26	27	27	27	27	27	28	

**Tabla A2.3 Normales climatológicas estación meteorológica 14065 “Guadalajara Sur”. Fuente: (CNA, 2019)**

ESTADO DE: JALISCO													PERIODO: 1981-2010
ESTACION: 00014132 TLAQUEPAQUE													ALTURA: 1,540.0 MSNM.
LATITUD: 20°38'18" N.													LONGITUD: 103°18'38" W.
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	25.1	27.0	29.3	31.0	33.3	31.6	29.0	28.6	28.1	27.0	27.0	25.1	28.7
MAXIMA MENSUAL	28.8	29.6	32.7	35.7	36.4	36.1	31.6	30.9	30.4	30.5	29.5	29.3	
AÑO DE MAXIMA	1982	1985	1982	1982	1998	1982	1988	1997	1997	1981	1981	1985	
MAXIMA DIARIA	31.0	33.0	37.0	39.0	39.5	40.0	38.5	36.0	38.0	39.5	38.0	34.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	22/1982	12/1982	31/1982	07/1982	15/1982	04/1982	14/2003	15/1988	30/2003	25/1995	09/1985	08/1987	
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	17.0	18.5	20.5	23.1	24.8	24.2	22.5	22.3	21.9	21.1	19.2	17.2	21.0
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
TEMPERATURA MINIMA													
NORMAL	8.9	9.9	11.6	14.3	16.3	16.7	16.0	16.0	15.7	14.4	11.4	9.3	13.4
MINIMA MENSUAL	7.0	5.6	9.1	10.7	14.2	14.3	14.0	13.4	11.3	10.0	7.6	5.5	
AÑO DE MINIMA	1985	1986	1983	1983	1983	1984	1990	1990	1990	2010	2010	2010	
MINIMA DIARIA	3.0	3.0	4.0	9.0	8.0	9.0	10.5	11.0	8.0	7.5	4.0	0.0	
FECHA MINIMA DIARIA	23/1981	05/1986	20/1987	10/1983	02/2010	26/2001	17/1984	08/1988	15/1990	15/2010	09/2010	14/1997	
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
PRECIPITACION													
NORMAL	15.8	6.0	2.2	3.1	26.5	213.7	262.4	214.4	168.8	65.3	14.8	5.8	998.8
MAXIMA MENSUAL	155.1	42.4	27.5	66.4	115.2	502.9	479.0	416.0	425.8	205.8	82.0	34.5	
AÑO DE MAXIMA	1992	1987	1997	1997	2000	2004	1990	1992	2004	1992	1982	1982	
MAXIMA DIARIA	24.0	21.0	21.0	28.5	56.2	85.0	99.6	75.5	106.5	102.9	47.6	18.3	
FECHA MAXIMA DIARIA	15/1983	25/2005	20/1997	04/1997	29/2000	07/2008	14/1990	11/1991	25/2004	31/1992	11/1999	06/1989	
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
EVAPORACION TOTAL													
NORMAL	155.2	189.1	274.9	309.4	323.6	243.0	191.2	181.7	163.8	172.1	163.0	144.9	2,511.9
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
NUMERO DE DIAS CON LLUVIA													
NORMAL	1.9	1.3	0.5	0.5	2.9	14.5	18.0	17.1	13.6	5.2	1.6	1.2	78.3
AÑOS CON DATOS	29	30	30	30	30	29	30	30	30	30	30	30	
NIEBLA													
NORMAL	2.1	1.6	1.1	0.8	2.0	2.9	2.6	3.3	2.8	3.3	3.1	3.2	28.8
AÑOS CON DATOS	27	28	28	28	28	27	28	28	28	28	28	29	
GRANIZO													
NORMAL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1	0.0	1.3
AÑOS CON DATOS	27	28	28	28	28	27	28	28	28	28	28	29	
TORRENTA E.													
NORMAL	0.6	0.4	0.0	0.1	0.3	1.1	2.0	0.9	0.4	0.3	0.3	0.3	6.7
AÑOS CON DATOS	27	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	29	

## A2.2 Hoja de cálculo Bioclimarq

Caracterización climática  
Diagnóstico de confort  
Recomendaciones bioclimáticas

**bioclimarq** 2016

Hoja de cálculo desarrollada por Gomez-Azpeitia, G. (D.R.)

**Referencias**

**ANSI-ASHRAE 55 (2010)**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, USA. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

**Bagnouls, F. y Gausson, H. (1953)**. Saison sèche et indice xérothermique. Paris. Faculté des Sciences.

**Duffie, J. y Beckman, W.A. (2000)**. Solar engineering of thermal processes. Londres: John Wiley and Sons.

**Evans, I.M. (2007)** The confort triangles. A new tool for bioclimatic design. PhD Thesis. Delft, NL. Technische Universiteit Delft.

**Fanger, P.O., and Toftum, J. (2002)**. Prediction of thermal sensation in non-Air Conditioned buildings in warm climates. Proceedings: Indoor Air, 2002. International Academy of Indoor Air Sciences, pp. 92-97

**Fanger, P.O. (1972)**. Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering. New York. McGraw Hill

**Givoni, B. (1976)**. Man, climate and architecture. Applied Science Publ.

**Givoni, B. (1998)**. Climate considerations in building and urban design. Canada. John Wiley & Sons Inc.

**Gut, P. and Ackerknecht, D. (1993)**. Climate Responsive Building: Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions. Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and management (SKAT), Switzerland.

**ISO 7730 (2005)**. Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Standards Organization. Switzerland.

**Koenigsberger, O.H., Mahoney, C.T. and Evans, M. (1971)**. Climate and House Design. United Nations. Dept. of Economic and Social Affairs, Centre for Housing, Building, and Planning (United Nations)

**Olgay, V. (1963)** Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton, N.J. Princeton University Press

**Serra Florensa, R. y Coch Roura, H. (1995)**. Arquitectura y Energía Natural. Barcelona. Ediciones UPC.

**Szokolay, S.V., and Docherty, M. (1999)** Climate Analysis. Brisbane, Australia. PLEA-he University of Queensland.

**Szokolay, S.V. (2008)** Introduction to Architectura Science. The basis of sustainable design. Oxford, UK. Elsevier LTD.

**Tejeda Martínez, A. (1991)** An exponential model of the curve of mean monthly hourly air temperature. *Atmósfera* (1991), 4, pp. 139-144

**Tejeda Martínez, A. (1994)** On the evaluation of the wet bulb temperatures a function of dry bulb temperature and relative humidity. *Atmósfera*(1994) 7, pp. 179-184

**Tejeda Martínez, A. y Gómez-Azpeitia, G. (2015)** Prontuario Solar de México. Univesidad de Colima, Universidad Veracruzana.






<b>CLIMA</b>	Tabla de temperaturas y humedades relativas horarias Resumen de temperaturas Resumen de humedades relativas Resumen de precipitación pluvial Resumen de radiación solar Resumen del clima
<b>BIOCLIMA</b>	PMV y PPD de Fanger Carta bioclimática de Olgay Carta BBCC de Givoni Carta bioclimática de Szokolay Triángulos de Confort de Evans
<b>RECOMENDACIONES</b>	Tablas de Mahoney Coeficientes de Serra y Coch

### DATOS Escriba sólo en las celdas sombreadas

Localización	
Nombre del sitio	Guadalajara, Jal.
Latitud	20 ° 40 ' 35 " 20.7 °
Longitud	-103 ° 20 ' 46 " -103.3 °
Altitud	1550 msnm

Normales Climatológicas	Meses												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
Temperatura máxima	24.6	26.6	29.0	31.4	32.7	30.8	28.0	27.8	27.4	27.3	26.5	24.8	28.1 °C
Temperatura mínima	8.5	9.4	11.0	13.5	15.7	16.9	16.3	16.2	16.1	14.3	11.0	9.1	13.2 °C
Humedad relativa máxima*													%
Humedad relativa mínima*													%
Humedad relativa promedio*	56.5	53.4	51.3	51.6	53.9	61.9	67.8	68.1	68.7	64.6	58.1	57.4	59.44 %
Precipitación pluvial	16.6	8.6	4.2	4.1	21.9	180.8	238.0	196.5	160.6	56.5	12.6	6.0	907 mm
Radación media s/p. horizontal*													wh/m2 dia
Brillo solar*													hrs
Velocidad de viento													m/s

\* Si no cuenta con los datos marcados con asterisco \*, deje vacias las celdas correspondientes.

Hábitos en la localidad	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tipo de ropa habitual	E	D	C	B	A	A	A	B	B	B	C	D
												
	Fuente de la imagen: Gut et Ackerknecht (1993) / Valores del coeficiente de arropamiento: ANSI-ASHRAE 55: 2010											

Uso de la ventilación natural	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Las ventanas por lo regular están abiertas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Las ventanas se abren a ciertos horarios	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Las ventanas por lo regular están cerradas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Uso de climatización artificial	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Los edificios climatizados artificialmente son comunes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Los edificios climatizados artificialmente son comunes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Algunos edificios cuentan con clima artificial	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Algunos edificios cuentan con clima artificial	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy pocos edificios cuentan con clima artificial	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Muy pocos edificios cuentan con clima artificial	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura A2.1 Llenado inicial hoja de cálculo Bioclimarq

## A2.3 Especificaciones y calibración de sensores de temperatura

**Tabla A2.4 Especificaciones de “data loggers”. Fuente: manual del fabricante.**

Measurement range	Temperature: -20° to 70°C (-4° to 158°F) RH: 5% to 95% RH External input channels (see sensor manual): 0 to 2.5 VDC; 0 to 5 VDC (with CABLE-ADAP5) and 0 to 10 VDC (with CABLE-ADAP10)
Accuracy	Temperature: $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ from 0° to 50°C ( $\pm 0.63^{\circ}\text{F}$ from 32° to 122°F), see Plot A RH: $\pm 2.5\%$ from 10% to 90% RH typical to a maximum of $\pm 3.5\%$ including hysteresis at 25°C (77°F); below 10% and above 90% $\pm 5\%$ typical External input channels (see sensor manual): $\pm 2\text{ mV} \pm 2.5\%$ of absolute reading
Resolution	Temperature: 0.03°C at 25°C (0.05°F at 77°F), see Plot A RH: 0.05% External Input Channels: 0.6 mV
Drift	Temperature: 0.1°C/year (0.2°F/year) RH: <1% per year typical
Response time in airflow of 1 m/s (2.2 mph)	Temperature: 6 minutes, typical to 90% RH: 1 minute, typical to 90%
Time accuracy	$\pm 1$ minute per month at 25°C (77°F), see Plot B
Operating temperature	Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F) Launch/readout: 0° to 50°C (32° to 122°F), per USB specification
Memory & Battery life	64K bytes (43,000 12-bit measurements). 1 year typical use
Weight & Dimensions	46 g (1.6 oz). 58 x 74 x 22 mm (2.3 x 2.9 x 0.9 inches)

Para asegurar la coherencia entre los datos registrados por los tres sensores de temperatura (ver [Tabla A2.4](#)), se procedió a una prueba casera considerando lo señalado por de [Schiller, et al. \(2007\)](#) para la calibración comparativa de “data loggers” marca HOBO. Los valores indicados en la [Tabla A2.5](#) corresponden a la diferencia promediada durante un registro de 24 hrs en el mismo sitio, siendo que las primeras dos horas los sensores fueron colocados al mismo tiempo dentro de un frasco sumergido en hielo y posteriormente se dejó a temperatura ambiente el resto del periodo. R1 corresponde al sensor para el tezontle, R2 el que se dejaría en la recámara testigo y R3 el que estaría en el exterior.

**Tabla A2.5 Diferencias promediadas entre lectura de sensores**

Concepto	R2-R1	R3-R2	R3-R1
Temperatura °C	- 0.03	- 0.09	- 0.12
Humedad Relativa %	- 0.58	0.72	0.14

## A2.4 Registro de temperaturas

**Tabla A2.6 Registro de máximos, mínimos y promedios por día del periodo 12 al 21 de mayo. Fuente: elaboración propia**

Etiquetas de fila	Máx. de Temp, °C	Mín. de Temp, °C	Promedio de Temp, °C	Máx. de HR, %	Mín. de HR, %	Promedio de HR, %
12/05/2019						
52744	28.07	25.09	26.81	29.36	26.09	27.53
52749	28.22	24.70	26.80	29.36	24.66	26.86
Ganancia Temp/HR	0.15	-0.39	-0.00	0.00	-1.44	-0.66
52745	35.56	21.65	29.98	38.62	15.14	22.95



Continúa de página anterior ->							
<b>13/05/2019</b>							
52744	27.85	24.56	26.23	31.52	24.87	28.43	
52749	28.10	24.22	26.13	31.14	22.91	27.89	
Ganancia Temp/HR	0.25	-0.34	-0.10	-0.38	-1.96	-0.54	
52745	38.31	14.12	25.77	55.33	11.84	29.15	
<b>14/05/2019</b>							
52744	28.54	24.75	26.49	33.35	24.91	29.32	
52749	28.87	24.44	26.44	32.61	23.59	28.64	
Ganancia Temp/HR	0.32	-0.31	-0.05	-0.74	-1.32	-0.68	
52745	40.37	15.58	26.79	62.80	12.56	32.92	
<b>15/05/2019</b>							
52744	28.25	25.21	26.88	30.67	23.86	27.48	
52749	28.32	24.85	26.76	30.39	22.20	26.76	
Ganancia Temp/HR	0.07	-0.36	-0.11	-0.28	-1.66	-0.73	
52745	38.98	15.34	26.61	49.12	9.96	27.02	
<b>16/05/2019</b>							
52744	30.27	25.84	27.75	35.58	19.82	27.95	
52749	30.24	25.57	27.57	36.39	20.55	27.65	
Ganancia Temp/HR	-0.03	-0.27	-0.18	0.81	0.73	-0.29	
52745	41.50	17.58	28.31	55.32	11.36	31.40	
<b>17/05/2019</b>							
52744	29.94	26.21	28.11	32.92	22.69	29.29	
52749	29.92	25.91	27.95	31.98	22.89	29.11	
Ganancia Temp/HR	-0.02	-0.29	-0.16	-0.94	0.20	-0.17	
52745	38.70	16.89	27.50	53.70	16.08	33.82	
<b>18/05/2019</b>							
52744	29.59	26.06	27.88	33.84	20.50	27.88	
52749	29.54	25.70	27.69	32.80	20.78	27.55	
Ganancia Temp/HR	-0.05	-0.37	-0.19	-1.05	0.27	-0.32	
52745	37.89	17.30	26.85	53.72	14.30	31.46	
<b>19/05/2019</b>							
52744	29.52	25.94	27.67	32.02	18.95	26.66	
52749	29.82	25.77	27.67	33.21	22.06	28.47	
Ganancia Temp/HR	0.30	-0.17	-0.00	1.19	3.11	1.80	
52745	40.69	15.27	27.18	52.72	10.71	29.63	
<b>20/05/2019</b>							
52744	29.24	26.16	27.72	28.38	20.04	24.72	
52749	29.72	25.91	27.84	31.12	21.80	27.22	
Ganancia Temp/HR	0.48	-0.24	0.13	2.74	1.76	2.50	
52745	38.14	17.27	27.16	38.01	12.34	24.30	
<b>Promedios</b>							
52744	29.03	25.53	27.28	31.96	22.42	27.70	
52749	29.19	25.23	27.21	32.11	22.38	27.79	
52745	38.90	16.78	27.35	51.04	12.70	29.18	
Ganancia Temp/HR	0.16	-0.30	-0.08	0.15	-0.03	0.10	

Tabla A2.7 Registro de máximos, mínimos y promedios por día del periodo 21 de mayo al 01 de junio. Fuente: elaboración propia

Etiquetas de fila	Máx. de Temp, °C	Mín. de Temp, °C	Promedio de Temp, °C	Máx. de HR, %	Mín. de HR, %	Promedio de HR, %
<b>22/05/2019</b>						
52744	28.47	25.19	26.91	26.95	19.23	23.56
52749	29.09	25.04	27.24	30.23	20.19	25.47
Ganancia Temp/HR	0.62	-0.15	0.33	3.28	0.96	1.91
52745	39.35	15.75	26.29	41.05	11.15	24.48
<b>23/05/2019</b>						
52744	28.64	25.33	26.92	29.42	18.45	23.58
52749	28.92	25.28	27.19	29.05	20.05	25.15
Ganancia Temp/HR	0.27	-0.05	0.27	-0.37	1.59	1.57
52745	37.67	16.27	26.44	41.80	9.66	24.38
<b>24/05/2019</b>						
52744	30.19	25.55	27.55	32.11	21.74	26.17
52749	30.22	25.43	27.51	33.33	22.93	26.62
Ganancia Temp/HR	0.02	-0.12	-0.04	1.22	1.19	0.46
52745	41.01	17.75	28.36	41.95	14.13	26.51
<b>25/05/2019</b>						

Continúa de página anterior ->							
52744	30.32	26.35	28.19	35.46	23.06	30.31	
52749	30.70	26.23	28.36	35.56	22.52	30.16	
Ganancia Temp/HR	0.38	-0.12	0.17	0.10	-0.53	-0.14	
52745	41.41	17.94	28.54	52.85	14.72	33.25	
<b>26/05/2019</b>							
52744	30.24	26.70	28.31	40.19	31.15	34.69	
52749	30.55	27.09	28.84	39.00	30.42	35.02	
Ganancia Temp/HR	0.30	0.39	0.52	-1.19	-0.73	0.33	
52745	41.50	18.91	28.10	54.83	18.69	38.44	
<b>27/05/2019</b>							
52744	29.89	27.14	28.38	43.65	37.14	40.90	
52749	30.67	27.33	29.05	41.79	36.41	39.46	
Ganancia Temp/HR	0.78	0.20	0.67	-1.86	-0.73	-1.44	
52745	39.18	20.37	27.99	65.13	24.08	46.16	
<b>28/05/2019</b>							
52744	29.32	26.11	27.89	43.08	33.24	39.46	
52749	30.02	26.97	28.64	41.55	33.57	38.73	
Ganancia Temp/HR	0.70	0.86	0.75	-1.52	0.32	-0.73	
52745	37.65	18.91	27.04	67.91	22.42	45.43	
<b>29/05/2019</b>							
52744	29.52	26.11	27.77	43.41	25.24	36.24	
52749	29.97	26.45	28.31	41.84	28.52	36.88	
Ganancia Temp/HR	0.45	0.34	0.54	-1.57	3.28	0.64	
52745	38.20	18.79	27.38	69.37	17.65	41.47	
<b>30/05/2019</b>							
52744	29.87	25.91	27.76	48.45	25.10	37.59	
52749	29.99	26.40	28.24	45.87	29.92	39.13	
Ganancia Temp/HR	0.13	0.49	0.48	-2.58	4.83	1.54	
52745	41.36	17.53	27.64	81.65	16.07	44.45	
<b>31/05/2019</b>							
52744	29.69	26.52	28.18	45.78	33.61	39.62	
52749	30.09	26.94	28.62	43.38	36.66	40.02	
Ganancia Temp/HR	0.40	0.42	0.44	-2.39	3.05	0.40	
52745	42.83	18.60	28.03	72.91	19.49	43.64	
<b>Promedios</b>							
52744	29.61	26.09	27.79	38.85	26.79	33.21	
52749	30.02	26.32	28.20	38.16	28.12	33.66	
52745	40.02	18.08	27.58	58.95	16.81	36.82	
Ganancia Temp/HR	0.41	0.23	0.41	-0.69	1.32	0.45	

Tabla A2.8 Registro de máximos, mínimos y promedios por día del periodo 01 al 30 de junio. Fuente: elaboración propia

Etiquetas de fila	Máx. de Temp, °C	Mín. de Temp, °C	Promedio de Temp, °C	Máx. de HR, %	Mín. de HR, %	Promedio de HR, %
<b>02/06/2019</b>						
52744	29.32	26.70	27.92	48.46	37.04	44.41
52749	30.07	27.19	28.70	46.65	35.18	42.28
Ganancia Temp/HR	0.75	0.49	0.79	-1.81	-1.86	-2.13
52745	28.02	24.53	26.09	54.99	38.25	49.44
<b>03/06/2019</b>						
52744	28.47	26.16	27.44	55.63	45.72	49.32
52749	29.62	26.77	28.34	51.98	44.05	47.35
Ganancia Temp/HR	1.15	0.61	0.90	-3.66	-1.67	-1.97
52745	27.58	25.28	26.54	58.77	47.39	51.45
<b>04/06/2019</b>						
52744	28.84	26.48	27.62	52.16	45.73	48.59
52749	29.67	27.36	28.59	50.05	45.17	47.73
Ganancia Temp/HR	0.82	0.88	0.97	-2.11	-0.57	-0.86
52745	27.95	26.35	27.14	53.15	47.59	50.04
<b>05/06/2019</b>						
52744	28.64	26.84	27.62	53.85	46.65	49.90
52749	29.32	27.24	28.21	52.84	45.62	48.78
Ganancia Temp/HR	0.67	0.39	0.60	-1.01	-1.03	-1.12
52745	27.88	26.60	27.18	54.12	48.90	51.34
<b>06/06/2019</b>						
52744	29.59	26.43	27.77	55.32	39.30	48.75

Continúa de página anterior ->							
52749	30.55	26.65	28.26	55.19	33.00	45.28	
Ganancia Temp/HR	0.96	0.22	0.49	-0.13	-6.31	-3.46	
52745	28.25	26.11	26.91	57.00	39.94	49.30	
<b>07/06/2019</b>							
52744	29.62	27.24	28.55	49.83	43.35	46.59	
52749	30.29	27.11	28.90	50.92	40.40	44.36	
Ganancia Temp/HR	0.68	-0.12	0.34	1.09	-2.95	-2.23	
52745	28.57	26.84	27.73	51.33	43.45	47.23	
<b>08/06/2019</b>							
52744	29.67	27.36	28.55	54.36	40.18	47.07	
52749	29.87	27.43	28.79	51.33	41.63	46.29	
Ganancia Temp/HR	0.20	0.07	0.24	-3.03	1.45	-0.78	
52745	28.57	27.16	27.99	53.06	41.95	48.26	
<b>09/06/2019</b>							
52744	30.52	26.92	28.50	57.16	28.84	45.29	
52749	31.13	27.21	28.89	53.72	34.85	46.30	
Ganancia Temp/HR	0.61	0.29	0.39	-3.44	6.01	1.01	
52745	29.46	26.84	27.77	54.88	32.83	46.77	
<b>10/06/2019</b>							
52744	30.27	26.65	28.73	47.11	21.31	34.02	
52749	31.18	26.92	29.31	46.65	18.75	33.38	
Ganancia Temp/HR	0.91	0.27	0.58	-0.46	-2.57	-0.64	
52745	29.54	26.04	28.07	48.60	22.25	35.06	
<b>11/06/2019</b>							
52744	30.34	27.55	28.97	42.62	30.77	36.87	
52749	30.90	27.46	29.29	41.55	29.34	35.50	
Ganancia Temp/HR	0.56	-0.10	0.32	-1.07	-1.43	-1.38	
52745	29.57	27.14	28.59	42.43	32.79	37.80	
<b>12/06/2019</b>							
52744	30.34	28.02	29.27	47.51	39.12	42.86	
52749	30.95	27.75	29.42	47.73	30.01	40.98	
Ganancia Temp/HR	0.61	-0.27	0.15	0.22	-9.11	-1.87	
52745	29.49	27.58	28.48	48.96	38.26	43.72	
<b>13/06/2019</b>							
52744	30.17	27.33	28.73	45.72	35.94	41.97	
52749	30.82	27.28	29.14	45.12	32.01	40.52	
Ganancia Temp/HR	0.66	-0.05	0.40	-0.60	-3.93	-1.46	
52745	29.12	25.82	27.55	49.01	35.60	44.25	
<b>14/06/2019</b>							
52744	29.22	26.82	28.09	48.90	36.58	44.25	
52749	30.07	26.97	28.66	49.11	30.09	43.01	
Ganancia Temp/HR	0.85	0.15	0.57	0.21	-6.49	-1.24	
52745	28.52	26.57	27.56	52.23	36.85	45.83	
<b>15/06/2019</b>							
52744	29.07	26.84	28.05	51.71	45.20	48.14	
52749	30.19	26.92	28.63	52.88	39.78	46.74	
Ganancia Temp/HR	1.13	0.07	0.58	1.18	-5.42	-1.40	
52745	28.42	26.60	27.48	51.81	46.20	49.65	
<b>16/06/2019</b>							
52744	28.32	25.96	27.24	55.37	47.20	51.18	
52749	29.27	26.23	27.86	54.53	43.09	49.81	
Ganancia Temp/HR	0.95	0.27	0.62	-0.84	-4.11	-1.37	
52745	27.53	25.65	26.64	56.58	46.85	52.69	
<b>17/06/2019</b>							
52744	28.74	25.79	27.17	58.87	49.27	52.19	
52749	29.87	26.06	27.85	54.58	45.57	50.28	
Ganancia Temp/HR	1.12	0.27	0.68	-4.30	-3.70	-1.92	
52745	29.49	25.57	26.65	58.42	51.54	54.10	
<b>18/06/2019</b>							
52744	29.52	26.84	28.05	54.70	47.04	51.16	
52749	30.42	27.06	28.73	53.58	40.74	48.74	
Ganancia Temp/HR	0.90	0.22	0.69	-1.12	-6.30	-2.42	
52745	28.47	26.38	27.36	57.35	47.47	53.05	
<b>19/06/2019</b>							
52744	28.99	26.35	27.28	54.61	49.00	51.57	
52749	30.02	26.72	27.98	55.97	48.25	51.83	
Ganancia Temp/HR	1.03	0.37	0.70	1.36	-0.75	0.26	
52745	28.02	25.89	26.69	57.57	53.29	55.24	

Continúa de página anterior ->							
<b>20/06/2019</b>							
52744	28.89	25.67	27.00	60.70	50.63	54.82	
52749	30.24	26.06	27.85	57.45	42.43	51.59	
Ganancia Temp/HR	1.35	0.39	0.85	-3.25	-8.20	-3.23	
52745	27.58	25.40	26.36	60.82	48.37	55.72	
<b>21/06/2019</b>							
52744	28.72	26.45	27.66	55.40	50.48	52.71	
52749	29.59	26.65	28.30	55.83	42.30	49.92	
Ganancia Temp/HR	0.87	0.20	0.64	0.43	-8.18	-2.79	
52745	28.17	26.43	27.24	57.93	47.76	54.12	
<b>22/06/2019</b>							
52744	29.32	26.16	27.58	55.67	43.03	49.90	
52749	30.19	26.26	27.99	53.98	40.07	47.79	
Ganancia Temp/HR	0.88	0.10	0.41	-1.69	-2.96	-2.11	
52745	28.25	26.09	27.23	55.86	40.50	48.93	
<b>23/06/2019</b>							
52744	29.22	25.94	27.62	46.88	23.87	39.78	
52749	29.62	25.79	27.72	44.64	24.42	38.94	
Ganancia Temp/HR	0.40	-0.15	0.10	-2.25	0.55	-0.84	
52745	27.90	25.70	26.72	45.10	30.51	40.37	
<b>24/06/2019</b>							
52744	28.94	25.77	27.23	44.31	32.23	38.29	
52749	29.39	25.50	27.26	42.90	32.18	37.50	
Ganancia Temp/HR	0.45	-0.27	0.03	-1.41	-0.05	-0.78	
52745	27.83	25.57	26.60	43.68	31.60	37.74	
<b>25/06/2019</b>							
52744	28.72	25.53	27.03	47.08	42.14	44.82	
52749	29.19	25.26	27.09	45.47	41.00	44.04	
Ganancia Temp/HR	0.47	-0.27	0.05	-1.61	-1.14	-0.78	
52745	27.83	25.60	26.69	50.58	44.28	45.55	
<b>26/06/2019</b>							
52744	28.30	26.21	27.36	51.98	45.72	49.29	
52749	29.14	26.04	27.58	49.84	43.26	47.91	
Ganancia Temp/HR	0.84	-0.17	0.22	-2.14	-2.46	-1.38	
52745	27.53	25.89	26.68	56.83	48.25	51.36	
<b>27/06/2019</b>							
52744	27.75	25.53	26.59	57.38	47.02	52.82	
52749	28.42	25.60	27.05	55.26	45.05	50.94	
Ganancia Temp/HR	0.67	0.07	0.46	-2.12	-1.97	-1.89	
52745	26.92	25.11	25.90	60.15	48.36	54.98	
<b>28/06/2019</b>							
52744	27.26	24.68	26.01	52.69	43.45	49.37	
52749	28.52	24.87	26.64	50.43	41.28	47.42	
Ganancia Temp/HR	1.26	0.19	0.63	-2.26	-2.18	-1.95	
52745	26.87	24.51	25.60	55.19	41.42	50.93	
<b>29/06/2019</b>							
52744	27.80	24.73	26.27	51.96	36.01	44.41	
52749	28.67	25.04	26.95	46.27	34.79	42.40	
Ganancia Temp/HR	0.87	0.31	0.68	-5.68	-1.23	-2.02	
52745	26.97	24.58	25.84	54.19	38.51	44.37	
<b>30/06/2019</b>							
52744	27.80	24.90	26.00	52.19	48.64	50.13	
52749	28.62	25.14	26.55	50.66	45.18	48.21	
Ganancia Temp/HR	0.82	0.24	0.55	-1.54	-3.46	-1.91	
52745	27.16	24.53	25.57	54.91	49.82	51.52	
<b>Promedios</b>							
52744	29.05	26.34	27.65	52.07	41.09	46.91	
52749	29.85	26.50	28.16	50.59	38.26	45.37	
52745	28.19	25.94	26.99	53.64	42.10	48.30	
Ganancia Temp/HR	0.81	0.16	0.50	-1.48	-2.83	-1.54	

Tabla A2.9 Ejemplo de diferenciales de temperatura (°C) cada 30 minutos entre sensores utilizados. R1: sensor recamara con capa de tezontle. R2: sensor recamara de referencia Fuente: elaboración propia

Fecha	Hora	Temp R1	Temp R2	ΔT
27/05/2019	00:00:00	29.24	30.22	0.98
27/05/2019	00:30:00	29.17	30.14	0.98
27/05/2019	01:00:00	29.07	30.04	0.98
27/05/2019	01:30:00	28.92	29.94	1.03
27/05/2019	02:00:00	28.74	29.82	1.07
27/05/2019	02:30:00	28.64	29.64	1.00
27/05/2019	03:00:00	28.57	29.49	0.92
27/05/2019	03:30:00	28.47	29.34	0.87
27/05/2019	04:00:00	28.39	29.22	0.82
27/05/2019	04:30:00	28.27	29.07	0.80
27/05/2019	05:00:00	28.15	28.94	0.79
27/05/2019	05:30:00	27.97	28.79	0.82
27/05/2019	06:00:00	27.85	28.64	0.79
27/05/2019	06:30:00	27.80	28.49	0.69
27/05/2019	07:00:00	27.73	28.32	0.59
27/05/2019	07:30:00	27.63	28.17	0.54
27/05/2019	08:00:00	27.53	28.05	0.52
27/05/2019	08:30:00	27.43	27.92	0.49
27/05/2019	09:00:00	27.41	27.83	0.42
27/05/2019	09:30:00	27.36	27.68	0.32
27/05/2019	10:00:00	27.26	27.55	0.29
27/05/2019	10:30:00	27.19	27.46	0.27
27/05/2019	11:00:00	27.16	27.38	0.22
27/05/2019	11:30:00	27.14	27.33	0.20
27/05/2019	12:00:00	27.14	27.33	0.20
27/05/2019	12:30:00	27.16	27.43	0.27
27/05/2019	13:00:00	27.24	27.55	0.32
27/05/2019	13:30:00	27.36	27.65	0.29
27/05/2019	14:00:00	27.58	27.83	0.25
27/05/2019	14:30:00	27.90	28.02	0.12
27/05/2019	15:00:00	28.17	28.32	0.15
27/05/2019	15:30:00	28.42	28.64	0.22
27/05/2019	16:00:00	28.77	28.97	0.20
27/05/2019	16:30:00	29.09	29.32	0.23
27/05/2019	17:00:00	29.37	29.64	0.28
27/05/2019	17:30:00	29.64	29.92	0.28
27/05/2019	18:00:00	29.74	30.14	0.40
27/05/2019	18:30:00	29.89	30.42	0.53
27/05/2019	19:00:00	29.87	30.55	0.68
27/05/2019	19:30:00	29.79	30.67	0.88
27/05/2019	20:00:00	29.41	30.55	1.13
27/05/2019	20:30:00	29.09	30.44	1.35
<b>27/05/2019</b>	<b>21:00:00</b>	<b>28.74</b>	<b>30.39</b>	<b>1.65</b>
27/05/2019	21:30:00	28.82	30.34	1.53
27/05/2019	22:00:00	28.92	30.27	1.35
27/05/2019	22:30:00	28.97	30.19	1.23
27/05/2019	23:00:00	29.02	30.14	1.13
27/05/2019	23:30:00	28.94	30.07	1.13

Fecha	Hora	Temp R1	Temp R2	ΔT
31/05/2019	00:00:00	28.47	29.77	1.30
31/05/2019	00:30:00	28.49	29.67	1.17
31/05/2019	01:00:00	28.47	29.59	1.12
31/05/2019	01:30:00	28.47	29.46	1.00
31/05/2019	02:00:00	28.39	29.32	0.92
31/05/2019	02:30:00	28.32	29.19	0.87
31/05/2019	03:00:00	28.22	29.04	0.82
31/05/2019	03:30:00	28.15	28.89	0.74
31/05/2019	04:00:00	28.02	28.74	0.72
31/05/2019	04:30:00	27.88	28.59	0.72
31/05/2019	05:00:00	27.73	28.44	0.72
31/05/2019	05:30:00	27.55	28.30	0.74
31/05/2019	06:00:00	27.43	28.15	0.72
31/05/2019	06:30:00	27.31	27.97	0.67
31/05/2019	07:00:00	27.19	27.83	0.64
31/05/2019	07:30:00	27.06	27.63	0.57
31/05/2019	08:00:00	26.97	27.48	0.52
31/05/2019	08:30:00	26.87	27.36	0.49
31/05/2019	09:00:00	26.79	27.26	0.47
31/05/2019	09:30:00	26.72	27.16	0.44
31/05/2019	10:00:00	26.65	27.04	0.39
31/05/2019	10:30:00	26.57	26.97	0.39
31/05/2019	11:00:00	26.52	26.94	0.42
31/05/2019	11:30:00	26.52	26.94	0.42
31/05/2019	12:00:00	26.55	26.94	0.39
31/05/2019	12:30:00	26.70	26.99	0.29
31/05/2019	13:00:00	26.97	27.09	0.12
31/05/2019	13:30:00	27.55	27.21	-0.34
31/05/2019	14:00:00	27.70	27.38	-0.32
31/05/2019	14:30:00	28.44	27.68	-0.77
31/05/2019	15:00:00	28.42	27.97	-0.45
<b>31/05/2019</b>	<b>15:30:00</b>	<b>29.34</b>	<b>28.37</b>	<b>-0.97</b>
31/05/2019	16:00:00	29.41	28.77	-0.65
31/05/2019	16:30:00	29.69	29.09	-0.60
31/05/2019	17:00:00	29.69	29.39	-0.30
31/05/2019	17:30:00	29.57	29.67	0.10
31/05/2019	18:00:00	29.46	29.84	0.38
31/05/2019	18:30:00	29.52	29.84	0.32
31/05/2019	19:00:00	29.41	29.74	0.33
31/05/2019	19:30:00	29.44	29.87	0.43
31/05/2019	20:00:00	29.49	30.02	0.53
31/05/2019	20:30:00	29.29	30.04	0.75
31/05/2019	21:00:00	29.22	30.02	0.80
31/05/2019	21:30:00	29.27	29.99	0.73
31/05/2019	22:00:00	29.19	30.04	0.85
31/05/2019	22:30:00	29.22	30.09	0.88
31/05/2019	23:00:00	29.22	30.07	0.85
31/05/2019	23:30:00	29.12	30.02	0.90

## A2.5 Valores de conductividad $\lambda$

Tabla A2.10 Valores de Conductividad y Aislamiento Térmico de Diversos Materiales. Fuente: (DOF, 2001; DOF, 2011)

Material	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) W/mK	Aislamiento térmico (M) m <sup>2</sup> K/W
Tabique rojo cocido común			
* al exterior	2 000	0.872	-----
* con recubrimiento impermeable por fuera	-----	0.768	-----
* al interior	-----	0.698	-----
Tabique de barro extruido			
* Solido vidriado, para acabado exterior	2 050	1,282.0	-----
* Bloque hueco vertical (60 a 67% solido)	2 050	0.998	-----
* Bloque hueco vertical, relleno con vermiculita	2 050	0.575	
Tabique ligero con recubrimiento impermeable por fuera			
* densidad	1 600	0.698	-----
* densidad	1 400	0.582	-----
* densidad	1 200	0.523	-----
* densidad	1 000	0.407	-----
Tabique ligero al exterior	1 600	0.814	-----
Bloque de concreto celular curado c/autoclave			
* densidad	450	0.120	-----
* densidad	600	0.210	-----
Bloque de concreto celular curado c/autoclave			
* densidad	500	0.190	-----
* densidad	600	0.210	-----
Bloque de concreto			
* 20 cm de espesor, 2 o 3 huecos	1 700	-----	0.180
* el mismo con perlita	1 700	-----	0.360
* el mismo con vermiculita	1 700	-----	0.300
Concreto			
* armado	2 300	1,740.0	-----
* simple al exterior	2 200	1,650.0	-----
* ligero al exterior	1 250	0.698	-----
* ligero al interior	1 250	0.582	-----
Mortero			
* cemento arena	2 000	-----	-----
* con vermiculita	500	-----	-----
* con arcilla expandida	750	-----	-----
Asbesto cemento, placa	1 800	0.582	-----
Asbesto cemento, placa	1800	0.582	-----
Asbesto cemento, placa	1360	0.250	-----
Bloque			
* de tepetate o arenisca calcarea al exterior	-----	1,047.000	-----
* de tepetate o arenisca calcarea al interior	-----	0.930	-----
* de adobe al exterior	-----	0.930	-----
* de adobe al interior	-----	0.582	-----
Piedra			
* Caliza	2 180	1,400.0	-----
* Granito, basalto	2 600	1,500.0	-----
* Mármol	2 500	2,000.0	-----
* Pizarra	2 700	2,000.0	-----
* Arenisca	2 000	1,300.0	-----
Madera			
* Viruta aglutinada (Pamacon)	700	0.163	-----
* Blanda	610	0.130	-----
* dura	700	0.150	-----
Vidrio			
* Sencillo	2 200	0.930	-----

<b>Continúa de página anterior →</b>			
* Sencillo	2 700	1,160.0	-----
Metales			
* Aluminio	2 700	204.0	-----
* Cobre	8 900	372.2	-----
* Acero y fierro	7 800	52.3	-----
MATERIAL DE RECUBRIMIENTO			
Tablero de asbesto cemento	1932	0.557	-----
* Espesor 0,32 cm	1932	-----	0.055
* Espesor 0,84 cm	1932	-----	0.083
Tablero de triplay	-----	0.115	
* Espesor 0,64 cm	-----	-----	0.055
* Espesor 0,96 cm	-----	-----	0.083
* Espesor 1,27 cm	-----	-----	0.110
* Espesor 1,60 cm	-----	-----	0.137
* Espesor 1,90 cm	-----	-----	0.165
Tablero de yeso	-----	-----	-----
* Espesor 0,96 cm	-----	-----	0.057
* Espesor 1,27 cm	-----	-----	0.083
* Espesor 1,69 cm	-----	-----	0.110
Aplanados			
* Yeso	800	0.372	-----
* Mortero de cal al exterior	-----	0.872	-----
* Mortero de cal al interior	-----	0.698	-----
Rellenos			
* Tierra, arena o grava expuesta a la lluvia	-----	2,362.0	-----
* Terrados secos en azoteas	-----	0.582	-----
* Tezontle	-----	0.186	-----
* Arena seca, limpia	1 700	0.407	-----
Placas			
* Fibracel	1,000	0.128	-----
Azulejos y mosaicos	-----	1,047.0	-----
Ladrillo exterior	-----	0.872	-----
Ladrillo exterior con recubrimiento impermeabilizado por fuera	-----	0.768	-----
Madera (humedad 12%)			
* Pino	663	0.162	-----
* Cedro	505	0.130	-----
* Roble	753	0.180	-----
* Fresno	674	0.164	-----

# ANEXO 3

## Datos de hidrología y registros con el simulador de lluvias

### A3.1 Coeficientes de escurrimiento

Se indican en las *Tablas A3.1* y *A3.2*, índices de escurrimiento considerados por diferentes autores para su empleo en la formulación del Método Racional.

**Tabla A3.1 Valores del coeficiente de escurrimiento para periodos de retorno de 2 a 100 años. Fuente: (Campos-Aranda, citado en SEMARNAT-CNA, 2016)**

Uso del terreno	Porcentaje de área impermeable	Periodos de retorno en años			
		2	5	10	100
Comercial	95	0.87	0.87	0.88	0.89
Alrededor de zonas comerciales	70	0.6	0.65	0.7	0.8
Residencial de familias individuales	50	0.4	0.45	0.5	0.6
Edificios de apartamentos (separados)	50	0.45	0.5	0.6	0.7
Edificios de apartamentos (juntos)	70	0.6	0.65	0.7	0.8
½ campo edificado o más	45	0.3	0.35	0.4	0.6
Apartamentos	70	0.65	0.7	0.7	0.8
Industrial (disperso)	80	0.71	0.72	0.76	0.82
Industrial denso	90	0.8	0.8	0.85	0.9
Parques y cementerios	7	0.1	0.25	0.35	0.65
Campos de juego	13	0.25	0.25	0.35	0.65
Escuelas	50	0.45	0.5	0.6	0.7
Patios de ferrocarril	20	0.4	0.45	0.5	0.6
Calles pavimentadas	100	0.87	0.88	0.9	0.93
Calles empedradas	40	0.15	0.25	0.35	0.65
Avenidas y paseos	96	0.87	0.87	0.88	0.89
Techo o azoteas	90	0.8	0.85	0.9	0.9
Césped en suelos arenosos	2	0	0.01	0.05	0.2
Césped en suelos arcillosos	2	0.05	0.1	0.2	0.4

**Tabla A3.2 Coeficientes de escurrimientos para distintas superficies sin urbanizar. Fuente: Fuente especificada no válida.**

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
Bosque Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Pastizales Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82



### A3.2 Registro de resultados del experimento en el simulador de lluvias

En las tablas que se presentan a continuación, *Reg ###* corresponde al número corrida con el que se identificó cada uno de los ensayos realizados en el simulador de lluvias. *Superficie* identifica el estado de la superficie por la que transitaba el flujo de agua (e.g. mesa libre, con una capa de tezontle y con dos capas de tezontle). *Pendiente* es la que se le dio a la mesa a fin de replicar aquella que existe comúnmente en las azoteas de vivienda. *Q ini* y *Q Fin* son los datos registrados en el aforador del simulador (ver Fig. 5.10), mientras que *Q (l/min)* es el dato que se registró en la regla graduada del vertedor del sistema (ver Fig. 5.11). Los tiempos *t (min)* se cronometraron y registraron en video.

Tabla A3.3 Registros para mesa libre con 1% de pendiente

Reg 333		Reg 334		Reg 348		Reg 349		Promedios representativos de Tc
Superficie	Pendiente	Superficie	Pendiente	Superficie	Pendiente	Superficie	Pendiente	
mesa libre	1.0%	mesa libre	1.0%	mesa libre	1.0%	mesa libre	1.0%	
<b>Q ini</b>	<b>Q Fin</b>	<b>Q ini</b>	<b>Q Fin</b>	<b>Q ini</b>	<b>Q Fin</b>	<b>Q ini</b>	<b>Q Fin</b>	
2.4	2.3	2.4	2.3	2.4	2.38	2.4	2.38	
<b>Q (l/min)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Q (l/min)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Q (l/min)</b>	<b>t (min)</b>	<b>Q (l/min)</b>	<b>t (min)</b>	
0	00:00:00	0	00:00:00	0	00:00:00	0	00:00:00	
0.2	00:00:35	0.2	00:00:37	0.2	00:00:27	0.2	00:00:24	
0.4	00:00:54	0.4	00:01:00	0.4	00:01:00	0.4	00:00:52	
0.6	00:01:17	0.6	00:01:17	0.6	00:01:27	0.6	00:01:17	
0.8	00:01:38	0.8	00:01:35	0.8	00:01:50	0.8	00:01:40	
1	00:02:00	1	00:01:59	1	00:02:08	1	00:02:00	
1.2	00:02:34	1.2	00:02:31	1.2	00:02:32	1.2	00:02:27	
1.4	00:03:16	1.4	00:03:14	1.4	00:03:03	1.4	00:03:00	
1.6	00:04:06	1.6	00:04:03	1.6	00:03:39	1.6	00:03:37	
1.8	00:05:06	1.8	00:04:54	1.8	00:04:25	1.8	00:04:29	
2	00:06:29	2	00:06:08	2	00:05:21	2	00:05:27	
2.1	00:07:20	2.1	00:07:46	2.1	00:05:50	2.1	00:06:00	
2.2	00:10:00	2.2	00:10:43	2.2	00:07:00	2.2	00:07:43	
2.25	00:13:13	2.25	00:12:00	2.25	00:07:30	2.25	00:08:20	
		2.25	00:13:17	2.3	00:08:50	2.3	00:09:40	
				2.35	00:12:40	2.3	00:12:16	
								Tc con 1 l/min:
								00:02:02
								Tc con 2 l/min:
								00:05:51

Tabla A3.4 Registros para mesa libre con 2% de pendiente

Reg 350		Reg 351		Reg 352		Promedios representativos de Tc
Superficie	Pendiente	Superficie	Pendiente	Superficie	Pendiente	
mesa libre	2.0%	mesa libre	2.0%	mesa libre	2.0%	
Q ini	Q Fin	Q ini	Q Fin	Q ini	Q Fin	
2.3	2.2	2.4	2.4	2.4	2.35	
Q (l/min)	t (min)	Q (l/min)	t (min)	Q (l/min)	t (min)	
0	00:00:00	0	00:00:00	0	00:00:00	
0.2	00:00:43	0.2	00:00:30	0.2	00:00:53	
0.4	00:01:20	0.4	00:00:56	0.4	00:01:14	
0.6	00:01:34	0.6	00:01:22	0.6	00:01:29	
0.8	00:01:48	0.8	00:01:46	0.8	00:01:41	
1	00:02:00	1	00:02:09	1	00:01:52	
1.2	00:02:16	1.2	00:02:33	1.2	00:02:06	
1.4	00:02:32	1.4	00:03:07	1.4	00:02:30	
1.6	00:03:03	1.6	00:03:46	1.6	00:03:08	
1.8	00:04:02	1.8	00:04:43	1.8	00:03:48	
2	00:05:14	2	00:06:00	2	00:04:45	
2.1	00:05:50	2.1	00:07:00	2.1	00:05:41	
2.2	00:07:40	2.2	00:08:30	2.2	00:07:29	
2.25	00:08:10	2.25	00:08:59	2.25	00:08:25	
2.3	00:08:50	2.3	00:10:00	2.3	00:10:42	
2.3	00:12:13	2.35	00:10:30	2.3	00:12:35	
		2.4	00:12:13			
						Tc con 1 l/min:
						00:02:00
						Tc con 2 l/min:
						00:05:20

Tabla A3.5 Registros para mesa con 1 capa de tezontle y 1% de pendiente

Reg 356		Reg 357		Promedios representativos de Tc
Superficie	Pendiente	Superficie	Pendiente	
Tez. 1 capa	1.0%	Tez. 1 capa	1.0%	
Q ini	Q Fin	Q ini	Q Fin	
2.3	2.2	2.3	2.2	
Q (l/min)	t (min)	Q (l/min)	t (min)	
0	00:00:00	0	00:00:00	
0.2	00:00:08	0.2	00:00:10	
0.4	00:00:24	0.4	00:00:24	
0.6	00:00:36	0.6	00:00:38	
0.8	00:00:49	0.8	00:00:48	
1	00:01:00	1	00:01:00	
1.2	00:01:15	1.2	00:01:14	
1.4	00:01:33	1.4	00:01:30	
1.6	00:01:53	1.6	00:01:51	
1.8	00:02:20	1.8	00:02:14	
2	00:02:53	2	00:02:42	
2.1	00:03:30	2.1	00:03:11	
2.2	00:04:15	2.2	00:03:55	
2.25	00:04:50	2.25	00:04:27	
2.25	00:08:31	2.25	00:06:00	
		2.2	00:07:15	
		2.2	00:08:21	
				Tc con 1 l/min:
				00:01:00
				Tc con 2 l/min:
				00:02:48

Tabla A3.6 Registros para mesa con 1 capa de tezontle y 2% de pendiente

Reg 353

Superficie	Pendiente
Tez. 1 capa	2.0%
Q ini	Q Fin
2.4	2.3
Q (l/min)	t (min)
0	00:00:00
0.2	00:00:10
0.4	00:00:23
0.6	00:00:34
0.8	00:00:43
1	00:00:55
1.2	00:01:08
1.4	00:01:23
1.6	00:01:42
1.8	00:02:03
2	00:02:38
2.1	00:03:24
2.2	00:05:40
2.25	00:06:15
2.3	00:08:40
2.3	00:12:12

Reg 354

Superficie	Pendiente
Tez. 1 capa	2.0%
Q ini	Q Fin
2.4	2.3
Q (l/min)	t (min)
0	00:00:00
0.2	00:00:23
0.4	00:00:34
0.6	00:00:41
0.8	00:00:51
1	00:01:00
1.2	00:01:12
1.4	00:01:26
1.6	00:01:39
1.8	00:01:58
2	00:02:11
2.1	00:02:30
2.2	00:02:58
2.25	00:03:30
2.3	00:05:00
2.35	00:07:00
2.35	00:08:31

Reg 355

Superficie	Pendiente
Tez. 1 capa	2.0%
Q ini	Q Fin
2.3	2.2
Q (l/min)	t (min)
0	00:00:00
0.2	00:00:10
0.4	00:00:23
0.6	00:00:34
0.8	00:00:43
1	00:00:56
1.2	00:01:08
1.4	00:01:25
1.6	00:01:44
1.8	00:02:10
2	00:02:36
2.1	00:03:08
2.2	00:04:10
2.25	00:05:10
2.25	00:09:20

Promedios representativos de Tc
Tc con 1 l/min:
00:00:57
Tc con 2 l/min:
00:02:28

Tabla A3.7 Registros para mesa con 2 capas de tezontle y 1% de pendiente

Reg 359

Superficie	Pendiente
Tez. 2 capa	1.0%
Q ini	Q Fin
2.3	2.2
Q (l/min)	t (min)
0	00:00:00
0.2	00:00:20
0.4	00:00:30
0.6	00:00:40
0.8	00:00:53
1	00:01:07
1.2	00:01:21
1.4	00:01:36
1.6	00:01:57
1.8	00:02:30
2	00:03:05
2.1	00:03:50
2.2	00:06:16
2.25	00:07:09
2.25	00:08:23

Reg 360

Superficie	Pendiente
Tez. 2 capa	1.0%
Q ini	Q Fin
2.2	2.2
Q (l/min)	t (min)
0	00:00:00
0.2	00:00:19
0.4	00:00:33
0.6	00:00:44
0.8	00:00:55
1	00:01:09
1.2	00:01:27
1.4	00:01:47
1.6	00:02:12
1.8	00:02:56
2	00:04:10
2.05	00:05:28
2.05	00:08:46

Promedios representativos de Tc
Tc con 1 l/min:
00:01:08
Tc con 2 l/min:
00:03:38

**Tabla A3.8 Registros para mesa con 2 capas de tezontle y 2% de pendiente**

**Reg 361**

Superficie	Pendiente
Tez. 2 capa	2.0%
Q ini	Q Fin
2.1	2
Q (l/min)	t (min)
0	00:00:00
0.2	00:00:21
0.4	00:00:36
0.6	00:00:47
0.8	00:01:01
1	00:01:13
1.2	00:01:27
1.4	00:01:45
1.6	00:02:07
1.8	00:02:49
2	00:03:28
2.1	00:04:02
2.15	00:06:18
2.15	00:08:36

**Reg 362**

Superficie	Pendiente
Tez. 2 capa	2.0%
Q ini	Q Fin
2	2
Q (l/min)	t (min)
0	00:00:00
0.2	00:00:30
0.4	00:00:45
0.6	00:00:57
0.8	00:01:09
1	00:01:21
1.2	00:01:38
1.4	00:02:00
1.6	00:02:28
1.8	00:03:12
2	00:04:04
2	00:08:19

Promedios representativos de Tc
Tc con 1 l/min:
00:01:17
Tc con 2 l/min:
00:03:46

# ANEXO 4

## De la revisión estructural

### A4.1 Determinación del valor inicial de carga limite en la azotea

Expuestos en el [Capítulo 4](#) y [Capítulo 6](#), se hace referencia a una carga uniformemente distribuida de 100 kg/m<sup>2</sup> como el valor límite que, sin contar con un análisis estructural completo, es factible colocar sobre una azotea como carga adicional. Dicha carga se corresponde con la carga viva indicada en los Reglamentos de Construcción y Normas Técnicas Complementarias de los municipios del AMG y el RCDF (*e.g. NTC, 2004; RCGDL, 1997*). Se transcribe a continuación en forma parcial algunos detalles de dichas normativas y la tabla de donde se extrae el valor referido.

... La carga viva máxima  $W_m$  se deberá emplear para diseño estructural por fuerzas gravitacionales y para calcular asentamientos inmediatos en suelos, así como en el diseño estructural de los cimientos ante cargas gravitacionales ...

... Las cargas uniformes de la tabla siguiente se considerarán distribuidas sobre el área tributaria de cada elemento:

**Tabla A4.1 Cargas Vivas Unitarias, en kg/m<sup>2</sup> (extracto parcial). Fuente: (NTC, 2004)**

Destino de piso o cubierta	$W_m$ (kg/m <sup>2</sup> )
a) Habitación (casa/habitación, departamentos, viviendas, dormitorios, cuartos de hotel, internados de escuelas, cuarteles, cárceles, correccionales, hospitales y similares)	190
b) Oficinas, despachos y laboratorios	250
c) Comunicación para peatones (pasillos, escaleras, rampas, vestíbulos y pasajes de acceso libre al público)	400
d) Estadios y lugares de reunión sin asientos individuales incluyendo salones de baile y gimnasios	480
e) Otros lugares de reunión (templos, cines, teatros, restaurantes, áreas de lectura en bibliotecas, aulas, salas de juego y similares)	350
f) Comercio, fábricas, talleres, bodegas y áreas de almacenaje	$W_m$
<b>g) Cubiertas y azoteas con pendiente no mayor de 5%</b>	<b>100 (4) (7)</b>
h) Cubiertas y azoteas con pendiente mayor de 5%	40
i) Volados en vía pública (marquesinas, balcones y similares)	300
j) Garajes y estacionamientos (para automóviles exclusivamente)	250

(4) En el diseño de pretilos de cubiertas, azoteas y barandales para escaleras, rampas, pasillos y balcones, se supondrá una carga viva horizontal no menor de 100 kg/m<sup>2</sup> actuando al nivel y en la dirección más desfavorables ...

(7) Las cargas vivas especificadas para cubiertas y azoteas no incluyen las cargas producidas por tinacos y anuncios, ni las que se deben a equipos u objetos pesados que puedan apoyarse en o colgarse del techo. Estas cargas deben preverse por separado y especificarse en los planos estructurales ... adicionalmente, los elementos de las cubiertas y azoteas deberá revisarse con una carga concentrada de 100 kg en la posición más crítica ...

#### A4.2 Requerimientos para la aplicación del Análisis simplificado

Señala las NTC en su edición 2004 para edificios de mampostería:

Será admisible considerar que la fuerza cortante que toma cada muro o segmento es proporcional a su área transversal, ignorar los efectos de torsión, de momento de volteo y de flexibilidad de diafragma, y emplear el método simplificado de diseño sísmico especificado en el Capítulo 7 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo, cuando se cumplan los requisitos especificados en el Capítulo 2 de las Normas citadas y que son los siguientes:

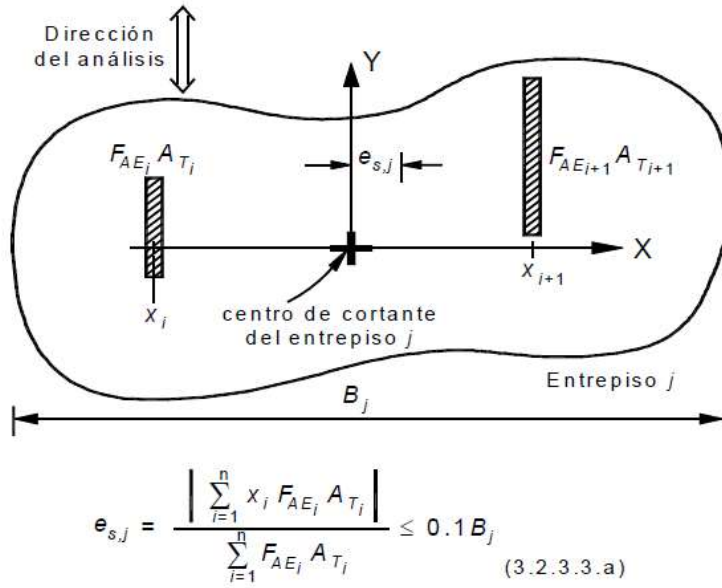
- a) En cada planta, incluyendo a la apoyada en la cimentación, al menos 75 por ciento de las cargas verticales están soportadas por muros continuos en elevación y ligados entre sí mediante losas monolíticas u otros sistemas de piso suficientemente resistentes y rígidos al corte. Dichos muros tendrán distribución sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales. Para ello, la excentricidad torsional calculada estáticamente  $e_s$  no excederá del diez por ciento de la dimensión en planta del entrepiso medida paralelamente a dicha excentricidad,  $B$ . La excentricidad torsional  $e_s$  podrá estimarse como el cociente del valor absoluto de la suma algebraica del momento de las áreas efectivas de los muros, con respecto al centro de cortante del entrepiso, entre el área efectiva total de los muros orientados

en la dirección de análisis (fig. 3.6). El área efectiva es el producto del área bruta de la sección transversal del muro,  $A_T$  y el factor  $F_{AE}$  que está dado por:

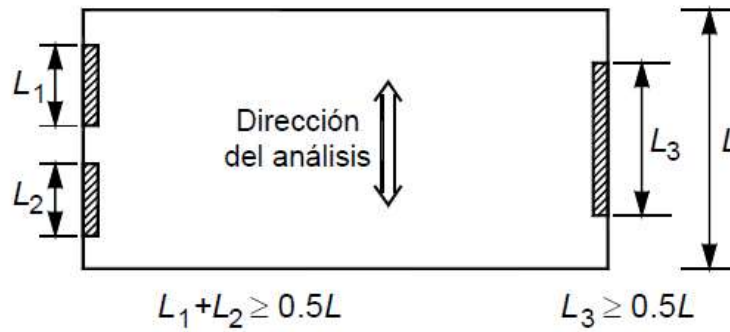
$$F_{AE} = 1 ; \quad \text{si } \frac{H}{L} \leq 1.33$$
$$F_{AE} = \left(1.33 \frac{L}{H}\right)^2 ; \quad \text{si } \frac{H}{L} > 1.33$$

donde  $H$  es la altura libre del muro y  $L$  es la longitud efectiva del muro. En todos los pisos se colocarán como mínimo dos muros de carga perimetrales paralelos con longitud total al menos igual a la mitad de la dimensión de la planta del edificio en la dirección de análisis (fig. 3.7).

- b) La relación entre longitud y ancho de la planta del edificio no excede de 2 a menos que, para fines de análisis sísmico, se pueda suponer dividida dicha planta en tramos independientes cuya relación longitud a ancho satisfaga esta restricción y las que se fijan en el inciso anterior, y cada tramo se revise en forma independiente en su resistencia a efectos sísmicos.
- c) La relación entre la altura y la dimensión mínima de la base del edificio no excede de 1.5 y la altura del edificio no es mayor de 13 m.



**Figura 3.6** Requisito para considerar distribución simétrica de muros en una dirección



**Figura 3.7** Requisito sobre muros de carga perimetrales paralelos



# BIBLIOGRAFÍA

## *Trabajos citados*

---

Abuseif, M. & Gou, Z., 2018. Review of Roofing Methods: Construction Features, Heat Reduction, Payback Period and Climatic Responsiveness. *Energies*, 11(11).

Academia Mexicana de la Lengua, 2019. *Diccionario breve de mexicanismos de Guido Gómez de Silva*. [En línea] Available at: <http://www.academia.org.mx>

Al-Turki, A., Gari, H. & Zaki, G., 1997. Comparative study on reduction of cooling loads by roof gravel cover. *Energy and Buildings*, Volumen 25, pp. 1-5.

Alvarez-Partida, F., 2017. *Parametros del confort en la Edificación*, s.l.: ITESO.

Alvarez-Partida, F., Jiménez-Rodríguez, J., Flores-Flores, L. E. & Cueva-Lomas, J. E., 2016. *Metodología de análisis de sostenibilidad de materiales producidos en Jalisco, de la Materioteca del ITESO*. s.l.:ITESO.

Angeles-Hernández, J. M., Ojeda-Bustamante, W., De Los Santos-García, A. & Arista-Cortes, J., 2003. *Análisis de la granulometría del tezontle utilizado como sustrato en invernaderos*, s.l.: XII CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN.

Aparicio-Mijares, F. J., 1989. *Fundamento de Hidrología de Superficie*. CDMX: Limusa.

Armfield, s.f. *ADVANCED ENVIRONMENTAL HYDROLOGY SYSTEM - S12MKII*, s.l.: s.n.

Arquinetpolis, 2019. *¿Cómo orientar una vivienda según sus asoleamientos?*. [En línea] Available at: <https://arquinetpolis.com/orientar-vivienda-proyecto-000100/>

Ayala-Rodríguez, N. A., 2015. *Propuesta para la gestión integral sustentable de los residuos de construcción y demolición (RCD) en el área metropolitana de Guadalajara*. s.l.:ITESO.

Blyth, F. & de Freitas, M., 1989. *Geología para Ingenieros*. s.l.:CECSA.

Borfitz, A., 2008. *Trabajo práctico de laboratorio - Permeabilidad*, s.l.: Universidad Nacional del Nordeste.

Breña-Puyol, A. F. & Jacobo-Villa, M. A., 2006. *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Cd.de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Brito, A. F., 2010. *Problemas de la vivienda en el Area Metropolitana de Guadalajara*, Guadalajara: Cinvestav / UdeG.

Carretero-Ayuso, M. J., 2018. Comparison between building roof construction systems based on the LCA. *Revista de la Construcción*, 17(1), pp. 123-136.

Carrillo-Armenta, J., 2000. Pésima infraestructura pluvial en Guadalajara. *Gaceta Universitaria - UdeG*.

Carrillo, L. E., 2005. El efecto "isla de calor". *Gaceta Universitaria - UdeG*.

Cayeros-Robles, D. E., 2016. *Adecuación bioclimática y eficiencia hidrica sustentable para edificios de vivienda multifamiliar*. s.l.:ITESO.

CEA-Jalisco, 2015. *Comision Estatal del Agua Jalisco*. [En línea] Available at: [https://www.ceajalisco.gob.mx/doc/fichas\\_hidrologicas/region4/guadalajara.pdf](https://www.ceajalisco.gob.mx/doc/fichas_hidrologicas/region4/guadalajara.pdf)

Cedeño-Valdiviezo, A., 2010. Materiales Bioclimáticos. *Revista de Arquitectura*, Volumen 12, pp. 100-110.

Chan, H.-Y., Riffat, S. B. & Zhu, J., 2010. Review of passive solar heating and cooling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), pp. 781-789.

Chávez, C. & Arreygue, E., 2011. *Caracterización Mecánica de la Escoria Volcánica (Tezontle), de la Zona de Morelia, Michoacán*, s.l.: s.n.

CNA, 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. En: *Alcantarillado Pluvial*. s.l.:s.n.

CNA, 2019. *Normales Climatológicas por Estado*. [En línea] Available at: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>

CONAGUA, 2016. *Atlas del Agua en México 2016*. s.l.:Comision Nacional del Agua.

CONAGUA, 2018. *Estadísticas del Agua en México 2018*. s.l.:Comision Nacional del Agua.

CONAGUA, 2019. *Mapas de climatología 1981-2010*, s.l.: s.n.

CONAVI, 2008. *Criterios e indicadores para los desarrollos habitacionales sustentables en México*, s.l.: Comisión Nacional de Vivienda.

CONAVI, 2017. *Codigo de Edificación de Vivienda 3RA.Edición*. s.l.:CONAVI / Gobierno Federal.

CONAVI, 2019. *Sistema Nacional de Información e Indicadores de Vivienda*, s.l.: s.n.

Dario-Ibargüengoitia, F. B., 2011. Confort ecológico. En: *Diseño y Construcción Sostenibles: Realidad ineludible*. Cd.de México: Departamento de Arquitectura - Universidad Iberoamericana.

de Schiller, S. y otros, 2007. Auditorias Bioclimáticas en vivienda de Interes Social. En: H. G. e. S. Camelo, ed. *Los Edificios en el Futuro, Estrategias Bioclimáticas y Sustentabilidad*. s.l.:INETI, pp. 151-172.

Del Castillo, A., 2016. El ciclo del agua en el AMG, "gravemente deteriorado". *Milenio*.

Department of Irrigation and Drainage, s.f. Flow Estimation and Routing. En: *Urban Stormwater Management Manual*. s.l.:Ministry of Water, Land and Natural Resources - Malasia, pp. 14.1-14.30.

DOF, 2001. *NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificiosno residenciales*, s.l.: Diario Oficial de la Federación - Gobierno de México.

DOF, 2011. *NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones.- Envolvente de edificios para uso habitacional.*, s.l.: Diario Oficial de la Federación - Gobierno de México.

- EFE, 2006. El año 2005 fue el más caluroso desde finales del siglo XIX. *El País*.
- Estecha Diseño, s.f. *Datos Técnicos de piedra volcánica*, s.l.: s.n.
- Fuentes-Freixanet, V., 2011. Arquitectura pasiva. En: *Diseño y Construcción Sostenibles: Realidad ineludible*. Cd.de México: Departamento de Arquitectura - Universidad Iberoamericana.
- Fuentes-Freixanet, V. A., 2002. *Metodología de diseño bioclimático. El análisis climático..* s.l.:Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco.
- Gallo-Ortiz, G. O., Espino-Marquez, L. I. & Olvera-Montes, A. E., 2005. *Diseño estructural de casas habitación*. México: McGraw Hill.
- Garzón, B., 2007. *Arquitectura Bioclimática*. Buenos Aires: Nobuko.
- Gobierno de Jalisco, 2019b. *Guadalajara*. s.l.:s.n.
- Gobierno de Jalisco, 2019. *Mapa general de Jalisco 2012 modificado por Decreto 26837, límite municipal*. [En línea] Available at: <https://datos.jalisco.gob.mx/dataset/mapa-general-de-jalisco-limite-municipal-2012>
- Gómez Domínguez, J., S.F.. *El ingeniero estructurista, los materiales y sus posibilidades en el diseño: un enfoque educativo*, s.l.: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Gómez-Amador, A., 2009. Atlas bioclimático de Jalisco. En: *Edificación Sustentable en Jalisco*. s.l.:Secretaría del Medio Ambiente para el Desarrollo Sustentable - Gob.de Jalisco, pp. 42-61.
- Gómez-Azpeitia, G., 2016. *Bioclimart 2016*, s.l.: s.n.
- Gómez-Azpetia, G., Bojórquez-Morales, G. & Ruiz-Torres, R. P., 2007. El confort térmico: dos enfoques encontrados. *Palapa*, II(I), pp. 45-57.
- Gomez-Tremari, R., 1988. *Fundamentos de diseño y construcción sismo resistente*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- González-Martín, D. A., 2016. *Caracterización mecánica de escoria volcánica compactada de la Cd.de México y sus alrededores*, s.l.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Google Earth Pro®, 2019. *Vistas satelitales*, s.l.: s.n.
- Guillén-Guillén, C. A., Santa Ana-Lozada, P., Muciño-Vélez, A. & Verduzco-Chirino, G. L., 2018. Análisis de las propiedades térmicas del Arundo Donax (carrizo) y Zea Mays (caña maíz) para su uso como material aislante de cubiertas. *Academia XXII*, 9(18), pp. 90-107.
- Gupta, N. & Tiwari, G. N., 2016. Review of passive heating/cooling systems of buildings. *Energy Science & Engineering*, pp. 305-333.
- Hernández, G. & Velásquez, S., 2010. *Vivienda y calidad de vida. Medición del hábitat social en el México Occidental*, s.l.: s.n.
- Hernández-Pérez, I. y otros, 2014. Thermal performance of a concrete cool roof under different climatic conditions of Mexico. *Energy Procedia*, Volumen 57, pp. 1753-1762.

- Higuera-Zimbrón, A. & Rubio-Toledo, M. A., 2011. *La vivienda de interés social: sostenibilidad, reglamentos internacionales y su relación en México*. [En línea] Available at: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40119956009> [Último acceso: abril 2018].
- Hill, L. A., 1978. *Fundamentos de diseño estructural: acero, concreto y madera*. Nueva York: Intext Educational Publishers.
- Huang, W. T., 1968. *Petrología*. s.l.:Union Tipografica Editorial Hispano Americana.
- IMEPLAN, 2018. *Instituto Metropolitano de Planeacion del Area Metropolitana de Guadalajara*. [En línea] Available at: <http://imeplan.mx/en/acerca>
- INEGI, 2019. *México en cifras*, s.l.: s.n.
- Infraestr.Sustentable, 2017. *Manejo de agua de lluvia en cuencas rurales-urbanas*, s.l.: Maestria en Edif. Sustentable-ITESO.
- Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, s.f. *Conductividad termica de materiales*, s.l.: s.n.
- Juárez-Badillo, E. & Rico-Rodriguez, A., 1974. *Mecanica de suelos I*. s.l.:Limusa.
- Lacomba, R., 1991. *Manual de arquitectura solar*. Cd.de México: Trillas.
- Landa, R., Magaña, V. & Neri, C., 2008. *Agua y Clima: elementos para la adapatación al cambio climático*. s.l.:SEMARNAP.
- León-Flores, G. A., López-Batiz, O. & Padilla-Romero, D. A., 2008. Estudios experimentales del comportamiento sismico de losas prefabricadas. *Sociedad Mexicana ed Ingenieria Estructural*.
- López de Asian-Alberich, M., 2003. *Estrategias Bioclimaticas en la Arquitectura*, Tuxtla Gutierrez: s.n.
- Low Carbon Architecture-GIZ-CONUEE, 2015. *Manual Técnico para la aplicación de la NOM-020-ENER-2011*, s.l.: SENER.
- Lucero-Álvarez, J., Alarcón-Herrera, T. & Martín-Domínguez, I. R., 2014. *The effect of solar reflectance, infrared emissivity, and thermal insulation of roofs on the annual thermal load of single-family households in México*, s.l.: International Solar Energy Society.
- Magill, J., 2011. *A history and definition of green roof technology with recomendations for future research*, llinois: Southern Illinois University.
- Marban, E. A., s.f. Sistemas Pasivos. En: *Apuntes de Arquitectura Bioclimatica*. s.l.:s.n.
- Martín-Domínguez, I. R., 2016. *Estudio comparativo de recubrimientos para techos y el efectos sobre el confort humano y uso de enrgía en México*. s.l.:Centro de Investigacion en Materiales Avanzados S.C..
- Martínez de Azagra, A., 2006. Método de los coeficientes de escorrentía. En: s.l.:s.n.
- Martinez, I., 2016. *Más de 200 casas afectadas por lluvia en Tlajomulco*, s.l.: s.n.

Martínez-Martínez, S. y otros, 2010. Análisis Térmico De Sistemas Constructivos Para Techos Elaborados A Base De Vigueta-Bovedilla. *MEMORIAS DEL XVI CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*.

Masters, F. & Gurley, K., 2007. *Performance of Embedded Gravel Roof Systems in Extreme Wind Loading*, s.l.: Universidad de Florida.

Materioteca ITESO, 2019. *Recinto Tezontle negro*. [En línea] Available at: <https://blogs.iteso.mx/materioteca/>

Merchand-Rojas, M. A., 2017. Estado, vivienda de interes social e inmobiliarias en México. *Cuadernos de vivienda y urbanismo*, 10(19), pp. 6-21.

Morillón-Gálvez, D., 2007. *Habilidad Térmica en la Vivienda*, s.l.: V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda.

Morillón-Gálvez, D., 2012. Bases para los criterios e indicadores de vivienda sustentable en México. En: *Arquitectura sostenible. Bases, soportes y casos demostrativos*. s.l.:Ediciones del la U.

Mozumder, A. & Kumar-Singh, A., 2012. Solar heat flux reduction through roof using porous insulation layer. *Energy Procedia*, Volumen 30, pp. 446-451.

Muralimanohar, A., Jayachandran, J. A. R. & Srinath, S., 2017. Analysis of Heat Reduction through Roof Using Innovative Insulation Technique. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 3(3), pp. 1185-1191.

NAPRESA, 2018. *Catalogo de productos 2018*, s.l.: s.n.

NTC, 2004. Normas Tecnicas Complementarias - RCDF. En: *Reglamento de Construcción del Distrito Federal*. s.l.:Gobierno CDMX.

NTC, 2017. Normas Tecnicas Complementarias - RCDF. En: *Reglamento de Construcción del Distrito Federal*. s.l.:Gobierno CDMX.

Núñez-Miranda, B., 2007. Grandes Desarrollos habitacionales en la Zona Conurbana de Guadalajara. *Espiral, estudios sobre Estado y Sociedad*, XIII(39), pp. 111-137.

Olivera-Bustamante, F., 1999. *Estructuración de vías terrestres*. s.l.:CECSA.

ONU, 2015. *Transformar Nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, Nueva York: ONU.

Orozco, A. O., 2015. *Expansión Urbana. Área Metropolitana de Guadalajara. Análisis y prospectiva: 1970 – 2045*, s.l.: s.n.

Orozco-Carrillo, G., 2016. *Adaptación de la vivienda existente a los estándares de la sustentabilidad por medios de autogestión. Mejorías en el desempeño energético e hídrico (vivienda en Villa Belenes, Zapopan, 2014-2016)*. s.l.:ITESO.

Orozco-Ochoa, A., 2015. *Expansión Urbana. Área Metropolitana de Guadalajara. Análisis y prospectiva: 1970 – 2045*, s.l.: IMEPLAN.

Ortiz-Arnau, H., 2016. *Bioconstrucción y arquitectura bioclimática para la ejecución de vivienda ecológica unifamiliar*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.

Otazo-Sánchez, E. M., Ortiz-Polo, A., Richards-Urbe, R. M. & Ponce-Lira, B., s.f. Materiales funcionales para la remoción de iones metálicos contaminantes del agua. En: *Avances en Impacto, Tecnología y Toxicología Ambiental*. s.l.:Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, pp. 85-113.

Pearlmutter, D. & Rosenfeld, S., 2008. Performance analysis of a simple roof cooling system with irrigated soil and two shading alternatives. *Energy and Buildings*, Volumen 40, pp. 855-864.

Pina-Fernández, A., 2013. Vivienda Social en la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Geocalli*, 14(27).

Pisello, A. L., Pignatta, G., Castaldo, V. L. & Cotana, F., 2014. Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roofing and Cool Pavement. *Sustainability*, Volumen 6, pp. 4706-4722.

Prado-León, L. R. & Zambrano-Prado, P. L., 2015. La percepción del usuario en viviendas de interés social de la Zona Metropolitana de Guadalajara: factores ambientales. En: *Construyendo el Paradigma Arquitectónico*. s.l.:s.n., pp. 41-54.

Rámirez-Sánchez, H. U., Meulenert-PeñDa, Á. R. & Gómez-Reyna, J. A., 2012. Actualización del Atlas Bioclimático del Estado de Jalisco. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Issue 82, pp. 66-92.

RCGDL, 1997. Reglamento de Construcción del Municipio de Guadalajara. En: *De la Seguridad Estructural de las Construcciones*. s.l.:s.n.

Ribas-Urbe, R., 2019. Acatlán de Juárez, décimo integrante del AMG. *El Informador*.

Rico-Rodríguez, A., 2005. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. s.l.:Limusa.

Rodríguez Morales, L., 2011. La práctica constructiva en la Ciudad de México. El caso del tezontle, siglos XVIII-XIX. *Boletín de Monumentos Históricos*, Volumen 22, pp. 157-180.

Rodríguez-Chumillas, I., 2006. Vivienda social latinoamericana: la clonación del paisaje de exclusión. *ACE Architecture, City and Environment*, 1(2).

Rodríguez-Díaz, E. y otros, 2013. *Reúso del tezontle: efecto en sus características físicas y en la producción de tomate.*, s.l.: Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias - UdeG.

Rodríguez-Morales, L., 2011. La práctica constructiva en la Ciudad de México. El caso del tezontle, siglos XVIII-XIX. *Boletín de Monumentos Históricos*, Volumen 22, pp. 157-180.

Rodríguez-Viqueira, M., 2001. *Introducción a la Arquitectura Bioclimática*. Cd.de México: Limusa.

Rojas-Tavera, K. M., 2018. *Confort Ambiental Basado en los Principios de una Arquitectura Bioclimática en un Centro Educativo Especial*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.

Sánchez-Corral, J., 2012. *La vivienda social en México: pasado, presente y futuro?*. [En línea]

Available at: <http://conurbamx.com/home/wp-content/uploads/2015/05/libro-vivienda-social.pdf>

[Último acceso: abril 2018].

- Sanchez-Montañés, B., 2014. Arquitectura Bioclimática: conceptos y técnicas. *EcoHabitar*.
- SCT, 2017. *Inventario de Bancos de Materiales 2017 Jalisco*, s.l.: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- SEMARNAT-CNA, 2016. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. En: *Drenaje Pluvial Urbano*. s.l.:s.n.
- SENER-CONUEE, s.f. *Guía rápida para el cálculo de la NOM-020-ENER-2011*, s.l.: SENER.
- Shimbo, L., 2011. *Vivienda social de mercado. Confluencia entre Estado, empresas y capital financiero*. s.l.:Infonavit - Redalyc.
- SIAPA, 2008. *Ficha Técnica Informativa sobre el Programa de Manejo Integral de Aguas Pluviales (PROMIAP)*, s.l.: s.n.
- SIAPA, 2014. Hidrología Superficial Urbana. En: *Lineamientos Técnicos para Factibilidades*. s.l.:s.n.
- SIAPA, 2016. *Programa de Manejo Integral de Aguas Pluviales (PROMIAP) - Version Pública*, s.l.: s.n.
- SIAPA, 2017. *Programa de Manejo Integral de Agua Pluvial (PROMIAP) y Plan Integral de Manejo de Inundaciones (PIMI)*. s.l.:Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado.
- Silva-Treviño, C. J., Esparza-López, C. J. & Ojeda-Sanchez, J. A., 2018. *Análisis experimental de medios porosos en cubiertas de concreto para un clima cálido sub-húmedo*. Guadalajara: s.n.
- Simancas-Yovane, K. C., 2003. *Reacondicionamiento bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo*. [En línea] Available at: [http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6113/04PARTE2\\_3.pdf](http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6113/04PARTE2_3.pdf) [Último acceso: 2018 abril].
- Suárez-Montes, E., 1993. *Análisis de vigas isostáticas*. s.l.:UdeG.
- Suarez-Plascencia, C., 2015. *Departamento de Geografía y Ordenación Territorial - UdeG [Entrevista] 2015*.
- Tamari, S. y otros, 2004. Particle Density of Volcanic Scoria Determined by Water Pycnometry. *Geotechnical Testing Journal*, XX(X).
- Tena, A., Liga, A., Pérez, A. & González, F., 2017. Propuesta de mejora de mezclas para producir piezas de mampostería de concreto empleando materiales comúnmente disponibles en el Valle de México. *ALCONPAT*, 7(1), pp. 36-56.
- Tena-Colunga, A., Chinchilla-Portillo, K. L. & Juárez-Luna, G., 2013. Evaluación de la flexibilidad elástica de sistemas de piso utilizados en edificios urbanos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, Issue 89, pp. 135-166.
- Tetreault, D. V., 2008. Escuelas de pensamiento ecológico en las Ciencias Sociales. *Estudios Sociales*, 16(32).

Trejo-Tellez, L. I. y otros, 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Esp.(5), pp. 863-876.

Tudela, F., 1982. *Bioclima y Confort Térmico*. s.l.:Consejo Economico y Social - Naciones Unidas.

UdeG, 2019. *Vivir en Guadalajara*. [En línea] Available at: [http://www.cgci.udg.mx/es/estudiantes/externos/llegada\\_mx/vivir](http://www.cgci.udg.mx/es/estudiantes/externos/llegada_mx/vivir) [Último acceso: mayo 2019].

United States General Services Administration, 2011. *The beneficts and challenges of Green Roofs on Public and Comercial Buildings*, USA: GSA.

Universidad de Coruña, s.f. *Hidrología Superficial y subterránea*, s.l.: s.n.

Valdivia-Órnelas, L. & Suárez-Plascencia, C., s.f. Riesgos Naturales en el Area Metropolitana de Guadalajra.

Valdivia-Soto, C.-A., Gonzalez-Barceló, O. & González-Martínez, S., s.f. *Filtración combinada en lechos de tezontle para el tratamiento de agaus residuales*, s.l.: Universidad Nacional Autonoma de México.

Vásquez, J., 2019. *Fuertes inundaciones tras tormenta en Tlajomulco*, s.l.: s.n.

Weber, S., 2006. Comparison of in-situ measured ground heat fluxes within a heteorogeneous urban ballast layer. *Theoretical and Applied Climatology*, Volumen 83, pp. 169-179.

Weiss, A., 2018. *La Quinta Fachada una Nueva Perspectiva sobre la Ciudad*. [En línea] Available at: <https://lacasadejuana.cl/la-quinta-fachada-una-nueva-perspectiva-la-ciudad/>

Wikipedia, 2019. *Tezontle*. [En línea] Available at: <https://es.wikipedia.org/wiki/Tezontle>