

*DIVISIÓN DE CIENCIAS Y ARTES PARA EL DISEÑO*  
*Doctorado en Diseño Bioclimático*

***APORTACIÓN DE LAS CUBIERTAS VERDES AL DESEMPEÑO TÉRMICO  
DE LAS ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS, MEDIANTE EL USO DE  
DIFERENTES ARREGLOS CONSTRUCTIVOS DE VEGETACIÓN NATIVA  
DE MÉXICO***

**Edwin Israel Tovar Jiménez**

*Tesis (ICR) para optar por el Grado de Doctor en Diseño Bioclimático*

Miembros del jurado

Dr. Aníbal Figueroa Castrejón

*Director de Tesis*

Dr. José Manuel Ochoa de la Torre

*Asesor PRODEP de Tesis*

Dra. Irene Marincic Lovriha

Dra. Blanca Estela Chávez Sandoval

Dr. Víctor Armando Fuentes Freixanet

*Ciudad de México*

*febrero de 2018*

*Dedico el presente trabajo a mi hija Sabina Tolpan  
y a mi familia, que son el soporte de mi vida*

Agradezco el apoyo incondicional de mis padres Alberto y Julieta, de mi tía Judith, de mis hermanos Óscar y Mario.

Igualmente agradezco el apoyo de los profesores Aníbal Figueroa, Gloria Castorena y Víctor Fuentes, que han sido mis profesores, compañeros del laboratorio de Arquitectura Bioclimática y sobre todo amigos.

Especialmente agradezco el apoyo de los Doctores Manuel Domingo Gordon Sánchez, y Carlos Trejo López, quienes asesoraron y soportaron teóricamente el presente trabajo con su sabiduría y generosidad académica.

Agradezco al programa PRODEP, que acompañó el presente esfuerzo con su apoyo. Asimismo al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología, por su apoyo durante uno de los años de desarrollo del presente trabajo.

Agradezco al sistema público de educación de mi país por darme la oportunidad de formarme con un alto nivel de especialidad en ésta, mi casa de estudios.

Mi más profundo agradecimiento a mi Institución Universidad Autónoma Metropolitana, por formarme profesionalmente y laboralmente como académico en el Departamento de Medio Ambiente de la División de CYAD.



## Índice general

CAPÍTULO .....	9
MARCO TEÓRICO .....	9
ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	10
ANTECEDENTES .....	14
Naturación en las normas y certificaciones nacionales .....	16
CAPÍTULO 1.2 .....	18
TRANSFERENCIA TÉRMICA EN NORMAS Y CERTIFICACIONES ACTUALES.....	18
Norma oficial mexicana nom-008-ener-2001 .....	19
CAPÍTULO 1.31 .....	26
VEGETACIÓN ADECUADA PARA LA ZMCM Y CRITERIOS DE USO .....	26
Vegetación adecuada para la CdMx y criterios de uso .....	27
Zona Metropolitana de la Ciudad de México .....	27
Metabolismo Ácido Crasuláceo CAM .....	36
CAPÍTULO 22 .....	40
ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO .....	40
Modelo FASST en Energy Plus .....	41
Ámbito general del modelo FASST .....	44
CAPÍTULO 3 .....	55
MODELO MATEMÁTICO,.....	55
CALOR LATENTE Y RESISTENCIA ESTOMÁTICA.....	55
Modelo FASST y vegetación .....	56
CAPÍTULO 4 .....	64
AJUSTE DEL MODELO FASST.....	64
A LA VEGETACIÓN NATIVA DE LA ZMCM .....	64
Modelo FASST y vegetación nativa en la ZMCM .....	65
AJUSTES AL MODELO FASST .....	70
CAPÍTULO 5 .....	78
PRUEBAS DE CAMPO E INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA MEDICIÓN TÉRMICA.....	78
Calibración de simulador de radiación para obtención de valores térmicos del modelo matemático .....	79
Intercambio de calor por efecto de la luz .....	83

Adecuación del simulador solar.....	87
Determinación del vapor de agua transpirado .....	93
Monitoreo de tasa de transpiración .....	93
Determinación de Índice de área foliar IAF.....	96
Determinación de absortancia de vegetación y suelo.....	100
CAPÍTULO 6 .....	104
COMPROBACIÓN DEL MODELO PROPUESTO .....	104
CORRIDA C1 .....	106
CORRIDA C2.....	109
Conclusiones .....	113
Recomendaciones .....	116
Bibliografía consultada .....	117

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación continúa el estudio de la transferencia térmica en la capa vegetal de una cubierta verde adecuada para la CdMx, con vegetación nativa, abordado previamente por el autor de la presente ICR.

Al continuarse los trabajos referidos, con la vegetación del género *Hylocereus*, se ha obtenido también como parte de esta investigación una Patente Número Mx/a/2012/000723, Título No. 324384, expedida el 30 de septiembre de 2014, y denominada: “*SISTEMA LIGERO DE NATURACIÓN PARA CUBIERTAS Y/O MUROS EN BASE A MEMBRANAS Y VEGETACIÓN DEL GÉNERO HYLOCEREUS*” (SE ANEXA COPIA DE TÍTULO DE PATENTE).

Aunado al estudio de la vegetación del género *Hylocereus*, se han investigado las propiedades térmicas detalladas de otras plantas adecuadas para ser utilizada en arreglos constructivos aligerados, para la CdMx.

En la presente investigación se determinan cuáles deben ser las adecuaciones al modelo de transferencia térmica en techos verdes cuando éstos se construyen con vegetación de metabolismo CAM, que es la más adecuada para techos verdes en la ZMCM.

## ESTRUCTURA METODOLÓGICA

### ***Planteamiento del problema***

Las azoteas verdes son sistemas capaces de mejorar térmicamente las edificaciones (palomo, 1997), con el beneficio adicional de incorporar al medio ambiente componentes orgánicos y servicios ambientales que no aportan los materiales industrializados (Yeang, 2001), por lo que es pertinente aportar datos para su uso.

Actualmente las empresas instaladoras de techos verdes e instituciones oficiales como la SEDEMA CDMX; CONAVI, SENER, CONUEE, INFONAVIT y la SFH a nivel federal, reconocen que los techos verdes benefician térmicamente las edificaciones. Sin embargo **no ofrecen ningún sistema de cálculo de transferencia térmica aplicable a estimar su impacto sobre las edificaciones aplicable a nuestro contexto nacional.**

En el ámbito internacional existen ya varios modelos que se han propuesto para determinar el flujo térmico a través de un techo verde. Entre éstos, el modelo más completo integrado hasta hoy es el llamado FASST -fast all season soil strength- (Frankeinstain y Koenig, 2004), que junto con los modelos BATS y SiB, son el motor de cálculo de Energy Plus. Aun cuando este complejo modelo matemático predice el comportamiento de un techo verde, **su estructura no ha sido revisada para determinar la transferencia térmica en techos verdes con la vegetación nativa de México, y particularmente con las plantas crasuláceas, que son las más adecuadas para la naturación en la Ciudad de México.**

### ***Hipótesis***

Las plantas más adecuadas para naturar en la Ciudad de México presentan un metabolismo ácido crasuláceo, mismo que las hace intercambiar calor en cantidades y períodos horarios diferentes que resto de la vegetación; por lo que **el modelo de cálculo de flujo térmico**

**usado por el modelo FASST podrá arrojar resultados más certeros para nuestro contexto urbano en la CdMx, mediante el ajuste de sus parámetros de cálculo al comportamiento fisiológico de este tipo de vegetación.**

### ***Objetivo general***

Adecuar un modelo matemático predictivo de transferencia térmica en la capa vegetal de techos verdes adecuado a las características de la vegetación nativa y eficiente para la CdMx; modelo basado en el modelo matemático más complejo actualmente utilizado para estos fines.

### ***Objetivos particulares***

- Identificar los modelos matemáticos más robustos para el cálculo de transferencia térmica en envolventes verdes
- Establecer cuál es la vegetación más adecuada para naturalizar en la CdMx.
- Identificar las variables tomadas en cuenta en el modelo matemático
- Identificar las variables fisiológicas que toma en cuenta el modelo matemático y que difieren del comportamiento fisiológico de la vegetación más adecuada para techos verdes en la CdMx.
- Adecuar el modelo matemático para describir el flujo térmico en la capa vegetal, en función del metabolismo de la vegetación más adecuada para techos verdes en la CdMx.
- Generar el conocimiento respecto a los valores termofísicos de la vegetación más adecuada para techos verdes en la CdMx.

### ***Pertinencia de la investigación***

Es necesario generar modelos de cálculo matemático predictivo del comportamiento térmico de los techos verdes, que integren las variables hoy usadas a la vegetación más adecuada para la CdMx. Actualmente no se cuenta con un modelo certero de cálculo térmico que haya revisado los procedimientos para nuestra vegetación. Igualmente las normas y certificaciones aplicables en nuestro país no cuentan con un modelo matemático predictivo que se tome como base de la cuantificación térmica energética en las edificaciones, por lo que es necesario establecer estas herramientas, y así poder integrar la vegetación a los edificios con más certidumbre de predecir su aportación térmica al confort del usuario y al desempeño energético de las edificaciones.

# CAPÍTULO 1



## MARCO TEÓRICO

## ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Las cubiertas verdes son sistemas que aportan ahorros efectivos en los consumos energéticos, que a su vez, reducen de manera indirecta emisiones de gases de efecto invernadero (Tovar, 2011), que son una de las causas del Cambio Climático<sup>1</sup> que nos aqueja a nivel global (Houghton, 2001).

Existen básicamente dos tipos de procedimientos para establecer de los efectos térmicos de los techos verdes sobre las edificaciones: el primero es mediante monitoreo de techos verdes sobre edificios existentes. El segundo es mediante el cálculo predictivo del comportamiento de un techo verde que será construido sobre un edificio que aún existe sólo en proyecto, y esto se hace a través de modelos matemáticos.

### ***Estimaciones mediante monitoreo***

Una de las primeras publicaciones que dieron datos cuantitativos de las aportaciones térmicas de las cubiertas verdes es la de Minke (2005). En esta publicación Minke presenta los resultados obtenidos por Kolb y Schwarz (1999), en Kesel, Alemania. Estudio experimental basado en monitoreo de los diferentes estratos de un sistema de naturación extensivo en un edificio construido en la ciudad de Kesel, Alemania.

Define la importancia del monitoreo bajo condiciones del medio ambiente, al mismo tiempo que se monitorea el comportamiento del espacio interior bajo condiciones reguladas. Aporta un procedimiento adecuado para obtener resultados válidos de un espacio construido que ha sido naturado.

En períodos de calor extremo con temperaturas de 35°C al exterior, la temperatura registrada debajo del techo verde nunca excedió los 25°C. En las gráficas abajo presentadas, se muestra una medición de seis días de verano, realizadas a una profundidad de 10 cm. dentro del sustrato del techo verde. Se hicieron las mediciones de la temperatura exterior y debajo de la azotea verde, demostrando que la vegetación redujo la temperatura hasta 29°C.

En la gráfica 1.1, correspondiente a la medición de verano vemos que, mientras que la temperatura medida a 10 cm de la tierra sin vegetación presentó una oscilación de 42°C en el periodo de medición, que fue entre los 7°C (mínima) y 48°C (máxima), con la misma base, más una cubierta de vegetación se tuvo un diferencial de 4K, con oscilación de los 15°C a los 19°C. En este mismo intervalo las temperaturas sobre la vegetación oscilaron entre los 10°C y los 30°C.

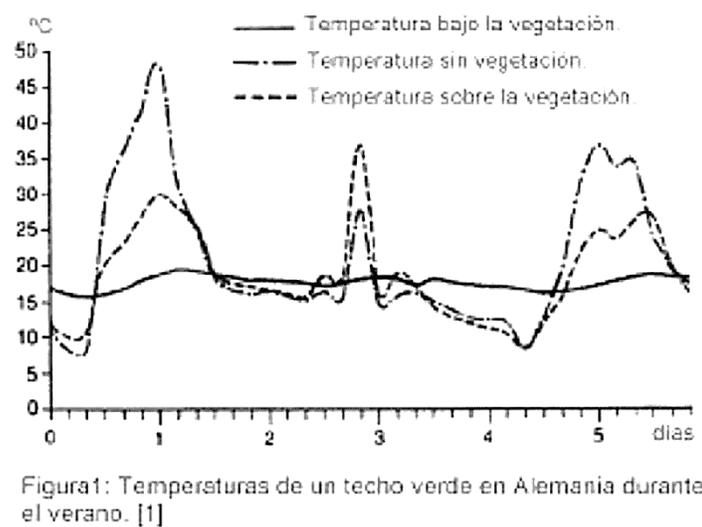
En la gráfica 1.2, se muestra la medición hecha de un techo verde de 16 cm de espesor con cubierta vegetal de pasto silvestre, durante septiembre y octubre en que tiene lugar el otoño.

---

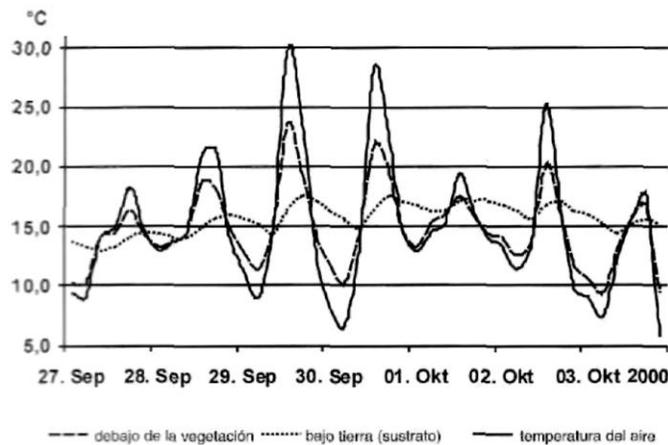
<sup>1</sup> Usamos el término definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 1992, para referirse al cambio por causas humanas: Por "cambio climático" se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables.

En esta medición se obtuvo que cuando en el exterior la temperatura era de 30°C, debajo de la cubierta verde se midieron 17.5°C.

Kolb y Schwartz (1999) identifican que el efecto refrigerante de las cubiertas verdes es producido principalmente por la evaporación (evapotranspiración), la sombra y la reflexión de las plantas. Asimismo por el consumo de la energía recibida a través de la fotosíntesis y la inercia térmica del agua contenida en su tejido.



Gráfica 1.1 Temperaturas de un techo verde en Alemania durante el verano<sup>2</sup>  
Fuente: (Kolb y Schwartz, 1999).



<sup>2</sup> Las gráficas 1, 2, 3 y 4 presentadas, no tienen la calidad gráfica deseable, pero se presentan tal como se obtuvieron, para respetar la autenticidad de la fuente.

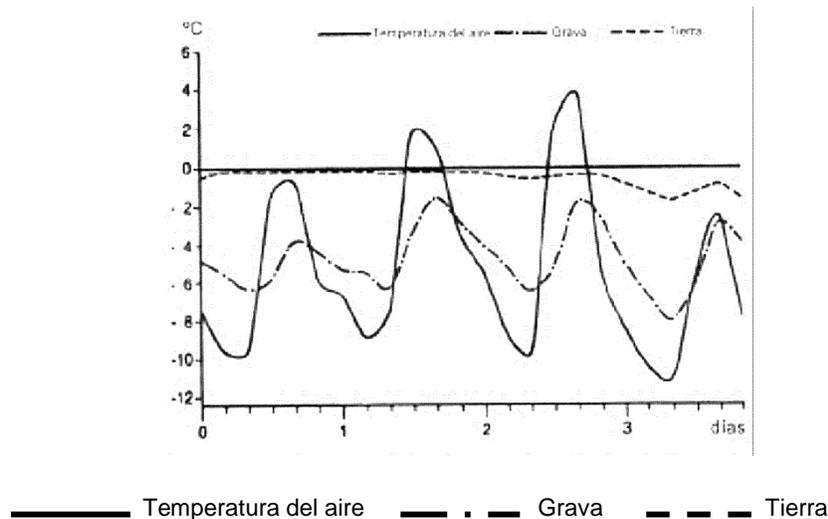
### Conservación del calor en invierno

Si la vegetación es una capa densa “como una piel de oso”, aumenta el efecto de aislamiento (Minke, 2005).

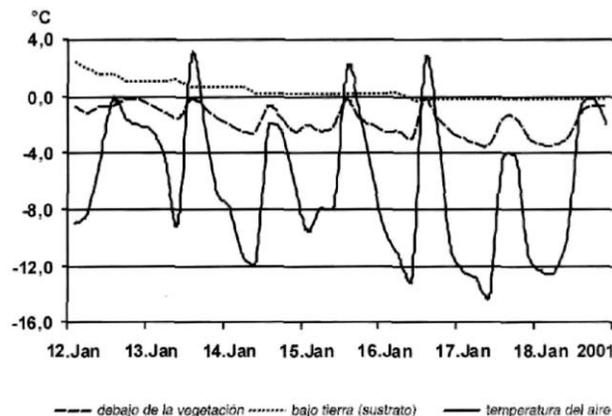
Durante el invierno Kolb y Schwartz (1999), llevaron a cabo la medición comparativa del comportamiento de un techo verde y otro de grava, medidas a una profundidad de 5 cm. Durante un período de cuatro días.

La gráfica 1.3 nos muestra que mientras la temperatura exterior estaba en  $-11^{\circ}\text{C}$ , la temperatura de la tierra era de  $-2^{\circ}\text{C}$  y la de la grava era de aproximadamente  $-7^{\circ}\text{C}$ , lo que nos da un diferencial de temperatura de 9 K, tan sólo con la capa de tierra a 5 cm.

En la gráfica 1.4, vemos el comportamiento del mismo techo de 16 cm. de espesor, monitoreado durante una semana del mes de enero, que es el más frío para la ciudad de Stuttgart, Alemania. Se registró que cuando la temperatura del aire alcanzaba los  $-14^{\circ}\text{C}$ , la temperatura bajo los 16 cm. de tierra era de  $0^{\circ}\text{C}$ . Al mismo tiempo, la temperatura sobre la tierra -a pie del pasto- era de aproximadamente  $-3^{\circ}\text{C}$ . lo que deja ver que la mayor reducción del diferencial de temperatura fue aportado por la vegetación (Gráficas 1.3 y 1.4).



Gráfica 1.3. Temperaturas a una profundidad de 5 cm. en invierno.  
Fuente: (Kolb y Schwartz 1999).



Gráfica 1.4. Temperaturas de un techo verde de 16cm. durante el invierno.  
Fuente: (Kolb y Schwartz 1999).

Doug y Banting (2005) desarrollaron un estudio de las aportaciones ambientales y costos de dos sistemas de naturación para la ciudad de Toronto, Canadá.

Con el apoyo de tres Fundaciones<sup>1</sup> y los Gobiernos Federal y el de la ciudad de Toronto se construyeron dos techos verdes demostrativos:

- a. El primero de 300 m<sup>2</sup> en el Toronto's City Hall building
- b. El segundo, de 465 m<sup>2</sup> en el Eastview Neighbourhood Community Centre.

Niachou y Santamouris (2001) en Grecia, realizan el estudio de cubierta extensiva para Atenas. Se monitoreó una cubierta instalada. Se realizó una simulación computacional y se realizó un modelo numérico para expresar su comportamiento.

Se realizaron mediciones con cubierta vegetal y sin cubierta vegetal, de lo que se obtuvo la diferencia de comportamiento. Se cuantificaron los impactos sobre la transferencia térmica mediante la aplicación de la cubierta verde.

Wong (2005), para el caso de Singapur realizó un estudio comparativo de techos verdes monitoreados con 4 tipos diferentes de vegetación y bajo las mismas condiciones climáticas. Determinó que los sustratos oscuros tienden a absorber más radiación durante el día. Asimismo identificó que el sistema aporta mayores beneficios durante el día que durante la noche. Concluye que evitar la acumulación de humedad sobre el follaje, incrementa su capacidad de transpiración y así también de enfriamiento.

### ***Modelos cuantitativos predictivos***

Palomo del Barrio (1989), en Francia desarrolló un modelo matemático para explicar:

- a. El comportamiento térmico y dinámico de un albedo simplificado en las cubiertas verdes reales.
- b. Potencial de enfriamiento en verano

Concluye que: un sistema bien diseñado iguala el desempeño de un aislante eficiente y como dispositivo de sombreado; El espesor del sustrato, su densidad aparente y humedad determinan la difusividad; la transmisión de onda corta es el único proceso importante del follaje sobre la cubierta verde.

Rabah Djedjig, Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, Emmanuel Bozonnet (2012), en Francia, desarrollaron el estudio "Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs". Estudio matemático de transferencia de calor y masa térmica a través de los componentes de un techo verde basado en las variaciones del balance del agua en el proceso de evapotranspiración.

Validación del modelo matemático mediante la medición y comparación de un techo verde instalado y medido bajo condiciones ambiente. Definió la importancia del efecto evapotranspirativo en el enfriamiento pasivo.

### ***Modelo FASST***

El modelo fast all-season soil strength model (FASST) ha sido desarrollado por la Army Corps of Engineers. A su vez este modelo se basa en modelos previos, usados

intensamente para estudios de modelado atmosférico, como el modelo Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) y el modelo Simple Biosphere model (SiB).

El estado dinámico unidimensional del modelo de suelo FASST (Fast All-Season Soil Strength) es un estado del modelo de suelo desarrollado por Frankenstein y Koenig (2004) como parte del programa de investigación del ejército norteamericano llamado *Army's Battlespace Terrain Reasoning and Awareness* (BTRA). En su forma original, los únicos parámetros de la vegetación incorporados en FASST fueron el albedo superficial y la emisividad. Recientemente, se agregó un algoritmo de vegetación multicapa de dos niveles. Éstos Pueden ser implementados por separado o juntos. Ambos alteran los presupuestos de energía y humedad de la superficie del suelo. En este informe se discutirán las ecuaciones del balance energético utilizadas para resolver la baja vegetación, el dosel y las temperaturas del suelo. Los efectos de la interceptación de precipitación y la modificación de la humedad del suelo atribuible a la acumulación de raíces también se incorporan (Frankenstein y Koenig, 2004).

## **ANTECEDENTES**

### ***Techos verdes y transferencia térmica***

El estudio de transferencia térmica en techos verdes tiene el interés de contribuir a cuatro ejes fundamentales:

- Mejorar el desempeño térmico de los edificios
- Reducir el consumo energético en edificios
- Aumentar la biodiversidad en el entorno urbano
- Conservar e incrementar la vegetación nativa de nuestro país.

Nuestro país requiere de este tipo de medidas porque, no obstante contar con gran variedad de climas, más del 70% corresponde a climas cálidos (Huelsz et al, 2011). El Balance Nacional de Energía (SENER, 2006), indica que del total de la energía consumida en México, casi el 20% corresponde a edificios del sector residencial o comercial. A esto, Figueroa et al (2011) actualizan el padrón de vivienda con base en datos de Infonavit cuyo reporte para 2010 es de 465,000 viviendas de las cuales 65,705 (14.1%) se han programado para el Distrito Federal y el Estado de México, lo que aumentará progresivamente la magnitud de los consumos energéticos.

De esa energía, el 89% se produjo a partir de la quema de hidrocarburos, emitiendo en esta misma medida gases de efecto invernadero y otros contaminantes a la atmósfera.

En la mayor parte de nuestro país la demanda más alta de energía se da por acondicionamiento mecánico de las edificaciones para enfriamiento (Morillón-Gálvez et al, 2004), que podemos revertir mediante el uso de vegetación aplicada a las envolventes.

Al mejorar térmicamente las envolventes arquitectónicas con vegetación nativa de nuestro país contribuimos a utilizar la riqueza natural en flora con que contamos, y con esto

preservamos el banco genético o germoplasma<sup>3</sup> que posee (Yeang, 2001). Comenta Fathy (1975) que sólo mediante su uso, los bienes se integran a la vida cotidiana y económica de una comunidad y de esta manera se vuelven un elemento evidentemente necesario para el ser humano, evitando el riesgo de extinguirse.

El mayor intercambio térmico (pérdidas y ganancias) de un edificio con el medio exterior, es a través de su envolvente arquitectónica, y de éstos elementos, la cubierta es el más inestable. De acuerdo al texto introductorio de la NOM-008-ENER-2001: *“En México, el mayor consumo de energía en las edificaciones es por concepto de acondicionamiento de aire...La ganancia por radiación solar es la fuente más importante a controlar, lo cual se logra con un diseño adecuado de la envolvente”* (SENER, 2001). De la misma manera Santamouris y Asimakopoulos (1996) determinan que el uso más importante de los sistemas de acondicionamiento pasivo debe darse en la envolvente misma de la edificación, donde es determinante la orientación, la proporción de área de ventanas y las propiedades termofísicas de los materiales en los diferentes elementos de la envolvente.

El análisis de transferencia térmica en techos verdes es complejo.

Si tomamos en cuenta que la transferencia térmica en elementos inertes se debe realizar con métodos de análisis dinámicos, que incluyan la difusión de calor en el tiempo, se establece un grado de dificultad más alto respecto a los análisis con métodos estacionales. Ahora que, si tomamos en cuenta que en la transferencia térmica a través de elementos vivos como son las plantas, intervienen mecanismos derivados de sus propio procesos fisiológico, se agrega mayor complejidad al cálculo.

Huelsz et al (2009) señalan la importancia de rebasar el análisis con métodos que solamente consideran los coeficientes de Transmisión de calor “U” y se debe emplear un método basado en un análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo. Usando un análisis de este tipo, menciona que se ha demostrado que cuando las oscilaciones de la temperatura externa y el valor de la radiación solar son importantes, una envolvente de la edificación construida con materiales con una combinación adecuada de los valores de conductividad, densidad y calor específico, aún con un bajo valor de la resistencia térmica (valor R), tiene un comportamiento térmico más adecuado, y por ello menor consumo de energía para climatización, que una envolvente con un alto valor R.

México es considerado uno de los doce países megadiversos del mundo por poseer una diversidad biológica extraordinaria, que representa alrededor del 10% de las plantas y animales del planeta. Existen en nuestro país por lo menos 23,702 especies de plantas conocidas, y los especialistas estiman que podrían ser 36,000 especies (CONABIO, 2010). De éstas, se estima que aproximadamente el 23% son endémicas, es decir que sólo habitan en nuestro país. Tenemos entonces un banco de materiales posibles de ser incorporados a las envolventes verdes tan vasto como pocos países lo tienen.

---

<sup>3</sup> El germoplasma es el conjunto de genes que se transmite por la reproducción a la descendencia por medio de gametos o células reproductoras.

## Situación ambiental de la Ciudad de México

La ciudad de México se encuentra en una crisis ambiental que se inició en el siglo XVI, y vive un punto de inflexión a partir de la década de los 80 (Tovar, 2011). En ésta etapa de la crisis ambiental nos situamos actualmente, con la posibilidad de intervenir a favor de la calidad ambiental, para lo que la regeneración vegetal de la ciudad es una de las herramientas imprescindibles. Esta tendencia es similar a nivel global, donde en este momento las ciudades sólo ocupan el 2% del territorio del planeta, pero son responsables del 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero (ONU, 2011). Asimismo la crisis por la falta y contaminación del agua es un problema generalizado.

Los temas más álgidos de la crisis ambiental a los que se enfrenta nuestra ciudad son:

- **Pérdida de especies vegetales.** Se pierden con esto sus servicios ambientales. Son el sustento de la fauna, que igualmente se ha ido extinguiendo en la Cuenca del Valle de México; La calidad del aire y del espacio urbano se deteriora igualmente, lo que repercute negativamente en la salud del ser humano en los aspectos fisiológico y psicológico.
- **Contaminación del aire.** De acuerdo con el Inventario de Gases de Efecto Invernadero (GDF, 2008) la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) aporta el 6.7% de las emisiones nacionales de GEI (43.4 millones de toneladas eq. CO<sub>2</sub> para el año 2006). Solamente la delegación Azcapotzalco emite entre 40 y 100 mil ton/año CO<sub>2</sub>.
- **Crisis del agua.** Ésta es sin duda la más aguda de todas, ya que conlleva sobreexplotación de las aguas subterráneas para cubrir el 67% del abasto de la Ciudad (CNA, 2008). Esta sobreextracción provoca la grave y progresiva subsidencia en la Cuenca (Táutica, 2000), que a su vez provoca las inundaciones cada vez más riesgosas para la población. Por otro lado, en la actualidad, las áreas verdes de nuestra ciudad se riegan con agua potable (Tovar, 2011), por lo que reverdecer la ciudad es aparentemente contradictorio con la crisis del agua, a lo que se propondrán alternativas viables en la presente investigación. El abasto de agua implica su bombeo y demanda el gasto energético que se deriva de él.

Los sistemas de naturación que se comercializan actualmente en nuestro país son importados. Por esto, se tiene poca información acerca de su aportación al confort térmico de los espacios arquitectónicos. Los datos que ofrecen los proveedores de estos sistemas son frases y cifras ya hechas que a su vez han conocido de estudios hechos en el extranjero (Tovar, 2011).

## Naturación en las normas y certificaciones nacionales

En la normatividad actualmente disponible para promover el mejor desempeño térmico de la envolvente de las edificaciones, se considera como el principal objetivo limitar la ganancia térmica en las edificaciones (SENER, 2001), para lo que se propone como estrategia

prioritaria la incorporación de aislantes en la cubierta. La NOM-008-ENER-2001<sup>4</sup> y LA NOM-020-ENER-2011<sup>5</sup>, tienen como referencia técnica la NOM-018-ENER-1997 Aislantes térmicos para edificaciones, características y métodos de prueba (SENER, 2011).

La norma NADF-013-RNAT-2008 en sus especificaciones generales menciona que los sistemas de naturación “*También tienen funciones de aislamiento térmico y acústico, protección de la edificación contra los efectos de los rayos solares y de la intemperie así como reducir los gastos energéticos producidos por el uso de equipos de calefacción y refrigeración al interior de los inmuebles*” (GODF, 2008), sin embargo no presenta criterios o métodos para establecer su impacto térmico y energético sobre los edificios. El Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde -SISEVIVE ECO CASA- en sus criterios de evaluación reconoce que las aportaciones de la cubierta verde en la envolvente del edificio son positivas. Asimismo la NMX-AA-164-SCFI-2013 (DOF, 2013) en su apartado 5.2.5. motiva el uso de techos verdes. Ninguna de las normas y certificaciones mencionadas aportan sistemas de evaluación térmica y energética de un techo verde.

En el ámbito internacional existen herramientas de evaluación térmica de techos verdes y su impacto sobre los edificios, que se encuentran incluso liberadas para uso libre en internet.

Actualmente las normas mexicanas vigentes nom-008-ener-2001, nom-020-ener-2011 y nom-018-ener-1997, que promueven la eficiencia energética en las edificaciones, tienen como principal objetivo limitar la ganancia térmica al interior de las edificaciones recurriendo al uso de aislantes en la envolvente arquitectónica, y sin tomar en cuenta la inercia térmica de los sistemas constructivos (Huelsz et al, 2011). Asimismo, para estas normas, los techos verdes son ignorados como estrategias aplicables y cuantificables debido a que: 1). No existen datos termo-físicos de sistemas de techos verdes diseñados en nuestro país para nuestras condiciones climáticas y nuestra vegetación nativa; y 2). No se ha generado un procedimiento o método numérico predictivo de diseño que permita incorporar un techo verde de manera controlada al proyecto, previendo la transferencia térmica a través de él, su aportación al confort del edificio y cuantificación de los ahorros energéticos promovidos.

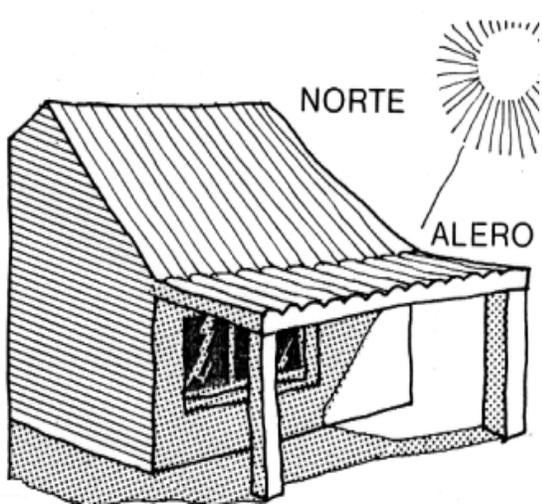
Por esto, es necesario contar con tecnologías de azoteas verdes acordes con las condiciones de nuestro medio, nuestro clima, y con las especies vegetales nativas de cada región; de los cuales se genere el conocimiento de sus valores termo-físicos y los beneficios que aportan al ahorro energético, al mejoramiento de la calidad del aire del espacio urbano, así como a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que son la principal causa del cambio climático (IPCC, 2007). De la misma manera, se debe contar con un modelo de análisis numérico que permita incorporar estos sistemas al proyecto arquitectónico, con predicción cuantificable de su impacto.

---

<sup>4</sup> Eficiencia energética en edificaciones.- Envolvente de edificios no residenciales.

<sup>5</sup> Eficiencia energética en edificaciones.- Envolvente de edificios para uso habitacional.

## CAPÍTULO 1.2



## TRANSFERENCIA TÉRMICA EN NORMAS Y CERTIFICACIONES ACTUALES

## Norma oficial mexicana nom-008-ener-2001

En la elaboración de esta norma participaron 21 instituciones, entre instancias gubernamentales, privadas y la UNAM. Es preciso mencionar que esta norma es la base de la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011 Eficiencia Energética en Edificaciones - Envoltente de Edificios para uso Habitacional. Se explicará con más detalle debido a que las normas y certificaciones mexicanas la toman como base.

Esta norma titulada “Eficiencia Energética en Edificaciones, Envoltente de Edificios no Residenciales”, se propone como objetivo lograr la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía a través de un mejor diseño de la envoltente del edificio, lo que hace poner la atención sobre dos temas fundamentales. En su texto introductorio se identifica al aire acondicionado como el principal motivo del gasto energético en las edificaciones, centrando su principal atención en reducir su uso en el norte y las zonas costeras del país. Menciona que la principal fuente de ganancia de calor en las edificaciones es la radiación solar.

### Clima y radiación

Se toma en cuenta la ubicación de los proyectos en diferentes regiones del país mediante la tabla del Apéndice “A” NORMATIVO (pp. 72) que en el eje de las ordenadas enlista 60 ciudades de los 32 estados del país (Figura 1.2.1).

ESTADO	Ciudad	CONDUCCIÓN												RADIACIÓN					Barrera para vapor					
		OPACA						TRANSPARENTE						TRANSPARENTE										
		Coeficiente de transferencia de calor, K (W / m² K)		Temperatura equivalente promedio te ( °C )												Factor de ganancia solar promedio FG ( W / m² )								
				Superficie inferior		Techo		Muro masivo				Muro ligero									Tragaluz y domo		Ventanas	
		Techo	Muro			N	E	S	O	N	E	S	O			N	E	S		O				
SONORA	Guaymas	0,354	0,521	32	47	33	36	34	35	38	42	40	41	27	28	30	30	30	322	70	159	131	164	Si
	Hermosillo	0,352	0,467	33	48	34	38	35	36	39	43	41	43	28	29	30	31	31	322	70	159	131	164	
	Cd. Obregón	0,357	0,634	31	45	31	35	33	33	36	40	38	40	26	27	29	29	29	322	70	159	131	164	
	Navojua	0,348	0,392	34	50	35	40	37	38	40	45	43	45	29	30	32	32	32	322	70	159	131	164	
	Nogales	0,391	1,557	28	40	27	30	28	28	32	36	35	35	23	25	26	26	26	322	70	159	131	164	
TABASCO	Villahermosa	0,354	0,540	32	46	32	36	34	34	38	42	40	41	27	28	29	30	30	272	102	140	114	134	
	Comalcalco	0,356	0,617	31	45	31	35	33	33	37	41	39	40	26	28	29	29	29	272	102	140	114	134	
TAMAULIPAS	Cd. Victoria	0,357	0,631	31	45	31	35	33	33	36	40	38	40	26	27	29	29	29	272	102	140	114	134	

Figura 1.2.1. Fragmento muestra de la Tabla del apéndice “A” Normativo, pp 72 de la Norma

La radiación en los elementos opacos se toma en cuenta de manera indirecta mediante valores de una temperatura equivalente. Aun cuando la norma no lo cita literalmente, la temperatura equivalente es utilizada como una temperatura Sol-aire ( $T_{sol-aire}$ ) que es la temperatura del aire exterior que, en ausencia de intercambios de calor por radiación, podría generar el mismo flujo de calor a través del cerramiento que el que existiría con la actual combinación de radiación solar incidente (Monrroy, 1995). La ganancia de calor por radiación solar de una componente del edificio con una determinada orientación, queda entonces definida por la ecuación:

$$\phi_{rci} = \sum_{j=1}^n [ K_j x A_{ij} x (t_{ei} - t) ] \quad (1)$$

Donde:

$F_{rci}$  es la ganancia de calor por conducción a través de la envolvente del edificio de referencia, en W;  
 $j$  son las diferentes partes de la componente de la envolvente del edificio de referencia.  
 $k_j$  es el coeficiente global de transferencia de calor de la envolvente del edificio de referencia  $j$ . Para las partes opacas se denomina según la tabla 1 del Apéndice A, y para las partes transparentes de los techos es 5.952 W/m<sup>2</sup> K y para las partes transparentes de las paredes es de 5.319 en W/m<sup>2</sup> K  
 $A_{ij}$  es el área de cada parte de la envolvente  $j$ , con orientación  $i$ , en m<sup>2</sup> lo  
 $t_{ei}$  es el valor de la temperatura equivalente promedio, para la orientación  $i$ , determinado según la tabla 1 del Apéndice A en °C  
 $t$  es el valor de la temperatura interior del edificio, que se considera igual a 25°C

Nota: este valor de temperatura interior de 25°C, es sólo una referencia para el cálculo de la ganancia de calor (presupuesto energético)

### **Confort**

La manera en que se estima una temperatura objetivo, o temperatura de confort es mediante el establecimiento de una temperatura interior única para todos los casos calculados, en cualquier parte del país, lo que deja fuera de consideración los rangos locales de adaptación a las temperaturas estacionales (modelos adaptativos de confort). Se maneja de esta manera una temperatura de 25°C (ver ecuación 1), como una temperatura neutra, comúnmente usada como objetivo de diseño de climatización mecánica. Se pierde de esta manera la posibilidad de adaptar bioclimáticamente los edificios.

### **Transferencia de calor**

La evaluación de desempeño energético de las edificaciones se hace mediante la comparación de un edificio de referencia con el edificio con las condiciones propuestas por el proyectista. El edificio de referencia es el mismo que se evalúa, pero ajustado a los requerimiento óptimos según la norma.

La estimación del flujo de calor del exterior a la superficie interior de un edificio se determina mediante un método de Régimen Estacionario, donde los sistemas constructivos utilizados aportan un coeficiente global de transferencia de calor “K”, en función de una sumatoria del aislamiento térmico aportado por cada una de las capas que conforman el sistema constructivo:

$$K = \frac{1}{M} \quad (2)$$

Donde:

$K$  es el coeficiente global de transferencia de calor de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie, en W/m<sup>2</sup> K  
 $M$  es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie en W/m<sup>2</sup> K

El aislamiento térmico total de una porción “M” de capas homogéneas y no homogéneas se obtiene con la siguiente ecuación:

$$M = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{\ell_1}{\lambda_1} + \frac{\ell_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\ell_n}{\lambda_n} \quad (3)$$

Donde:

- M es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie, en m<sup>2</sup> K/W  
 h<sub>i</sub> es la conductancia superficial interior, en W/m<sup>2</sup> K. Su valor es 8.1 para superficies verticales, 9.4 para superficies horizontales con flujo de calor hacia arriba (del piso hacia el aire interior o del aire interior hacia el techo), y 6.6 para superficies horizontales con flujo de calor hacia abajo (del techo al aire interior o del aire interior hacia al piso).  
 h<sub>e</sub> es la conductancia superficial exterior, y es igual a 13 W/m<sup>2</sup> K.  
 n es el número de capas que forman la porción de la envolvente del edificio  
 l es el espesor de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente del edificio  
 λ es el coeficiente de conductividad térmica de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente del edificio en W/mK

La norma tiene asimismo un procedimiento en el que va sumando las cargas conductivas y por radiación. Compara el edificio de referencia con el proyectado, y de la comparación final de las cargas de ambos determina el porcentaje de ahorro energético obtenido, mismo que aparecerá en la etiqueta que se entrega a los edificios que acreditan la norma. Otra desventaja de esta norma es que se consideren los materiales únicamente como aislantes mediante análisis de régimen estacional, dejando fuera el efecto de inercia térmica. Al ser limitada la temperatura de confort a 25°C se pierden enormes ahorros energéticos, ya que en zonas templadas se tiene un rango de al menos 5K y oscilaciones de temperaturas de 13.6K en verano (Tovar-Jiménez et al, 2016); así como en zonas cálidas se tienen rangos estacionales de confort de hasta 10.7 K (Ruiz, 2007).

### **Norma mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013**

Esta norma titulada “Edificación Sustentable - Criterios y Requerimientos Ambientales Mínimos” es de carácter voluntario, impulsada por la Secretaría de Economía hace confluir a una gran cantidad de normas en materia energética y ambiental. Para su aplicación y verificación remite a la siguiente cantidad de normas por Institución: 9 de CONAGUA; 17 de la SENER; 4 de SCFI; 2 de SEMARNAT; 1 de SSA; 2 de la STPS; 3 del IMNC; y 1 de ONNCE. De acuerdo con su texto introductorio, aplica a las edificaciones y sus obras exteriores. Ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre uno o varios predios, en arrendamiento o propias. Se aplica a una o varias de sus fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición, incluyendo proyectos de remodelación, renovación o reacondicionamiento del edificio. La Secretaría de Economía manifiesta promover su implementación mediante el otorgamiento de beneficios fiscales.

### **Desempeño energético de los edificios**

En materia energética, remite a las tres normas de sistemas energéticos de SENER: NOM-008-ENER-2001; NOM-020-ENER-2011; y NOM-007-ENER-1995. Así como a 14 normas energéticas de productos. Por lo que el sistema de cálculo de transferencia de calor y eficiencia energética es el mismo anteriormente explicado para la NOM-008-ENER-2001. Menciona además que el edificio debe ser al menos 10% más eficiente que el edificio de referencia.

En su apartado 5.2.2.14 (pp 39/153) menciona que Todo edificio debe mantener consumos de energía iguales o inferiores a los valores establecidos en la siguiente tabla (Tabla 1.2.2),

considerando para ello la clasificación de usos señalada en la tabla referida así como la regionalización del Apéndice Informativo 6, conforme a las definiciones establecidas y a los criterios que se añaden a continuación: Por kWh/m<sup>2</sup>\*año se entiende el consumo total de energía del edificio facturado en un año, medido en (kWh\*año) y dividido entre la superficie total edificada medida en metros cuadrados. Cada uno de los valores indicados en la tabla está referido a las áreas del edificio destinadas a cada uno de los usos indicados, así como a cada una de las cuatro zonas climáticas indicadas en el Apéndice Informativo 6. En el caso de utilizar la clasificación de zonas climáticas de la NMX-C-460-ONNCCE (véase 3 Referencias), se deberá establecer su comparabilidad.

Uso del edificio	Zona bioclimática			
	Cálido seco	Cálido Húmedo	Cálido Subhúmedo	Templado
Hoteles	170	200	190	120
Oficinas	120	200	105	70
Escuelas	60	70	55	40
Hospitales	260	350	240	220
Restaurantes	325	350	225	240
Centros comerciales	190	265	250	155
Tiendas de autoservicio	200	290	280	170
Otros	190	265	225	155

**NOTA 1:** Tomado de: Estrategias regionales y sectoriales para lograr un desarrollo sustentable y de baja intensidad de carbono en México. CMM

Figura 1.2.2. Tabla 12 de consumo energético por uso de edificio

En el apartado 5.2.2.17 (pp 41/153) se establece que “La edificación puede estar diseñada con criterios bioclimáticos que favorezcan la iluminación natural dentro del edificio, logrando una buena distribución y organización de los espacios”. Sin embargo no se presenta ningún método de gestión, precálculo o evaluación de la efectividad del diseño.

Como herramienta de gestión del proyecto energéticamente eficiente, esta NMX indica el uso del modelo de cálculo de la Certificación Sisevive Ecocasa: “En el caso de vivienda se deberá obtener una calificación “C” o superior en la evaluación del Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde (Sisevive). El sistema de evaluación Sisevive-Ecocasa se comentará más adelante.

## **DUIS**

La Sociedad Hipotecaria Federal (SHF) El sistema de certificación para Desarrollos Urbanos Integrales Sostenibles (DUIS). Para la aplicación de esta certificación se parte de una Metodología de Evaluación la cual está dividida en dos apartados, la Visión y Evaluación Técnica. En base al apartado de Visión se considera la planeación y estrategias para el Ahorro Energético a nivel macro. En la segunda parte en el apartado de Evaluación técnica se considera la evaluación a nivel Urbano, Barrial y Arquitectónico. a nivel Arquitectónico considera la envolvente térmica del edificio como estrategia de ahorro energético desde una perspectiva bioclimática, así como equipos ahorradores de energía. Para este trabajo nos enfocaremos en la evaluación de la envolvente arquitectónica del edificio.

De manera explícita en su cuerpo metodológico, DUIS menciona algunos aspectos generales que deben cumplir las edificaciones, si bien son tomadas de CONAVI, a la que remite para su verificación:

Para la evaluación técnica de la eficiencia energética de la envolvente arquitectónica de las edificaciones, DUIS remite al sistema Sisevive-Ecocasa promovido por CONAVI.

### **SISEVIVE-ECOCASA**

Este programa de certificación tiene como base política la confianza que INFONAVIT, CONAVI y en general el Gobierno Federal mexicano han otorgado a la Agencia Alemana de Cooperación Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) para generar, implementar y evaluar el desempeño energético del parque habitacional de nuestro territorio, con el apoyo y soporte financiero de la Embajada Británica. La base teórica es una adecuación de los programas NAMA que GIZ ha desarrollado anteriormente, entre ellos el propuesto para nuestro país.

Particularmente para la evaluación térmica - egergética de las edificaciones, se ha encargado al Instituto alemán Passive House Institute, el desarrollo del paquete de evaluación energética llamado DEEVi, mismo que se basa en el PHPP (Passive House Planning Package).

### **DEEVI**

La hoja de cálculo DEEVi (Diseño Energéticamente Eficiente de la Vivienda) se otorga a Desarrolladores de vivienda que como primer requisito deben contar con un registro en la plataforma del Registro Único de Vivienda (RUV), posteriormente reciben una capacitación para el uso de la hoja de cálculo, y finalmente una revisión por un certificador.

La evaluación de la envolvente térmica se hace mediante la comparación de la vivienda propuesta, con otra vivienda diseñada de manera adecuadamente llamada Línea Base. La calificación final se determina en función del diseño arquitectónico, sistemas constructivos, materiales y tecnologías incorporados a la nueva vivienda.

La metodología de cálculo del balance energético usada por la DEEVi ha sido ajustada a través de mediciones históricas de viviendas en Europa. DEEVi se basa en normas internacionales y mexicanas. El cálculo del valor  $k$  se hace basado en la NOM-020-ENER-2011, por lo que la transferencia térmica se basa a su vez en un modelo de Régimen Estacionario, con todas las desventajas que comentamos líneas arriba para la NOM-008-ENER-2001 y la NOM-020- ENER-2011.

De acuerdo con INFONAVIT (2013), el modelo de cálculo DEEVi, considera las siguientes condiciones de la vivienda en el cálculo: Ubiación y orientación; clima basado en la información de INEGI; Coeficiente  $U$  de tranferencia térmica; Valores de infiltración y aportaciones convectivas; estimación de uso de equipos de refrigeración y calefacción.

De manera complementaria la corrida de cálculo entrega una evaluación de la vivienda respecto de la NOM-020-ENER-2011, que en este caso es de carácter informativo y no implica su acreditación.

## **LEED**

Se analiza LEED como sistema de certificación por ser el sistema que más se ha implementado en nuestro territorio y su presencia sigue en aumento. Cuenta en este momento con 212 proyectos registrados y 45 certificados (Revitaliza Consultores, 2012). El sistema LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental, por sus siglas en inglés) es un programa de certificación voluntario desarrollado por el USGB, el Consejo de Construcción Ecológica de los Estados Unidos de América y ofrece una validación y reconocimiento por parte de un tercero sobre las características sustentables de un proyecto. El interés de los desarrolladores por certificar con LEED sus edificaciones, radica en ser una estrategia de mercadeo que genera una gran ventaja para colocar los productos inmobiliarios, e incluso darles un sobreprecio que los clientes aceptan y pagan.

El desempeño energético de la construcción para LEED es un tema prioritario que otorga hasta 35 puntos en su apartado de Energía y Atmósfera, de éstos, se pueden obtener hasta 19 punto mediante la demostración de un adecuado funcionamiento energético del edificio mediante simulaciones computacionales. Se debe resaltar que la certificación LEED más básica se puede obtener con 40 puntos; Plata 50, Oro 60, Platino 80 pts. Lo que nos dice que sólo con un buen proyecto energético se está cerca de la certificación.

La eficiencia de la envolvente arquitectónica en LEED se calcula mediante software que tiene como base la modelación tridimensional de los edificios, mismos que se sitúan en una ubicación geográfica, solar y climática. Los archivos de clima son complejos y robustos, simulando las condiciones ante las cuales se calcula el comportamiento térmico energético del edificio.

La opción de análisis energético que más otorga puntos es Opción 1: Whole Building Energy Simulation (1 –19 puntos) basado en ASHRAE 90.1-2007 Appendix G.

La simulación de desempeño energético del edificio es válida mediante el uso del siguiente software:

Equest, Energy-10, DOE-2, Energy PRO, TRACE 700, EnergyPlus, Design Builder y TRNSYS. Algunos de estos gratuitos y otros de costos muy elevados.

Los principales parámetros que se califican en el desempeño energético son: Consumos energéticos totales; Niveles de temperatura interior; Confort térmico; Flujos energéticos; Zonas de mayor consumo; Dimensionado del sistema HVAC; Emisiones contaminantes.

## **BREEAM**

Este Sistema toma el nombre de sus siglas Building Research Establishment Environmental Assessment Methodologies, es propiedad de BRE Global Ltd (British Research Establishment). Es el método de evaluación líder mundial en sustentabilidad para la planeación de proyectos urbanos, infraestructura y edificaciones. A nivel mundial hay más de 535,400 desarrollos con certificaciones BREEAM, y casi 2.218 millones de edificios registrados para la evaluación desde que fue lanzado por primera vez en 1990". su presencia domina sobre todo el continente europeo. Este sistema puede ser aplicado a Plan Maestro, Construcción nueva, Edificios en Uso y Rehabilitación y Acondicionamiento. Las

posibles calificaciones que BREEAM otorga a los edificios asigna una estrella en orden ascendente a los siguientes niveles de desempeño: Aceptable, Pasable, Bueno, Muy bueno, Excelente, Sobresaliente. Los impactos térmicos, energéticos y al confort para edificaciones nuevas se evalúan en las categorías 2 y 3 de 10 evaluadas.

La evaluación energética del edificio se desarrolla en la Norma técnica ENE-01, cuyo objetivo general es: Reconocer y promover edificios que minimicen su consumo de energía operativa a través del buen diseño. Se toman en cuenta tres aspectos principales: a) La demanda de energía del edificio en operación; b) Consumo de energía primaria del edificio, y c) El total de las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes.

Un adecuado desempeño energético puede aportar hasta 15 créditos, que son un 26.5% del total de la certificación. La eficiencia energética del edificio se calcula a partir de la información de diseño mediante el cálculo de la energía aprobada (modelada) en software y el número de créditos alcanzados se basan en la eficiencia energética prevista del edificio evaluado en comparación con el rendimiento de un edificio nacional equivalente diseñado para satisfacer, pero no mejorar, la eficiencia energética actual del edificio estándar.

BREEAM calcula el desempeño energético de las edificaciones utilizando su propio sistema de checklist, donde el aplicante llena los datos generales, y el certificador de BREEAM asigna un asesor experto que llevará a cabo la evaluación dinámica de desempeño térmico, energético de la edificación. El software utilizado es el mismo usado en LEED. Algunos de los más usados son Design Builder, DOE, y Energy Plus (Figura 1.2.3).

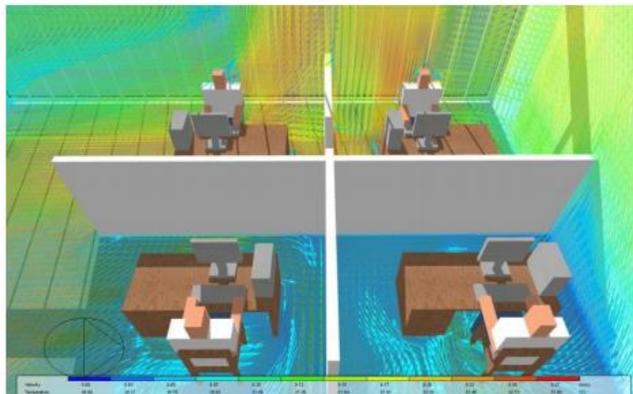


Figura 1.2.3. Escena de la evaluación computacional convectiva de un edificio en Design Builder

## CAPÍTULO 1.3



### **VEGETACIÓN ADECUADA PARA LA ZMCM Y CRITERIOS DE USO**

## **Vegetación adecuada para la CdMx y criterios de uso**

La incorporación de un techo verde a la envolvente de un edificio puede ser motivada por múltiples causas, casi todas ellas mencionadas de manera automática por las empresas instaladoras que los ofrecen. La que nos ocupa en el presente artículo es mejorar el desempeño térmico de los edificios. Para conseguir este objetivo es necesario que la vegetación incorporada sea seleccionada e instalada en la cubierta de manera adecuada.

En el presente apartado se propone como un parámetro fundamental de la selección de especies vegetales, su capacidad de sobrevivencia en las condiciones climáticas de la Zona Metropolitana de La Ciudad de México (ZMCM), con un mantenimiento mínimo, que implica también un bajo consumo de agua.

Se ha demostrado que la inadecuada selección de especies conduce inevitablemente al fracaso de una reforestación (Lamprecht, 1990) y que a nivel de reservas naturales como de vegetación urbana, un porcentaje del 70 a 90 por ciento de los problemas de las plantas son resultado de condiciones ambientales adversas a la planta, o una inapropiada selección de especies (ISA, 1999). En los estudios de campo sobre techos verdes, Navas-Gómez<sup>6</sup> ha demostrado que el éxito en eficiencia y mejor desempeño ambiental de la vegetación depende de una buena selección de especies (Carmona, 2001).

Sin embargo, para el caso de la ZMCM no se ha establecido de manera clara la relación entre plantas, clima, sobrevivencia y eficiencia, cuando son integradas a un techo naturado con el objetivo de mejorar el desempeño térmico del edificio.

El sobrepeso que genera un techo verde, con el gasto que implica reforzar la estructura de los edificios, es uno de los factores que desmotivan su uso en la ZMCM (Tovar, 2011), por lo que los sistemas que se consideran más adecuados son los extensivos y semi intensivos.

Los criterios aquí establecidos consideran la vegetación también en términos de jardinería sustentable (AGMASC, 2011), para la ZMCM cuyas zonas urbanas tienen una cultura ecológica cero de acuerdo con Yeang (2009). Se dedicará un apartado a establecer las ventajas que ofrece la vegetación nativa para ser considerada prioritaria, lo que no sucede actualmente en la construcción de cubiertas verdes comerciales.

## **Zona Metropolitana de la Ciudad de México**

Dentro de la Cuenca del Valle de México se ubica la ZMCM formada por 16 delegaciones del Distrito Federal y 18 municipios del Estado de México (Fig. 1.3.1), con una superficie de 3,540 km<sup>2</sup> lo que representa el 37% de la Cuenca. Se ubica sobre los 19°20' de Latitud Norte y 99°05' de Longitud Oeste. Tiene una elevación promedio de 2,240 MASL y una superficie de 9,560 km<sup>2</sup> (CAM, 2010).

---

<sup>6</sup> Profesor Researcher, Universidad Autónoma Chapingo, was introduces first green roofs in México City in 1984.

Ezcurra (1990) enlista los 10 principales tipos de vegetación distribuida en la Cuenca, que podemos resumir en: 5 tipos de bosque, matorral de encinos chaparros, pastizales, xerophytic scrub forest, halophytic vegetation and acuatic vegetation. Es importante mencionarlo como antecedente del tipo de vegetación que es compatible con las condiciones de esta región.

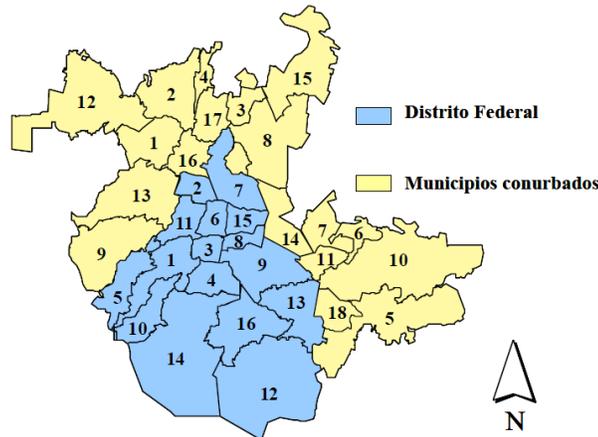


Fig. 1.3.1. Zona Metropolitana de la Ciudad de México. En color azul se notan las delegaciones del Distrito Federal y en amarillo, los municipios del Estado de México.

La ZMCM tiene una mala calidad ambiental. Para efectos de este artículo sólo mencionaremos que el aspecto más crítico en la actualidad es la lack of water. Tovar (2011) con datos de Montero (2009) establece que las áreas verdes privadas en ésta zona se riegan con agua potable, por lo que se evita incrementar las áreas verdes para que no quiten el agua al consumo humano. Por esto naturalizar con plantas de bajo consumo de agua hace viable la naturación de azoteas.

### **Clima**

La MAMC al ser una región extensa, presenta distintas características climáticas. En su mayor parte el clima de acuerdo con la adaptación que hace García (1986) de la clasificación de Köppen es Cb(w1)w(i)g. Presenta un bioclima templado de acuerdo con la matriz de bioclimas de Fuentes (2008), con días extremos ya que presenta oscilación media diaria de 13.8°C. El verano es fresco, lluvioso y prolongado, y el invierno es seco. Tiene una oscilación anual de tipo isotermal que va de 5°C a 7°C. La temperatura máxima media es de 23.4°C, sin embargo se registran temperaturas de hasta 33°C. La temperatura mínima media es de 9.6°C, registrándose ocasionalmente temperaturas por debajo de 0°C. Los datos normalizados muestran que la radiación máxima total anual en promedio es de 665.8 W/m<sup>2</sup>, presentando 797 W/m<sup>2</sup> en el mes con más radiación que es marzo (SMN, 1997), aunque en mediciones diarias se pueden registrar valores por encima de los 1000 W/m<sup>2</sup>.

### **Ámbito de aplicación**

Ante todo, se debe mencionar que la única norma disponible específicamente para un techo verde en México es la NADF-013-RNAT-2007(SMADF, 2008) para El Distrito Federal y se enfoca en las características constructivas de tres tipos principales de sistemas.

En esta norma se reconoce que los sistemas extensivos deben tener vegetación que no requiera mantenimiento, que resista alta radiación, largos periodos de sequía, temperaturas extremas, con altura menor a 50 cm. La norma presenta ya algunos criterios generales que coinciden de manera general con los planteados en el presente artículo como:

- Desarrollo tapizante rápido y duradero
- Resistentes a la acción del viento
- Resistentes a largos periodos de sequía
- Resistentes a las temperaturas extremas de la zona
- Resistentes a los niveles de contaminación de la zona urbana
- Resistentes a radiaciones solares elevadas

Finalmente se incluye una orientación con fines orientativos, no restrictivos about las plantas adecuadas en techos extensivos:

- Césped y pastos silvestres
- Plantas C-4
- Plantas CAM “Crasulacean Acid Metabolism”.
- Plantas Cespitosas
- Plantas Herbáceas Perennifolias
- Plantas Subarbustivas
- Plantas Suculentas
- Plantas Vivaces

De manera inicial se observa que los criterios marcados por la norma para seleccionar vegetación son adecuados, pero muy vague.

El presente artículo complementa y profundiza en criterios para definir la vegetación adecuada para conseguir un techo verde térmicamente eficiente, que además responda a necesidades de vegetación sustentable, ambientalmente funcional.

### ***Plantas nativas***

Las plantas nativas, son aquellas que crecen de manera espontánea en una región, sin que medie el cuidado del hombre (Planchuelo, 2013). Al estar adaptadas a las condiciones climáticas de su medio natural, sobreviven sin cuidados especiales y demandan poco mantenimiento. Este tipo de vegetación ha evolucionado lentamente en sus áreas de distribución natural, al estar acondicionadas a su medio natural, también sus mecanismos físicos o bioquímicos de defensa se encuentran estables, pero no es así ante la presencia de vegetación introducida o exótica (Aguirre, et. al. 2008).

Las exóticas, son plantas que se encuentran fuera de su área de distribución natural, introducidas accidental o intencionalmente por el ser humano (Semarnat, 2002). Perjudican los servicios ambientales y por consiguiente el bienestar humano, además de ser responsables de un elevadísimo número de extinciones de especies (Primack, 2002). Introducir las en zonas urbanas con cultura ecológica cero, promueve la creación de

ecosistemas disfuncionales. Muchas de las especies exóticas son consideradas invasoras que representan un riesgo ambiental (Semarnat, 2002).

Las especies naturalizadas. Son especies que fueron introducidas en un largo período de tiempo. El proceso de naturalización de una especie requiere que hayan sido superadas algunas barreras bióticas y abióticas para que la especie sobreviva y se reproduzca regularmente en el nuevo ambiente (Semarnat, 2002).

Debido a las consideraciones mencionadas, es prioritario que los techos verdes en la ZMCM (y el país) sean conformados con vegetación preferentemente nativa y como una segunda opción optar por las naturalizadas. Las especies exóticas se evitarán, y se incorporarán únicamente si prestan un servicio altamente eficiente y se tienen evidencias de que no provoquen daños ambientales. Este principio obedece a cumplir dos objetivos: primero, que el techos verdes sea estable y provea el mejor servicio al menor costo; el segundo objetivo es lograr que la vegetación preste un buen servicio ambiental, ya que la mala selección de especies podría causar impactos ambientales negativos.

### ***Resistencia al clima***

Si bien hemos mencionado que las plantas nativas son las que mejor se adaptan a las condiciones naturales del medio, una planta es considerada nativa al ser de México, por lo que se deben revisar las condiciones precisas del lugar del proyecto contra las condiciones precisas bajo las cuales la planta que incorporamos se puede establecer adecuadamente.

Para la ZMCM Carmona (2001) probó el nivel de supervivencia de 68 especies diferentes de plantas integradas a un techo naturalizado, de las cuales sólo 33 consiguieron sobrevivir. El estudio se desarrolló de septiembre de 1999 a marzo del 2000 en Chapingo, ubicado en la latitud 19° 29', longitud 98° 53', a una altitud de 2250 msnm. La selección de especies para esta prueba se hizo tomando como base la propuesta de Krupka y Pymont (1992) de vegetación eficiente en techos para climas templado de Europa, y de estas especies se hizo una revisión de especies nativas o naturalizadas presentes en el Valle de México. Se conoce de esta manera que 31 de los géneros citados por Krupka están representados con al menos 97 especies nativas y 30 naturalizadas en México.

Las especies con mayor supervivencia fueron plantas suculentas, seguidas por las cactáceas. La Tabla 1.3.1, muestra la lista de plantas, con su categoría de supervivencia e indicación de su ciclo de vida. El listado de las especies muertas se ha omitido.

Tabla 1.3.1. Especies sobrevivientes a las condiciones de intemperie, con indicación de su estatus migratorio y ciclo de vida.

**Sobrevivencia:** A = vivas; L = latentes; R = revividas (anuales con brotes viables)

**Estatus migratorio:** n = nativa; e = exótica a = naturalizada

**Ciclo de vida:** p = perene; a = anual; a/p = anual y perene.

Species	Sobrevivencia	Estatus migratorio	Ciclo de vida
<i>Opuntia lasiacantha</i> <b>Pfeiffer.</b>	A	n	p
<i>Opuntia streptacantha</i> <b>Lem.</b>	A	n	p
<i>Tradescantia navicularis</i> <b>Ortg.</b>	A	n	p
<i>Tradescantia sillamontana</i> <b>Matuda.</b>	A	n	p
<i>Echeveria amoena</i> <b>De Smet.</b>	A	n	p
<i>Echeveria nodulosa</i> ( <b>Baker</b> ) <b>Otto.</b>	A	n	p
<i>Sedun adolphii</i> <b>Hamet.</b>	A	n	p
<i>Sedun liebmannianum</i> <b>Hemsl.</b>	A	n	p
<i>Sedun moranense</i> <b>H.B.K.</b>	A	n	p
<i>Sedun rubrotinctum</i> <b>R.T.</b> <b>Clausen</b>	A	n	p
<i>Villadia ramosissima</i> <b>Rose</b>	A	n	p
<i>Crasula elegans</i> <b>Schonl &amp;</b> <b>Baker f.</b>	A	e	p
<i>Crasula socialis</i> <b>Schonl.</b>	A	e	p
<i>Kalanchoe daigremontiana</i> <b>Hamet &amp; Perrier</b>	A	e	p
<i>Kalanchoe tomentosa</i> <b>Baker</b>	A	e	p
<i>Kalanchoe tubiflora</i> ( <b>Harv.</b> ) <b>Hamet</b>	A	e	p
<i>Tillandsia recurvata</i> <b>L. (L.)</b>	L	a	p
<i>Sisyrinchium tenuifolium</i> <b>Humb. Et Bonp. Ex Willd.</b>	L	n	p
<i>Aphodelus fistulosus</i> <b>L.</b>	L	e	a/p
<i>Cheilanthes bonariensis</i> <b>(Willd.) Proctor</b>	L	n	p
<i>Cheilanthes sinuata</i> <b>Lagasca</b> ex Schwartz	L	n	p
<i>Poyipodium thyssanolepis</i> <b>A.</b> <b>Braun ex Klotzsch.</b>	L	n	p

<i>Selaginella pallescens</i> (Presl.) <b>Spring.</b>	L	e	p
<i>Selaginella peruviana</i> (Milde) <b>Hieron.</b>	L	n	p
<i>Euphorbia indivisa</i> (Engelm.) <b>Tidestr.</b>	R	n	a/p
<i>Euphorbia hirta</i> var. <i>procumbens</i> (DC.) N.E.	R	n	a/p
<i>Portulaca oleracea</i> L.	R	e	a/p
<i>Portulaca pilosa</i> L.	R	e	a/p
<i>Gomphrena decumbens</i> Jacq.	R	n	a/p
<i>Bidens pilosa</i> L.	R	n	a
<i>Florestina pedataq</i> (Cav.) <b>Cass.</b>	R	n	a
<i>Zinia peruviana</i> Jacq.	R	n	a

Fuente: Carmona (2001).

Las plantas suculentas fueron las más aptas para sobrevivir en un techo verde de acuerdo con Carmona (2001). Son igualmente el elemento principal del modelo básico de vegetación óptima para techos extensivos y semi intensivos propuesto por Krupka y Pymont (1992) en el caso de Alemania. Domínguez (1995), comprobó igualmente en Chapingo, MAMC, que la especie *Sedum moranense* H. B. K. sobrevivió a altas condiciones de estrés hídrico y térmico.

### **Características de las plantas y su integración**

Gernot Minke (2005) menciona que si la vegetación es una capa densa “como una piel de oso”, aumenta el efecto de aislamiento térmico.

Son numerosos los estudios que han evaluado el efecto positivo de incorporar capas vegetales densas a los techos naturados. Tabares-Velasco (2012) reconoce la aportación de la cobertura vegetal comparada con una capa de substrato desnuda; Palomo del Barrio (1998) define con detalle cómo los valores de LAI y características geométricas del follaje determinan la transferencia de calor relacionada con la radiación de onda corta y onda larga.

Mencionaremos con más detalle tres estudios para hacer notar que independientemente del clima para el que se está diseñando la densidad de la capa vegetal mejora el desempeño térmico y energético de las edificaciones:

Sailor (2008), en un modelo de Energy Plus establece que las características de la vegetación más importantes para los sistemas térmicamente eficientes, desde el punto de vista de los impactos en la transferencia de calor a través del techo son la altura, índice de área foliar (LAI), factor de cobertura, albedo y Resistencia estomática. Los resultados

obtenidos en su estudio, hecho para las ciudades de Chicago y Houston, muestran que el aumento de LAI resultó en un menor consumo anual de energía en ambas ciudades; incluso cuando, como regla general, las simulaciones de Chicago muestran una mayor sensibilidad invernal a las variaciones en el diseño del techo verde y las simulaciones de Houston muestran más sensibilidad durante el verano.

Kolb y Schwartz (1999) en mediciones de campo para un techo verde de pasto, establecieron que en verano aportó un efecto refrigerante, reduciendo la temperatura hasta en 29°C respecto a la TBS exterior, para la ciudad de Stuttgart, Alemania. Durante enero, que es el mes más frío, cuando la temperatura exterior era de -14°C, la temperatura bajo los 16 cm del sustrato era de 0°C y al pie del pasto era de -3°C, demostrando que el mayor efecto térmico lo proporcionó la vegetación reduciendo el diferencial en 11 K.

Para la ZMCM, Tovar (2011) en un modelo experimental y con simulación en Energy Plus muestra que con la aplicación de una cubierta vegetal denominada “*Sistema ligero de naturación para cubiertas y/o muros en base a membranas y vegetación del género hilocereus*”<sup>7</sup> aplicada sin sustrato, con LAI de 3.2, factor de cobertura = 0.83; una casa de techo de concreto simple, redujo en 40 % la cantidad de días que entraron en disconfort por superhábit de temperatura en un año. Igualmente se redujo en 13 % el número de días que en un año entraron en disconfort por déficit térmico.

Por estas consideraciones, la capacidad de cubrir densamente el techo verde es el primer criterio físico que se tomará en cuenta para seleccionar una planta, que debe ser una planta de cobertura densa.

De las especies sobrevivientes para la ZMCM antes mostradas, se enlistan en la Tabla 1.3.2 las que son nativas, que forman cubiertas densas, con alto LAI y alto factor de cobertura. Se destaca igualmente que una cobertura vegetal térmicamente eficiente debe tener como base especies con ciclo de vida perene.

Tabla 1.3.2. Especies nativas sobrevivientes que forman cubiertas densas y altos IAF y factor de cobertura.

**Sobrevivencia:** A = vivas; L = latentes; R = revividas (anuales con brotes viables)

**Estatus migratorio:** n = nativa; e = exótica a = naturalizada

**Ciclo de vida:** p = perene; a = anual; a/p = annual y perene.

<i>Species</i>	sobrevivencia	Estatus migratorio	Ciclo de vida
<i>Sedun adolphii</i> Hamet.	A	n	p
<i>Sedun liebmannianum</i> Hemsli.	A	n	p
<i>Sedun moranense</i> H.B.K.	A	n	p
<i>Sedun rubrotinctum</i> R.T. Clausen	A	n	p

<sup>7</sup> Patente No. MX/a/2012/000723, Título de Patente No. 324384; Inventor y titular: Edwin Israel Tovar Jiménez.

Las demás especies nativas sobrevivientes de la Tabla 1.3.1, se pueden incluir en el techo verde como complemento para tener una cobertura densa del follaje.

### **Pastos adecuados**

Con base en los resultados obtenidos por Kolb y Schwartz (1999) y los de Doug (2005) en Toronto, Canadá, se ha demostrado el buen desempeño térmico de una cubierta densa de pasto tanto en periodos cálidos como fríos. Para el caso específico de los pastos seleccionados para este trabajo, están en proceso las mediciones para aportar los datos de su desempeño térmico de un edificio. En este momento, el autor del presente artículo ha realizado una selección de pastos basado en los criterios básicos ya antes citados, buscando el buen funcionamiento de un techo verde térmicamente eficiente y generando impactos positivos en el medio ambiente. Los criterios que se establecieron para la búsqueda son:

- Nativa de México
- Perennial
- Dense ground cover
- 30 to 100 centimeters tall
- Habitat: selva de matorral xerófito; reproducción por estolones; vegetación ruderal; crecimiento en suelos pobres; distribución en altitudes similares a la ZMCM.

Se propone a continuación una Tabla de Criterios de Selección de Pastos para la MAMC en la Tabla 1.3.3.

Con la Tabla 1.3.3, fueron seleccionados 16 pastos adecuados de entre 120 pastos revisados en el catálogo de Malezas de México (Vibrans, 2013); En esta lista sólo se incluyen plantas nativas, ya que en un proceso anterior de selección se descartaron los exóticos.

Tabla 1.3.3. Criterios para selección de pastos en la ZMCM

**Estatus migratorio:** todas las plantas en esta lista son nativas. **Ciclo de vida:** p = perenes; a = anual; a/p = anual y perene. **Categoría:** 1. Prioridad óptima: nativa, perene, cobertura densa de suelo, estolón, altura menor a 1 m, rango de altitud de la ZMCM, presente en el valle de México, bajo consumo de agua; 2. Óptima: perene, densa cobertura de suelo, pero alguna otra desventaja. 3. Muy Buena en combinación con 1 o 2: Crecimiento en macojo de baja cobertura, pero algunas ventajas como el 1; 4. Muy Buena para diseño anual, en combinación con 1 o 2: anual. 5. Buena: Con evidentes desventajas pero no críticas, y atractivas ventajas como floración estética o planta útil 6. Inconveniente.

<b>Categoría</b>	<b>Nombre científico</b>	<b>Ciclo de vida y características</b>	<b>Cobertura densa</b>	<b>Habitat</b>	<b>Atractivo</b>
5	<i>Hordeum jubatum</i> L.	a/p; 75 cm de altura; Raíz extensiva. Retiene suelos	Crece en racimos densos	Altitud de 1880 a 2800 msnm	Hermosas textura y color de flores
2	<i>Enneapogon desvauxii</i> P. Beauv.	a/p; 50 centímetros;	Cobertura densa	Altitud de 2300 a 2450 msnm;	

3	<i>Heteropogon contortus</i> (L.) Beauv. ex Roem. & Schult.	p; 20 to 80 cm de altura	Poca cobertura de suelo	Altitud de 2250 a 2350 msnm; ruderal; presente en el Valle de México	
1	<i>Hilaria belangeri</i> (Steud.) Nash	p; Reproducción por estolón; 5 to 35 centímetros de alto	Cobertura densa	Forma carpetas con los estolones; mitiga erosión; alta tolerancia a sequía	
1	<i>Hilaria cenchroides</i> Kunth	p; Reproducción por estolón; 5 a 60 centimeters de alto, usualmente entre 20 y 30 cm.	Cobertura densa	Restaura suelos degradados. Selva de matorral xerófito. Arvense or ruderal. Presente en el Valle de México.	
5	<i>Setaria parviflora</i> (Poir.) Kerguélen	p; Reproducción por estolón; 30 a 120 cm de alto (fuera de rango).	Cobertura densa	Ruderal y arvense; Altitud de 2250 a 2650 msnm; Presente en el Valle de México.	Flores en panícula todo el año
1	<i>Bouteloua gracilis</i> (Willd. ex Kunth) Lag. ex Griffiths	p; Reproducción por estolón; 20 a 70 cm de altura	Cobertura densa	Selva de matorral xerófito. Altitud de 2250 a 3100 msnm; Presente en el Valle de México. Requiere 200 a 400 milímetros de lluvia/ año. Tolera sequía y frío.	Hermosas flores
5	<i>Bouteloua media</i> (E. Fourn.) Gould et Kapadia	p; Reproducción por estolón; 100 a 200 200 cm de altura (fuera de rango).	Cobertura densa	Altitud de 300 a 3000 msnm; Presente en el Valle de México; Suelos fértiles	Cobertura densa
3	<i>Bouteloua scorpioides</i> Lag.	p; 30 to 60 cm de altura;	Cobertura no densa	Selva de matorral xerófito. Altitud de 500 a 3000 msnm; presente en el Valle de Méx. Suelos pobres.	Flores hermosas.
3	<i>Bouteloua triaena</i> (Trin. ex Spreng.) Scribn.	p; 50 cm de altura;	Cobertura no densa	Selva de matorral xerófito. Altitud de 500 a 3000 msnm; Presente en el Valle de México. Suelos secos y pobres.	Flores hermosas.
3	<i>Bouteloua williamsii</i> Swallen	p; 115 cm de altura;	Cobertura no densa	Regiones semi-áridas	Flores hermosas.
6	<i>Ixophorus unisetus</i> (J. Presl) Schltld.	p; 150 cm. (fuera de rango)	Cobertura no densa	Altitud de sea level a 1650 msnm (fuera de rango);	

5	<i>Bothriochloa laguroides</i> (DC.) Herter	p; Reproducción por estolón; 30 a 130 cm de altura (fuera de rango).	Cobertura no densa	Ruderal; Presente en el Valle de México.	Flores hermosas.
1	<i>Bromus anomalus</i> Rupr. ex E. Fourn.	p; Reproducción por estolón; usualmente entre 70 y 90 cm de alto	Cobertura densa	Selva de matorral xerófilo. Altitud de 2250 a 3700 msnm; Presente en el Valle de Méx. Tolera suelos pobres.	Flores hermosas.
5	<i>Distichlis spicata</i> (L.) Greene	p; Reproducción por estolón; 60 cm de alto	Densa cobertura de suelo	Ruderal; Presente en el Valle de Méx. Tolera suelos salino.	
3	<i>Muhlenbergia glabrata</i> (Kunth) Trin.	p; 100 cm de alto;	Cobertura no densa	Selva de matorral xerófilo. Altitud de 2300 a 3000 MASLmsnm suelos superficiales.	
2	<i>Scleropogon brevifolius</i> Phil.	p; Reproducción por estolón; 25 cm de altura.	Cobertura densa. Forma colonias extensas.	Selva de matorral xerófilo. Altitud de 2300 a 2600 msnm; no muy presente en el Valle de México.	
4	<i>Muhlenbergia microsperma</i> (DC.) Kunth	a; 10 a 70 cm de altura.	Cobertura densa. Forma colonias extensas.	Suelos secos y rocosos.	Muy atractiva por sus hermosas flores.

## Metabolismo Ácido Crasuláceo CAM

Dicho de manera concreta y práctica, la diferencia fundamental entre los metabolismos C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y CAM, radica en que los dos primeros transpiran durante el día, en presencia de la luz, y el CAM lo hace de manera inversa, es decir en ausencia de la luz.

La vegetación CAM, al ser preponderantemente de ambientes con baja disposición de agua se han especializado en transpirar bajo las condiciones que le generen menor pérdida de agua, durante los períodos del día en que el diferencial de presión de vapor es menor. Podemos definir algunas características básicas que diferencian a los tres tipos de metabolismo en la tabla 3.2.

Tabla 1.3.4. Características de los tres metabolismos de plantas vasculares

Parámetro	PLANTAS C3	PLANTAS C4	PLANTAS CAM
Apertura estomas	Gran apertura	Pequeña apertura	Apertura nocturna
Anatomía mesófilo	Células clorofílicas normales	Anatomía de Kranz: células de la vaina clorofílicas y el resto captadoras de CO <sub>2</sub>	Anatomía de Kranz vacuolas con málico
Enzimas carboxilasas	RUBISCO	RUBISCO y PEPcasa	RUBISCO y PEPcasa
Ecología	Zonas extratropicales	Zonas tropicales	Zonas con déficit hídrico

De esta tabla, se destaca sobre todo que la actividad fisiológica de transpiración de CAM es nocturna.  
Fuente: (IESJA, 2016)

En el metabolismo de algunas plantas existe una relación de equilibrio autorregulada entre los componentes físicos del medio y su metabolismo, teniendo como sustancia central el gas dióxido de carbono, que está presente y altamente concentrado en nuestra ciudad.

La importancia de ahondar desde una perspectiva bioclimática en el Metabolismo de Ácido Crasuláceo (MAC ó CAM por sus siglas en inglés), radica en que existe una estrecha relación entre la temperatura ambiente, la humedad relativa, el nivel de concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente y las fases metabólicas de las plantas CAM. De acuerdo a la manera en que se relacionan las variables, las plantas con este metabolismo regulan su capacidad de asimilar mayores cantidades de CO<sub>2</sub> del ambiente, y las fases en que lo hacen.

Este tipo de metabolismo se presenta en plantas crasuláceas y epífitas que viven en ambientes desérticos y medios epifíticos de la selva tropical seca. Aproximadamente el 7% de las 1,600 especies de cactáceas conocidas son epífitas, según Nobel y Hartsock (Ortiz, 1999).

Existen dos modalidades de este metabolismo de acuerdo con Ting y Lüttge (Ortiz, 1999); una variante de ellas es la:

**MAC cíclica.** Caracterizada por cambiar parcial o totalmente su patrón de absorción de CO<sub>2</sub> de la noche al día. Se presenta cuando las plantas tienen un buen abastecimiento hídrico.

**MAC reducida.** Esta segunda modalidad consiste en que las plantas cierran completamente sus estomas durante el día y la noche, desarrollando un recirculamiento interno de CO<sub>2</sub>, con lo que consiguen respirar evitando la pérdida de agua por la transpiración. Este mecanismo se presenta cuando las plantas se encuentran bajo estrés hídrico severo.

En la típica planta MAC la absorción de CO<sub>2</sub> ocurre principalmente durante la noche; lo que resulta inverso a las nociones típicas acerca de la fotosíntesis, donde durante el día las plantas captan el CO<sub>2</sub> para generar nutrientes, liberando posteriormente O<sub>2</sub> al ambiente; relación de la que depende el desarrollo de la vida en este planeta (Ortiz, 1999).

La variante metabólica de éste género de plantas nos puede dar la posibilidad de aportar O<sub>2</sub> a los medios con saturación de CO<sub>2</sub> y aire viciado durante los periodos en que las demás plantas lo transpiran al medio ambiente, que en espacios exteriores urbanos y más en los interiores cerrados, es una preocupación de la disciplina bioclimática. Aun cuando la mayor cantidad de contaminantes en la Ciudad de México se produce durante el día.

## **Conclusiones al capítulo 1**

### ***Vegetación***

En México el uso de las azoteas verdes con el propósito de mejorar térmicamente los edificios es joven y se aprecia descontrol en el uso adecuado de la vegetación, tanto en los instaladores como en los organismos reguladores.

Los criterios propuestos en el presente trabajo y usados hasta este momento para la selección de especies apropiadas para techos verdes térmicamente eficientes coinciden con los trabajos que le anteceden a nivel global y local, y están adecuados a la vegetación y a las condiciones de la MAMC, por lo que pueden servir de base para promover un mejor uso de nuestros recursos vegetales.

Se presentaron cuatro especies de suculentas altamente eficientes que pueden servir como base a la naturación extensiva y semi extensiva. Asimismo, se tienen otras 7 especies de plantas nativas altamente resistentes que en combinación con las básicas tienen un buen rendimiento en el green roof.

Se obtuvieron también cuatro especies de pastos que igualmente cubren todos los requerimientos para ser base de un green roof, y otras doce especies de pastos que responden a las condiciones requeridas y del clima de la MAMC.

Conociendo los requerimientos de las plantas para vivir, de los green roofs de acuerdo a su propósito funcional y del clima

### ***Normatividad***

Se mostraron de manera general las consideraciones y claves del cálculo de transferencia de calor, de los que podemos concluir que los sistemas de evaluación de normas y

certificaciones nacionales se llevan a cabo mediante análisis de régimen estacional, con una temperatura neutra como objetivo y considerando que los elementos aportan únicamente un nivel de aislamiento a la envolvente del edificio.

Las normas y certificaciones nacionales, basadas en el modelo de cálculo estacional de la NOM-008-ENER-2001, tienen la ventaja de ofrece un procedimiento accesible, posible de ejecutarse de manera manual (o con un software sencillo con que ya cuenta la NOM-020-ENER-2011) y basado en una serie de valores precalculados, disponibles en tablas, y por esto la hace viable para ser implementada. A pesar de ser una NOM (obligatoria en el territorio nacional) los edificios certificados en sus 15 años de vigencia no son más de 20. Esto para nuestro medio nacional es bueno porque hemos constatado que mientras más complejas y especializadas son las normas, se aplican menos, o son más susceptibles a la corrupción para ser acreditadas.

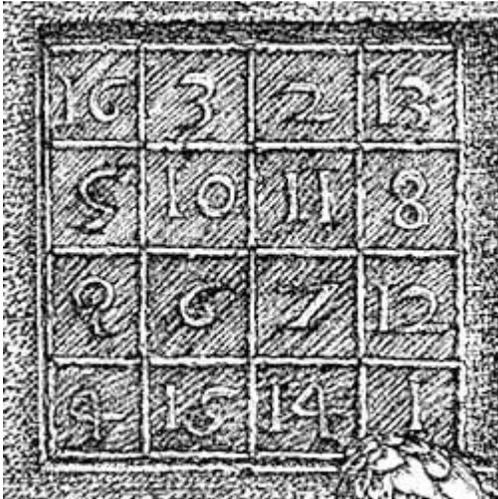
Como se comento anteriormente, la NOM-008- ENER-2001 pierde eficacia también al restringir la temperatura de confort a 25°C y con esto se aumentan los consumos energéticos, por lo que requiere un modelo más adecuado de análisis de confort. Asimismo, una de las grandes desventajas que encontramos en esta norma nacional es que, al ser su objetivo principal evitar el sobrecalentamiento de las edificaciones, en climas fríos, los edificios mal diseñados que promueven temperaturas con déficit de temperaturas, muy por debajo de la zona inferior de la zona de confort, acreditan la norma, debido a que no se sobrecalientan.

Por otro lado, se mostró cómo evalúa LEED, y debemos comentar que resulta efectivamente un sistema de certificación mucho más robusto, complejo y eficaz para la gestión de proyectos sustentables, comparado con los sistemas de certificación y normas nacionales, sin embargo, tiene un nicho de clientes muy dirigido, de alto nivel adquisitivo cuya dinámica comercial le permite incluir la acreditación de esta certificación como una inversión redituable, lo que no resulta aplicable a muchos de los sectores de la edificación de México.

En el mismo sentido BREEAM presenta las mismas ventajas y desventajas que LEED.

Sisevive Ecocasa, con el modelo DEEVí presenta un modelo de cálculo un poco más cercano a ser un paso intermedio entre la facilidad de aplicación y la integración de un modelo de edificio que integra todas sus componentes térmicas, y pese a tener las mismas limitaciones del modelo estacionario, problemas en considerar los factores del clima y basarse en el comportamiento de viviendas fuera de México, puede ser tomado como una base para que el sector académico integre un sistema de evaluación junto con el sector gubernamental. La base de este sistema puede ser Ener habitat, que mediante su enriquecimiento y su complemento para integrar un modelo de espacios complejos, no sólo paramétricos, puede cubrir las necesidades de nuestras normas y certificaciones.

## CAPÍTULO 2



## ANÁLISIS DEL MODELO MATEMÁTICO

## Modelo FASST en Energy Plus

El modelo fast all-season soil strength model (FASST) ha sido desarrollado por la Army Corps of Engineers. A su vez este modelo se basa en modelos previos, usados intensamente para estudios de modelado atmosférico, como el modelo Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) y el modelo Simple Biosphere model (SiB).

El estado dinámico unidimensional del modelo de suelo FASST es un estado del modelo de suelo desarrollado por Frankenstein y Koenig (2004) como parte del programa de investigación del ejército norteamericano llamado *Army's Battlespace Terrain Reasoning and Awareness* (BTRA). En su forma original, los únicos parámetros de la vegetación incorporados en FASST fueron el albedo superficial y la emisividad. Recientemente, se agregó un algoritmo de vegetación multicapa de dos niveles. Éstos Pueden ser implementados por separado o juntos. Ambos alteran los presupuestos de energía y humedad de la superficie del suelo. En este informe se discutirán las ecuaciones del balance energético utilizadas para resolver la baja vegetación, el dosel y las temperaturas del suelo. Los efectos de la interceptación de precipitación y la modificación de la humedad del suelo atribuible a la acumulación de raíces también se incorporan (Frankenstein y Koenig, 2004).

Tabla 2.1. Nomenclatura del modelo FASST

NOMENCLATURA	
$C_{eg}$	coeficiente de transferencia de flujo de calor latente en la capa de tierra
$C_f$	coeficiente de transferencia de calor en masa
$C_{hg}$	coeficiente de transferencia de flujo de calor sensible en la capa de tierra
$C_{hnf}$	coeficiente de transferencia casi neutro en la capa de follaje
$C_{hng}$	coeficiente de transferencia casi neutro en la capa de tierra
$C_{p,a}$	calor específico de aire a presión constante (1005,6 J / kg K)

---

## NOMENCLATURA

---

$C_{1,f/g}, C_{2,f/g}, C_{3,f/g}$	coeficientes en ecuaciones lineales de temperatura para follaje / suelo
$e^*$	presión de vapor saturada (Pa)
$f_1$	factor multiplicador del efecto de la radiación sobre la resistencia estomática
$f_2$	factor multiplicador del efecto de la humedad sobre la resistencia estomática
$f_3$	factor multiestitucional adicional para la resistencia estomática
$F_f$	flujo neto de calor a la capa de follaje (W/m <sup>2</sup> )
$F_g$	flujo neto de calor a la superficie del suelo (W/m <sup>2</sup> )
$g_d$	característica específica de la planta relacionada con la resistencia estomática
$H_f$	flujo de calor sensible del follaje (W/m <sup>2</sup> )
$H_g$	flujo de calor sensible del suelo (W/m <sup>2</sup> )
$I_{s\downarrow}$	radiación de onda corta de entrada total (W/m <sup>2</sup> )
$I_{ir\downarrow}$	radiación de onda larga de entrada total (W/m <sup>2</sup> )
$K_v$	constante von Karman (0.4)

---

---

## NOMENCLATURA

---

$l_f$	Calor latente de vaporización a la temperatura del follaje (J/kg)
$l_g$	Calor latente de vaporización a la temperatura del suelo (J/kg)
$L_f$	flujo de calor latente del follaje (W/m <sup>2</sup> )
$L_g$	flujo de calor latente del suelo (W/m <sup>2</sup> )
LAI	índice de área foliar (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
$M_g$	factor de saturación de humedad
$q_a$	mezcla de aire
$q_{af}$	mezcla de aire dentro del dosel del follaje
$q_{f,sat}$	relación de mezcla de saturación a la temperatura del follaje
$q_{g,sat}$	relación de mezcla de saturación a la temperatura del suelo
$r_a$	resistencia aerodinámica a la transpiración (s/m)
$r_s$	resistencia estomática de la hoja del follaje (s/m)
$r_{s,min}$	resistencia estomática mínima de la hoja (s/m)
$r''$	factor de humedad superficial
$R_{ib}$	número de Richardson en masa

---

---

## NOMENCLATURA

---

$R_v$	gas constante para el vapor de agua (461.53 J/kg K)
$T_a$	la temperatura del aire a la altura del instrumento (Kelvin)
$T_{af}$	temperatura del aire en el dosel (Kelvin)
$T_f$	temperatura del follaje (Kelvin)
$T_g$	temperatura de la superficie del suelo (Kelvin)
$W$	velocidad del viento sobre el dosel (m/s)
$W_{af}$	velocidad del viento en el dosel (m/s)
$z$	altura o profundidad (m)
$Z_a$	altura del instrumento (m)
$Z_d$	altura de desplazamiento (m)
$Z_{o,f}$	escala de longitud de la rugosidad del follaje (m)

---

## Ámbito general del modelo FASST

Se presenta en este apartado el modelo matemático FASST, tal como se describe en el cuerpo del documento Energy Plus Engineering Reference (2013) para establecer las bases que los han generado y más adelante proponer los aspectos a ser modificados.

Existe un amplio reconocimiento y una creciente literatura de datos medidos que sugieren que los techos verdes pueden reducir el consumo de energía de los edificios. Sin embargo, actualmente hay pocas herramientas de diseño disponibles para ayudar a los desarrolladores y arquitectos a evaluar la magnitud probable del ahorro de energía asociado con diversas opciones de implementación (por ejemplo, tipo, profundidad del suelo, opciones de riego, tipo de planta). Como resultado, existe una necesidad significativa de

una herramienta de simulación de energía cuantitativa y física basada en edificios que represente los efectos de las construcciones de techados verdes. Dicha herramienta facilitaría la difusión más rápida de las tecnologías de techos verdes y permitiría tener en cuenta los beneficios de los techos verdes en los códigos energéticos estatales y las normas de eficiencia energética conexas, como LEED, mencionado el apartado de normatividad.

En respuesta a la necesidad de herramientas de diseño de techos verdes, se ha desarrollado un modelo computacional de los procesos de transferencia de calor involucrados en un techo de vegetación. Este modelo explica: Ondas largas y radiativas de onda corta dentro de la copa de la planta, Efectos de la cubierta vegetal sobre la transferencia de calor convectiva, Evapotranspiración del suelo y de las plantas, y Conducción de calor (y almacenamiento) en la capa de suelo

La capacidad de rastrear las propiedades térmicas dependientes de la humedad no se ha implementado aún debido a problemas de estabilidad en el esquema CTF, pero está en desarrollo para su uso con el esquema de solución de diferencias finitas disponible en EnergyPlus a partir de la versión 2.

Como se implementa en EnergyPlus, el módulo de techo verde permite al usuario especificar "ecorooft" como la capa exterior de una construcción en la azotea utilizando un objeto "Material: Roof Vegetation". El usuario puede especificar varios aspectos de la construcción del techo verde, incluyendo la profundidad de los medios de cultivo, las propiedades térmicas, la densidad de la copa de la planta, la altura de la planta, la conductancia estomática (capacidad de transpirar la humedad) y las condiciones de humedad del suelo (incluyendo riego).

La formulación del modelo incluye lo siguiente: Balance de humedad simplificado que permite la precipitación, irrigación y transporte de humedad entre dos capas de suelo (zona superior y raíz). Frankenstein y Koenig (2004), basándose fuertemente en BATS (Dickenson et al.) y en SiB (Sellers et al.), establecieron los modelos de vegetación FASST para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército.

Las ecuaciones de temperatura de la superficie del suelo ( $T_g$ ) y del follaje ( $T_f$ ) se resuelven simultáneamente en cada paso de tiempo, invirtiendo el CTF para extraer la información del flujo térmico para el cálculo del balance energético.

El análisis detallado del balance energético y las ecuaciones resultantes, que son bastante complicados, se resumen aquí. El resultado final es un conjunto de dos ecuaciones simultáneas para la temperatura: una para la superficie del suelo y otra para el follaje.

### ***Intercambio térmico del techo verde***

Al igual que con un techo tradicional, el balance energético de un techo verde está dominado por la ganancia de radiación del sol. Esta radiación solar se equilibra con el flujo de calor sensible (convección) y latente (evaporativo) del suelo y las superficies de las plantas combinado con la conducción de calor en el sustrato del suelo. Este equilibrio de energía se ilustra en la Figura 1. Las variables introducidas en esta figura se definen en las ecuaciones que siguen.

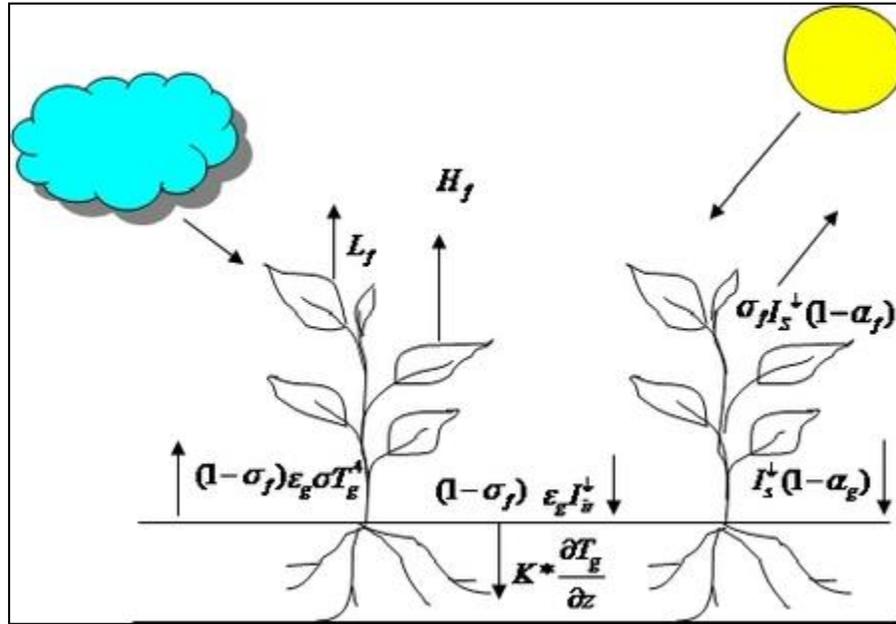


Figura 2.1. Balance energético en el techo verde. Fuente: Energy Plus (2013).

El análisis del presupuesto energético sigue el modelo Fast All Season Soil Strength (FASST) desarrollado por Frankenstein y Koenig (2004) para el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. FASST se desarrolló, en parte, para determinar la capacidad de los suelos para apoyar a los vehículos tripulados y no tripulados y el movimiento del personal. Con el fin de lograr esto, sin embargo, FASST rastrea el equilibrio de energía y humedad (incluyendo hielo y nieve) dentro de un suelo con vegetación. Se trata de un modelo unidimensional que se basa en gran medida de otros modelos de dosel vegetal incluyendo BATS (Dickinson et al.) Y SiB (Sellers et al.). Se implementó FASST con sólo unas pocas modificaciones para adaptarlo para su uso con una capa de suelo relativamente delgada. La convención de signos utilizada asume que todos los flujos de calor son positivos cuando la energía se absorbe en la capa.

En el siguiente análisis, este presupuesto de energía se divide en un presupuesto para la capa de follaje (F<sub>f</sub>) y un presupuesto para la superficie del suelo (F<sub>g</sub>). Las diversas parametrizaciones para el flujo de calor latente y sensible se describen con cierto detalle y luego el conjunto de ecuaciones se reduce a la solución simultánea de dos ecuaciones que implican las temperaturas del follaje y la superficie del suelo.

### **Presupuesto energético en la capa de follaje**

El balance energético del follaje está dado por:

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (1)$$

Además de la transferencia de calor convectiva y sensible, esta ecuación explica tanto la radiación corta como la radiación de onda larga absorbida por la vegetación, incluyendo los efectos de múltiples reflexiones. Los términos de flujo de calor sensible y latente son complejos.

### **Flujo de calor sensible en la capa de follaje**

La transferencia de calor sensible entre la superficie de la hoja y el aire cercano a la vegetación está influenciada por la diferencia de temperatura entre ellos, la velocidad del viento y el índice IAF.

El flujo de calor sensible está dado por:

$$H_f = (1.1 * LAI \rho_{af} C_{p,a} C_f W_{af}) * (T_{af} - T_f) \quad (2)$$

Las propiedades del aire cerca del follaje se modelan utilizando el promedio de las condiciones del follaje y del instrumento:

$$\rho_{af} = 0.5(\rho_a + \rho_f) \quad (3)$$

Donde se involucran la densidad del aire a la altura del instrumento y la densidad del aire a la temperatura de la hoja. La temperatura del aire dentro del follaje es estimada por:

$$T_{af} = (1 - \sigma_f)(T_a) + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g) \quad (4)$$

Donde  $T_a$  es la temperatura del aire a la altura del instrumento,  $T_f$ , es la temperatura de la vegetación y  $T_g$ , es la temperatura del suelo. La velocidad del viento del follaje se estima en:

$$W_{af} = 0.83\sigma_f W \sqrt{C_{hm}^f} + (1 - \sigma_f)W \quad (5)$$

Aquí  $W$  es el mayor de 2,0 m / s o la velocidad real del viento por encima de la copa (Hughes et al.) Y  $C_{hm}^f$  es el coeficiente de transferencia en condiciones de estabilidad atmosférica casi neutras:

$$C_{hm}^f = K_v^2 \cdot \left( \ln \left( \frac{Z_a - Z_d}{Z_o^f} \right) \right)^{-2} \quad (6)$$

Donde  $K_v$  es la constante de von Karman (0,4),  $Z_a$  es la altura del instrumento,  $Z_d$  es la altura de desplazamiento cero en metros (altura sobre el suelo en la que la velocidad del viento es efectivamente cero) y  $Z_o^f$  es la escala de longitud de rugosidad del follaje (m). Las formulaciones para altura de desplazamiento nulo, longitud de rugosidad se basan en Balick (1981):

$$Z_d = 0.701Z_f^{0.979} \quad (7)$$

$$Z_o = 0.131Z_f^{0.997} \quad (8)$$

Por último, el coeficiente de transferencia en masa definido por Deardorff (1978) viene dado por:

$$C_f = 0.01 * \left( 1 + \frac{0.3(m/s)}{W_{af}(m/s)} \right) \quad (9)$$

### **Flujo de calor latente en la capa de follaje**

El proceso de pérdida de agua a través de la respiración de la planta se conoce como transpiración. Es controlada por el cierre y la apertura de los estomas - las aberturas intercelulares entre las células epidérmicas (guardias) (Gates, 1980). La resistencia a la difusión del vapor de agua de estos espacios en la atmósfera se denomina resistencia estomática. Depende de factores como la intensidad de la luz, el contenido de humedad del suelo y la diferencia de presión de vapor entre la hoja interior y la atmósfera exterior. Se mide en unidades de s / m y se formula como:

$$r_s = \frac{r_{s,\min}}{LAI} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (10)$$

Aquí,  $r_{s,\min}$  es la resistencia estomática mínima. La resistencia estomática real en cualquier momento es proporcional a esta resistencia mínima e inversamente proporcional al índice IAF. La resistencia estomática se modifica adicionalmente mediante factores de multiplicación fraccionaria que se relacionan con la radiación solar entrante y la humedad atmosférica. Como se encuentra en Frankenstein y Koenig (2004) las inversas de los factores multiplicadores  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  están dadas por:

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[ 1, \frac{0.004 * I_s^\downarrow + 0.005}{0.81 * (0.004 * I_s^\downarrow + 1)} \right]$$

$$\frac{1}{f_2} = \begin{cases} 0 & \text{when } \theta_r > \bar{\theta} \\ \frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_{\max} - \theta_r} & \text{when } \theta_r \leq \bar{\theta} \leq \theta_{\max} \end{cases}$$

$$\frac{1}{f_3} = \exp[-g_d(e_{f,sat} - e_a)] \quad (11)$$

Aquí,  $\Theta_r$ , es el contenido de humedad residual (definido como la cantidad de humedad en el suelo cuando las plantas comienzan a marchitar),  $\Theta_{max}$  es el contenido máximo de humedad (definido como la cantidad máxima de humedad que un tipo particular de suelo puede contener y por encima que se escapa), y es la humedad media del suelo en la zona de las raíces. El contenido de humedad residual es típicamente de alrededor de  $0,01 \text{ m}^3 / \text{m}^3$  (Frankenstein y Koenig, 2004). En la expresión para  $f_3$ ,  $g_d$  es una característica específica de la planta que es sólo distinta de cero para árboles,  $e_f$ ,  $sat$  es la presión de vapor saturada a la temperatura de la hoja, y es la presión de vapor de aire.

La resistencia al intercambio de humedad ofrecida por la capa límite formada sobre la superficie de la hoja se conoce como resistencia aerodinámica. Se mide en unidades de (s/m) y está influenciada por la velocidad del viento, la rugosidad superficial y la estabilidad de la atmósfera. Se formula como:

$$r_a = \frac{1}{c_f W_{af}} \quad (12)$$

El efecto combinado de las resistencias aerodinámicas y estomáticas a la difusión de vapor se integra en un factor de humedad superficial del follaje:

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \quad (13)$$

Este factor de humedad superficial es simplemente una relación de la resistencia aerodinámica a la resistencia total. Cuando la resistencia aerodinámica es pequeña, el factor de humedad se aproxima a cero (las superficies de las hojas permanecen secas a medida que la humedad superficial se evapora fácilmente). A medida que aumenta la resistencia aerodinámica en relación con la resistencia estomática, el factor de humedad se aproxima a 1,0 (la humedad viaja fácilmente a las superficies de las hojas, pero no se evapora fácilmente).

El flujo de calor latente es entonces dado por:

$$L_f = l_f * LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (14)$$

Aquí,  $l_f$  es el calor latente de vaporización (J / kg),  $q_{f,sat}$  es la relación de mezcla de saturación a la temperatura de la superficie de la hoja, y  $q_{af}$  es la relación de mezcla del aire dentro del dosel. Tal como se ha desarrollado en Frankenstein y Koenig (2004), la relación de mezcla dentro de la copa puede determinarse a partir de:

$$q_{af} = \frac{[(1 - \sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_{f,sat}r'' + 0.1q_{g,sat}M_g)]}{1 - \sigma_f[0.6(1 - r'') + 0.1(1 - M_g)]} \quad (15)$$

Donde el factor  $M_g$  (que va de 0 a 1) es la relación entre el contenido de humedad volumétrica y la porosidad del suelo (Koenig, 1994). El calor latente de vaporización ( $l_f$ ) es la cantidad de energía requerida para convertir una masa unitaria de agua en vapor. Se mide en unidades de J / kg y es inversamente proporcional a la temperatura. De Henderson-Sellers se estima como:

$$l_f = 1.91846 * 10^6 \left[ \frac{T_f}{T_f - 33.91} \right]^2 \quad (16)$$

### **Presupuesto energético del suelo**

El presupuesto de energía en la superficie del suelo está influido principalmente por las propiedades térmicas del suelo, la cantidad de cobertura foliar ( $af$ ) y la cantidad de humedad en el suelo. Si la superficie del suelo está densamente cubierta, el rango diario de la temperatura superficial es pequeño. En el presupuesto de energía del suelo se ignora el calor liberado o ganado debido a los cambios de fase del agua del suelo, flujo de calor de precipitación y flujo de calor debido al transporte vertical del agua en el suelo. Futuros ajustes a este modelo incorporarán estos fenómenos. La convención de signos seguida aquí es la misma que anteriormente (el flujo de calor en el suelo es positivo). El balance energético global en la superficie del suelo, como se da en Frankenstein y Koenig (2004) es:

$$F_g = (1 - \sigma_f) \left[ I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4 \right] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K * \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (17)$$

Al igual que con la ecuación de energía para el follaje, esta ecuación representa el flujo de calor sensible ( $H_g$ ), el flujo de calor latente ( $L_g$ ) y las reflexiones múltiples asociadas con la radiación de onda larga y corta. El término final en el lado derecho da la conducción del calor en el sustrato del suelo.

### **Flujo de calor sensible en la capa de suelo**

El flujo de calor sensible entre la superficie del suelo y el aire en su vecindad depende de la diferencia de temperatura entre ellos y de la velocidad del viento dentro del dosel. Se da como:

$$H_g = \rho_{ag} C_{p,a} C_h^g W_{af} (T_{af} - T_g) \quad (18)$$

Donde  $C_h^g$  es el coeficiente de transferencia y  $\rho_{ag}$  es la densidad de aire cerca de la superficie del suelo ( $\text{kg/m}^3$ ) dada por:

$$\rho_{ag} = \frac{P_a + P_g}{2} \quad (19)$$

Aquí  $\rho_g$  es la densidad de aire a la temperatura de la superficie del suelo. El coeficiente de transferencia en masa se da como la combinación lineal de coeficiente de transferencia en masa cerca del suelo ( $C_{hnf}$ ) y cerca de la interfaz follaje-atmósfera ( $C_{hng}$ ) multiplicada por el factor de estabilidad ( $\Gamma_h$ ) y se formula como:

$$C_h^g = \Gamma_k \left[ 1 - \sigma_f C_{hn}^g + \sigma_f C_{hn}^f \right] \quad (20)$$

Los coeficientes de transferencia en masa del suelo y del follaje, a su vez, están dados por:

$$C_{hn}^g = r_{ch}^{-1} \left[ \frac{K_v}{\ln \left( \frac{Z_a}{Z_o^g} \right)} \right]^2 \quad (21)$$

y

$$C_{hn}^f = \left[ \frac{K_v}{\ln \left( \frac{Z_a - Z_d}{Z_o^f} \right)} \right]^2 \quad (21)$$

Donde  $Z_o^g$  y  $Z_o^f$  son las longitudes de rugosidad del terreno y del follaje,  $r_{ch}$  es el número de Schmidt de turbulencia (0.63), y  $K_v$  es la constante de von Karman (0.4).

La condición de la atmósfera ( $\Gamma_h$ ) se determina como estable o inestable basándose en el signo del número de Richardson en masa:

$$R_{ib} = \frac{2gZ_a}{T_{af} + T_g} \frac{T_{af} - T_g}{W_{af}^2} \quad (22)$$

El factor de estabilidad atmosférica es entonces dado por Businger, Lumley y Panofsky (1966) como:

$$\Gamma_h = \begin{cases} \frac{1.0}{1.0 - 16.0 R_{ib}^{0.5}} & \text{for } R_{ib} < 0 \\ \frac{1.0}{1.0 - 5.0 R_{ib}} & \text{for } R_{ib} > 0 \end{cases} \quad (23)$$

### Flujo de calor latente en la capa de suelo

La eliminación del vapor de agua de la superficie del suelo depende de la diferencia entre la relación de mezcla de la superficie del suelo y el aire y la velocidad del viento dentro de la cubierta. El flujo de calor latente resultante es entonces dado por:

$$L_R = C_e^g l_g W_{af} \rho_{ag} q_{af} - q_g \quad (24)$$

Aquí  $C_e^g$  está el coeficiente de transferencia en masa,  $l_g$  es el calor latente de vaporización a la temperatura de la superficie del suelo,  $q_{af}$  es la relación de mezcla en la interfase follaje-atmósfera, y  $q_g$  es la relación de mezcla en la superficie del suelo, dada por:

$$q_g = M_g q_{g,sat} + 1 - M_g q_{af} \quad (25)$$

El coeficiente de transferencia en masa para el intercambio de calor latente es análogo al del intercambio de calor sensible y está dado por:

$$C_e^g = \Gamma_e \left[ 1 - \sigma_f C_{en}^g + \sigma_f C_{hm}^f \right] \quad (23)$$

Donde  $C_{en}^g$  es el coeficiente de transferencia en masa cerca del suelo para el flujo de calor latente y  $\Gamma_e$  es el factor de corrección de la estabilidad de intercambio de calor latente (se supone que es el mismo que  $\Gamma_h$ ).

### Linealización

Para resolver las ecuaciones del follaje y del presupuesto del calor del suelo, los términos de orden  $T_f^4$  y  $T_g^4$  y los términos de la relación de mezcla  $q_{g,sat}$  y  $q_{f,sat}$  se linealizan de acuerdo con Deardorff:

$$\left[ T_f^{n+1} \right]^4 = \left[ T_f^n \right]^4 + 4 \left[ T_f^n \right]^3 \left[ T_f^{n+1} - T_f^n \right] \quad (24)$$

$$\left[ T_g^{n+1} \right]^4 = \left[ T_g^n \right]^4 + 4 \left[ T_g^n \right]^3 \left[ T_g^{n+1} - T_g^n \right] \quad (25)$$

Aquí  $T_f^{n+1}$  y  $T_g^{n+1}$  son las temperaturas actuales de la hoja de paso y de la superficie del suelo.  $T_f^n$  y  $T_g^n$  son las temperaturas correspondientes en el paso de tiempo anterior.

La relación de mezcla de saturación a las temperaturas de la superficie del suelo y la superficie de la hoja se dan como:

$$q_{g,sat} T_g^{n+1} = q_{sat} T_g^n + \left( \frac{\partial q_{sat}}{\partial T} \right)_{T_g^n} * T_g^{n+1} - T_g^n \quad (26)$$

$$q_{f,sat} T_f^{n+1} = q_{sat} T_f^n + \left( \frac{\partial q_{sat}}{\partial T} \right)_{T_f^n} * T_f^{n+1} - T_f^n \quad (27)$$

Donde  $q_{sat} (T_{gn})$  es la relación de mezcla de saturación en el paso de tiempo anterior y se formula como se da en Garratt:

$$q_{sat} T_g^n = \frac{0.622 e^* T_g^n}{P - e^* T_g^n} \quad (28)$$

Aquí la presión de vapor de saturación  $e^*$  (Pa) se evalúa a la temperatura del suelo desde el paso de tiempo anterior ( $T_{gn}$ ) como:

$$e^* = 611.2 \exp \left[ 17.67 \left( \frac{T_g^n - 273.15}{T_g^n - 29.65} \right) \right] \quad (29)$$

La derivada de la proporción de mezcla de saturación en el paso de tiempo anterior viene dada por:

$$\frac{dq^*}{dT_g^n} = \left[ \frac{0.622 * P}{P - 0.378 * e^{*2}} \right] \left( \frac{de^*}{dT_g^n} \right) \quad (30)$$

Aquí, la derivada de la presión de vapor de saturación se puede calcular a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron:

$$\frac{de^*}{dT_g^n} = \frac{l_g * e^* T_g^n}{R_v * T_g^{n+2}} \quad (31)$$

Donde  $R_v$  es la constante de gas para el vapor de agua y  $l_g$  es el calor latente de vaporización a la temperatura de la superficie del suelo.

Las relaciones de relación de mezcla de saturación correspondientes para las superficies de las hojas pueden obtenerse reemplazando  $T_g$  con  $T_f$  en las relaciones anteriores.

### ***Ecuaciones finales***

Después de la linealización las ecuaciones finales son de la forma:

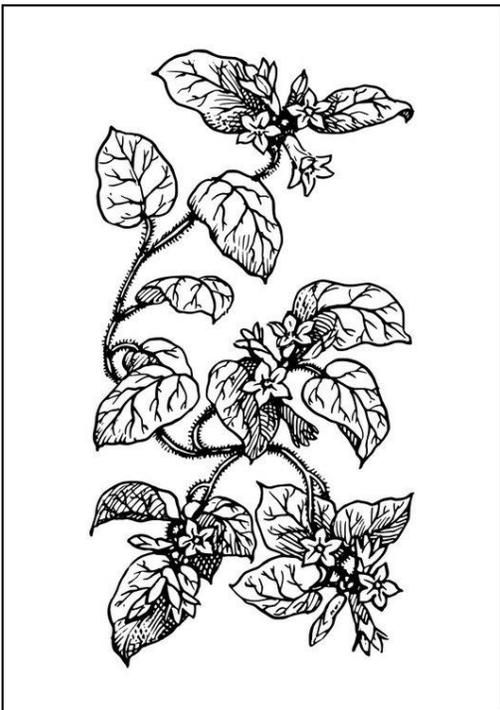
$$C_1^f + C_2^f T_g + C_3^f T_f = 0 \quad (32)$$

$$C_1^g + C_2^g T_g + C_3^g T_f = 0 \quad (33)$$

Los coeficientes en estas ecuaciones resultan de la combinación directa de las ecuaciones del desarrollo anterior. El lector interesado está dirigido a los artículos de Frankenstein y Koenig para las expresiones completas y algo complicadas.

Este conjunto final de ecuaciones se resuelve simultáneamente para obtener  $T_g$  y  $T_f$ . Una diferencia clave en nuestra implementación del algoritmo FASST es que los términos de conducción en las ecuaciones para  $C_1^g$  y  $C_2^g$  se resuelven invirtiendo las Funciones de Transferencia de Conducción (CTF) dentro del esquema de solución de EnergyPlus.

# CAPÍTULO 3



**MODELO  
MATEMÁTICO,  
CALOR LATENTE Y  
RESISTENCIA  
ESTOMÁTICA**

## Modelo FASST y vegetación

El modelo matemático aquí analizado es una compleja concreción de muchos años de investigación y muchos otros modelos antes desarrollados por investigadores en campos de fisiología vegetal, ingeniería mecánica, ingeniería militar, física, etc.

Las plantas *vasculares* son aquellas que están formadas por vasos o conductos, a través de los cuales circulan los fluidos que soportan su fisiología. Se les considera plantas superiores, también conocidas como cormófitas, y una de sus principales características es que están formadas por tejidos diferenciados, como raíz, tallo, hojas y flores. Las plantas no vasculares son las que carecen de tubos conductores o vasos. Algunos ejemplos conocidos de estas plantas pueden ser las briofitas, dentro de las cuales se encuentran los musgos (Ciencia y Biología, 2017).

De acuerdo con Nobel (2011), poco más del 90 por ciento de las plantas de las plantas vasculares conocidas en todo el mundo, alrededor de 300 000 especies usan el metabolismo  $C_3$ .

*“Con bastante certeza, usted puede señalar cualquier planta y decir: ¡Hey, ésa es una planta  $C_3$ !”*

A pesar de que las plantas tienen una gran presencia entre las malezas y especies altamente productivas, sólo 1 a 2 % del total de las plantas vasculares conocidas utilizan el metabolismo  $C_4$ .

Por otro lado, las plantas vasculares que usan metabolismo CAM constituyen entre el 6 y 7%, siendo la mayoría de ellas epífitas o hemiepífitas (Nobel, 2011).

El modelo FASST, que es el motor de cálculo del módulo de flujo térmico en techos verdes de Energy Plus (y de Design Builder en consecuencia), describe el flujo de calor latente, por vía de los estomas, en las plantas vasculares de metabolismo principalmente  $C_3$ . Toda vez que este tipo de vegetación presenta un intercambio de gases (entre ellos el vapor de agua) durante el día. En este intercambio los estomas se abren en presencia de la luz. Más adelante se describirán las particularidades de este mecanismo de apertura estomática.

La paleta vegetal que presenta el manual de usuario de Design Builder en español (2014) como índice de vegetación con valores predeterminados a elegir en el techo verde simulado, se conforma por vegetación de metabolismo  $C_3$  (Tabla 3.1). Esta tabla, el manual de usuario de DSB en español, a su vez la retoma de la tesis doctoral de Chen Yu (2006).

Tabla 3.1. Paleta vegetal de manual de usuario DSB (DSB, 2014).

Plant description	Mean Leaf Area Index (LAI)	Picture
"White flowers, spider lily"	3.07	
"Pink flowers"	4.95	
"Yellow green leaves"	3.75	
"Dark green long blades of leaves/grass"	5.82	
"Pinkish red flowers"	2.44	
"Fern-like"	6.59	
"Palm tree-like"	4.41	
"White flowers with yellow center"	3.21	
"Small yellow green leaves"	4.08	
"Long big leaves"	5.28	

Plant description	Mean Leaf Area Index (LAI)	Picture
"Orange stems and leaves for those which are taller"	2.15	
"No special features"	3.32	
"Light green edges with dark green center leaf blades"	5.83	
"Red yellow tulip like flowers"	3.04	
"Large red leaves"	2.33	
"Dark green leaf blades"	~0	
Tree	1.69	
Palm tree	2.37	

Desde el punto de vista cuantitativo, de acuerdo con el gran porcentaje de vegetación C<sub>3</sub> a nivel mundial, es lógico y adecuado que el modelo de cálculo atienda esta población.

Sin embargo es preciso hacer las adecuaciones para que se describa de manera más adecuada el flujo de calor latente en las especies más adecuadas para los techos verdes en la ZMCM. Especies que ya antes se mencionaron.

### **Flujo de calor latente**

En el modelo matemático FASST, antes descrito, se establece el intercambio de calor latente en el follaje en función del flujo de vapor de agua que cede la vegetación al medio a través de los estomas. La expresión está definida con base en Deardof (1978):

$$L_f = l_f * LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' q_{af} - q_{f,sat} \quad (14)$$

En esta ecuación, la variable  $r''$  es un factor de humedad de la hoja, que es la cantidad de vapor de agua que la vegetación cederá al medio. Los estomas y el factor de humedad están directamente relacionados con la dimensión del área de las hojas del follaje LAI. Participan de este intercambio la densidad del aire, la velocidad del aire, y el diferencial entre el índice de saturación de mezcla de aire entre el follaje y el coeficiente de saturación de mezcla de aire a la temperatura del follaje.

### **Resistencia estomática en el modelo FASST**

El flujo (perdida) de calor latente como se dijo antes, se da a través de los estomas. Es en este mecanismo de la fisiología vegetal donde se concentra la disertación de la presente investigación.

De acuerdo con F y K (2004), para el modelo FASST el valor de  $r_s$  está parametrizado con base con base en el trabajo llamado "*Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observation*" desarrollado por Chen et al, (1996).

En dicho trabajo Chen y sus colegas contrastaron cuatro esquemas de parametrización de la superficie terrestre frente a las observaciones de 5 meses de un área de los 15 km x 15 km del Primer Proyecto Internacional de Climatología de Superficie Terrestre por Satélite (ISLSCP). Se compararon cuatro modelos de superficie, que incorporan diferentes complejidades del tratamiento de evaporación / hidrología, incluyeron el modelo de cubo simple tradicional, el modelo de balance de agua simple (SWB), el modelo de la Universidad Estatal de Oregon (OSU) y el modelo Simplificado de Biosfera Simple (SSiB).

Las mediciones *Field Experiment* FIFE se llevaron a cabo en 1987, en la pradera de Konza, Kansas, en una gran extensión de tierra. Una de las principales conclusiones es que el modelo Oregon tuvo un alto grado de certidumbre en establecer los parámetros de pérdida de agua y de flujo de calor latente, comparado con el modelo SSiB, aun cuando es un modelo más simplificado.

En general, el modelo de Oregon State University -OSU- se utilizó como base para establecer los parámetros de resistencia de la cubierta vegetal. De acuerdo con las expresiones determinadas por Noilhan y Planton (1989), así como Jacquerain y Noilhan (1990) la resistencia de la cubierta  $R_c$  se define a continuación:

$$R_c = \frac{R_{cmin}}{LAI F_1 F_2 F_3 F_4}$$

$$F_1 = \frac{R_{cmin}/R_{cmax} + f}{1 + f} \quad \text{where} \quad f = 0.55 \frac{R_g}{R_{gl}} \frac{2}{LAI}$$

$$F_2 = \frac{1}{1 + \beta[q^*(T_a) - q_a]}$$

$$F_3 = 1 - B1(T_{ref} - T_a)^2$$

$$F_4 = \sum_{i=1}^2 \frac{(\Theta_i - \Theta_w)d_{z_i}}{(\Theta_{ref} - \Theta_w)(d_{z_1} + d_{z_2})}$$

Donde  $R_{cmin}$  es la resistencia estomática mínima, and LAI, leaf area index. Las funciones  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , son factores entre 0 y 1 que representan el primero la influencia de la radiación solar:  $R_g$  crecimiento;  $R_{gl}$  crecimiento debido a la luz; El segundo el déficit de presión de vapor, y el tercero la influencia de la temperatura del aire. El valor  $F_4$  representa la influencia del diferencial de humedad de suelo. Observamos en esta expresión la participación de la radiación solar en el comportamiento de la cubierta.

Por otro lado, el comportamiento de la superficie del suelo en el modelo OSU, se basa a su vez en la ecuación dependiente del período diurno de Penman.

Acerca del estudio de Chen, se puede identificar que se valida el comportamiento de la pérdida de vapor de agua y calor latente de la vegetación principalmente en función de un comportamiento típico diurno, es decir compatible sobre todo con la vegetación de metabolismo  $C_3$ .

Continuando con el desarrollo del modelo FASST por parte de F y K (2004), la resistencia estomática, que es a la vez la resistencia que opone la vegetación al flujo de vapor de agua al medio, se integra en un factor  $r''$

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \quad (13)$$

Este factor es producto de dividir la resistencia aerodinámica  $r_a$ , entre la resistencia total que es la suma de resistencia aerodinámica más la resistencia estomática.

Para la obtención de este factor  $r''$ , que es el que se integrará a la ecuación 14 de flujo de calor latente descrito arriba, se debe definir entonces  $r_s$ .

Para el modelo FASST,  $r_s$  se define como sigue:

$$r_s = \frac{r_{s,\min}}{LAI} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (10)$$

Donde,  $r_{s,\min}$  es la resistencia estomática mínima. La resistencia estomática real en cualquier momento es proporcional a esta resistencia mínima e inversamente proporcional al índice IAF. La resistencia estomática se modifica adicionalmente mediante factores de multiplicación fraccionaria que se relacionan con la radiación solar entrante y la humedad atmosférica. Como se encuentra en Frankenstein y Koenig las inversas de los factores multiplicadores  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  están dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_1} &= \min \left[ 1, \frac{0.004 * I_s^\downarrow + 0.005}{0.81 * (0.004 * I_s^\downarrow + 1)} \right] \\ \frac{1}{f_2} &= \begin{cases} 0 & \text{when } \theta_r > \bar{\theta} \\ \frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_{\max} - \theta_r} & \text{when } \theta_r \leq \bar{\theta} \leq \theta_{\max} \end{cases} \\ \frac{1}{f_3} &= \exp \left[ -g_d (e_{f,\text{sat}} - e_a) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Aquí,  $\theta_r$  es el contenido de humedad residual (definido como la cantidad de humedad en el suelo cuando las plantas comienzan a marchitar),  $\theta_{\max}$  es el contenido máximo de humedad (definido como la cantidad máxima de humedad que un tipo particular de suelo puede contener), y  $\bar{\theta}$  es la humedad media del suelo en la zona de las raíces.

### **Identificación de los parámetros de ajuste del modelo**

En la ecuación 11, destacamos que el factor  $f_1$ , que afectará el comportamiento de la resistencia estomática en la ecuación 10, es fundamentalmente el parámetro que está describiendo el comportamiento de un tipo de vegetación C<sub>3</sub> o C<sub>4</sub>. Por lo tanto, no describe el comportamiento de la vegetación más adecuada para la ZMCM.

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[ 1, \frac{0.004 * I_s^\downarrow + 0.005}{0.81 * (0.004 * I_s^\downarrow + 1)} \right]$$

En la anterior expresión, se destaca que en la medida que aumenta el valor de la radiación, el valor  $f_1$  se reduce, lo que a su vez reduce el valor final de la resistencia estomática; implicando en consecuencia un aumento de la transpiración de la planta.

De la misma manera, en la medida que se reduce la incidencia de radiación, el valor de  $f_1$  (de la resistencia estomática en consecuencia) aumenta, lo que conlleva una reducción del vapor de agua transpirado por la vegetación.

Dicho de manera simplificada, el modelo actual asume que más radiación implica más transpiración y menos radiación implica menos transpiración. Lo que describe el comportamiento de la vegetación  $C_3$  y  $C_4$ , no de la CAM. Como se sintetiza en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Relación de radiación de onda corta con transpiración en el modelo FASST

$+ I_S^\downarrow$	$- f_1$	$- r_s =$	$+T_r$	$\therefore$	$+ I_S^\downarrow$	$=$	$+T_r$
$- I_S^\downarrow$	$+ f_1$	$+ r_s =$	$- T_r$	$\therefore$	$- I_S^\downarrow$	$=$	$- T_r$

Por otra parte, la resistencia aerodinámica, que es una expresión definida por Oake (1978), es no dependiente de la radiación y se define con la expresión.

$$r_a = 1/C_f W_{af} \quad (12)$$

Para esta ecuación los valores de  $C_f$  y  $W_{af}$ , se obtienen de las ecuaciones 5, 6, 7 y 8, que en este momento se omiten, debido a que ya se presentaron antes y serán usadas más adelante en la propuesta de ajuste del modelo.

Para el modelo FASST, F y K (2004) aportan una tabla con datos preestablecidos para diferentes tipos de vegetación (Tabla 3.4)

Tabla 3.4. Valores adicionales para vegetación

Biome	$r_{s,min}^*$ (s/m)	$z_0^f$ (m)	$g_D^\dagger$ ( $10^{-2} Pa^{-1}$ )	$d_{max}^{**}$ (mm)	$a_r^\dagger$ ( $m^{-1}$ )	$b_r^\dagger$ ( $m^{-1}$ )
crop	120	0.06	0.0	0.20	5.558	2.614
short grass	200	0.02	0.0	0.20	10.739	2.608
tall grass	200	0.10	0.0	0.20	8.235	1.627
desert	200	0.05	0.0	0.20	4.372	0.978
tundra	200	0.04	0.0	0.20	8.992	8.992
irrigated crops	200	0.06	0.0	0.20	5.558	2.614
Semidesert	200	0.10	0.0	0.20	4.372	0.978
bog/marsh	200	0.03	0.0	0.20	7.344	1.303
evergreen shrub	200	0.10	0.0	0.25	6.326	1.567
deciduous shrub	200	0.10	0.0	0.10	6.326	1.567

\* Dickinson et al. (1986)

† <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY25r1/Physics/Physics-08-03.html>

\*\* Ramírez and Senarath (2000)

Fuente: F y K (2004).

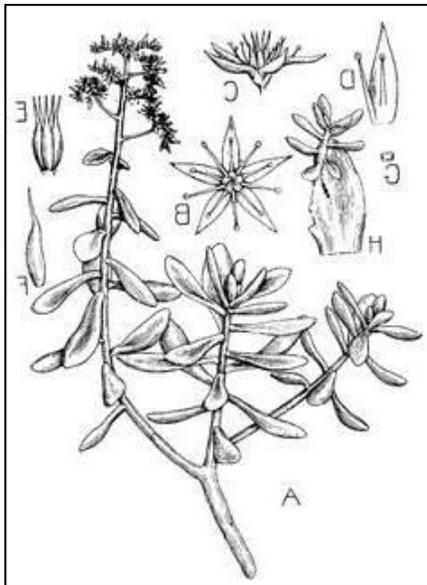
### Conclusiones al Capítulo 3

Después de análisis del modelo FASST se identifica que el comportamiento fisiológico que describen las ecuaciones referentes a la resistencia estomática del modelo FASST es compatible con un metabolismo C<sub>3</sub>.

En el modelo FASST, la resistencia estomática asume que a mayor presencia de radiación se presenta mayor transpiración y a menor radiación se presenta menor transpiración, lo que no describe adecuadamente el comportamiento fisiológico de la vegetación de metabolismo CAM, que es la que se usa en el presente trabajo y es a la vez la más óptima para integrarse en techos verdes en la ZMCM.

Al utilizarse en el presente trabajo vegetación de tipo CAM, se identifica la necesidad de ajustar el modelo FASST en la expresión que describe el comportamiento de intercambio de vapor de agua de la vegetación CAM.

## CAPÍTULO 4



### **AJUSTE DEL MODELO FASST A LA VEGETACIÓN NATIVA DE LA ZMCM**

## Modelo FASST y vegetación nativa en la ZMCM

La vegetación considerada más adecuada para la ZMCM es de manera general la que tiene bajos requerimientos de mantenimiento y de riego, así como resistencia a los niveles de radiación, altitud, régimen pluvial y vientos.

De acuerdo con el análisis presentado en el apartado 1.3 del presente trabajo, la vegetación con menores requerimientos, con mayor capacidad de sobrevivencia y con capacidad de formar cubiertas densas, son las mostradas en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Especies sobrevivientes que forman cubiertas densas y altos IAF y factor de cobertura.

**Sobrevivencia:** A = vivas; L = latentes; R = revividas (anuales con brotes viables)

**Estatus migratorio:** n = nativa; e = exótica a = naturalizada

**Ciclo de vida:** p = perene; a = anual; a/p = anual y perene.

<i>Species</i>	sobrevivencia	Estatus migratorio	Ciclo de vida
<i>Sedum adolphii</i> Hamet.	A	n	p
<i>Sedum liebmannianum</i> Hemsl.	A	n	p
<i>Sedum moranense</i> H.B.K.	A	n	p
<i>Sedum rubrotinctum</i> R.T. Clausen	A	n	p

Fuente (Tovar, 2013).

Para el presente trabajo se toma como base un arreglo integrado por cuatro diferentes especies: *Sedum rubrotinctum*, *Sedum adolphii*, *Sedum moranense* y *Sedum griseum*. Aun cuando en la tabla antes mostrada no se encuentra *Sedum griseum*, se determinó integrar en este estudio por recomendación de viveristas que reportaron una alta resistencia de esta especie, tanto en campo como en condiciones de jardinería (Figura 4.1). La vegetación utilizada presenta un metabolismo CAM.



Figura 4.1. Arreglo de vegetación altamente eficiente para la ZMCM

### ***Resistencia estomática en la vegetación CAM***

La resistencia estomática se refiere a la oposición que ofrecen los estomas al flujo de una masa de agua, por unidad de área de las hojas de la planta y por unidad de tiempo. Su unidad de medida es  $s\ m^{-1}$ . A su vez, la resistencia ( $r_s$ ) es el inverso de la conductancia estomática ( $g$ ). Se puede decir igualmente que resistencia es la oposición a la cantidad de agua transpirada, por lo que mayor resistencia implica menor transpiración.

La transpiración es un proceso de evaporación de agua, desde un tejido vivo hacia el exterior. Tal fenómeno puede tener lugar en cualquier parte del vegetal que esté expuesta al aire, pero son las hojas los órganos que lo realizan con mayor intensidad.

La transpiración en las plantas se da por tres vías:

- a) Transpiración estomática: por los estomas;
- b) Cuticular: a través de la cutícula; y
- c) Lenticilar: por vía de las lenticelas.

En la mayoría de las plantas la transpiración ocurre en un 90% a través de los estomas y en casi 10% por vía combinada de la cutícula y lenticelas. Sin embargo, en las plantas xerófitas, al tener una cutícula muy gruesa y cubierta de ceras para evitar la pérdida de agua, la transpiración cuticular no supera el 1% del total (Lallana, 2003). Por lo que para el presente trabajo se considera despreciable, asumiendo que el total de la transpiración se da a través de los estomas.

La característica más importante que se debe tener en cuenta acerca de la vegetación CAM, y que ya líneas arriba mencionamos, es que su período de transpiración se inhibe durante el día. Transpira sobre todo en ausencia de la luz (radiación). Las células encargadas de “abrir y cerrar” el estoma y con esto posibilitando el paso de agua, se llaman células oclusoras, que se muestran en la Figura 4.2.

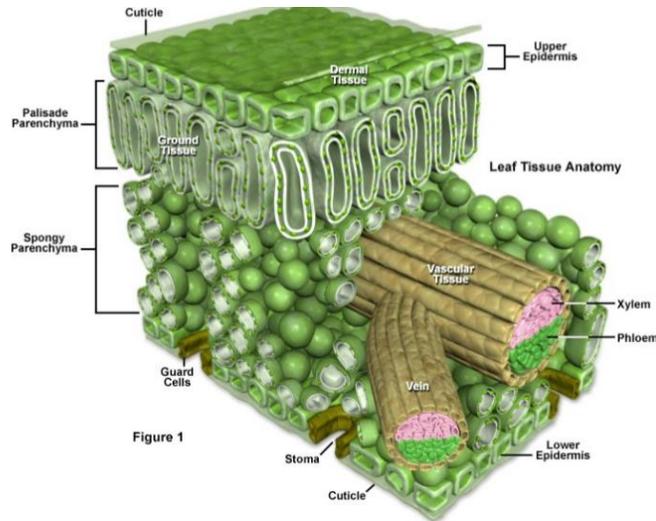


Figura 4.2. corte esquemático de una hoja. Los poros inferiores son estomas y en verde oscuro las células ocluidoras. Fuente: Bonifacio (2017).

Las células ocluidoras en el caso de la vegetación CAM, son sensibles sobre todo a la presencia de luz, que indica a la planta la presencia de radiación y con esto del período diurno, en que el déficit de presión de vapor es más alto. Y por esto ante la presencia de luz las células ocluidoras cierran el estoma, por lo que la relación entre radiación y resistencia estomática es inversa que la que prevalece en plantas C<sub>3</sub>, y también inversa a la que se mostró en la Tabla 3.3, para el modelo de cálculo FASST (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Relación de radiación de onda corta con transpiración De la vegetación CAM

$$\begin{array}{r}
 \hline
 + I_s \downarrow = -T_r \\
 \hline
 - I_s \downarrow = +T_r \\
 \hline
 \end{array}$$

Una vez que el estoma se encuentra abierto, las condiciones del medio favorecen o limitan la cantidad de agua que la planta cede al exterior. Cada especie tiene diferentes tasas de transpiración. Para algunas plantas conocidas, Nobel (2011) presente la tasa de transpiración medida, y sobre todo resaltamos: las horas en que sucede la transpiración (Figura 4.3)

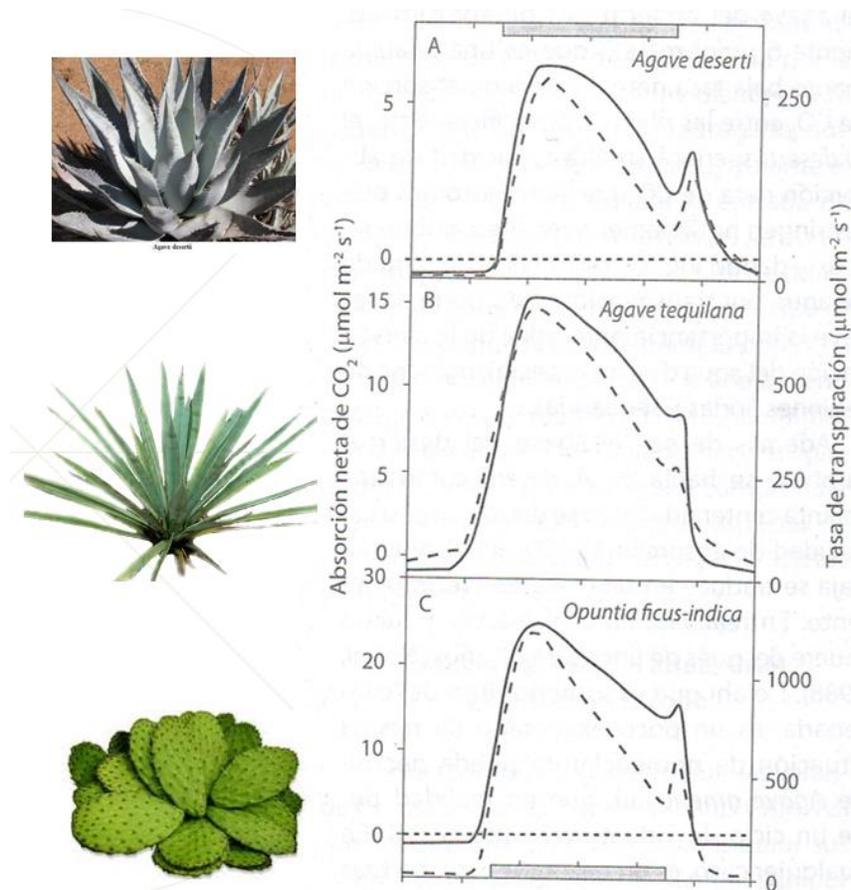


Figura 4.2. Tasas de transpiración. para diferentes especies CAM. La línea oscura en la base de la gráfica indica el período nocturno. Fuente: Nobel (2011).

Las consideraciones de este apartado definen la importancia de establecer en qué momentos sucede la transpiración en el arreglo de vegetación que se usa en la medición. Por lo que se llevó a cabo la medición de la transpiración de muestras de la vegetación utilizada. Datos que se presentarán en el apartado de medición de datos del modelo.

### **Resistencia estomática y radiación**

Al haber quedado establecido que la vegetación utilizada no transpira en presencia de la radiación solar. Se proponen en adelante los ajustes al modelo.

Con ánimo de tratar con claridad el ajuste del modelo de cálculo, y a riesgo de ser reiterativo, se presentarán abajo nuevamente las ecuaciones relacionadas con la resistencia estomática, debido a que es en estos valores donde radica la adecuación de los parámetros que describen el flujo de calor latente en este modelo matemático.

Retomamos la importancia de integrar la participación de la resistencia estomática.

Como antes se dijo, la resistencia de la vegetación al flujo de vapor de agua, se integra en un factor  $r''$  que se define como un factor de humedad de la hoja.

$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \quad (13)$$

En la propuesta de ajuste del modelo se mantiene este factor  $r''$ , que es importante porque se convierte en un coeficiente que integra la resistencia estomática y la resistencia aerodinámica que dentro de la ecuación general de flujo de calor latente determinará en qué proporción la resistencia de la hoja afectará el flujo de calor latente.

$$L_f = l_f L A I \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (14)$$

Para la obtención de este factor  $r''$ , se debe definir entonces  $r_a$  y  $r_s$ . Para el modelo FASST,  $r_s$  se define como sigue:

$$r_s = \frac{r_{s,min}}{LAI} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (10)$$

Donde,  $r_{s,min}$  es la resistencia estomática mínima. La resistencia estomática real en cualquier momento es proporcional a esta resistencia mínima e inversamente proporcional al índice  $LAI$ . La resistencia estomática se modifica adicionalmente mediante factores de multiplicación fraccionaria que se relacionan con la radiación solar entrante y la humedad atmosférica. Como se encuentra en F y K (2004) las inversas de los factores multiplicadores  $f_1$ ,  $f_2$  y  $f_3$  están dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_1} &= \min \left[ 1, \frac{0.004 * I_s^\downarrow + 0.005}{0.81 * (0.004 * I_s^\downarrow + 1)} \right] \\ \frac{1}{f_2} &= \begin{cases} 0 & \text{when } \theta_r > \bar{\theta} \\ \frac{\bar{\theta} - \theta_r}{\theta_{max} - \theta_r} & \text{when } \theta_r \leq \bar{\theta} \leq \theta_{max} \end{cases} \\ \frac{1}{f_3} &= \exp[-g_d (e_{f,sat} - e_a)] \end{aligned} \quad (11)$$

Los factores  $f_2$ ,  $f_3$  y demás valores involucrados han quedado determinados en la explicación del modelo FASST.

Ya antes se estableció que para este modelo la primera consideración que hay que tener y ajustar es que durante el período del día que existe presencia de radiación (luz).

## AJUSTES AL MODELO FASST

El ajuste del modelo que se propone, se enfoca en tres consideraciones generales:

### **Consideración 4.1**

La determinación de la cantidad de agua perdida por las plantas a través de los estomas depende de la hora del día en que se presenta. Debido a que la presencia o ausencia de radiación y la luz que ésta conlleva, condiciona la actividad estomática.

### **Consideración 4.2**

De manera general durante el día, en presencia de luz la vegetación utilizada en este modelo no transpira, por lo que en este momento se presenta

### **Consideración 4.3**

La transpiración de la planta durante la noche y las madrugadas se debe establecer con un modelo independiente de la luz.

### **Período diurno**

En la ecuación que despeja el valor de  $f_1$ , se define la proporción en que la radiación afectará la resistencia estomática en el momento de cálculo:

$$r_s = \frac{r_{s,\min}}{LAI} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$$

Donde resistencia mínima implica transpiración máxima, dividida entre el área de hojas por unidad de terreno. Igualmente, antes se comentó que en la medida que aumenta la radiación el valor de  $f_1$  se aproxima al valor 1, es decir a la máxima transpiración.

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[ 1, \frac{0.004 * I_s^\downarrow + 0.005}{0.81 * (0.004 * I_s^\downarrow + 1)} \right]$$



Para nuestra vegetación, en el período diurno, cuando hay presencia de radiación, el valor de la resistencia deberá ser el de la máxima, es decir mínima transpiración. Sin embargo en la medida que aumenta la radiación, para el modelo actual la resistencia mínima se aproxima a 1, por lo que se presentaría la transpiración máxima. Por ejemplo, para una radiación de 500 W/m<sup>2</sup>:

$$r_s = \frac{r_{s,\min}}{LAI} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$$

$$\frac{1}{f_1} = \min \left[ 1, \frac{0.004 * I_s^\downarrow + 0.005}{0.81 * (0.004 * I_s^\downarrow + 1)} \right] \quad \frac{2.005}{2.43} = 0.82$$

Es preciso comentar que cuando la radiación es cero, el modelo efectivamente tomaría el valor de 1 para  $f_1$ , por lo que la resistencia sería igual a la resistencia mínima dividida entre LAI.

De esta revisión podemos definir que El modelo no describe el comportamiento de nuestra vegetación ante la exposición a la radiación, pero sí describe la resistencia ante la ausencia de radiación.

De acuerdo con las mediciones hechas en campo, la gráfica de transpiración del arreglo medido tuvo el desempeño mostrado en la Figura 4.3.

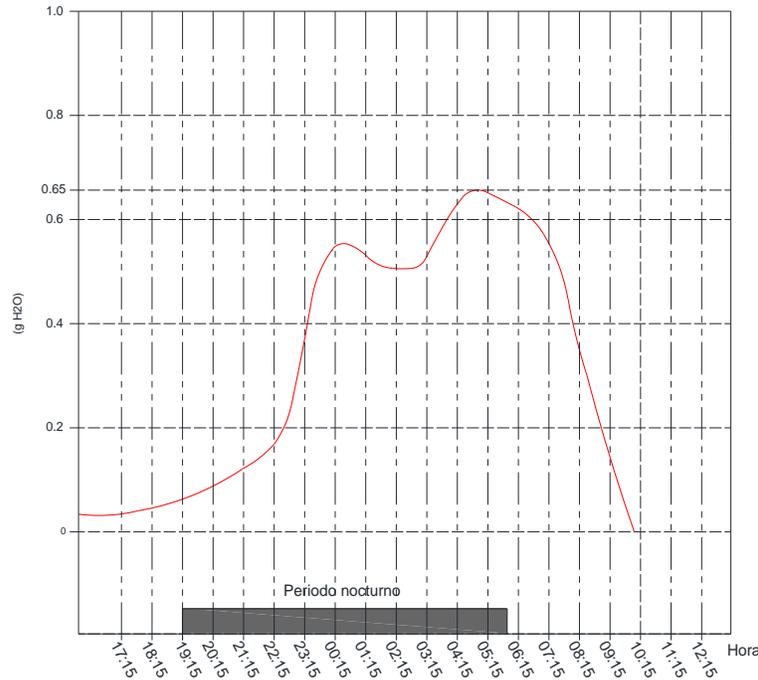


Figura 4.3. Transpiración del arreglo medido en sitio

Tomando en cuenta que la transpiración máxima es la resistencia mínima, en la gráfica de transpiración arriba mostrada, a cada hora corresponde un área bajo la curva que es a la vez el porcentaje horario de agua transpirada.

Con base en estos datos, se propone la sustitución de  $f_1$  del modelo FASST, por un  $f_1$  empírico para cada una de las 9 horas en que hubo transpiración, como lo muestra la tabla 4.1. A cada hora le corresponde un factor, por el que se multiplicará el agua transpirada:

Tabla 4.1. Factores horarios para afectar el valor de  $r_{\min}$

Período	Hora de transpiración	Factor	Factor horario/3600
Pm	7	0.0143	3.97222E-06
Pm	8	0.0184	5.11111E-06
Pm	9	0.025	6.94444E-06
Pm	10	0.045	0.0000125
Pm	11	0.08	2.22222E-05
Pm	12	0.092	2.55556E-05
Am	1	0.088	2.44444E-05
Am	2	0.086	2.38889E-05
Am	3	0.0962	2.67222E-05
Am	4	0.108	0.00003
Am	5	0.106	2.94444E-05
Am	6	0.098	2.72222E-05
Am	7	0.076	2.11111E-05
Am	8	0.043	1.19444E-05
Am	9	0.0102	2.83333E-06

### **Resolución 1. Período diurno**

1.1. La resistencia estomática para el período diurno no se tomará en cuenta únicamente durante las 9 horas en que el arreglo transpira de 7 pm a 9 am.

1.2. Durante el resto del día la transpiración se considera como cero.

### **Resolución 2. Período nocturno**

El flujo de calor latente en el follaje, depende en dos etapas de la aportación de la evaporación, primero como transpiración y posteriormente de la transpiración que propicia el factor de humedad de la superficie ( $r''$ ). Se encuentra presente en la ecuación de flujo de calor latente (ecuación 14), así como en la estimación de la proporción de mezcla del aire dentro del follaje ( $q_{af}$ ) en la ecuación 15:

$$q_{af} = \frac{[(1 - \sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_{f,sat}r'' + 0.1q_{g,sat}M_g)]}{1 - \sigma_f[0.6(1 - r'') + 0.1(1 - M_g)]} \quad (15)$$

En el período nocturno, se conservan las ecuaciones del modelo FASST sin cambios, pero con la adecuada estimación del coeficiente  $r''$ , que deberá describir el comportamiento típico de la resistencia sin presencia de luz solar.

### Estimación de $r_s$ sin presencia de radiación

Kramer (1974), en su publicación llamada "Relaciones hídricas de suelos y plantas", establece que el coeficiente de transpiración depende de un suministro de energía para vaporizar el agua; de la presión de vapor del agua o gradiente de concentración, que constituye la fuerza impulsora; y de las resistencias a la difusión en el camino del vapor. Lo que se puede ver esquematizado en la Figura 4.4, y en el esquema simplificado de la figura 4.5.

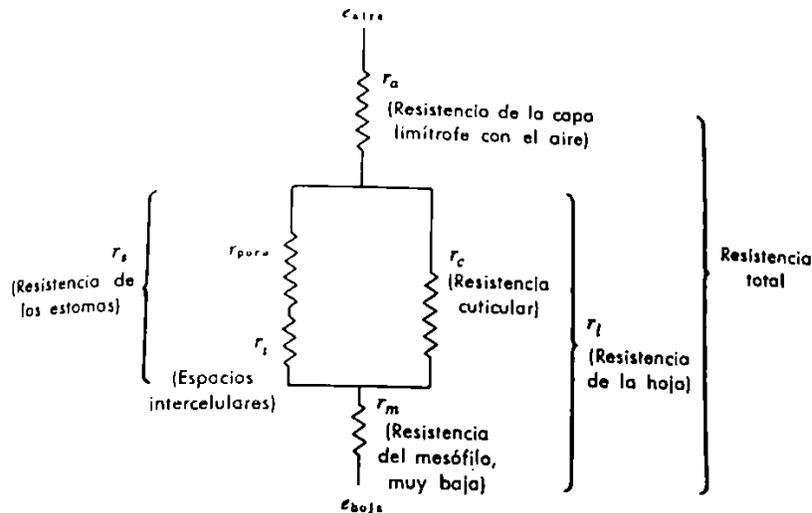


Figura 4.4. Diagrama de las resistencias a la difusión de vapor de agua en una hoja. La transpiración es proporcional a la inclinación del gradiente de vapor de agua  $e_{\text{hoja}}$  a  $e_{\text{aire}}$ , e inversamente proporcional al cambio de valor de las resistencias expresadas en segundos por centímetro. Fuente: Kramer (1974).

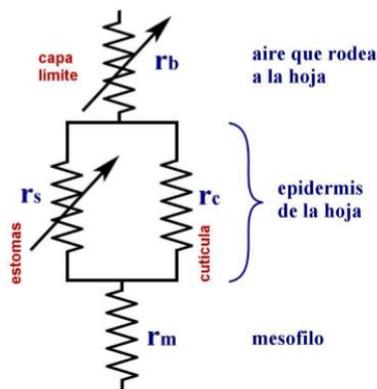


Figura 4.5. Diagrama de resistencia estomática al flujo de vapor, basado en un diagrama de resistencia eléctrica. En éste  $r_m$  representa resistencia del mesófilo;  $r_s$  resistencia estomática;  $r_c$  resistencia de la cutícula y  $r_b$  resistencia aerodinámica de la capa límite. Fuente: UPVGENETICA (2011).

Para determinar el intercambio de vapor de agua de la planta con el medio, se debe partir de mediciones reales, monitoreadas en campo, y preferentemente bajo las condiciones en

las que la vegetación trabajará. En el caso que nos ocupa, en una azotea verde. Las mediciones mencionadas permitirán determinar: 1- Cuál es el monto máximo de vapor de agua transpirado; 2- En qué período del día se presenta la transpiración; y 3- Durante cuánto tiempo se da transpiración. Conocer estas condiciones hará posible determinar posteriormente el calor latente cedido al ambiente y así el balance térmico en la capa del follaje.

### ***Determinación del vapor de agua transpirado***

Más adelante, en el Capítulo 5 se explica la manera en que se obtuvo la tasa de transpiración, por método de lisímetro. En este momento basta con comentar que se optó por este método, debido a que es una manera desagregada y práctica, de bajo presupuesto para obtener medidas del agua perdida por efecto de la transpiración de la planta. Existen otro tipo de aparatos instrumentados con sensores que permiten la medición de estos parámetros, pero de un costo que sale del alcance de este trabajo por el momento.

### ***Transpiración máxima – resistencia mínima***

Mediante el monitoreo antes descrito se estableció una tasa de transpiración y una transpiración máxima.

Debido a que el modelo base de los cálculos es el modelo FASST, los diferentes valores de la resistencia estomática se obtienen a partir del valor de la resistencia mínima, y sin perder de vista que esto debe ser descrito sin presencia de radiación (luz). Por lo que se propone a continuación un modelo de estimación de la resistencia estomática en función de una transpiración conocida.

El modelo propuesto se basa en la ecuación de Penman - Monteith, que es una de las ecuaciones más utilizadas para el cálculo de la evaporación:

$$E = g_w \Delta c_w \quad (34)$$

Donde E es la transpiración que se requiere determinar;  $g_w$  es la conductancia total; y  $\Delta c_w$  es la diferencia de concentración de vapor de agua entre la superficie y el aire del medio.

Debido a que la fuerza impulsora de la evaporación es la diferencia de presión de vapor, y basado en la ecuación 37, Jones (1992) establece que la expresión  $\Delta c_w$  (diferencia de concentración de vapor de agua entre la superficie y el volumen de aire) puede ser sustituida por:

$$\Delta c_w \text{ by } (\rho_a M_w / M_A P) \Delta e \quad (35)$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad del aire;  $M_A$  es el peso molecular efectivo para el aire seco;  $M_w$  el peso molecular del agua;  $\Delta e$  es la diferencia de presión de vapor saturado. De esta manera, la evaporación quedará definida por:

$$E = g_w(0.622 \rho_a/P)(e_{s(T_s)} - e_a) \quad (36)$$

Donde  $g_w$  es la conductancia total de los estomas y la capa que rodea la hoja; la expresión  $(0.622\rho_a/P)$  de acuerdo con Byers, (1959), es un factor de conversión para cambiar de  $\Delta c$  a  $\Delta e$ ;  $e_{s(T_s)}$  es la presión de vapor saturado a la temperatura de la superficie;  $e_a$  presión de vapor del aire.

De acuerdo con Jones (1992, pp 110) la ecuación 37 que define la masa de concentración de vapor de agua, permite simplificar la expresión  $M_w/M_A$ , en la que debido a que siendo  $M_A$  el peso molecular del aire seco ( $\approx 29$ ), entonces  $M_w/M_A$  es = 0.622 que fue comentada antes en la ecuación 36.

$$\rho_a(M_w/M_A)[e/(P - e)] \simeq \rho_a(M_w/M_A)(e/P) \quad (37)$$



## Propuesta de modificación al modelo FASST

### **Modelo de transpiración en función de resistencias, sin radiación**

Kramer (1974) integra la ecuación que se toma como base para el presente trabajo, tomando en cuenta que la evaporación difiere de la transpiración en la resistencia que ofrecen las hojas -a través de sus mecanismos ya mencionados- al flujo de vapor de agua. Aquí se incluye también el diferencial de presión de vapor que se da entre la hoja y el aire, dividido entre la resistencia total de la planta a ceder el agua, que es la suma de la resistencia estomática  $r_s$ , más la resistencia aerodinámica  $r_a$ :

$$T = \frac{0.622 \rho_a}{P} * \frac{e_h - e_a}{r_h + r_a} \quad (38)$$

De acuerdo con la ecuación 35 arriba descrita, y a la simplificación de la expresión  $M_w/M_A = 0.622$  de la ecuación 37, se utiliza la expresión  $\Delta c$  equivalente a la ecuación 39:

$$\Delta c = \frac{0.622 \rho_a}{P} \Delta e \quad (39)$$

Para este caso  $r_h + r_a$  se integran como un valor  $r_t$  de resistencia total. La transpiración  $T$  ( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), sin presencia de radiación, queda definida como sigue:

$$T = \frac{\Delta c}{r_t} \quad (40)$$

Por lo tanto el valor de la resistencia de la hoja, es decir la resistencia estomática será:

$$r_h = \frac{\Delta c}{T} - r_a \quad (41)$$

Debemos recordar que ya contamos con el valor de  $r_a$ , que se toma directamente del modelo FASST, sin modificaciones (ecuación 12).

Una vez que se ha obtenido el valor de  $r_h$ , éste será el valor que sustituye el valor de  $r_s$  de la ecuación 10. Dicho de otra manera, la ecuación 10 se cancela y  $r_s$  toma el valor de  $r_h$  obtenido en la ecuación propuesta. Se sigue el procedimiento del modelo FASST y se calcula el valor de  $r_a$ :

$$r_a = \frac{1}{c_f W_{af}} \quad (12)$$

En la ecuación 12, la magnitud del viento dentro del follaje  $W_{af}$ , se determina en la ecuación 5.

$$W_{af} = 0.83\sigma_f W \sqrt{C_{hn}^f} + (1 - \sigma_f)W \quad (5)$$

Aquí  $W$  es el mayor entre 2,0 m/s o la velocidad real del viento por encima de la copa (Hughes et al.) Y  $C_{hn}^f$  es el coeficiente de transferencia en condiciones de estabilidad atmosférica casi neutras:

$$C_{hn}^f = K_v^2 \cdot \left( \ln \left( \frac{Z_a - Z_d}{Z_o^f} \right) \right)^{-2} \quad (6)$$

Donde  $K_v$  es la constante de von Karman,  $Z_a$  es la altura del instrumento,  $Z_d$  es la altura de desplazamiento cero en metros (altura sobre el suelo en la que la velocidad del viento es efectivamente cero) y  $Z_o^f$  es la escala de longitud de rugosidad del follaje (m). Las formulaciones para altura de desplazamiento nulo, longitud de rugosidad se basan en Balick (1981):

$$Z_d = 0.701Z_f^{0.979} \quad (7)$$

$$Z_o = 0.131Z_f^{0.997} \quad (8)$$

Por último, el coeficiente de transferencia en masa definido por Deardorff (1978) viene dado por:

$$C_f = 0.01 * \left( 1 + \frac{0.3(m/s)}{W_{af}(m/s)} \right) \quad (9)$$

Con las ecuaciones arriba descritas se puede establecer la cantidad de agua transpirada por la planta sin presencia de radiación, y para el presente trabajo, el principal uso que se hace de este modelo propuesto es que se puede despejar y obtener el valor de  $r_h$ , con la ecuación 41.

Ya determinado el despeje del valor de  $r_h$ , debemos de tomar en cuenta que el valor de  $T$ , es un valor ya conocido y que se alimentará de las mediciones de la transpiración real monitoreada en nuestro caso, de las plantas utilizadas en la experimentación. La transpiración se obtiene en gramos, mediante el cálculo del área bajo la curva horaria, por lo que el valor obtenido de manera horaria y el valor a ser alimentado en el modelo tendrá antes de ser dividido entre 3600, para obtener su valor por segundo.

Una vez obtenido el valor de  $r_h$ , será utilizado para sustituir el valor  $r_s$  de la ecuación 10. Posteriormente  $r_h$ , ahora  $r_s$ , se integra a la ecuación 13.

La resistencia de la vegetación al flujo de vapor de agua, se integra en un factor  $r''$  que se define como un factor de humedad de la hoja.

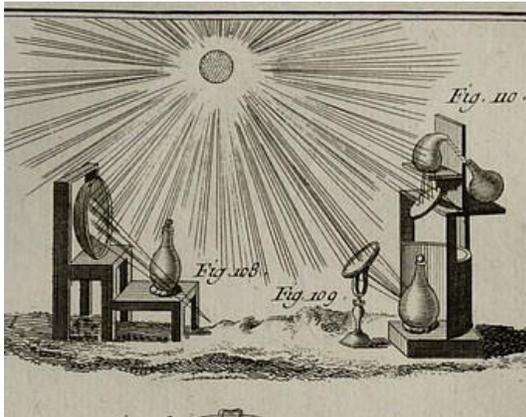
$$r'' = \frac{r_a}{r_a + r_s} \quad (13)$$

En la propuesta de ajuste del modelo se mantiene este factor  $r''$ , que es importante porque se convierte en un coeficiente que integra la resistencia estomática y la resistencia aerodinámica que dentro de la ecuación general de flujo de calor latente determinará en qué proporción la resistencia de la hoja afectará el flujo de calor latente.

$$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (14)$$

De esta manera se tiene ya integrado a las ecuaciones del modelo FASST una estimación de la resistencia estomática sin presencia de radiación, válido para los período en que la vegetación CAMM transpira sin presencia de luz.

# CAPÍTULO 5



## PRUEBAS DE CAMPO E INSTRUMENTOS DE LABORATORIO PARA MEDICIÓN TÉRMICA

Se llevaron a cabo diferentes mediciones y desarrollo de instrumentos con la finalidad de obtener los parámetros de alimentación y cálculo de ecuaciones del modelo térmico.

En sentido literal, la gran mayoría de experimentos y pruebas se diseñaron en función de los parámetros que se tuvieron que conocer y alimentar a las ecuaciones del modelo FASST, y al modelo adecuado de FASST.

## **Calibración de simulador de radiación para obtención de valores térmicos del modelo matemático**

### ***Luz PAR***

En la UAM Azcapotzalco se cuenta con un simulador de radiación solar utilizado en la evaluación de equipos y sistemas solares como estufas y concentradores de calor de proceso, conformado actualmente por un arreglo de seis lámparas infrarrojas soportadas por una estructura de acero. El simulador se encuentra ya tipificado para aportar los niveles de radiación promedio con los que se evalúan los equipos solares estudiados.

Como parte del desarrollo de tres tesis en Diseño Bioclimático, dos de nivel maestría y una de doctorado, se estudian las propiedades termofísicas de diferentes arreglos de vegetación, para posteriormente determinar de manera cuantitativa la aportación de las cubiertas verdes al desempeño térmico - energético de las edificaciones. Particularmente, en el simulador de radiación solar se evaluará la conductancia promedio de tres diferentes arreglos de vegetación.

### ***Medición térmica en techos verdes***

El estudio de las propiedades térmicas de los techos verdes en ambiente controlado se ha realizado de diferentes maneras de acuerdo a los objetivos de cada estudio. En el Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje de la UNAM, Ortega y Morales (2011) han desarrollado mediciones de conductancia térmica en muestras paramétricas de techos verdes usando parrillas de resistencia eléctrica que aportan calor radiante a las muestras. Asimismo, Ortega y Carbajal (2008) determinan las propiedades termofísicas de las componentes inertes del arreglo constructivo mediante el uso de un conductivímetro.

La transferencia térmica a través de un techo verde se determina por la interacción compleja de los elementos del clima con la vegetación y sus demás componentes (Figura 5.1). Para conocer de manera detallada el comportamiento de algunos arreglos de vegetación ante condiciones de clima específicas, Sailor y Spolek (2008) han desarrollado un simulador de condiciones climáticas controladas que incluye radiación, temperatura, humedad relativa, lluvia y viento (Figura 5.2).

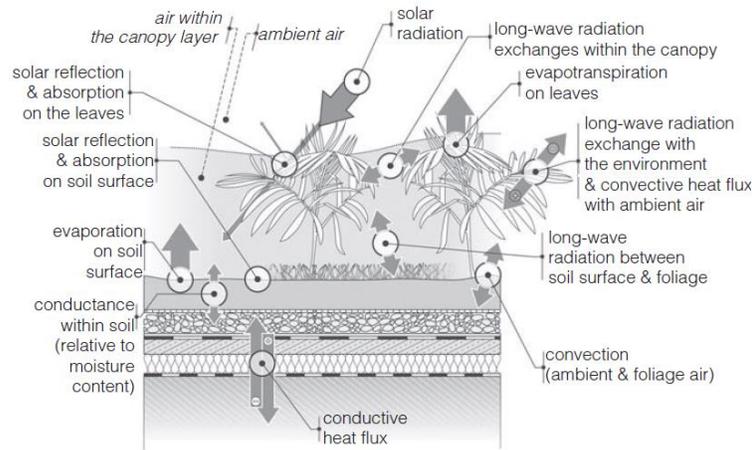


Figura 5.1. Esquema general del intercambio de calor en un techo verde

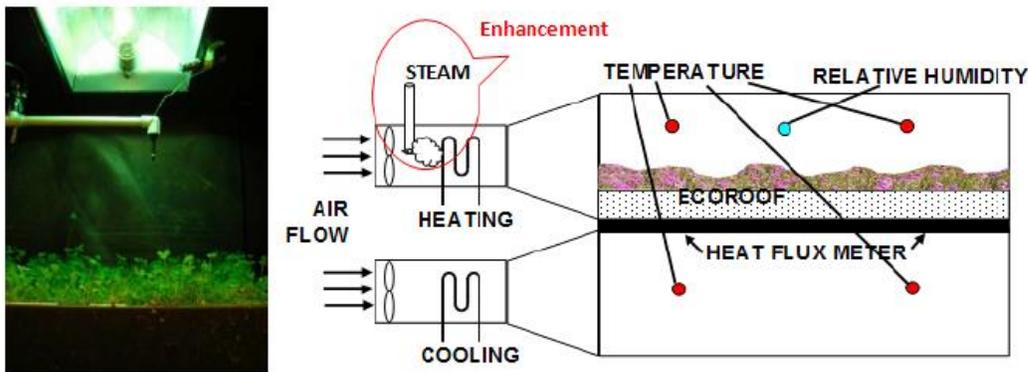


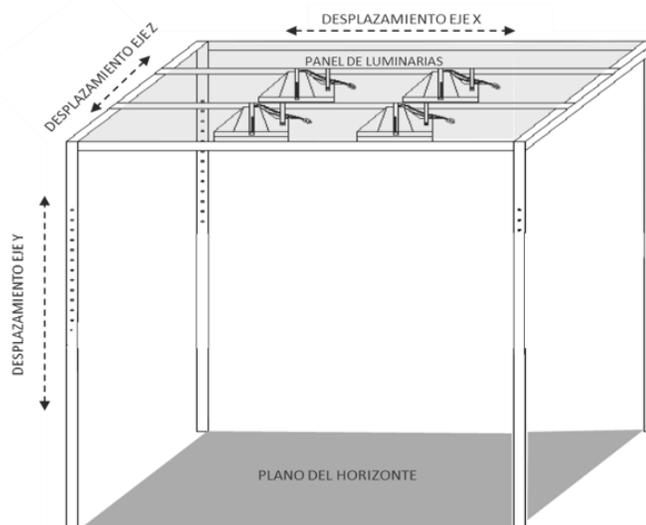
Figure 5.2. Green Roof Test Facility apparatus. Test section in operation (on left); and schematic with proposed enhancement to allow humidity control with direct steam injection.

Uno de los mecanismos de transferencia de calor que más influyen en un techo verde es la avapotranspiración.

### **Simulador solar de la UAM Azcapotzalco**

El simulador de radiación solar diseñado en la UAM-Azcapotzalco, es un prototipo simple y de bajo costo con formato pequeño para pruebas de colectores bajo condiciones controladas y donde el proceso de medición no requiere de mucho tiempo.

Este simulador costa de 1400 W de cuatro lámparas tipo reflectores infrarrojos R-40 marca GE de uso industrial de 375watts. La disposición de las lámparas se muestra en la figura 5.3. Cada lámpara tiene grados de libertad para rotar y ajustar el ángulo de incidencia sobre plano horizontal. Y estas se fijan en dos barras paralelas para ajustar la separación entre ellas.



**Figura 5.3. Esquema Estructura del Simulador de Radiación Solar UAM-Azc.**

Dicho simulador es fijo con estructura de soporte con perfil tubular con dimensiones de 1.70m x 1.00 m, con una altura máxima de 2 m, diseñado con movimientos en sus tres ejes (x, y, z) para ajustes manuales. Donde la intensidad es controlada al alejar o acercar el panel de las lámparas hacia el plano horizontal donde se colocarán las muestras o equipos a evaluar.

### ***Luz par en la vegetación***

La luz juega un papel crítico en el adecuado establecimiento de plantas. Es importante contar con la calidad y la cantidad de luz adecuada de acuerdo con las especies que se menejen. Los niveles de luz insuficientes reducirán el peso global de plantas y presentarán síntomas de estrés, disminución de la densidad de los nódulos, hojas más pequeñas y en general un deterioro de su salud. Mientras que el exceso de luz puede dañar la planta a partir de la radiación térmica de infrarrojos o excesiva radiación ultravioleta extrema (INDAGROW, 2010).

La luz PAR (Photosynthetically Active Radiation), es la cantidad de radiación, dentro de un rango de longitudes de onda, que produce actividad fotosintética en una planta. El rango de las longitudes de onda está comprendido entre los 400 y los 700 nanómetros, que es similar al del espectro visible (Ciencia y Biología 2010).

La radiación que incide sobre la tierra es de diferentes longitudes de onda y características de partículas. Los rayos X, la radiación UV, la luz visible, la radiación IR, las ondas de radio o televisión y la radiación térmica son diferentes radiaciones electromagnéticas. Sólo una pequeña parte de las radiaciones electromagnéticas, denominada radiación visible o luz, es visible para el ojo humano. La radiación visible abarca longitudes de onda comprendidas

entre los 380 nm (color violeta) y los 780 nm (rojo lejano) y representa el espectro visible completo (Figura 5.4).

La planta percibe la luz de una manera distinta al ojo humano. La sensibilidad de las plantas a los colores oscila entre el 57 %, en el caso del componente azul de la luz, y el 100 %, en el caso del componente roja. Por ejemplo, la dominancia de luz roja (alrededor de 650 nm), apenas resulta visible para el ojo humano, sin embargo, es un segmento ante el que las plantas son especialmente sensibles y les permite gran actividad fotosintética (Hortilux, 2010).

Las unidades métricas de la RFA son los  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , y los micro Einsteins  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . La más utilizada es la primera de éstas.

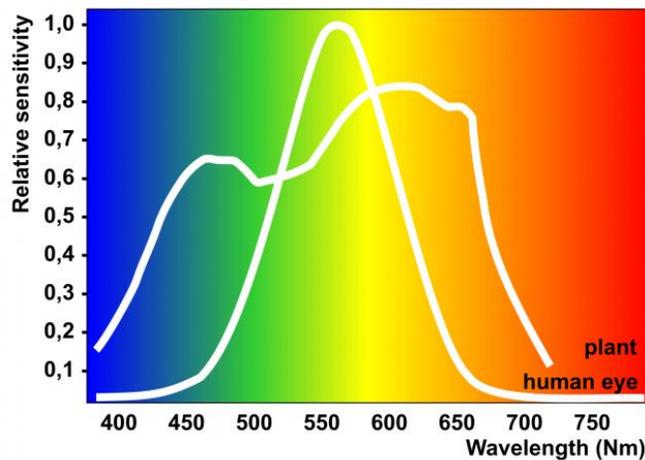


Figura 5.4. Longitudes de onda de la luz PAR  
Fuente: <http://www.indagro.com/IG/?q=node/53>

La radiación electromagnética contiene pequeñas partículas, llamadas fotones. Los fotones inciden sobre la planta para activar la clorofila de las hojas, generando –junto con otros agentes- el crecimiento de la planta. Una cantidad determinada de fotones activa el mismo número de moléculas de clorofila. Por lo que la cantidad exacta de fotones que dispongamos para la planta estará directamente relacionada con su crecimiento. La relación se puede expresar sencillamente de la siguiente manera 1 % de RFA = 1 % de crecimiento. Si tuviéramos como objetivo estimar el crecimiento de las plantas en relación a la luz quanta recibida, existen medidores capaces de realizar la conversión de unidades de fotones contra unidades de crecimiento, se llaman cuantómetros, y el número de fotones por  $\text{m}^2$  se expresa en  $\mu\text{mol}/\text{m}^2.\text{sec}$  (Hortilux, 2010) (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Niveles lumínicos entregados por diferentes tipos de lámpara en lumen

PPF (uMol/S)	Consumed Watts	Absolute Values			Total 400-700	uMol/S per Watt	Percentages		
		400-520	520-610	610-700			400-520	520-610	610-700
HPS Digital 1000 watts	1100	72	848	587	1506.3	1.37	5	56	39
HPS Digital 600 watts	660	47	560	387	994.0	1.51	5	56	39
M/H Digital 4000K 1000 watts	1100	302	738	192	1230.9	1.12	24	60	16
M/H Digital 4000K 400 watts	440	99	243	63	406.0	0.92	24	60	16
CMH Magnetic 4000K 400 watts	480	112	163	152	428	0.89	26	38	36
PLASMA 300 watts	300	103	107	90	300.0	1.00	34	36	30
T5-HO 6500K 54 watts	58	21	28	9	58.0	1.00	37	47	16
T5-HO 2800K 54 watts	58	7	30	21	58.0	1.00	12	52	37
LED-LG650 650 watts	650	258	91	821	1170.4	1.80	22	8	70
EFDL IG Pro-420 420 watts	425	174	122	237	533.0	1.25	33	23	44
EFDL IG-420/Pontoon 460 watts	460	174	122	303	599.0	1.30	29	20	51

Fuente: Inda-Gro (2010).

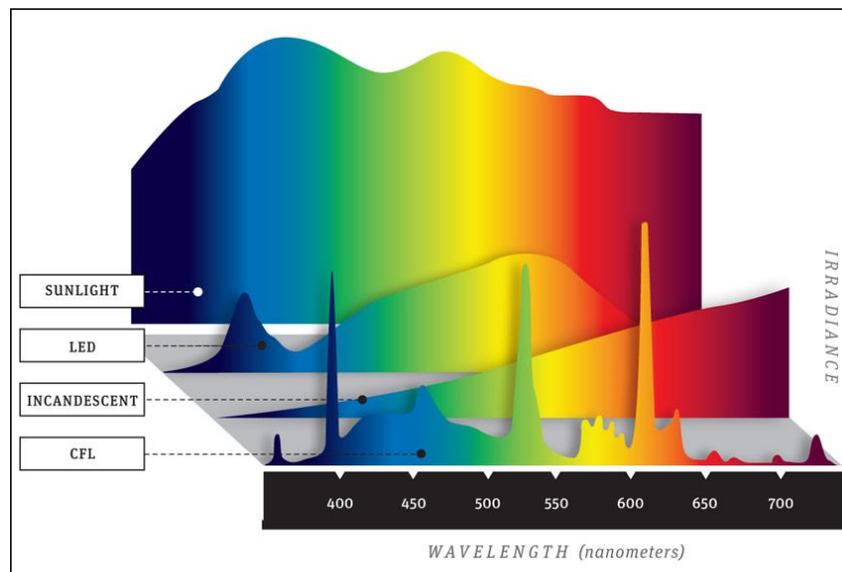


Figura: 5.5. Comparación de longitudes de onda por fuente luminosa, contra radiación solar.  
Fuente: Popular mechanics (2017).

## Intercambio de calor por efecto de la luz

Se explicará en adelante la implicación de la luz en el metabolismo de la vegetación.

### Evapotranspiración

La primera idea que se debe definir es que la vegetación transpira. Esta cesión de agua de las plantas al medio, en combinación con la evaporación del sustrato, propician pérdidas de calor latente por cambio de fase del agua. Este mecanismo de intercambio (siempre negativo) de calor se conoce como evapotranspiración.

La transpiración de las plantas se lleva a cabo a través de los estomas, encontrados principalmente (no únicamente) en el envés de las hojas. Cuando la planta transpira es porque el estoma está abierto, lo que indica a su vez que está intercambiando gases con el medio. Esta es una parte sustancial de la actividad metabólica que la hace ser un organismo autótrofo y producir crecimiento de masa.

Entre las plantas existen tres principales tipos de metabolismo: C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y CAM. La diferencia entre los tres tipos de metabolismo es la cantidad de carbono (3 o 4) que interviene en la captura y procesamiento para convertirlo después en “alimento” en el interior de las plantas. Hoy en día, poco más del 90% de las alrededor de 300 000 especies de plantas vasculares reconocidas, se valen del metabolismo fotosintético C<sub>3</sub>.

El metabolismo de las plantas llamado fotosíntesis, comienza su ruta de complejos intercambios bioquímicos en las hojas, que son consideradas el “aparato digestivo de las plantas”. En términos generales, la fotosíntesis es el proceso en el que las plantas convierten los fotones de la luz PAR y las moléculas de carbono capturadas de la atmósfera inmediata, en hidratos de carbono y oxígeno. La apertura de los estomas se regula en función de la luz PAR presente en el ambiente.

Es precisamente esta condición que Tovar-Jiménez (2011) plantea que una adecuada estimación de la conductancia promedio de una muestra de techo verde, en ambiente controlado se debe realizar reproduciendo las aportaciones térmicas, pero también cuánticas de la luz, porque es la presencia de luz PAR<sup>8</sup> la que abrirá y cerrará los estomas y activará o no, dependiendo del tipo de metabolismo, ocasionando o no, pérdidas de calor latente y cambiando el balance energético de este arreglo constructivo. También con base en este principio, las mediciones en ambiente controlado se realizarán con sustrato seco, para eliminar de las variables la pérdida evaporativa de calor.

### ***Luz par en el experimento***

Se han buscado diferentes opciones para dotar a las plantas de luz adecuada para el óptimo establecimiento y desarrollo de las plantas.

Se ha encontrado que el uso de sistemas de iluminación artificial en los procesos de cultivo permite a los productores extender los periodos de cultivo cuando se tienen condiciones limitadas de luz natural, como lo puede ser el periodo de invierno, y en algunos casos se ha logrado sustituir y aumentar la producción utilizando únicamente sistemas de iluminación artificial.

El objetivo de implementar sistemas de iluminación artificial en los cultivos de hortalizas o en la producción de otras especies en invernaderos es la de maximizar la producción de los mismos, minimizando gastos mantenimiento y aumento los periodos en los que se pueden cultivar las distintas especies, estos sistemas también nos permiten regular la temperatura de irrigación, minimizar el estrés de los cultivos y optimizar la fotosíntesis. (DHAAPU, 2016) Existen dos tipos de iluminación relacionadas al desarrollo a la vegetación: (Agrocomponentes, 2016)

---

<sup>8</sup> También llamada luz Quantum

- *Luz suplementaria: tiene como objetivo aumentar el tiempo de radiación incidente en el cultivo, esto hace que los pequeños cambios que provoca en la longitud del día o de la noche afecten beneficiosamente a la respuesta fisiológica de la vegetación.*
- *Luz fotoperiódica: su objetivo es aumentar la cantidad de luz en el cultivo lo que permite mantener las plantas vegetando.*

En el mercado existen distintos sistemas y lámparas que a su vez pertenecen a los dos tipos antes mencionados, los cuales brindan distintos beneficios a las distintas etapas de la producción del cultivo. Dentro de los más comunes en el mercado se encuentran los sistemas conformados por lámparas de alta presión de vapor de sodio, HPS, lámparas fluorescentes, de halogenuros metálicos y los diodos emisores de luz, LEDS.

Todos estos sistemas pueden ser complementados con balastos de alta eficiencia, equipos de regulación y estabilización de la línea eléctrica los cuales permiten no solo programar la intensidad de las luminarias, sino que también permiten establecer horarios de uso y estabilizan la red aumentando el rendimiento de los equipos, así como sistemas de sombreado los cuales se adecuan a la radiación de cada sitio. (CSL, 2016)

Algunas de las características generales de los sistemas antes mencionados son:

- *Lámparas de alta presión de vapor de sodio (HPS): son ideales para la floración y crecimiento de la vegetación, sin embargo, pierden intensidad y rendimiento después de algunos periodos de cosecha*
- *Halogenuros metálicos: ideales para la germinación, su desventaja es un periodo de vida útil más corto que las lámparas de alta presión de vapor de sodio, y si no se tiene cuidado en su manejo pueden fundirse rápidamente.*
- *Fluorescentes: no todas las lámparas fluorescentes son útiles para cultivar sin embargo pueden ser útiles en el mantenimiento de plantas madre*
- *Diodos emisores de luz (LEDS): son útiles en todos los ciclos de vida de la planta además de que generan un bajo consumo y un periodo de vida amplio, sin embargo, este tipo de sistemas tiende a tener un mayor costo (Agrocomponentes, S.L., 2016).*

Todos los sistemas ya mencionados se encuentran en una constante evolución, buscando mejorar su rendimiento y vida útil, las empresas están generando equipos cada vez más rentables para los productores.

Pero todos estos sistemas se rigen bajo los mismos tres principios en los que la luz afecta la vegetación; calidad, duración y cantidad.

Calidad: se refiere a la distribución del espectro de luz o al número relativo de fotones del azul(400-500nm), verde(500-600nm), rojo (600-700nm), y otras porciones del espectro de la luz emitida por alguna fuente ya sea natural (sol), o artificial.

Cada una de estas fracciones del espectro de la luz tiene distintas reacciones en la planta, mientras que la luz verde es en su mayoría reflejada por la planta el azul es utilizado principalmente para el crecimiento vegetativo, si nosotros ilumináramos únicamente de azul la vegetación tendría tonalidades más oscuras y una estatura baja. Por otro lado, la luz roja determina la elongación del tallo, así como la floración de la misma en especial en plantas con iluminación directa finalmente la combinación de estas dos promueve la floración.

Cada fuente de luz emite una combinación distinta del espectro por lo que cada una de estas puede tener efectos sumamente distintos en el desarrollo de la misma especie (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Promedio de longitud de onda y color para diferentes tipos de lámpara

Fuente de luz	azul	Verde	Rojo	Rojo lejano	promedio / rojo lejano	Rango radiante %
Cool white fluorescent lamps	21	52	24	2	10.7	22-27
High pressure sodium lamp	5	51	38	6	6	29-31
Incandescent lamp	2	13	34	52	0.7	6-7
Metal halide lamp	18	49	25	8	3	20-21
Sun (direct)	23	26	26	25	1	43

**Duración:** la duración se refiere al fotoperiodo o número de horas continuas en las que una planta recibe luz durante el día. En campo abierto esta cantidad puede variar dependiendo del lugar en que se encuentre la planta y la estación del año, ya que el ángulo en que la radiación llega a la planta está directamente relacionado con estos dos aspectos

Bajo esta premisa podemos dividir en tres grupos de vegetación, aquella que se desarrolla mejor estando expuesta a fotoperiodos de mayor duración, aquellas que se desarrollan mejor en periodos cortos y las neutrales, que son aquellas que no son dependientes del fotoperiodo para su desarrollo.

**Cantidad:** la cantidad se refiere al número de fotones capaces de generar fotosíntesis, y esta puede ser medida de dos maneras, la primera en la intensidad lumínica que es la cantidad de luz recibida por la planta en un momento y la otra es la luz integral recibida durante el día, DLI por sus siglas en inglés. La cantidad de luz puede ser cuantificada en distintas medias como son lux, watts,  $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . La relación es muy simple, a mayor cantidad de luz adecuada la planta puede recibir aumenta su capacidad de producir alimento a través de la fotosíntesis (HORT AMERICAS, 2016).

Basado en los tres puntos anteriores distintas empresas como Philips®, LUUM®S, Union Power Star, Compact Solutions Lighting, entre otras se han abocado, en conjunto con distintos grupos de investigadores, y productores, a desarrollar equipos más eficientes que sigan los principios ya expuestos, quizá el ejemplo hasta el momento más reconocido es el sistema utilizado en Green Sense Farms, en cooperación con Philips®

Green Sense Farms, es la granja vertical de interior más grande en los Estados Unidos con una producción aproximada de 1.5 millones de toneladas por año, se encuentra ubicada a 40 millas de Chicago en Portage, y utiliza un sistema de iluminación de alta eficiencia para cultivo desarrollado en conjunto con Philips® y Hort Americans. (Green Sense Farms, 2016).

El sistema utilizado es el Philips Greenpower Horticultural LED Grow Lights, el cual es un sistema integral de iluminación por LEDs, calibrado según los niveles de iluminación y el rango del espectro que las plantas a producir necesitan, además de brindar beneficios como un bajo consumo energético, así como una baja emisión de calor lo cual permite un mejor funcionamiento para espacios con climas acondicionados. Las lámparas de este sistema tienen una potencia que va dentro desde los 12 W hasta los 29 W y un flujo de fotones que

va desde los  $25 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$  hasta los  $62.5 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$  en las distintas combinaciones que conforman el espectro lumínico. (Philips, 2016).



Figura 5.6. Robert Colangelo & Carl Wenz (Philips, 2016)



Figura 5.7. Philips Greenpower Horticultural LED Grow Lights (Philips, 2016)

## Adecuación del simulador solar

En base a que el diseño del Simulador de radiación de UAM-Azc, no busca un simulador fiel del Sol, sino una alternativa viable para los mismos resultados que se obtienen con la radiación solar, en este caso elevar la temperatura de los captadores en el plano horizontal, a través de una fuente de luz, donde lo más importante es la emisión térmica sobre las muestras. Y para efecto de obtención en adquirir valores de radiación PAR será necesario calibrarlo en términos de semejanza al espectro de luz solar. De ser necesario se modificarán las luminarias existentes.

El trabajo es de tipo experimental realizando ajustes con diferentes tipos de luminarias. El objetivo de cada prueba se buscar que la distribución de la intensidad de la luz sea uniforme en toda la zona de medición y que los valores numéricos de intensidad de las lámparas propuestas sean los requeridos para obtención de radiación PAR.

La instrumentación para el desarrollo de las mediciones de radiación y radiación PAR, se utilizó HOBO- U30 Station con salida para sensor de radiación con reporte de unidades de  $\text{W}/\text{m}^2$  y sensor PAR con unidades de  $\mu\text{E}$  (Microeinstein). Las lecturas se tomaron a cada

minuto para estabilizar mediciones y eliminar en mayor medida las incertidumbres existentes (Figura 5.8).

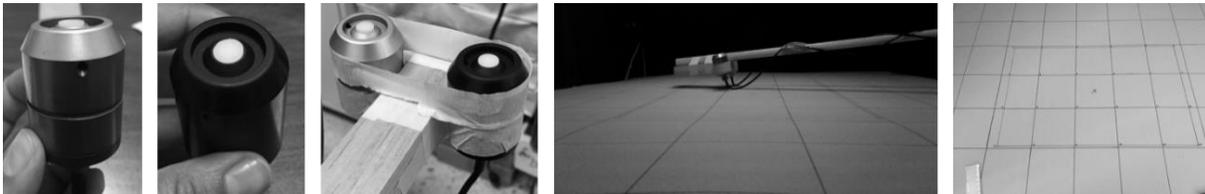


Figura 5.8. Sensores para mediciones de radiación solar y radiación PAR (extrema izquierda)

A fin de obtener un área de referencia con radiación uniforme, se trazó un área de medición de 90 x 60 cm con puntos a cada 10 cm, marcados con letras y números para su identificación. A si mismo se marcó un rectángulo centrado de 45 x 29 cm con 24 puntos de medición, buscando que el área de cobertura de las lámparas será suficiente para las pruebas con arreglos de vegetación.

Durante las pruebas se tomaron las lecturas arrojadas por los sensores en cada uno de los 24 puntos de la matriz, demostrando que radiación incidente sobre la superficie es lo más uniforme posible y buscando la proporción adecuada de PAR respecto a la radiación solar.

### **Calibración del simulador para obtención de luz PAR**

Prueba 1: Esta prueba se realizó a una separación entre luminarias de 80 cm en el eje x y 30 cm en el eje z. con una inclinación de la lámpara a 45°. Donde la única variable fue a una distancia entre el panel de luminarias y el plano de la matriz de puntos. Se realizaron mediciones a 20, 30 y 40cm de separación. Figura 3.

Observaciones: A medida que la altura de las lámparas se incrementa, el abanico de luz que emiten estas lámparas se va haciendo mayor de tal manera que se va cubriendo un área mayor de la superficie de matriz de puntos y por consiguiente la concentración de la radiación va disminuyendo, permitiendo que la radiación en la totalidad de la superficie sea mayormente uniforme. Sin embargo a menor altura los valores de radiación disminuyen. Cabe mencionar que a una separación de 30cm la radiación PAR respecto a la solar es del 50%. Los datos obtenidos en esta prueba se muestran en la tabla 5.3. Solo se consideraron los promedios.

Tabla 5.3. Prueba 1 con reflectors infrarrojos de 375 W

HOBO-U30	Unidades	Separación 40cm	Separación 30cm	Separación 20cm
Radiación Solar	W/m <sup>2</sup>	471.9	529.4	618.1
PAR	μE	206.2	253.7	288.7

Prueba 2: Para fines prácticos se modificó la medición, tomando en cuenta una única lámpara con una inclinación a 47°, a una distancia entre el panel de luminarias y el plano de

la matriz de puntos de 50cm de separación. Donde la variable fue el tipo de iluminación adicional. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Prueba con diferentes tipo de luminarias a 50cm de separación

HOBO-U30	U	Infrarroja	Infrarroja + Ultravioleta	Halógena 500 W	Led	Fluorescente	Infrarroja + Halógena	Fluorescente + Halógena
Radiación Solar	W/m <sup>2</sup>	294	289	273	16	69	395	310
PAR	μE	133	148	183	46.2	73	201	196

Observaciones: por medio de una única lámpara, el flujo obtenido con una lámpara halógena se obtiene mejores resultados sobre los valores esperados.

Prueba 3: Se consideró una única lámpara halógena de 500 W con una inclinación a 45°, a una distancia de 85 cm de separación; combinada con un panel lámparas fluorescentes de 27 W de luz fría y calidad colocadas paralelamente al plano de la matriz de puntos. Y otra muestra con el panel a 90° a una distancia de 30cm respecto al plano de matriz de puntos y a 50 cm del centro. Donde la variable fue la combinación de lámparas fluorescentes como iluminación adicional. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Prueba con lámpara halógena con combinación de lámparas fluorescentes

HOBO-U30	Unidades	Halógena + 1 Fluorescente	Halógena + 2 Fluorescentes	Halógena + 3 Fluorescentes	Halógena + 4 Fluorescentes	Halógena + 4 fluorescentes en vertical
Radiación Solar	W/m <sup>2</sup>	345.6	309	314	306.9	108
PAR	μE	186.2	196.2	203	206.2	218

Observaciones: se obtiene mejores resultados sobre los valores esperados, con una lámpara halógena más cuatro fluorescentes siempre y cuando la disposición de las lámparas sea vertical a 90° respecto a la matriz de puntos a una distancia de 25cm del centro.

### Resultados

En base a la pruebas anteriores se determinó utilizar en vez de reflectores infrarrojos de 375 W como lo propone actualmente el simulador, cambiarlas por lámparas halógenas de 500 W con una inclinación a 27°, a una distancia de 112 cm de separación de la matriz de puntos; combinada con un panel de cuatro lámparas fluorescentes de 27 W de luz fría y calidad a 90° o en disposición vertical respecto a la matriz de puntos con una separación de 30 cm y 20 cm del centro de la matriz. A continuación se muestra el resultado que se obtuvo en tabla 5.6.

Tabla 5.6. Prueba con lámpara halógena más combinación de 4 lámparas fluorescentes.

HOBO-U30	Unidades	Halógena + 4 fluorescentes en vertical
Radiación Solar	W/m <sup>2</sup>	
PAR	μE	

Para verificar el la homogeneidad del flujo luminoso se aplicó a través de la herramienta cámara termográfica HD efecto, que muestra en el diagrama de colores falsos la homogeneidad de la distribución de la radiación. A partir de la observación se determinó forrar con aluminio la cara de la lámpara para difuminar la luz y tener la uniformidad esperada (Figura 5.9).

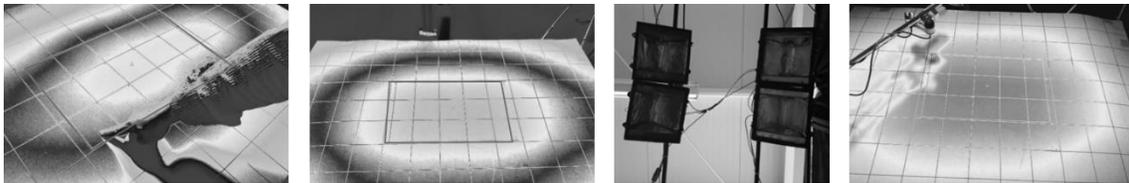


Figura 5.9. Imágenes termográficas, demuestran uniformidad en el área de interés

De igual modo se validó la mediación con un espectrómetro STS, donde se demuestra que el espectro de la halógena tiene los valores esperados (Figura 5.10).

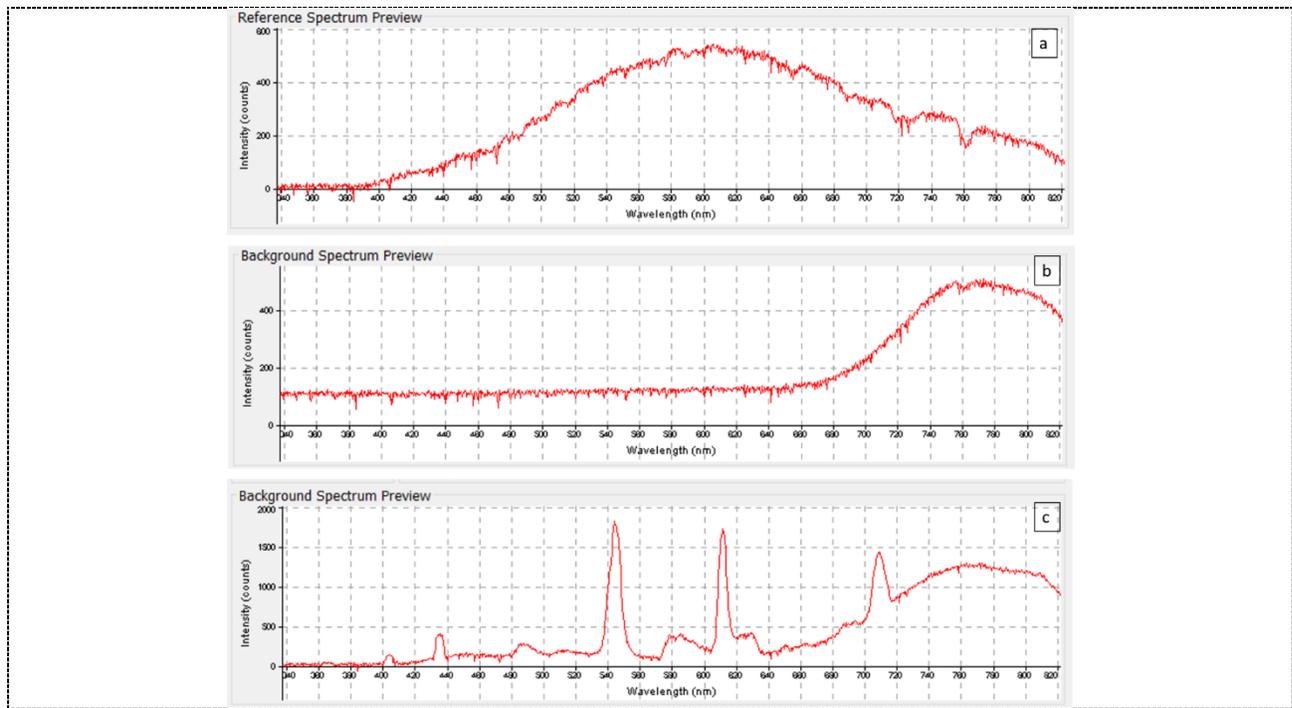


Figura 5.10. Graficas arrojadas por espectrometro STS (a). Espectro de Radiación solar (b) Espectro de lámpara halogena de 500W (c) Espectro de lamaparas flouerecenes

Observaciones: A alcanzar la proporción de dos más uno de la PAR respecto a la radiación solar y en base a que son los valores que se buscaban alcanzar. Se determina que por cada lámpara halógena se deberá complementar con cuatro fluorescentes.

### ***Obtención de valores térmicos de la muestra***

En el Laboratorio de Experimentación y Simulación en Energía Solar de CBI - UAM Azcapotzalco, se midió un arreglo de vegetación integrado por las especies adecuadas, seleccionadas anteriormente, y que se describen el Capítulo 1.3 (Figura 5.11)

La adquisición de datos se llevó a cabo con un equipo Compact Field Point CFP-1808, de National Instruments, de 6 módulos, cada módulo con 8 canales de termopares. La transferencia de datos al software se realizó con una base Phoenix Contact QUIN-PS-100-240 DC15. El software de adquisición de datos es Compact Field Point.vi (Figuras 5.11 y 5.12)



Figura 5.11. Medición de arreglo de vegetación en el simulador de radiación solar

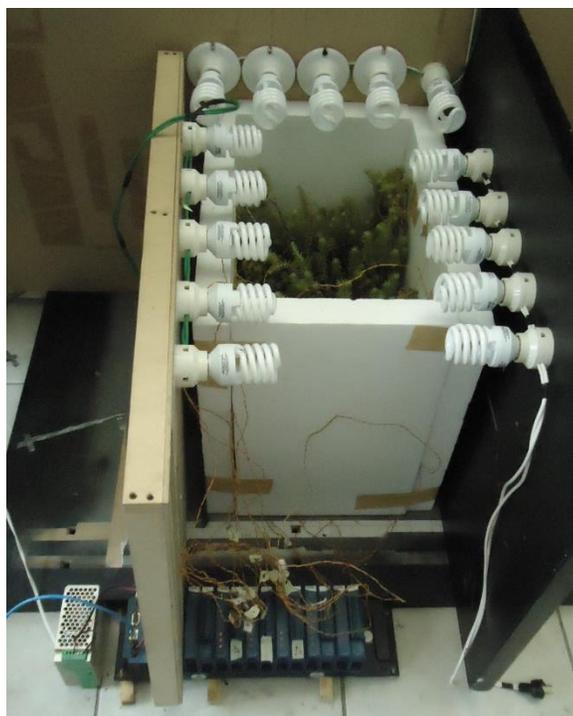


Figura 5.12. Módulo de vegetación de medición, en la parte baja, de izquierda a derecha se ven: la base Phoenix, el CFP con los 6 módulos de adquisición de datos, cada módulo con 8 termopares. Arriba se muestra el arreglo aislado, y en la base la placa fría.

Se midió el arreglo de vegetación durante el tiempo máximo de resistencia de las plantas, antes de mostrar marchitamiento ante la radiación fija. El tiempo de medición fue en sesiones de seis horas continuas, a través de las cuales se determinó como válida la medición, al permanecer durante al menos dos horas continuas las mediciones de todos los sensores, es decir en estado estable.

Las mediciones realizadas arrojaron los datos térmicos a ser alimentados en el modelo matemático. Los datos obtenidos se presentan en la Tabla 5.7

Tabla 5.7. Datos térmicos del modelo obtenidos en el simulador de radiación.

ELEMENTO	VALOR	UNIDADES
Temperatura del Follaje (f)	316.69	°K
Emitancia suelo (g)	0.95	index
Temperatura (g)	296.01	°K,
Viento W	0.25	m/s
Za - Altura del Instrumento	0.4	m
Zf – Altura de follaje	0.3	m

T aire Altura Sensor	298.15	°K
Taf dentro del Follaje	308.55	°K
rs,min	13619.5266	s/m
rs	13619.5266	s/m
Contenido Residual de Humedad (g)	0.01	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Contenido Máximo de Humedad (g)	0.3	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Contenido Promedio de Humedad	0.15	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Mg	1	factor
Presión de vapor Aire Altura del Sensor	3169.21202	P
TBS	25	°C
Presión Atmosférica	78055	Pa
Radiación PAR	1269	mmolm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Radiación Global	600	W/m <sup>2</sup>
Humedad Relativa	60.4	%

## Determinación del vapor de agua transpirado

Existen varios métodos para establecer la cantidad de agua cedida al ambiente, y se puede expresar de diferentes maneras. Se puede expresar en Tasa de Transpiración (T); en conductancia estomática (g); ó en resistencia estomática (rs).

## Monitoreo de tasa de transpiración

El monitoreo se presentará más adelante a detalle. En este momento se menciona el procedimiento para mencionar cómo se obtuvo el dato de tasa de transpiración en la presente investigación: Se monitoreó la transpiración mediante un procedimiento de lisímetro (Figura 5.13) adaptado por Trejo (2016), en el que se seleccionó una muestra representativa del arreglo de vegetación; se bloqueó la superficie del sustrato con grasa de petrolato; se midió la muestra ante las condiciones de intemperie, procurando que no recibiera agua de lluvia, para lo que se colocó una estructura exterior con cubierta de policarbonato; las muestra se colocaron sobre básculas, mismas que se fotografiaron con cámara Go-pro a cada 1 minuto; simultáneamente se colocó una estación meteorológica para monitorear las condiciones del ambiente ante las cuales se presentaron las tasas de transpiración (Figura 5.14).

Se monitoreó durante cuatro semanas, de las cuales se seleccionó el día más similar al día promedio anual para la Ciudad de México, asumiendo con esto un comportamiento estadísticamente promedio de transpiración del arreglo de vegetación utilizado.



Figura 5.13. Muestra representativa del arreglo de vegetación utilizado para las mediciones. La muestra es la caja de estireno, que corresponde a  $\frac{1}{4}$  de la charola base del sistema de techo verde.



Figura 5.14. Estación meteorológica (a) arriba a la izquierda; y charolas sobre básculas, monitoreadas con armazón de madera y cubierta de policarbonato.

### ***Tasa de transpiración obtenida***

En el capítulo 4, se mostraron los datos de tasa de transpiración obtenidos en las mediciones de campo, de los que se obtienen las siguientes gráfica (4.3) y tabla (5.8). Determinando el área debajo de la curva de desarrollo horario, se obtiene la cantidad de agua transpirada. De esta manera, a cada hora le corresponde un volumen transpirado, en

forma de coeficiente (que en el procedimiento propuesto llamamos empírico) que se usará para afectar la ecuación de apertura estomática.

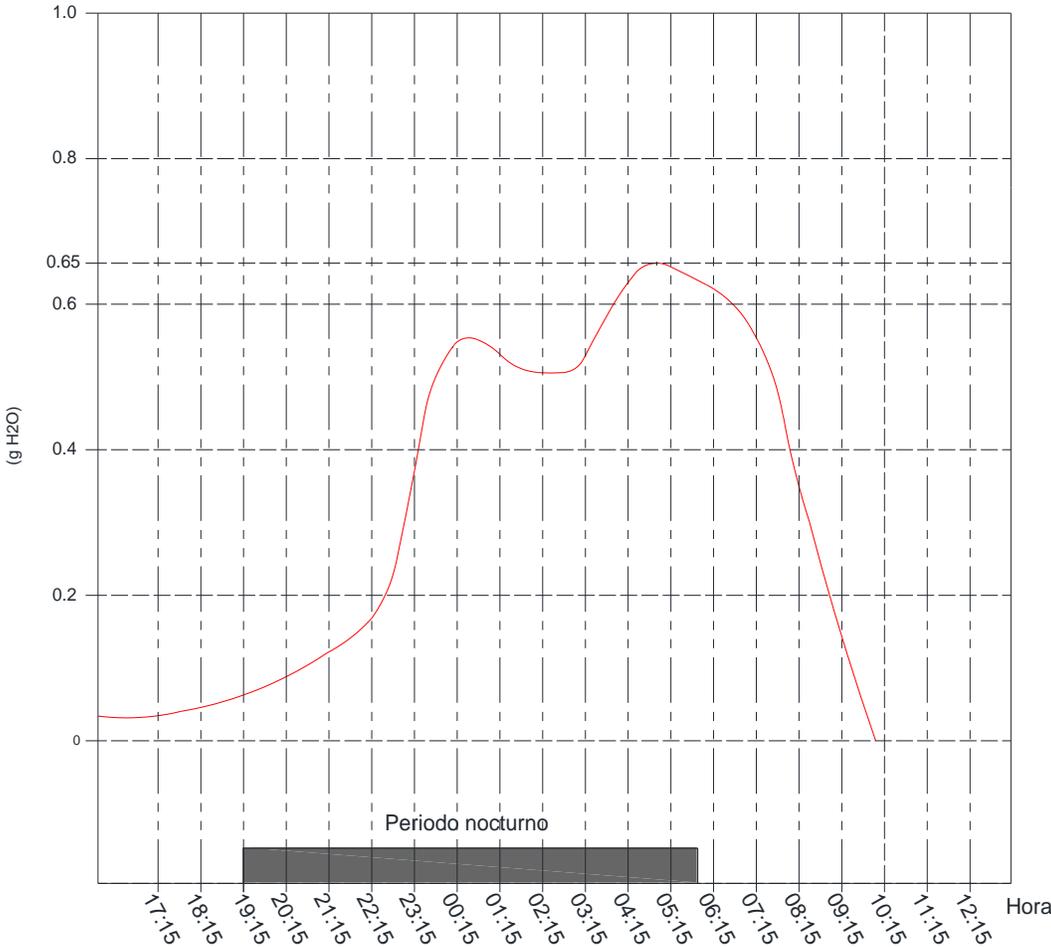


Figura 4.3. Transpiración del arreglo medido en sitio. Mostrada en el capítulo 4.

Tabla 5.8. Factores horarios para afectar el valor de  $r_{\min}$

Período	Hora de transpiración	Factor para cada hora	Factor horario/3600
Pm	7	0.0143	3.97222E-06
Pm	8	0.0184	5.11111E-06
Pm	9	0.025	6.94444E-06
Pm	10	0.045	0.0000125
Pm	11	0.08	2.22222E-05
Pm	12	0.092	2.55556E-05
Am	1	0.088	2.44444E-05
Am	2	0.086	2.38889E-05
Am	3	0.0962	2.67222E-05
Am	4	0.108	0.00003
Am	5	0.106	2.94444E-05
Am	6	0.098	2.72222E-05

## Determinación de Índice de área foliar IAF

Para determinar el índice de área foliar se utilizó el Método de Conteo de Intersecciones. Este método utiliza una placa sobre la cual se traza una retícula ortogonal, sobre la cual se coloca las hojas a ser estimadas, generando intersecciones entre éstas y la retícula. Para estimar la superficie de una o varias hojas se necesitan las láminas de las hojas y sustituir los valores en la siguiente relación:

$$A = n \times (S/N)$$

Donde:

A = área de las hojas

n = número de intersecciones que tocan las láminas de las hojas

S = superficie total de la placa

N = número total de intersecciones de la placa.

Las hojas de los siguientes individuos se colocaron sobre hojas reticuladas. Se muestra en adelante la disposición de las hojas sobre la retícula: Figuras 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 y 5.20. El conteo de intersecciones se desarrolla con la base de 100 intersecciones, que de acuerdo con Bourd y Lomas (1976) es una medida confiable de la superficie foliar.



Figura 5.15. Sedum adolphii (1) y moranense

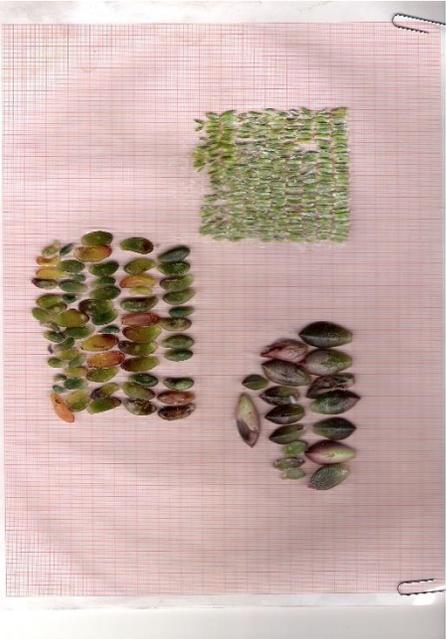


Figura 5.16. Sedum griseum (1) y adolphii (2)

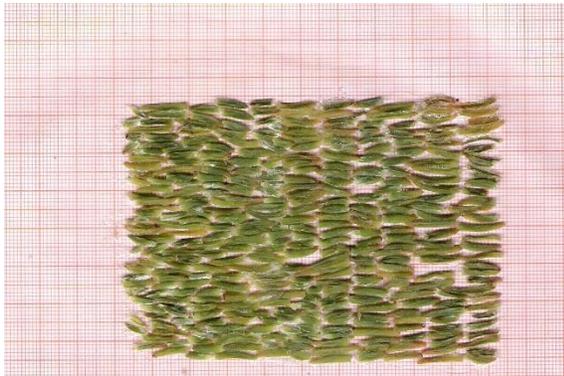


Figura 5.17. Sedum griseum (muestra 2)

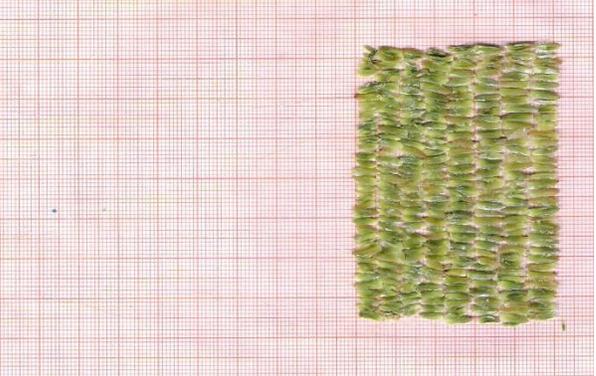


Figura 5.18. Sedum griseum (muestra 3)



Figura 5.19. *Sedum rubrotinctum* (1)



Figura 5.20 *Sedum rubrotinctum* (2)

La medición del IAF para cada especie se determinó de manera individual. Con estos datos se integró un promedio pesado para todo el arreglo, debido a que las cajas de vegetación funcionarán siempre en arreglos combinados.

De esta manera, el área total determinada para hojas es de 0.824 m<sup>2</sup>, tomando en cuenta todas las especies integradas en una charola muestra. El promedio desagregado de IAF por especie se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Valores de IAF desagregados. IAF directo es el que arroja el área de la superficie de la hoja. IAFX2 es el doble de IAF, debido a que las hojas son anfiestomáticas y el área de transpiración se duplica

Especie	Área	IAF - directo	IAF x 2
<i>Sedum rubrotinctum</i>	0.051	1.634	
<i>Sedum adolphii</i>	0.0166	0.0522	
<i>Sedum griseum</i>	0.0135	0.4244	
<i>Sedum moranense</i>	0.0013	0.0318	
Total	0.0824	2.6	5.18

Sin embargo, en el laboratorio de botánica del Colegio de Posgraduados, se determinó mediante microscopía que las plantas utilizadas son anfiestomáticas (Figura 5.21) el valor de IAF se multiplica por dos, ya que la distribución de estomas y el trabajo de la plantas en materia de transpiración actuará en el doble del área.

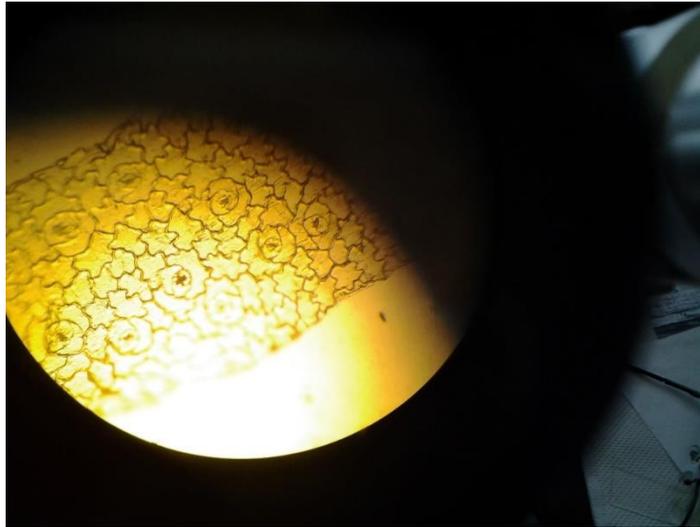


Figura 5.21. Microscopía de *Sedun rubroinctum* en la que se determina que es anfiestomática.

### **Factor de cobertura**

El factor de cobertura se define como el porcentaje directo de área cubierta por la vegetación, por una o más hojas (Sailor, 2008). Este factor se determinó mediante fotogrametría, generando una imagen plana (Figuras 5.22 y 5.23) del arreglo de vegetación, misma que se analizó en Autocad, arrojando el factor de cobertura (Figura 5.24).



Figura 5.22. Toma de imágenes planas del arreglo vegetal, generada con cámara digital Cannon con lente normal de 50mm f/1.4.



Figura 5.23. Imagen plana del arreglo vegetal, generada con cámara digital Cannon con lente normal de 50mm f/1.4.



Figura 5.24. Determinación del factor de cobertura mediante el cálculo de áreas cubiertas por la vegetación, contra las áreas de suelo expuesto

De esta manera se determina que el factor de cobertura, que es adimensional, corresponde a 0.8.

### **Determinación de absorción de vegetación y suelo**

La absorción se determinó en el Laboratorio de Arquitectura Bioclimática de la UAM Azcapotzalco con un Espectrofotómetro marca Ocean Optics modelo FLAME-S-VIS-NIR-ES, con lámpara de tungsteno Tungsten Halogen Source, 360-2000nm, 1500 hrs, 2960 K; Sensor de reflectancia Premium 400 um Reflection Probe, VIS/NIR, 2 m, modelo QR400-7-

VIS-NIR; Base para Sensor de reflectancia Reflection Probe Holder for 6.35-mm diameter probes modelo WS-1; y Prueba de Calibración de blanco *Diffuse Reflectance Standard, PTFE*. (Figuras 5.24 y 5.25). el espectrofotómetro mide reflectancia, y la absorbancia se obtuvo calculando el complementario de 1, toda vez que reflectancia es complementaria de absorbancia y entre los dos forma 1.

El espectrofotómetro mide las longitudes de onda reflejadas por cualquier material medido, a partir de la calibración de blancos llevada a cabo con el calibrador *Diffuse Reflectance Standard, PTFE* (Figura 5.26).



Figura 5.24. de izquierda a derecha: Espectrofotómetro marca Ocean Optics modelo FLAME-S-VIS-NIR-ES, Sensor de reflectancia con base para soportarlo, y lámpara de tungsteno.



Figura 5.25. Medición de reflectancia del suelo con sensor de reflectancia con base para soportarlo

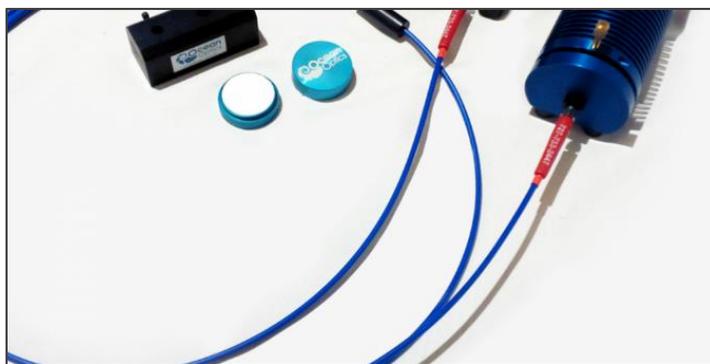


Figura 5.26. Calibrador de blancos calibrador *Diffuse Reflectance Standard, PTFE*.

La absorptancia final del arreglo se determina como un promedio pesado, de acuerdo con la absorptancia de cada especie, y el porcentaje de área que cada especie ocupa, de acuerdo con el factor de cobertura anteriormente obtenido (arriba definido). La Figura 5.27, muestra el área de cobertura de cada una de las especies, que determina el peso de la absorptancia para ser integrado en el promedio pesado de absorptancia por arreglo.

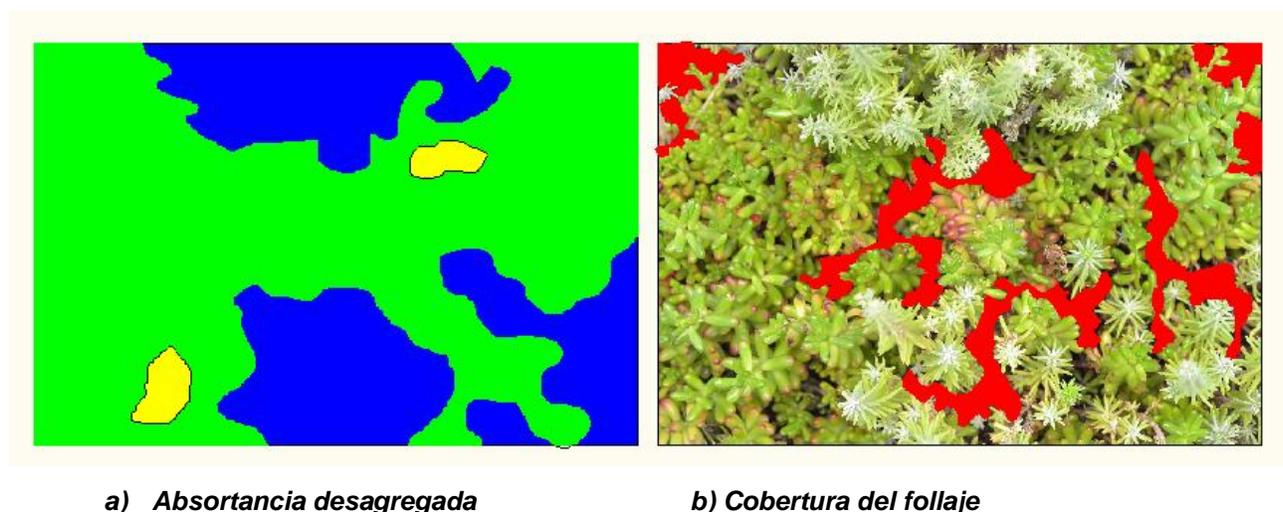


Figura 5.27. Determinación de promedio pesado de absorptancia; a) absorptancia desagregada; b) manchones de cada tipo vegetación, en rojo se descuenta el área del suelo.

De esta manera, el promedio pesado de la reflectancia o albedo tiene un valor de 0.19 y el promedio pesado de la absorptancia tiene un valor de 0.81.

### **Peso de los arreglos de vegetación**

Como información general del sistema se pesaron las charolas con vegetación que se tenían disponibles al inicio del proceso de mediciones y se presentan en adelante los resultados de dichas mediciones.

Mediciones realizadas en el LAB, con una báscula electrónica de plataforma marca Justa modelo C100kg40x40 equipada con indicador modelo xk3101-pjb de 100 kg de capacidad y lectura mínima de 10g.

Tabla 5.10. Pesos de los componentes del sistema de naturación

No.	Elemento	Peso en Kg	Observaciones
1	Charola simple (chica)	1.16	Se usa como tara para las posteriores medidas de charolas
2	Sedum + Echeverias	8.43	Sin charola (tierra + plantas)
		9.60	Todo el sistema integrado
3	Sedum + cactáceas	9.82	Sin charola (tierra + plantas)
		10.98	Todo el sistema integrado
4	Charola con sustrato	4.01	Peso del sustrato = $4.01 - 1.16 = 2.85$ (en seco)
5	Charola plástica grande	2.47	

Los pesos de las charolas se tomaron no en seco. Con un porcentaje de humedad aún no determinado. Se determinará con el medidor de humedad de suelos, conectado al cerebro Onset U-30.

Sustrato usado por caja chica = 17 litros, medidos con contenedor de 1 lt. Para llenar los 12 cm de tierra vertidos en el contenedor

Se midieron las temperaturas superficiales de los diferentes componentes del sistema: promedio de las charolas, plantas y sustrato (seco).

# CAPÍTULO 6

The image shows handwritten mathematical work on lined paper. At the top, there is a derivation:  $\frac{Pa}{kg \cdot m^2/s} = \frac{N/m^2}{kg \cdot m^2/s} = \frac{kg \cdot m/s^2}{kg \cdot m^2/s} = \frac{1}{m \cdot s}$ . Below this, there are several circled terms:  $\frac{s}{m}$ ,  $\frac{m}{s}$ , and  $\frac{s}{m}$ . A question mark is written to the left of the first term. Further down, there are more terms:  $\frac{kg}{m^2}$  and  $\frac{s}{m}$ , with some additional scribbles and a small 'p' above the first term.

## COMPROBACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Con la finalidad de estimar el impacto de los cambios realizados en el modelo, se elaboró una hoja de cálculo con el desarrollo del modelo.

Se realizan dos corridas numéricas, la primera, con el desarrollo del modelo tal como lo considera el modelo matemático FASST, sin las consideraciones a la vegetación aquí trabajada. A esta corrida se le llamará **corrida C1**, con radiación, que considera que la vegetación pierde calor latente ante la presencia de radiación.

La segunda corrida, considera las adecuaciones a la vegetación utilizada para estas pruebas. A esta corrida se le llamará **corrida C2**, sin radiación, que considera que la vegetación transpira y cede calor sin la presencia de radiación.

### Datos generales y fichas

Los datos generales son los mismos para las dos corridas. Se escriben los datos del lugar de análisis, localización, vegetación utilizada y datos informativos.

Datos generales del proyecto			
Fuente	Etiqueta	Datos	valor
a	a	Localidad	Azcapotzalco CDMX
b	b	Proyecto	Investigación doctoral
c	c	Horas de Sol, promedio anual	
d	d	Clima según Koppen-Garcia	Cb (w1) (w) (f) g
e	e	Vegetación Utilizada	rubrotinctum, adolphii, moranense, griseum
ivd	ivd	Índice de Vegetación Desagregada	
f	f	Densidad de la Planta	
g	g	Densidad del Sistema	
h	h	Periodo de simulación	

Fichas de Vegetación			
Nombre Común	Nombre Científico	Nat	Ex
		1	2
		3	4
			
			
			
			

# CORRIDA C1

## Corrida numérica con el modelo FASST sin modificaciones

### Datos del modelo térmico

Datos del Modelo Térmico									
Etiqueta	ELEMENTO	VALOR	UNIDADES	Conversiones	Etiqueta	ELEMENTO	VALOR	UNIDADES	Conversiones
2.1.1.	Factor de Cobertura	0.8	index		2.2.2.	Za - Altura del Instrumento	0.4	m	
2.1.2.	Radiación Onda Corta	288	W/m <sup>2</sup>	0.48	2.2.4.	Zf	0.3	m	
2.1.2.1.	Albedo Suelo	0.16	index		2.2.6.	T <sub>aire</sub> Altura Sensor	298.15	°K	25 °C
2.1.3.	Albedo del Follaje	0.19	index		2.2.7.	T <sub>st</sub> dentro del Follaje	306.878	°K	Eq. 4
2.1.4.	Emitancia del Follaje	0.95	index		2.2.9.	r <sub>s,min</sub>	53072.276	s/m	
2.1.5.	Radiación Onda Larga	312	W/m <sup>2</sup>	0.52	2.3.	r <sub>s</sub>	31974.3587	s/m	
2.1.6.	Temperatura del Follaje (f)	316.69	°K	43.54 °C	2.3.1.	Contenido Residual de Humedad (g)	0.01	m3/m3	
2.1.7.	Emitancia suelo (g)	0.95	index		2.3.2.	Contenido Máximo de Humedad (g)	0.3	m3/m3	
2.1.8.	Temperatura (g)	296.01	°K, derecha °C	22.86 °C	2.3.3.	Contenido Promedio de Humedad	0.15	m3/m4	
2.1.9.	I.A.F.	5.18	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>		2.3.3.1.	Mg	1	factor	
2.2.	Viento W	0.25	m/s		2.3.4.	Presión de vapor Aire Altura del Sensor	3169.21202	P	
2.2.1.	W' (condicional)	0.25	m/s		2.3.4.1.	Cpa- Calor Especifico a Presión Constante	1005.6	J/kgK	
							<	J/kgK	

Los datos del modelo térmico, fueron obtenidos de diferentes fuentes y corresponden a los datos que son alimentados en las ecuaciones del modelo FASST. El factor de cobertura fue obtenido de acuerdo con los criterios de Sailor (2008) descrito en la página 99 del presente documento; Las radiaciones de onda corta y onda larga corresponden al espectro de las lámparas halógenas utilizadas en el simulador solar (Testudo, 2004); el albedo del suelo y del follaje se obtuvo mediante mediciones con espectrofotómetro, procedimiento descrito en las páginas 100 a 102 del documento; la temperatura del follaje es la medida durante las pruebas en el simulador de radiación; la emitancia del suelo es un valor bibliográfico tomado de Caselles (1999). La temperatura del suelo para la corrida C1 se toma con el valor de 600 W/m<sup>2</sup> de las pruebas hechas en el simulador solar. El IAF se midió como se presenta en el capítulo 5 páginas 96 a 99 del presente documento. El viento se midió durante las pruebas de simulador solar, con un termoanemómetro de hilo caliente marca DELTA OHM Multifunctional meter-DO-9847. El valor W' es definido de acuerdo con Sailor (2008).

### Condiciones del ambiente

Datos del ambiente bajo el cual se desarrolla la estimación

Condiciones del Ambiente						
Etiqueta	ELEMENTO	VALOR	UNIDADES	Conversiones	Unidades	Fuente
2.3.5.	TBS	25	°C			Datos Mod Term
2.3.6.	Presión Atmosférica	78055	Pa	780.55	hPa	Sitio
2.3.7.	Radiación PAR	1200	mmolm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>			Sitio
2.3.8.	Radiación Global	600	W/m2			Sitio
2.3.9.	Humedad Relativa	60.4	%			sitio
2.4.1.	Pvs	3.16921202	kPa			ASHRAE
2.4.1.1.	e <sub>f</sub> sat a Temperatura del Follaje	8.89580686	kPa			ASHRAE
2.4.2.	Precipitación Pluvial en mm	740	mm			Sitio
2.4.3.	Densidad del Aire a la Altura del Instrumento	0.90393474	kg/m3			(Picard, 2008)
2.4.4.	Densidad del Aire a la Temperatura del Follaje	0.83446301	kg/m4			(Picard, 2008)
2.4.5.	Densidad del Aire a la Temperatura del Suelo	0.91150244	kg/m5			(Picard, 2008)

Se debe mencionar que para la estimación de la densidad del aire en el modelo, se utilizó el modelo más reciente que se tiene disponible en este momento, publicado por el Comité Internacional de Pesos y Medidas (Picard, 2008):

La fórmula del CIPM-2007 puede ser expresada de manera simplificada mediante la siguiente fórmula

$$\rho_a = \frac{0.34848p - 0.009h_r \exp(0.061t)}{273.15 + t}$$

donde,

- $\rho_a$  densidad de aire en kg m<sup>-3</sup>
- $p$  presión barométrica en hPa
- $h_r$  humedad relativa de aire en %
- $t$  temperatura de aire en °C

(42)

La presión de vapor saturado en este modelo se obtiene con base en la ecuación de ASHRAE (1993):

$$P_{vs} = \text{Exp} \left( (-5800.221/Ta) + (-5.516256) + (-0.04864024*Ta) + (0.00004176477*(Ta^2)) + (-0.00000001445209*(Ta^3)) + (6.5459673*\text{Ln}(Ta)) \right) \quad (44)$$

### Valores constantes

Que se mantendrán durante las diferentes etapas de cálculo

	CONSTANTES	VALOR	UNIDADES
Etiqueta			
4.1.	Stefan Boltzman Const. $5.67*10^{-8}$	0.000000567	W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup>
4.2.	Von Karman	0.4	index
4.3.	Relacion de Emitancias	0.9975	index
4.4.	K Conductividad del Suelo	1	W/mK
4.5.	Profundidad del Suelo	0.15	m
4.6.	g Constante Gravitacional	9.8	m/s
4.7.	gd Valor Especial	1	index

## Ecuaciones de la capa vegetal

Ecuaciones capa vegetal			
Flujo de calor sensible en la capa			
Número Eq.	Ecuación	Calculo	
2	Hf	-192.0835466	
3	Paf	0.869198875	
4	Taf	306.878	
5	Waf	0.093066255	
6	Chnf	0.067306661	
7	Zd	0.215684893	Balik
8	Zo,f	0.039442205	Balik
9	Cf	0.0422351	Deardof
10	rs	31974.35866	
11.1	1/f1	0.663752352	
11.1.2	f1	1.506585998	
11.2	1/f2	0.482758621	
11.2.2	Sub Calculo f2	0.482758621	
11.2.3	f2	2.071428571	
11.3	f3	1	
11.3.2	1/f3	1	
12	ra	254.4100357	Oke
13	r''	0.00789388	
14	Lf	-182.4289541	W/m2
15	qaf	-0.462483682	
16	lf	2406157.593	

Ecuaciones capa vegetal 2			
Balance Energético en la capa vegetal			
1	F <sub>f</sub>	-4285.219038	W/m2

En el bloque de ecuaciones de la capa vegetal se muestran los resultados de la corrida C1, donde se alimentan los valores de desempeño fisiológico de las platas de acuerdo a los parámetros del modelo FASST.

En la ecuación 14, de cálculo de calor latente, se estima que durante el período de presencia de radiación, que en el caso de las pruebas fue de 600 W/m<sup>2</sup>, se pierden 182.428 W/m<sup>2</sup> de arreglo constructivo. La diferencia que se encuentra con el comportamiento real de la vegetación nativa de México utilizada en este trabajo, radica en que ésta no transpira durante el día, por lo que el modelo FASST actual, tan sólo para la hora de análisis tiene un desfase de 182.428 W/m<sup>2</sup> de calor cedido en forma de calor latente.

De acuerdo con la ecuación 1, de balance energético en la capa vegetal, durante la presencia de radiación de 600 W/m<sup>2</sup>, el techo verde con este tipo de vegetación tendría un flujo de calor de -4,285.219 W/m<sup>2</sup>, carga que también es inadecuada para la vegetación aquí utilizada, por no haber pérdida del calor latente antes mencionado.

## CORRIDA C2

### Estimación de resistencia a partir de la fisiología CAM

En el tipo de vegetación utilizada en el presente trabajo, la transpiración de la planta se da, como ya se mencionó antes, durante la noche y parte de la mañana. De acuerdo con las mediciones de transpiración del arreglo de vegetación utilizada, se obtuvieron los siguientes valores de transpiración. En la tabla 6.1 se muestran los factores de transpiración obtenidos de la estimación del área bajo la curva de la transpiración del arreglo vegetal, en amarillo se resalta la hora en que se presentó la transpiración máxima y su magnitud.

Tabla 6.1. Factores horarios de resistencia estomática del arreglo de vegetación estudiado, donde T es la transpiración dada en gramos. En amarillo se resalta la hora en que se presentó la transpiración máxima, con su magnitud.

factores horarios de rs			
hora de T	factor	T total/m <sup>2</sup> (g)	T horaria en g
1	0.0143	31.438	0.44956340000
2	0.0184	31.438	0.57845920000
3	0.025	31.438	0.78595000000
4	0.045	31.438	1.41471000000
5	0.08	31.438	2.51504000000
6	0.092	31.438	2.89229600000
7	0.088	31.438	2.76654400000
8	0.086	31.438	2.70366800000
9	0.0962	31.438	3.02433560000
10	0.108	31.438	3.39530400000
11	0.106	31.438	3.33242800000
12	0.098	31.438	3.08092400000
13	0.076	31.438	2.38928800000
14	0.043	31.438	1.35183400000
15	0.0102	31.438	0.32066760000

### Datos del modelo térmico

Datos del Modelo Térmico										
Etiqueta	ELEMENTO	VALOR	UNIDADES	Conversiones	Etiqueta	ELEMENTO	VALOR	UNIDADES	Conversiones	
2.1.1.	Factor de Cobertura	0.4	index		2.2.2.	Za - Altura del Instrumento	0.4	m		
2.1.2.	Radiación Onda Corta	0.48	W/m <sup>2</sup>	0.48	2.2.4.	Zf	0.3	m		
2.1.2.1.	Albedo Suelo	0.16	index		2.2.6.	T <sub>aire</sub> Altura Sensor	298.15	*K	25	*C
2.1.3.	Albedo del Follaje	0.19	index		2.2.7.	T <sub>ar</sub> dentro del Follaje	297.534	*K		Eq. 4
2.1.4.	Emitancia del Follaje	0.95	index		2.2.9.	r <sub>s,min</sub>	5763.79934	s/m		
2.1.5.	Radiación Onda Larga	0.52	W/m <sup>2</sup>	0.52	2.3.	r <sub>s</sub>	317207.091	s/m		
2.1.6.	Temperatura del Follaje (f)	296.25	*K	23.1	*C	2.3.1.	Contenido Residual de Humedad (g)	0.01	m3/m3	
2.1.7.	Emitancia suelo (g)	0.95	index		2.3.2.	Contenido Máximo de Humedad (g)	0.3	m3/m3		
2.1.8.	Temperatura (g)	294.15	*K, derecha	*C	2.3.3.	Contenido Promedio de Humedad	0.15	m3/m4		
2.1.9.	I.A.F.	5.18	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>		2.3.3.1.	Mg	1	factor		
2.2.	Viento W	0.25	m/s		2.3.4.	Presión de vapor Aire Altura del Sensor	3169.21202	P		
2.2.1.	W' (condicional)	0.25	m/s		2.3.4.1.	Cpa- Calor Especifico a Presión Constante	1005.6	J/kgK		

Los datos del modelo térmico, fueron obtenidos de diferentes fuentes y corresponden a los datos que son alimentados en las ecuaciones del modelo FASST. El factor de cobertura fue obtenido de acuerdo con los criterios de Sailor (2008) descrito en la página 99 del presente documento; Las radiaciones de onda corta y onda larga corresponden al espectro de las lámparas halógenas utilizadas en el simulador solar (Testudo, 2004); el albedo del suelo y

del follaje se obtuvo mediante mediciones con espectrofotómetro, procedimiento descrito en las páginas 100 a 102 del documento; la temperatura del follaje es la medida al inicio de las pruebas en el simulador de radiación, sin lámparas prendidas; la emitancia del suelo es un valor bibliográfico tomado de Caselles (1999). La temperatura del suelo para la corrida C2 se toma con el valor de 0 W/m<sup>2</sup> de las pruebas hechas en el simulador solar. El IAF se midió como se presenta en el capítulo 5 páginas 96 a 99 del presente documento. El viento se midió durante las pruebas de simulador solar, con un termoanemómetro de hilo caliente marca DELTA OHM Multifunctional meter-DO-9847. El valor  $W$  es definido de acuerdo con Sailor (2008).

### Condiciones del ambiente

Condiciones del Ambiente					
ELEMENTO	VALOR	UNIDADES	Conversiones	Unidades	Fuente
TBS	25	°C			Datos Mod Term
Presión Atmosférica	78055	Pa	780.55	hPa	Sitio
Radiación PAR	2	mmolm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>			Sitio
Radiación Global	1	W/m2			Sitio
Humedad Relativa	60.4	%			sitio
Pvs	3.16921202	kPa			ASHRAE
$e_f$ , sat a Temperatura del Follaje	2.82749498	kPa			ASHRAE
Precipitación Pluvial en mm	740	mm			Sitio
Densidad del Aire a la Altura del Instrumento	0.90393474	kg/m3			(Picard, 2008)
Densidad del Aire a la Temperatura del Follaje	0.91065487	kg/m4			(Picard, 2008)
Densidad del Aire a la Temperatura del Suelo	0.91806553	kg/m5			(Picard, 2008)

### Valores constantes

CONSTANTES	VALOR	UNIDADES
Stefan Boltzman Const. $5.67 \cdot 10^{-8}$	0.000000567	W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup>
Von Karman	0.4	index
Relacion de Emitancias	0.9975	index
K Conductividad del Suelo	1	W/mK
Profundidad del Suelo	0.15	m
g Constante Gravitacional	9.8	m/s
gd Valor Especial	0	index

## Ecuaciones de la capa

Ecuaciones capa vegetal			
Flujo de calor sensible en la capa			
Número Eq.	Ecuación	Calculo	
2	Hf	34.36352472	
3	Paf	0.907294808	
4	Taf	297.666	
5	Waf	0.166808027	
6	Chnf	0.041008821	
7	Zd	0.215684893	Balik
8	Zo,f	0.039442205	Balik
9	Cf	0.027984746	Deardof
10	rs	2149183.485	
11.1	1/f1	0.00617284	
11.1.2	f1	162	
11.2	1/f2	0.482758621	
11.2.2	Sub Calculo f2	0.482758621	
11.2.3	f2	2.071428571	
11.3	f3	1	
11.3.2	1/f3	1	
12	ra	214.2208236	Oke
13	r"	9.96655E-05	
14	Lf	-1.301912924	W/m2
15	qaf	-0.220015257	
16	lf	2446473.062	
Ecuaciones capa vegetal 2			
Balance Energético en la capa vegetal			
1	Ff	-1626.525646	W/m2

En el bloque de ecuaciones de la capa vegetal se muestran los resultados de la corrida C2, donde se alimentan los valores de desempeño fisiológico de las plantas de acuerdo a los parámetros del modelo FASST, con las adecuaciones a la vegetación utilizada en el presente trabajo.

En la ecuación 14, de cálculo de calor latente, se estima que en la hora de análisis, durante el período de ausencia de radiación que es cuando la vegetación utilizada presenta transpiración, se pierden 1.30191 W/m<sup>2</sup>. De acuerdo con el modelo FASST actual durante la noche, no habría pérdida de calor latente.

De acuerdo con la ecuación 1, de balance energético en la capa vegetal, durante la presencia de radiación de 0 W/m<sup>2</sup>, el techo verde con este tipo de vegetación tendría un flujo de calor de -1626.5256 W/m<sup>2</sup>.

Cabe mencionar que en la ecuación general de balance energético en la capa vegetal de un techo verde (ecuación 1):

$$F_f = \sigma_f [I_S^\downarrow (1 - \alpha_f) + \epsilon_f I_{ir}^\downarrow - \epsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (1)$$

El balance se encuentra en función de la acción de la radiación.

Los resultados comparativos de la diferencia entre el comportamiento del modelo FASST actual con el modelo FASST CAM se presenta en la siguiente tabla 6.1.

Tabla 6.1. Diferencia de comportamiento en calor intercambiado de la capa vegetal hacia el medio, del modelo FASST actual comparado con el modelo FASST intervenido (CAM), en W/m<sup>2</sup>

DÍA		
	FASST	FASST CAM
Lf	-182.4285	0

NOCHE		
	FASST	FASST CAM
Lf	4.4	-1.30191

## Conclusiones

### ***Balance de energía en la capa vegetal***

La demostración del desfase del modelo FASST como se encuentra actualmente, respecto a la descripción adecuada del flujo de calor en la vegetación CAM se debe a los siguientes puntos:

La vegetación CAM transpira durante la noche, y el modelo FASST asume que la vegetación que entra en el modelo matemático transpira durante la presencia de radiación

Los límites de la resistencia estomática que permite el modelo FASST son demasiado bajos comparados con los límites de resistencia estomática que tiene en la realidad la vegetación CAMM.

Se debe tomar en cuenta que el balance energético de la ecuación 14 (calor latente) y general de balance en la capa vegetal (ecuación 1) determinan el flujo de calor de la capa vegetal hacia el ambiente, y su repercusión en el balance general del techo verde, antes de entrar en el sustrato.

Para el presente trabajo no se tomaron en cuenta las ecuaciones de flujo de calor en el sustrato, debido a que el análisis se concentró en determinar el efecto de la apertura de los estomas en el comportamiento adecuado del flujo de calor latente, y las horas en que se presenta.

### ***Modelo FASST actual***

Durante la noche que es cuando la vegetación CAM transpira, realmente la transpiración es tan baja que la pérdida de calor latente es mínima, tan sólo de 4.4 W/m<sup>2</sup>.

En ausencia de radiación se encontró que la diferencia de comportamiento entre el modelo FASST actual, y el modelo modificado, no es sustancial.

Sin embargo, se encontró que la diferencia importante, se presenta durante el día, cuando el modelo FASST actual asume que la vegetación CAM transpira, se calcula una pérdida de calor latente diario. En la ecuación 14, de cálculo de calor latente, se estima que durante el período de presencia de radiación, que en el caso de las pruebas fue de 600 W/m<sup>2</sup>, se pierden 182.428 W/m<sup>2</sup> de arreglo constructivo. La diferencia que se encuentra con el comportamiento real de la vegetación nativa de México utilizada en este trabajo, radica en que ésta no transpira durante el día, por lo que el modelo FASST actual, tan sólo para la hora de análisis tiene un desfase de 182.428 W/m<sup>2</sup> de calor cedido en forma de calor latente.

De acuerdo con la ecuación 1, de balance energético en la capa vegetal, durante la presencia de radiación de 600 W/m<sup>2</sup>, el techo verde con este tipo de vegetación, con las

características fisiológicas, tendría un flujo de calor de  $-4285.219 \text{ W/m}^2$ , carga que también es inadecuada para la vegetación aquí utilizada, por no haber pérdida del calor latente antes mencionado.

### ***Modelo matemático adecuado a la vegetación CAM***

Las adecuaciones al modelo FASST para vegetación de metabolismo CAM tienen su aportación en la cuantificación del flujo de calor latente por vía de los estomas. Para establecer un modelo de cálculo más adecuado, se propuso una ecuación de la que se despeja el valor de la resistencia estomática de la hoja  $r_h$  conociendo el valor de la transpiración real, y también las horas en que se da la transpiración. De entre el período en que se presenta la transpiración, se escogió el momento en que se presenta la mayor transpiración para obtener el mayor contraste con los resultados del modelo FASST, en el que la vegetación no tiene apertura de estomas en el período nocturno por no haber presencia de luz PAR. La ecuación propuesta dio los resultados adecuados, y se puede tomar en cuenta como una alternativa para el adecuado cálculo de la pérdida de calor latente por efecto de la transpiración a través de los estomas de la vegetación CAM.

En la ecuación 14, de cálculo de calor latente, se estima que en la hora de análisis, durante el período de ausencia de radiación que es cuando la vegetación utilizada presenta transpiración, se pierden  $1.30191 \text{ W/m}^2$ . De acuerdo con el modelo FASST actual durante la noche, no habría pérdida de calor latente.

De acuerdo con la ecuación 1, de balance energético en la capa vegetal, durante la presencia de radiación de  $600 \text{ W/m}^2$ , el techo verde con este tipo de vegetación tendría un flujo de calor de  $-1636.5256 \text{ W/m}^2$ .

### ***Vegetación***

En México el uso de las azoteas verdes con el propósito de mejorar térmicamente los edificios es joven y se aprecia descontrol en el uso adecuado de la vegetación, tanto en los instaladores como en los organismos reguladores.

Los criterios propuestos en el presente trabajo y usados hasta este momento para la selección de especies apropiadas para techos verdes térmicamente eficientes coinciden con los trabajos que le anteceden a nivel global y local, y están adecuados a la vegetación y a las condiciones de la MAMC, por lo que pueden servir de base para promover un mejor uso de nuestros recursos vegetales.

Se presentaron cuatro especies de suculentas altamente eficientes que pueden servir como base a la naturación extensiva y semi intensiva. Asimismo, se tienen otras 7 especies de plantas nativas altamente resistentes que en combinación con las básicas tienen un buen rendimiento en el techo verde.

Se obtuvieron también cuatro especies de pastos que igualmente cubren todos los requerimientos para ser base de un techo verde, y otras doce especies de pastos que responden a las condiciones requeridas y del clima de la MAMC.

Conociendo los requerimientos de las plantas para vivir, de los green roofs de acuerdo a su propósito funcional y del clima

## ***Normatividad***

Se mostraron de manera general las consideraciones y claves del cálculo de transferencia de calor, de los que podemos concluir que los sistemas de evaluación de normas y certificaciones nacionales se llevan a cabo mediante análisis de régimen estacional, con una tempera neutra como objetivo y considerando que los elementos aportan únicamente un nivel de aislamiento a la envolvente del edificio.

Las normas y certificaciones nacionales, basadas en el modelo de cálculo estacional de la NOM-008-ENER-2001, tienen la ventaja de ofrecer un procedimiento accesible, posible de ejecutarse de manera manual (o con un software sencillo con que ya cuenta la NOM-020-ENER-2011) y basado en una serie de valores precalculados, disponibles en tablas, y por esto la hace viable para ser implementada. A a pesar de ser una NOM (obligatoria en el territorio nacional) los edificios certificados en sus 15 años de vigencia no son más de 20. Esto para nuestro medio nacional es bueno porque hemos constatado que mientras más complejas y especializadas son las normas, se aplican menos, o son más susceptibles a la corrupción para ser acreditadas.

Como se comentó anteriormente, la NOM-008- ENER-2001 pierde eficacia también al restringir la temperatura de confort a 25°C y con esto se aumentan los consumos energéticos, por lo que requiere un modelo más adecuado de análisis de confort. Asimismo, una de las grandes desventajas que encontramos en esta norma nacional es que, al ser su objetivo principal evitar el sobrecalentamiento de las edificaciones, en climas fríos, los edificios mal diseñados que promueven temperaturas con déficit de temperaturas, muy por debajo de la zona inferior de la zona de confort, acreditan la norma, debido a que no se sobrecalientan.

Por otro lado, se mostró cómo evalúa LEED, y debemos comentar que resulta efectivamente un sistema de certificación mucho más robusto, complejo y eficaz para la gestión de proyectos sustentables, comparado con los sistemas de certificación y normas nacionales, sin embargo, tiene un nicho de clientes muy dirigido, de alto nivel adquisitivo cuya dinámica comercial le permite incluir la acreditación de esta certificación como una inversión redituable, lo que no resulta aplicable a muchos de los sectores de la edificación de México.

En el mismo sentido BREEAM presenta las mismas ventajas y desventajas que LEED.

Sisevive Ecocasa, con el modelo DEEVí presenta un modelo de cálculo un poco más cercano a ser un paso intermedio entre la facilidad de aplicación y la integración de un modelo de edificio que integra todas sus componentes térmicas, y pese a tener las mismas

limitaciones del modelo estacionario, problemas en considerar los factores del clima y basarse en el comportamiento de viviendas fuera de México, puede ser tomado como una base para que el sector académico integre un sistema de evaluación junto con el sector gubernamental. La base de este sistema puede ser Ener habitat, que mediante su enriquecimiento y su complemento para integrar un modelo de espacios complejos, no sólo paramétricos, puede cubrir las necesidades de nuestras normas y certificaciones.

Después de análisis del modelo FASST se identifica que el comportamiento fisiológico que describen las ecuaciones referentes a la resistencia estomática del modelo FASST es compatible con un metabolismo C3.

A utilizarse en el presente trabajo vegetación de tipo CAM, se identifica la necesidad de ajustar el modelo FASST en la expresión que describe el comportamiento de intercambio de vapor de agua de la vegetación CAM.

## **Recomendaciones**

Es necesario seguir evaluando diferentes arreglos de vegetación de diferentes especies de plantas para determinar sus valores termofísicos y fisiológicos, que posibilitan el trabajo térmico de la vegetación integrada a un sistema de techo verde.

Para el adecuado y exhaustivo estudio de la respuesta de la vegetación ante las condiciones complejas del medio y sus aportaciones al desempeño térmico de un techo verde, es recomendable contar con una cámara de simulación climatológica o de ambiente controlado, tal como lo llevan a cabo Sailor y Spolek en Portland State University.

Se recomienda continuar los trabajos iniciados en el presente documento, reforzando los procesos con equipo especializado en la adquisición de los valores que alimentan las ecuaciones de balance térmico en un techo verde.

Es factible que a partir del presente trabajo se elabore un software que incluya las modificaciones propuestas al modelo FASST, y se implemente el cálculo de techos verdes realizados con plantas de metabolismo CAM.

Se recomienda al Gobierno de la CDMX, así como al Gobierno Federal, que atiendan a la investigación realizada en nuestra casa de estudios, así como al avance en el tema aquí presentado e integren en las Normas y Certificaciones nacionales, un apartado de vegetación, en los procedimientos de cálculo de los impactos térmicos y energéticos de estos sistemas en los edificios, toda vez que ahora los desconocen.

## Bibliografía consultada

1. AGMASC. (2011). Criterios para una jardinería sostenible en la Ciudad de Madrid. Área de Gobierno de Medio Ambiente y Servicios a la Ciudad, Ayuntamiento de Madrid. España.
2. Agrocomponentes. (2016). Tecnología agrícola. Wordpress.com. Obtenido de [tecnologiaagricola.wordpress.com](https://tecnologiaagricola.wordpress.com): <https://tecnologiaagricola.wordpress.com/2012/09/11/iluminacion-artificial-en-cultivos/>. Ingresado el 28 de 06 de 2016
3. Aguirre, A. et. al. (2008). Especies exóticas invasoras: impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía (chapter). En: Capital natural de México, Vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO. México.
4. ASHRAE. (2005). ASHRAE Handbook – Fundamentals. Chapter 16, Air flow Around Buildings, Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc
5. Balick, L. R., R. K. Scoggins y L. E. Link. (1981). Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature models for thermal IR signature prediction. IEEE Geoscience and Remote Sensing GE-19(3), pp.143-152.
6. Burd D y Lomas J. (1976). Métodos de Medición del Área Foliar: un estudio de precisión y rapidez. WMO Symposium de Agrometeorología del cultivo del maíz. Iowa State University. Ames, Iowa. Traducción de E. V. Solórzano.
7. Businger, J. A. 1966. In 'Arctic Heat Budget and Atmospheric Circulation', Symposium Proceedings, pp. 305-332. The Rand Corporation.
8. Byers R B. (1959). General Meteorology. McGraw-Hill Book Company, Nueva York.
9. CAM. (2010). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México PROAIRE 2011-2020. Comisión Ambiental Metropolitana. Distrito Federal, México.
10. Carmona Ch, E. (2001). Selección de especies utilizable en la naturación extensiva de azoteas en el Valle de México. Master's degree Thesis. Colegio de Postgraduados. México.
11. Caselles V, et al. (1999). Medida de la temperatura y la emisividad con datos multiespectrales del sensor daís. Memorias del VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España. pp343-346.
12. Chart 1Difference between light sources2
13. Chen, F., K. Mitchell, J. Schaake, Y. Xue, H.-L. Pan, V. Koren, Q. Yun Duan, M. Ek, and A. Betts. (1996) Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE. NJ. USA. observations. Journal of Geophysical Research, 101(D3): 7251–7268.
14. Chen Yu. (2006). The intervention of plants in the conflicts between buildings and climate, Case study in Singapore. PhD Thesis. National University of Singapore. Singapore.
15. Ciencia y Biología. (2010). Adaptaciones de las plantas al medio. En: <http://cienciaybiologia.com/adaptaciones-de-las-plantas-al-medio-ecomorfologia-del-cormo/>
16. Ciencia y Biología (2017). Plantas basculares. Accesado en en: <https://cienciaybiologia.com/las-plantas-vasculares>, noviembre de 2017.
17. CNA. (2008). Estadísticas del Agua en México. CONAGUA - SEMARNAT. D. F. México.
18. CSL. (2016). Iluminación para horticultura. Compact Solutions Lighting. (28 de 06 de 2016). En: <http://www.eltacnet.com/presentacion.pdf>
19. CONABIO. (2008). Capital natural de México, Vol. III : Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
20. CONABIO. (2010) ¿Qué es un país megadiverso? Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad Mexicana. Accesado en diciembre de 2010. En: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/quees.html>
21. CONAVI. (2013). Nationally Appropriate Mitigation Actions NAMA - Mexico. Comisión Nacional de Vivienda en México. Consulted 2013-06-14, in: <http://www.conavi.gob.mx/viviendasustentable>.
22. Deardorff, J.W. 1978. "Efficient Prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation", Journal Geophysical Research, pp. 1889-1902.
23. DHAAPU. (2016). Measuring Daily Light Integral in a Greenhouse. Departamento De Horticultura y Arquitectura De Áreas Verdes, Purdue University. (28 de 06 de 2016). En: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-238-SW.pdf>

24. Dickinson, R.E., A. Henderson-Sellers, P.J. Kennedy, and M.F. Wilson. 1986. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR community climate model. NCAR Technical Note, TN-275+STR.
25. DOF. (2000). Acuerdo por el cual se aprueba la Carta Nacional Pesquera. Diario Oficial de la Federación, 17 de agosto de 2000. Mexico.
26. Doug, B. (2005), Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto, Dept. of Architectural Science, Ryerson University. Toronto, Canada.
27. ECMWF. 2002. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Integrated Forecast System. Documentation, CY25R1 (Operational implementation 9 April 2002). <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY25r1/Physics/Physics-08-03.html>.
28. Ezcurra, Excequiél. (1990). De las chinampas a la Megalópolis, El medio ambiente en la Cuenca de México. Fondo de Cultura Económica. México.
29. Fathy, H. (1975). Arquitectura para los pobres. Editorial Extemporáneos. D. F. México.
30. Figueroa C, A et al. (2011). Uso de sistemas pasivos en cinco zonas de México: Análisis de fichas técnicas de 25 prototipos de vivienda en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México [Reporte técnico]. Fondo SENER-CONACYT Sustentabilidad Energética en su convocatoria S0019-2009-01. Proyecto 118665. D. F. México.
31. Frankenstein, S., and G. Koenig. 2004. FASST Vegetation Models. U. S. Army Engineer Research and Development Center, Cold regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL Technical Report TR-04-25.
32. Frankenstein, S., and G. Koenig. 2004. Fast All-season Soil Strength (FASST). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold regions Research and Engineering Laboratory, ERDC/CRREL Special Report SR-04-1.
33. Garratt, J.R. 1992. The Atmospheric Boundary Layer, Cambridge university press.
34. Gates, D.M. 1980. Biophysical Ecology. New York: Springer-Verlag
35. GDF (2008). La calidad del aire en la zona metropolitana del valle de México 1986-2006. GDF. México.
36. González A, R. (2013). Secos y abandonados, los jardines verticales del conjunto La Valenciana. Periódico La Jornada. June 9th 2013, p. 35. México.
37. Green Sense Farms. (28 de 06 de 2016). <http://www.greensensefarms.com/>. Obtenido de <http://www.greensensefarms.com/>
38. Guymon, G.L., R.L. Berg, and T.V. Hromadka. 1993. Mathematical Model of Frost Heave and Thaw Settlement in Pavements. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 93-2.
39. Henderson-Sellers, B. 1984. "A New Formula for Latent Heat of Vaporization of water as function of temperature", Quarterly Journal Royal Meteorological Society, 10 pp. 1186-1190.
40. HORT AMERICAS. (28 de 06 de 2016). <http://hortamericas.com/>. Obtenido de <https://www.youtube.com/channel/UC0DAFWDXHZGCIy2GjKMfpVA>: <https://www.youtube.com/watch?v=rXNcCmFrVvU>
41. Hortilux. (2010). Iluminación en invernaderos. En: <https://www.hortilux.com/nl/total-solution/solution>
42. Houghton, J T, et al. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. IPCC. Cambridge University Press. Cambridge, MA, EU.
43. Huelsz, G et al. (2011). Desarrollo y validación de una metodología para estimar los impactos en el ahorro de energía por el uso de sistemas pasivo-constructivos en la edificación para diferentes climas de México [Título de Proyecto]. Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética, SENER-CONACYT, Convocatoria S0019-2009-01. Temixco, Morelos. México.
44. Huelsz, G., Rechtman, R. y Rojas, J. (2009). Altos valores de la resistencia térmica no aseguran un buen desempeño térmico de la envolvente de una edificación. Enviado a la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar, de la Asociación Nacional de Energía Solar (Artículo ABC-050). México.
45. Hughes, P.A., T.J.L. McComb, A.B. Rimmer, and K.E. Turver. 1993. "A mathematical model for the prediction of temperature of man-made and natural surfaces", International Journal of Remote Sensing 14 (7), pp. 1383-1412.
46. (IESJA, 2016) <http://www.iesjavirtual.es/iesja15/sitiobiob/principal/fotosintesisPpal.htm>
47. INDAGROW. (2010). Blending the Art and Science of Indoor Gardening. Inda-Gro. USA. En: <http://www.inda-gro.com/IG/?q=node/53>
48. INE. (1998). Manual de reforestación con especies nativas. Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México.

49. INFONAVIT. (2013). Hipoteca verde. Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores. México. Consulted 2013-06-14, in:  
<http://www.cmic.org/mnsectores/vivienda/2008/infonavit/hipotecaverde.htm>
50. IPCC, (2007). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. UNEP. Geneva, Switzerland. En: [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/es/mains2-4.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/mains2-4.html)
51. ISA. (1999). Arborists Certification Study Guide. Translation to spanish by Alicia Chacalo. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. México.
52. IUCN. (2000). 100 of the world's worst invasive alien species. International Union for Conservation of Nature. Hollands Printing Ltd. Auckland, New Zeland.
53. Jacquemin B, and Noilhan J. (1990) Sensitivity study and validation of a land surface parameterization using the HAPEX-MOBILHY data set, *Boundary Layer Meteorol.*, 5 2, 93-134,.
54. Kent, M. y Coker, P. (1992). *Vegetation description and analysis*. CRC Press. Boca Raton, FL. EU.
55. Koenig, G.G. 1994. Smart Weapons Operability Enhancement (SWOE) Joint Test and Evaluation (JT and E) Program: Final Report. Dr. James P. Welch, Joint Test Director, SWOE JT and E, SWOE Report 94-10, Annex D.
56. Krupka, B y Pymont, B. (1992). *Dachbegrunung*. Ulmer. Stuttgart, Germany.
57. Lallana V, y Lallana Ma. del C. (2003). *Estomas y Transpiración, Manual de Prácticas de Fisiología Vegetal - Edición digital*. En:  
[http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/fisiologiaveg/m\\_didactico/manual\\_practic/as/EstomasTED.pdf](http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/fisiologiaveg/m_didactico/manual_practic/as/EstomasTED.pdf). Accesado el 29-05-2017. BsAs, Arg.
58. Lamprecht, H. (1990): *Silvicultura en los Trópicos. Los Ecosistemas Forestales y sus Especies Arbóreas -Posibilidades y Métodos para un Manejo Sostenido-* Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Eschborn, República Federal de Alemania.
59. Lumley, J. L. and Panofsky, H. A. 1964. 'The structure of Atmospheric Turbulence'. *Interscience Monographs and Texts in Physics and Astronomy*, Vol. XII. Wiley, New York.
60. Minke, G. (2005). *Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Traducción del alemán: Denize Enlz y Lagiotta. Editorial Fin de Siglo. Montevideo, Uruguay.
61. Minke, G. (2005). *Tecttos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Traducción del alemán: Denize Enlz y Lagiotta. Editorial Fin de Siglo. Montevideo, Uruguay.
62. Montero C, D. (2009). *Innovación tecnológica, cultura y gestión del agua, Nuevos retos del agua en el Valle de México*. Porrúa, UAM. D. F., México.
63. Morillón-Gálvez, D., Saldaña-Flores R., and Tejeda-Martínez, A. (2004). *Human bioclimatic atlas for Mexico, Solar Energy*, Vol. 76, p. 781-792.
64. Noilhan, J., and S. Planton. (1989) A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Weather Rev.*, 117, 536- 549.
65. Oke, T.R. 1987. *Boundary Layer Climates*, University Press, Cambridge
66. ONU. (2011). *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements 2011*. Ed. Earthscan - United Nations Human Settlements Programme [UN-Habitat]. , Washington, DC, EE.UU.
67. Ortega y Carbajal (2008). *Cubiertas vegetales, una revisión histórica y técnica*, XXXII Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Mérida, Yuc. Mex.
68. Ortega A y Morales D. (2011). Entrevista personal. Mex.
69. Palomo del Barrio, E. (1998). *Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*. Energy and Buildings, Elsevier. PA, USA.
70. Philips. (2016). *Growing indoor crops*. Phillips. (06 de 2016). En:  
<http://www.lighting.philips.com/main/cases/cases/horticulture/green-sense-farms.html>
71. Planchuelo, A M. (2013). *Xerojardinería, Asesoramiento para cultivar plantas resistentes a las sequías*. COOPI. Córdoba, Argentina. Accesado el 18/05/2013 en: [http://www.coopi.com.ar/6\\_doc/plantas.pdf](http://www.coopi.com.ar/6_doc/plantas.pdf)
72. Primack R, B. (2002). *Essentials of conservation biology*. Sinauer Associates Press, Sunderland, Massachussets. USA.
73. Popular mechanics (2017). *Ultimate Light Bulb Test: Incandescent vs. Compact Fluorescent vs. LED*. En: <https://www.popularmechanics.com/technology/gadgets/reviews/g164/incandescent-vs-compact-fluorescent-vs-led-ultimate-light-bulb-test/>
74. Sailor D J. (2008). *A green roof model for building energy simulation programs*. Elsevier. PA, USA.
75. Sailor D, Spolek G. (2008). *A Green Roof Energy Calculator*, National Green Building Research Agenda. U S Green Building Council - Portland State University. USA

76. Santamouris M. and Asimakopoulos D. (1996). Passive cooling of buildings. James-James & European commission directorate general XVII for energy.
77. Sellers, P.J., Y. Mintz, Y.C. Sud, and A. Dalcher. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of Atmospheric Science*, 43 (6), pp. 505-532.
78. Semarnat. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-059- SEMARNAT-2001, Protección ambiental – Especies nativas de México de flora y fauna silvestres – Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio – Lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la Federación*, 6 de marzo de 2002. México.
79. SENER, (2001). Norma oficial mexicana NOM-008-ENER-2001, para eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Secretaría de Energía. *Diario Oficial*, Miércoles 25 de abril de 2001, p. 59-100.
80. SENER. (2006). Balance Nacional de Energía. Secretaría de Energía. Accesado el 7 de julio de 2011. En: [http://www.energia.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/Balance%20Nacional-%20de%20Energia%202006.pdf](http://www.energia.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/Balance%20Nacional-%20de%20Energia%202006.pdf)
81. SMA. (2008). NADF-013-RNAT-2007 “Que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el distrito federal. S. M. A. Gaceta oficial del Distrito Federal, publicada el 24 de diciembre de 2008. D. F. México.
82. SMADF. (2005). Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-006-RNAT-2004, que establece los requisitos, criterios, lineamientos y especificaciones técnicas que deben cumplir las autoridades, personas físicas o morales que realicen actividades de fomento, mejoramiento y mantenimiento de áreas verdes públicas. *Gaceta Oficial Del Distrito Federal*. México.
83. SMADF. (2008). Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007, que establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación en el Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. *Gaceta Oficial Del Distrito Federal*. México.
84. SMN. (1997). Media Histórica del Observatorio de Tacubaya, Periodo 1941-1997. Sistema Meteorológico Nacional. México.
85. Szokolay, S. y Docherty. (1999). *Cimate Análisis*. PLEA, University of Queensland, Australia.
86. Tabares-Velasco, P C. et. al. (2012). Validation of predictive heat and mass transfer green roof model with extensive green roof field data. *Ecological Engineering*, Elsevier. PA, USA.
87. Tautiva, A. (2000). Estudio de dinámicas poblacionales en zonas con subsidencia en la cuenca de México. Instituto de Geografía de la UNAM. D. F., México.
88. Testudo. (2004). Longitu de onde de diferentes tipos de lámparas. Jukka Lindgren. En: [www.testudo.cc](http://www.testudo.cc).
89. Tovar J, E I. (2011). Manejo bioclimático de vegetación nativa de México, de raíz autoadherente, en envolventes arquitectónicas como dispositivo de control térmico, aplicado a un modelo de casa habitación en la Ciudad de México. Master’s degree Thesis. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. México.
90. Vibrans, H. (2012). Malezas de México. CONABIO. México. Consulted 2013-06-10, in: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm>
91. Yeang, K. (2001). *El rascacielos ecológico*, Gustavo Gili, Barcelona, España.
92. UPVGENETICA (2011). Fisiología Vegetal. Transpiración y fisiología estomática. Wordpress. Accesado en junio de 2017 en: <https://upvgenetica.files.wordpress.com/2011/02/tema-25-transpiracion-estomas-2011/>.

**Edwin Israel Tovar Jiménez**

- Ciudad de México, febrero de 2018 -