

Características del subsuelo y perfiles de temperaturas para proyectos de enfriamiento pasivo en zonas costeras de México

Adrián Vidal¹, Jesús Chavez², José A. Lumbreras³, Adrián Sánchez¹, Estela Fernández¹, Marco O. Viguera¹, Álvaro Vega¹ y Alexandro Castellanos¹.

1 – Facultad de Ingeniería-Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Veracruzana. Blvd. Adolfo Ruiz Cortines No. 455, Col. Fracc. Costa Verde, C.P. 94294, Boca del Río, Veracruz, México.

Tel: (+52) 01 229 775 2000, Ext. 25119

e-mail: avidal@uv.mx - web: <http://www.uv.mx/veracruz/mim>

2 – Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León. Avenida Universidad s/n, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. C.P. 66451.

3 – Instituto de Estudios de la Energía. Universidad del Istmo. Avenida Universidad s/n. Bo. Santa Cruz Tagolaba 4ta. Sección. Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México.

Palabras clave: Diseño bioclimático, Confort térmico humano, Acondicionamiento de aire, edificios sustentables, bombas geotérmicas.

Resumen

Ante el inminente incremento de la temperatura ambiental, en verano, de los últimos años, el uso de sistemas de enfriamiento es cada vez más necesario, para poder desarrollar las actividades cotidianas. Sin embargo, se sabe también que los equipos de enfriamiento que predominan son los de compresión de vapor. Estos suelen ser altos consumidores de energía eléctrica y al trabajar con fluidos refrigerantes fluorocarbonados, pueden ser catalogados como sistemas agresivos con el medio ambiente. Es por ello que en los últimos años se han investigado tecnologías y medios de enfriamiento pasivo que ayuden a disminuir la dependencia de equipos de enfriamiento convencionales. En este trabajo se reportan el estudio del bioclima de la Ciudad de Veracruz a lo largo de un año climático, así como las estrategias arquitectónicas y de diseño bioclimático sugeridas para abatir la carga térmica en edificios. Se presentan también los avances de las mediciones de temperatura del subsuelo en la zona costera de Veracruz, México. En esta zona el subsuelo se caracteriza por ser arenoso, con muy poca arcilla y con un manto friático a sólo dos metros de profundidad; lo que conduciría a que haya una mejor transferencia de calor del aire del recinto o en su caso del fluido de trabajo, mezcla agua-acetona, la cual será usada en las pruebas experimentales de la segunda etapa de este proyecto. La investigación desarrollada hasta el momento forma parte de las actividades del proyecto de Investigación “Estudio del uso del subsuelo para acondicionamiento de aire en edificaciones sustentables mediante bombas geotérmicas de baja temperatura”, es cual es financiado y se desarrolla en red por las tres universidades participantes. Los resultados del estudio del bioclima de Veracruz, se aplicaron en la remodelación del lobby de un hotel ubicado en esta zona, el cual era climatizado con sistemas convencionales de compresión de vapor y ahora sólo usa enfriamiento pasivo. Respecto al estudio del subsuelo se obtuvieron los perfiles de temperatura, cuyos resultados muestran un buen gradiente con respecto a la temperatura ambiente; lo que permitiría el uso de bombas geotérmicas en la segunda etapa del proyecto; sin embargo, la humedad del ambiente es todavía un reto y un tema que se continuará estudiando.

1 Introducción

El fenómeno denominado Islas de Calor Urbano está siendo cada día más estudiado para enfatizar el incremento de la temperatura en las ciudades con respecto a los alrededores [1,2]. Dicho incremento de temperatura está conduciendo a situaciones de desconfort térmico más agudo, lo que hace imprescindible el uso indiscriminado de sistemas de acondicionamiento de aire; sin embargo, el proceso que se usa para el acondicionamiento del aire son los métodos convencionales como es el enfriamiento por compresión de vapor. Pero este método conlleva el alto costo que se paga por facturación eléctrica, el inconveniente de que usa refrigerantes fluorocarbonados y que al consumir energía eléctrica de la red se contribuye al deterioro de la capa de ozono ya que la mayoría de las plantas termoeléctricas queman combustibles fósiles para la generación de electricidad. El consumo energético en el sector residencial, comercial y público de nuestro país es bastante considerable. Durante el año 2010 consumió 18.6% del total del consumo final energético nacional. Los energéticos empleados fueron el gas licuado (38.45%), la leña (38.5%), la electricidad (27.8%), el gas natural (4.1%), solar (0.7%) y los querosenos y diesel (0.5%). Además, el subsector residencial consumió el 79.8% del consumo de energéticos total registrado para el sector residencial, comercial y público [3].

La búsqueda del confort térmico pretende proveer una temperatura en el interior de las edificaciones que resulte agradable a los individuos. Un ambiente inconfortable produce fatiga, agotamiento físico y nerviosismo, disminución del rendimiento, aumento de errores y riesgo en el trabajo. En virtud del creciente interés por el ahorro de energía y la protección del ambiente, ha surgido la necesidad de construir edificios diseñados de tal forma que proporcionen el confort haciendo uso racional de la energía y sin propiciar daños ambientales. Para ello es necesario incluir dentro del diseño, un análisis preliminar del bioclima de cada localidad, que permita añadir algunos criterios de diseño que contribuyan a la construcción de edificios de bajo consumo energético, sin sacrificar la sensación de confort térmico dentro del edificio. Investigaciones recientes reportan haber construido escenarios de bioclima humano para ciudades mexicanas de más de un millón de habitantes, considerando el calentamiento urbano y el calentamiento global [1]. Para la zona tropical del estado de Tabasco, México se realizaron evaluaciones bioclimáticas de dieciséis ciudades, donde las temperaturas promedio anuales ronda los 28°C y la humedad relativa promedio es de 50% [4]. Para edificios que proyectan etapas de remodelación con diseño bioclimático es muy útil el uso de datos del bioclima de la región. En este trabajo se inicia con la obtención de datos climatológicos de la región de Veracruz, México para generar las zonas de los requerimientos de climatización de la localidad y se continúa con la exploración de temperaturas del subsuelo para aplicaciones de enfriamiento pasivo.

En los últimos años el enfriamiento, por medios pasivos, ha cobrado interés en los investigadores, desarrollando tecnologías que conducen a un mejor aprovechamiento de los recursos naturales para beneficio del hombre y su entorno. Los primeros trabajos reportados datan desde 1987 cuyos trabajos se enfocaban en buscar reducir la carga de enfriamiento en casas habitación construyéndolas en el subsuelo, lo que podría ser propicio para esas áreas secas (Japón) [5], pero no para la región Veracruzana debido al nivel del manto friático que se encuentra a poca profundidad y que a la larga la humedad provocaría fuertes daños a la construcción. Años después, el análisis del enfriamiento pasivo volvió a tomar importancia y se desarrollaron modelos para cuantificar la disminución en la carga de enfriamiento de una vivienda aprovechando el enfriamiento nocturno y el subsuelo como sumidero de calor [6-7]. Un estudio, quizá de los más importantes, teórico-experimental fue el realizado por Hamada et al. [8] quienes construyeron una casa muestra, para validar sus modelos de simulación, en la cuál aprovecharon la energía solar, del viento y del subsuelo para producir casi el 85% de la energía consumida por una vivienda del tipo popular. Pfafferot [9] y Kumar et al. [10] modelaron intercambiadores y bombas de calor, respectivamente, para usarlos en el análisis de enfriamiento pasivo con el subsuelo. Alvarado et al. [11-12], investigaron nuevos materiales de construcción en zonas tropicales, para disminuir la ganancia térmica en edificios, sus resultados experimentales, basados en los prototipos de laboratorio, demostraron que la forma del reflector de la radiación así como la selección material de cada sistema de enfriamiento pasivo llevó a las reducciones en la conducción de calor entre 65 y 88% comparada con un prototipo convencional. Givoni [13], presenta resultados de la disminución de las temperaturas en interior de recintos empleando técnicas de enfriamiento pasivo, propias y de otros autores, acorde a la región; así como correlaciones para el cálculo de las temperaturas interiores mínimas y máximas, derivadas de los resultados experimentales obtenidos.

2 Análisis del clima

La Cd. de Veracruz se encuentra a 19°12" (N) de latitud, con una longitud de 96°08" (W) y una altitud de 16 msnm, sobre la costa del Golfo de México. En las Figuras 1 y 2 se muestran las temperaturas promedio de máxima, promedio de mínima y de bulbo seco (ambiente) mensuales, así como la humedad relativa mensual, respectivamente, para la Cd. de Veracruz, Ver.

En la Figura 1 se incluye también la zona de confort para el año, calculada a partir del concepto llamado Temppreferendum [14]:

$$T_p = 17.6 + 0.31 \times T_{amb} \quad (1)$$

en donde T_{amb} es la temperatura ambiente media o de bulbo seco. Se observan temperaturas superiores a la zona de confort en los meses de verano, lo cual da una idea de las condiciones de calor que predominan dicha temporada. Por otro lado, la Figura 2 muestra igualmente la humedad relativa de confort máxima y mínima recomendada [15].

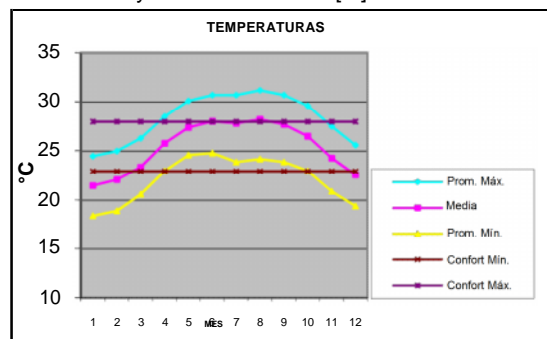


Figura 1. Variación mensual de la temperatura promedio de máxima, de mínima y media para Veracruz, Ver.

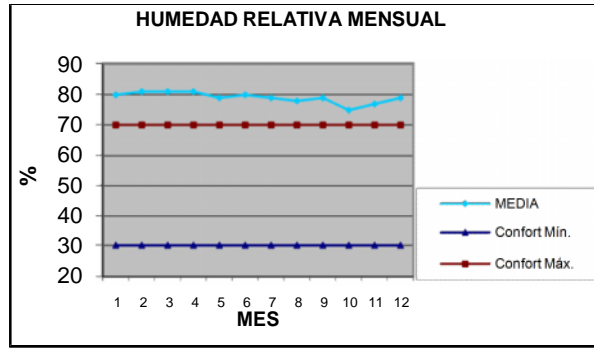


Figura 2. Variación mensual y límites de confort de la humedad relativa media para Veracruz, Ver.

2.1 Diagnóstico

Los datos del clima permiten formarse una primera y pequeña idea sobre las condiciones en la localidad analizada. Por ello es necesario tener información detallada de los impactos de las variables climatológicas del lugar sobre las condiciones del confort y así continuar con el análisis del bioclima, con el fin de emitir recomendaciones de diseño para clima cálido-húmedo. Ante la falta de dicha información, utilizando el software MARDIA [16] se calcularon valores de temperaturas y humedad relativa horarias promedio mensual, partiendo de las cifras de temperatura y humedad relativa media mensual como datos de entrada del software. El resultado son dos matrices de 24 renglones por 12 columnas, una corresponde a temperatura horaria promedio mensual y la otra a humedad relativa horaria promedio mensual (Tablas 1 y 2 respectivamente).

HORA	ENERO	FEB.	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.
0	20	21	22	24	25	26	25	25	25	24	22	21
1	19	20	22	24	25	26	25	25	25	24	22	20
2	19	20	21	24	25	26	25	25	25	24	22	20
3	19	20	21	23	25	25	25	25	24	24	22	20
4	19	19	21	23	25	25	24	25	24	24	21	20
5	18	19	21	23	25	25	24	24	24	23	21	19
6	19	19	21	23	25	25	24	24	24	23	21	20
7	19	19	21	23	25	25	24	25	24	23	21	20
8	21	20	22	24	26	25	24	26	26	24	22	22
9	22	21	23	26	27	26	26	28	27	25	23	23
10	23	23	24	27	29	28	27	29	29	27	25	24
11	24	24	25	28	30	29	29	31	30	28	26	25
12	25	25	26	29	30	30	30	31	31	29	27	26
13	25	25	27	29	30	31	31	31	31	30	28	26
14	25	25	27	29	30	31	31	31	31	30	28	26
15	24	25	26	28	30	31	31	31	30	30	28	25
16	24	25	26	28	29	30	30	30	30	29	27	25
17	23	24	25	27	29	30	30	29	29	29	27	24
18	22	23	25	26	28	29	29	28	28	28	26	23
19	22	23	24	26	27	28	28	28	27	27	25	23
20	21	22	24	25	27	28	27	27	27	27	24	22
21	21	22	23	25	26	27	27	27	26	26	24	22
22	20	21	23	24	26	27	26	26	26	25	23	21
23	20	21	22	24	26	26	26	26	25	25	23	21

Tabla 1. Datos de temperatura horaria promedio mensual en °C para Veracruz, Ver.

HORA	ENERO	FEB.	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.
0	91	90	91	93	93	91	90	90	91	89	89	91
1	92	91	92	94	94	92	91	91	92	90	90	92
2	93	92	93	94	94	93	92	92	93	91	92	93
3	94	93	94	95	95	94	93	93	93	92	93	94
4	95	94	94	95	95	94	93	93	94	93	93	95
5	97	95	95	96	96	95	94	94	94	94	94	96
6	96	97	97	97	97	95	94	95	95	96	96	96
7	92	96	96	96	95	96	95	94	94	95	95	92
8	86	92	93	91	91	95	94	88	88	91	91	86
9	79	86	87	84	84	90	88	80	81	85	85	79
10	73	79	81	78	78	83	81	73	74	78	78	73
11	69	74	75	73	73	77	74	68	68	72	72	69
12	67	69	71	71	71	72	68	65	65	68	68	67
13	67	67	69	70	70	69	65	64	65	65	65	66
14	68	67	69	71	71	69	65	65	66	65	65	67
15	70	68	70	73	73	70	66	67	68	66	66	70
16	73	70	72	76	76	72	68	70	71	68	68	72
17	76	73	74	79	79	74	71	74	74	71	71	75
18	79	76	77	81	81	77	74	77	78	74	74	78
19	81	79	80	84	84	80	78	80	81	77	77	81
20	84	81	82	86	86	83	81	83	83	80	80	84
21	86	84	85	88	88	85	83	85	86	83	83	86
22	88	86	87	90	90	88	86	87	88	85	85	88
23	90	88	89	92	91	89	88	89	89	87	87	90

Tabla 2. Datos de humedad relativa horaria promedio mensual en % para Veracruz, Ver.

Además, por otras fuentes [17] se obtuvieron datos mensuales correspondientes a la velocidad y frecuencia de los vientos para cada una de las direcciones, Tabla 3. Es prudente señalar que las cifras que aparecen en la tabla corresponden exclusivamente a las 14 hrs.

MES	N		NE		E		SE		S		SO		O		NO		CALMA
	f	v	f	v	f	v	f	v	f	v	f	v	f	v	f	v	
1	40	11	17	5.4	18	6.4	11	6.6	0.6	3	0.3	1.5	0	0	12	8	1
2	31	11	23	5.3	26	6.7	13	7.5	0	0	0	0	0.4	3	7.1	7.3	0
3	32	10	26	6	27	7.4	9	8.2	0.7	4.2	0.3	0.2	0.3	1.5	4.2	6.1	1
4	20	11	34	6.2	36	7.4	7.7	6.6	0	0	0	0	0	0	2	5.6	0
5	19	7.3	45	6.3	29	7.3	3.9	4.7	0	0	0	0	0.3	1	2	6.2	0.3
6	18	6.1	46	6.1	26	7	4.7	8.5	1	4.8	0	0	0.4	0.6	3.7	4.9	1.4
7	21	5.4	41	4.9	26	5.2	4.9	5.4	0	0	0	0	0.3	4	5.8	4.4	1
8	24	5.1	36	4.7	28	5.1	4.9	4.4	0.3	0.1	0.6	1.8	0.7	2.2	4.2	5.6	1
9	38	7.4	28	4.8	17	4.6	6.7	5.9	0.7	4.5	0.7	2.3	0	0	8.4	8.1	1
10	44	10	19	5.5	17	5.7	7.4	6.3	0.3	0.4	0.3	0.1	0.3	0.4	12	9.6	0.3
11	38	10	20	5.3	21	6.7	12	6.6	0.7	4.2	0	0	0	0	8.4	9.8	0
12	37	10	17	5	20	6.2	15	7.8	1.8	7	0.3	1.5	0.3	1.5	8.1	7.6	1

Tabla 3. Frecuencia (f) en % y velocidad del viento (v) en m/s, para Veracruz, Ver.

Con respecto al recurso solar, lo primero es determinar la trayectoria del Sol a lo largo del año, para definir la orientación más favorable del edificio, así como la inclusión de elementos de control solar como parte de la estructura o componente de la misma (aleros, partesoles, etc.), en una forma sistemática. Para esto se utilizó el software SUNCHART [18] mediante el cual se genera la ruta solar a lo largo del año para una latitud en particular. Las rutas solares se presentan en la Figura 3.

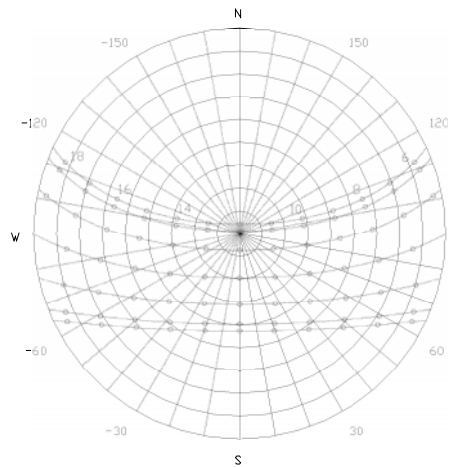


Figura 3. Ruta solar para Veracruz, Ver. (latitud de 19°12")

Para determinar el bioclima a partir de los datos de las Tablas 1 y 2 fue necesario contar con una herramienta mediante la cual se pudo determinar los requerimientos de climatización. Con esa finalidad se utilizó la gráfica bioclimática de Olgay [19], en la cual la humedad relativa se encuentra en el eje de las abscisas y la temperatura de bulbo seco en el de las ordenadas. La gráfica cuenta con una zona de confort, además de que incluye medidas correctivas para cualquier condición climática que se ubique fuera de dicha zona. El centro de la zona de confort está ubicado en la coordenada de 50% de humedad relativa, mientras que para la coordenada de temperatura, ésta se determina mediante el temporeferendum (T_p) [14]. En la Figura 4 se presentan los resultados para el mes de diciembre, y de la misma forma se realizó una gráfica de un día promedio para cada mes del año. En este caso, para diciembre, se observa que parte de la trayectoria está dentro de la zona de confort, las cuales son las horas tránsito entre las primeras horas del día (mañana) y el mediodía, mientras que el resto de la trayectoria corresponden a las horas de frío de la mañana y las de calor (mediodía): sin embargo, es prudente señalar que éste es un mes en el que se presenta un bioclima más benévolo para el ser humano. Para los meses de verano y algunos otros más, las trayectorias de un día promedio ni siquiera se acercan a la zona de confort.

Los puntos que se grafican y quedan localizados por arriba de la zona de confort se dice que tendrán una condición de calor, mientras que para aquellos puntos que se ubiquen bajo la zona de confort presentaran una condición de frío. Dependiendo de la coordenada de humedad relativa, el calor ó frío podrá ser húmedo ó seco. Los resultados para todo el año en Veracruz se presentan en la Tabla 4. Básicamente la Tabla 4 presenta los requerimientos de climatización de la localidad. Analizándola detenidamente puede dividirse en tres temporadas por sus características de condiciones ambientales y una temporada de transición entre ambas.

Temporada 1. Abarca los meses de enero y febrero, se presenta frío durante toda la noche, alrededor de 13 horas diarias de frío, de las 19 a las 8 horas del siguiente día; alrededor del mediodía se presentan varias horas de confort (entre las 10 y 18 horas aproximadamente), mientras que solo algunas pocas horas de calor, debido a la alta humedad, en el transcurso de las horas de frío a las de calor y viceversa.

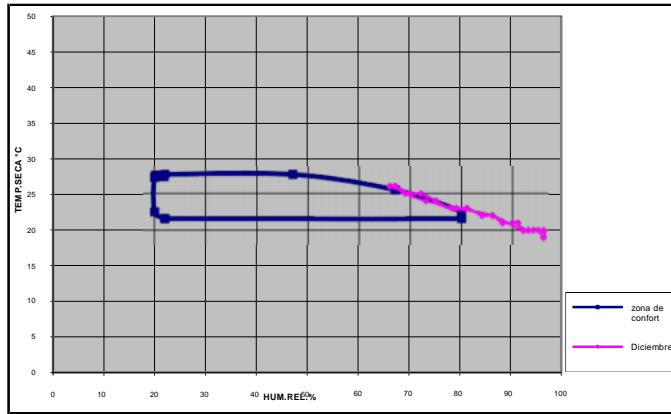


Figura 4. Gráfica bioclimática de Olgay correspondiente al mes de diciembre, para Veracruz, Ver.

HORA	ENERO	FEB.	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPT.	OCT.	NOV.	DIC.
0	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
1	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
2	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
3	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
4	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
5	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
6	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
7	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
8	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
9	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
10	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
11	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
12	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
13	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
14	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
15	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
16	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
17	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
18	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
19	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
20	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
21	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
22	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO
23	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO	FRÍO

CONDICIÓN: FRÍO	CALOR HUMEDO	CALOR POR DEMASIADA HUMEDAD	CONFORT
REQUIERE: CALENTAR	VENTILACIÓN O DESHUMIDIFICACIÓN Y PROTECCIÓN SOLAR	VENTILACIÓN O DESHUMIDIFICACIÓN	PROTECCIÓN SOLAR

Tabla 4. Requerimientos de climatización para Veracruz, Ver.

Temporada 2. Es la época de mayor calor humedo en la localidad, de hecho no existe practicamente ni un solo periodo de sensación de confort ni de frío a lo largo del día, ya que abarca toda la primavera y el verano. Aumenta de manera considerable la temperatura entre las 10 y las 17 horas, manteniendose la sensación de calor por las noches en virtud de la alta humedad relativa, se extiende desde el mes de abril hasta Noviembre.

Temporada 3. Se presenta dos veces al año y es el periodo de transición entre las temporadas 1y 2, comentadas anteriormente. A ella corresponden los meses de marzo y diciembre, registrandose pocas horas de confort (ninguna para marzo) y frío por la noche. Algunas recomendaciones de diseño que podemos realizar con respecto al diseño de una edificación que se construya en la Cd. de Veracruz, considerando los resultados obtenidos, se presentan a continuación:

1. Ubicación de ventanas en las fachadas Sur evitando aquellas en las fachadas Norte, ya que en los meses de mayor calor en la localidad la fachada Norte recibira radiación solar la mayor parte del tiempo.
2. Para las ventanas de la fachada Sur, es recomendable utilizar una combinación de aleros y parasoles com protección solar, ya que para los meses de diciembre, enero y febrero se deben proteger las horas de confort del día. Al proteger los meses mencionados, en virtud de la simetría de la ruta solar, se protegeran también los meses de marzo, septiembre, octubre y Noviembre, en los cuales resultara conveniente dicha protección solar debido a que son meses durante los cuales se presentan varias horas de calor húmedo. Tal medida no proporcionará las condiciones de confort en el edificio, pero sí ayudará a evitar un aumento en el grado de discinfort, fallitando así la tarea de adecuar otras medidas correctivas para la climatización.
3. Para la temporada 2 se recomienda basicamente la ventilación y/o deshumidificación, ya que la mayoría de las veces la sensación de calor obedece más a la humedad relativa que a la temperatura misma. Esto puede lograrse utilizando algún sistema de ventilación mecánico, o preferentemente la opción de un sistema pasivo de ventilación y/o deshumidificación. El

tipo de solución que se decida aplicar para las necesidades de climatización de ésta temporada será muy importante, ya que abarca la mayor parte del año.

4. Para los meses de enero, febrero y diciembre se presentan varias horas de frío por la noche, por lo que es necesario calentar el interior del edificio. Es posible utilizar calentadores eléctricos o también realizar un monitoreo de los diferentes materiales de construcción existentes en el mercado, para analizar cual de ellos puede almacenar parte de la radiación solar que se recibe durante el día para después transmitirlo por la noche hacia el interior. Además, también puede pensarse en la posibilidad de algún sistema pasivo de calentamiento.

Estas estrategias se aplicaron en un hotel donde el lobby es enfriado por medios pasivos, aprovechando las corrientes de aire que se generan en la costa, para ello el lobby del hotel fue rediseñado para mantener una relación de área de flujo 1:5, es decir, el área de entrada de aire es cinco veces menor que la salida (Fig. 5) y esto provoca un efecto Venturi, que a su vez mantiene fresco el lugar. Para mejorar el efecto, el techo de lobby se construyó de forma cupular (Fig. 6) y con adobe cuya conductividad térmica es muy baja, lo que provoca que disminuya la carga térmica por radiación solar en el recinto. Esta acción condujo a quitar de operación una máquina de cinco toneladas de refrigeración que anteriormente se usaba para acondicionar el aire del lobby.



Fig. 5. Relación de áreas de la entrada y salida del aire del lobby.



Fig. 6. Rediseño bioclimático del lobby y del hotel, para minimizar la carga térmica del recinto y disminuir el uso de sistemas convencionales de enfriamiento.

3. Enfriamiento Pasivo

Para saber si existe potencial para un proyecto de enfriamiento pasivo con el subsuelo se tiene que investigar si existe un gradiente superior a los 10°C entre la temperatura del medio ambiente y el subsuelo a una profundidad no mayor a los cinco metros. La zona que se investigó está ubicada en los patios de la Facultad de Ingeniería Región Veracruz, la cual se encuentra a escasos 500 metros del mar, por lo que es un suelo arenoso y con el manto fríasico a no más de dos metros de profundidad, lo cual ayuda a que haya una mejor disipación del calor [20].

3.1 Modelo analítico

Se han estudiado diferentes modelos analíticos para predecir el perfil de temperatura en el subsuelo; sin embargo, el modelo propuesto por Ho y Strand (2008) es el que será tomado como base en este trabajo. La temperatura del subsuelo a una profundidad (z) se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$T_{z,t} = T_m - fl_s \exp \left[-z \left(\frac{n}{365 s} \right)^{1/2} \right] \cos \left\{ \frac{2n}{365} \left[t - t_0 - \frac{z}{2} \left(\frac{365}{n s} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2)$$

La ecuación (2) depende de parámetros como la temperatura promedio de la superficie del suelo (T_m), la amplitud de la variación de la temperatura de la superficie del suelo (A_s), la profundidad (z), la difusividad térmica del suelo (s) el periodo de medición (t) y la constante de fase de la superficie del suelo (t_0). La gran mayoría de estos parámetros dependen de otros que aún están en proceso de obtención, por lo que los resultados del modelo analítico se presentarán en trabajos posteriores.

3.2 Modelo experimental

El monitoreo del subsuelo comenzó en marzo del 2009 y se continuaron realizando mediciones en otros meses del año (septiembre y octubre). Al principio de las mediciones se utilizaron sensores de temperatura del tipo LM-35 por ser los más económicos, pero no fueron resistentes a los esfuerzos mecánicos y se optó por utilizar los sensores de resistencia variable tipo PT100, cuyas mediciones se adquirieron en un equipo de cómputo con la ayuda de una tarjeta de adquisición NI-USB 6009 en conjunto con el software LabVIEW 9.0 para la instrumentación virtual.

El programa LabVIEW utiliza dos ventanas de trabajo, una de ellas se llama el Front Panel o Panel frontal (Figura 7), la otra de éstas se llama Block Diagram o Diagrama de Bloques (Figura 8). En el panel frontal se trabaja más que nada con la presentación, botones del programa y manipulación de los datos introducidos al programa mientras éste se está corriendo.

El trabajo se comienza con el Block Diagram, pues es en éste donde se programa. Como un concepto básico de utilización del programa se sabe que para poder manipular a placer el programa, se necesita tener un interruptor de encendido. Por ello, todas las operaciones y cableados deben de estar dentro de una estructura while la cual fungirá como el interruptor de apagado, dado que se puede poner un botón de "stop" el cual al ser presionado cumplirá la condición para que se detenga el ciclo y todas las operaciones dejarán de realizarse. El sistema de adquisición de datos fue diseñado en la plataforma de LabVIEW y se realizaron una serie de artificios para poder lograr la interface entre el sensor, la tarjeta de adquisición y el software, así como para minimizar los ruidos, ya que el cable de señal no era blindado. Los sensores fueron enterrados con una separación de 50 cm cada uno y el monitoreo de la señal se programó cada 60 segundos.

Para tener una medición convencional con los sensores PT100, generalmente se utiliza un instrumento que tenga una fuente de corriente incluida. Pero en nuestro caso al hacer uso de la tarjeta NI USB-6009, la cual no cuenta con esta fuente incluida, se usaron artificios de ingeniería para sustituirla.

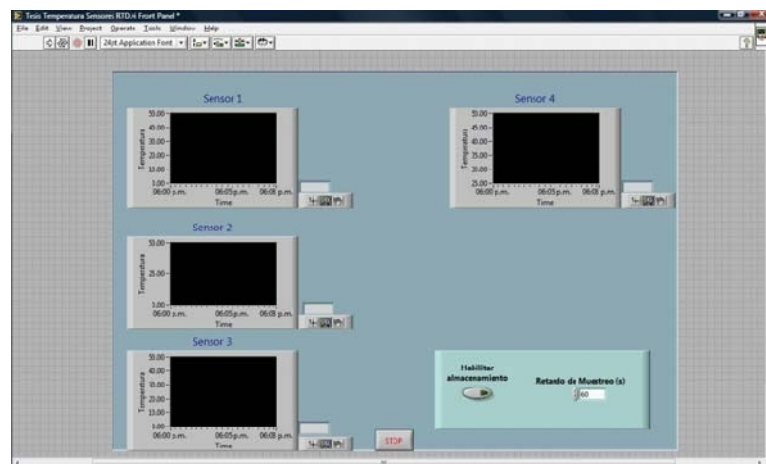


Figura 7. Panel Frontal de LabVIEW.

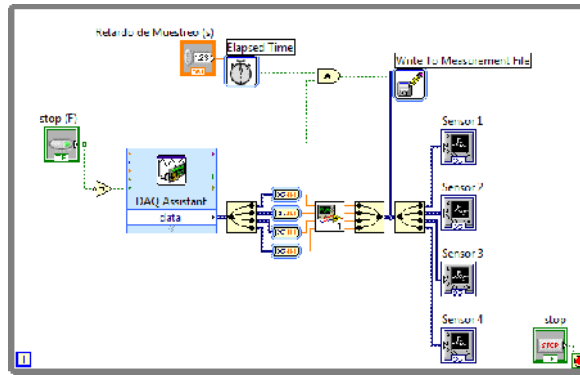


Figura 8. Diagrama a bloques de LabVIEW.

Primeramente, para la instrumentación se diseñó una tarjeta con puentes de Wheatstone para cada uno de los sensores, ya que al variar la detección de temperatura se origina un desbalance del puente que se traduce en una diferencia de potencial en su salida, por lo que la resistencia del sensor se deduce a partir de la ecuación del puente (ecuación 3).

$$R_x = \frac{(R_1 + R_3) \Delta V + R_3 V_o}{V_o (R_1 + R_3) - (R_1 + R_3) \Delta V - R_3 V_o} R_2 \quad (3)$$

Asimismo, dado que el voltaje adquirido es una función de la variación de resistencia del sensor, que a su vez depende de la temperatura, se correlacionó el voltaje adquirido con la curva de calibración de los sensores apoyados en una interpolación de Lagrange, a partir de ciertos puntos conocidos de la curva (ecuación 4).

$$T = \frac{(x - 114)(x - 138.4)(x - 100)}{(113.3 - 100)(113.3 - 114.3)(113.3 - 138.4)} \quad (33)$$

$$+ \frac{(x - 100)(x - 113.3)(x - 138.4)}{(114.3 - 100)(114.3 - 138.4)} \quad (36)$$

$$+ \frac{(x - 100)(x - 113.3)(x - 114.3)}{(138.4 - 100)(138.4 - 113.3)(138.4 - 114.3)} \quad (100) \quad (4)$$

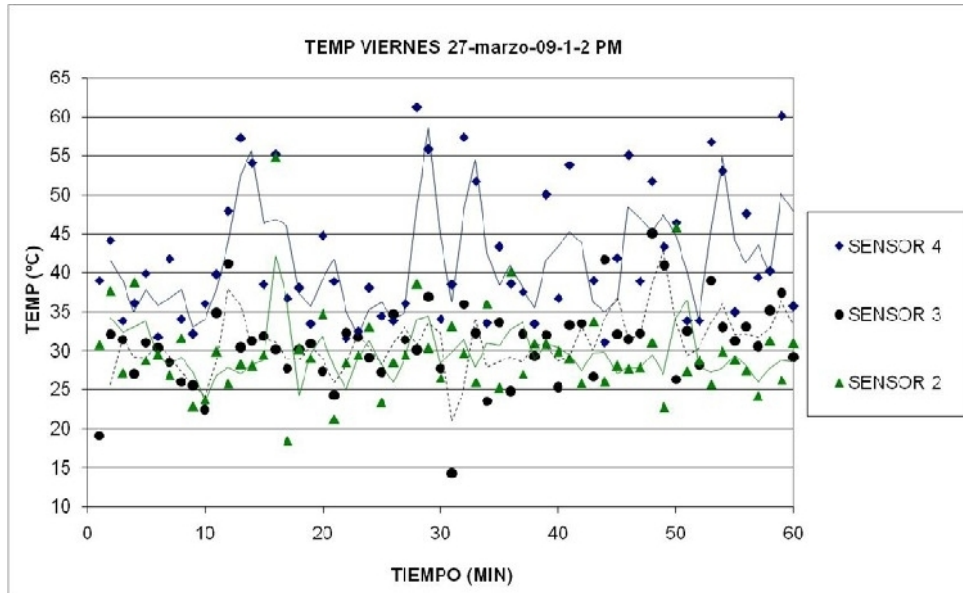
Cabe destacar, que los sensores se fijaron a un tubo de PVC, de modo que permitiera introducirlos en el subsuelo. El primero de los sensores se encontraba exactamente a 2 m de profundidad, mientras que el segundo de ellos se encontraba a 1.5 m, el tercero a 1 m y el cuarto y último de los sensores se encontraba justo sobre la superficie del suelo.

4. Resultados

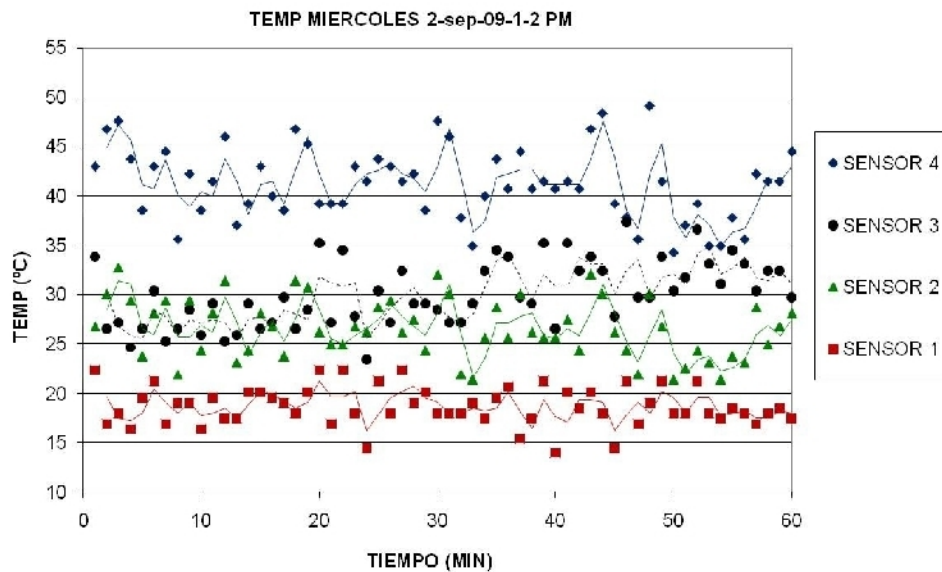
El las Gráficas 1 y 2 se muestran los perfiles de temperatura del subsuelo de mediciones realizadas el viernes 27 de marzo y el miércoles 02 de septiembre de 2009 en el horario de 13:00 a 14:00 pm.

Finalmente, a partir del análisis de las muestras de temperatura obtenida, en la Tabla 5 se presenta un concentrado de sus valores promedio respecto al tiempo de medición, así como de la diferencia promedio de temperatura presente entre el sensor que está en la superficie y aquél que se ubica a 2 m de profundidad.

Según los datos observados, se puede apreciar que siempre se mantiene un gradiente o diferencial de temperatura entre la superficie y el sensor que se encuentra a mayor profundidad en el subsuelo, de alrededor de 20°C, lo cual es muy conveniente para lograr el enfriamiento pasivo.



Gráfica 1. Perfiles de temperatura en el subsuelo de la Facultad de Ingeniería UV. Valores de temperaturas medidos con sensores tipo LMV-35. En esta gráfica se aprecia mucha dispersión de los valores medidos por el sensor 4 (el de la superficie) debido a que son muy sensibles a las condiciones ambientales como los vientos y la irradiación solar.



Gráfica 2. Perfiles de temperatura en el subsuelo de la Facultad de Ingeniería UV. Valores de temperaturas medidos con sensores tipo PT100. En esta gráfica se aprecia que hay una mejor correlación de los valores medidos durante la hora de medición por cada uno de los sensores debido a que este tipo tiene una mejor respuesta y viene protegido por un tubing o termopozo eliminando así las fallas por esfuerzos mecánicos.

Hora	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Δ (S1 y S4)
12 horas	18.6631104	26.5784131	30.0089622	41.2337724	22.570662
13 horas	17.3462434	26.9656238	32.0239383	41.6266934	24.28045
14 horas	17.7514885	25.7773471	31.9032967	40.2058099	22.4543214
15 horas	17.2128411	25.8311896	29.3422219	40.1255445	22.9127035
16 horas	15.9735942	23.5605867	24.4314899	37.7768168	21.8032225
17 horas	17.268548	23.2963228	23.8021395	37.6674172	20.3988692
18 horas	18.3208155	23.0196955	24.2907291	37.6087944	19.2879789

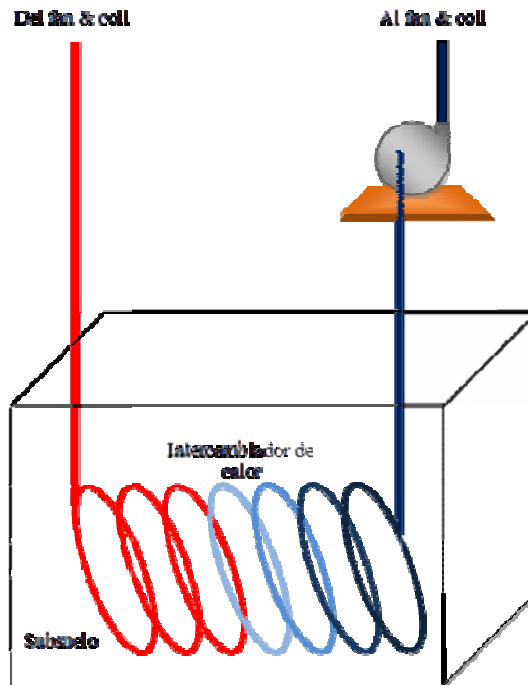
Tabla 5. Valores promedio de temperatura medida por los sensores.

4.1. Propuesta del prototipo experimental

Dependiendo de las características del subsuelo, del material de la tubería, de las propiedades del aire y del fluido secundario de trabajo es como se seleccionará la configuración del intercambiador de calor, pero eso requerirá de más trabajo de investigación y desarrollo de cálculos para el diseño del intercambiador de calor, cuyos resultados se publicarán en trabajos posteriores; sin embargo, se muestra en las Figuras 9(a) y 9(b) el nivel del manto fríasico y un esquema, muy burdo probablemente, del prototipo experimental pero es en lo se continuará trabajando



9(a)



9(b)

En la Fig. 9(a) se muestra la profundidad a la que se encuentra el manto fríasico en el suelo arenoso de la zona costera de Veracruz. En la Fig. 9(b) se muestra el esquema del prototipo experimental que se está planteando para el proyecto de enfriamiento pasivo.

5. Conclusiones

De los anterior podemos concluir que en la Cd. de Veracruz existen grandes requerimientos de climatización debidos, en buena parte, a los altos valores que registran los datos de humedad predominantes a lo largo del año, complementados por las temperaturas arriba de 25°C para todo el año en las horas cercanas al mediodía, llegando al extremo que en el periodo comprendido entre los meses de marzo a noviembre no existe prácticamente ninguna hora durante la cual se presenten las condiciones ambientales que determinan la sensación de confort térmico humano. Sin embargo, es posible incluir algunas consideraciones dentro del diseño de edificaciones en la localidad, tales como la protección solar en las fachadas Sur por medio de aleros y parasoles, evitando cualquier tipo de ventana u elemento similar en la fachada Norte, lo anterior con la finalidad de alcanzar el confort térmico, disminuyendo de ésta forma el consumo energético que se pudiera utilizar para ello. Estas recomendaciones fueron aplicadas recientemente en la remodelación del lobby de un hotel, el cual se sigue monitoreando.

Respecto al enfriamiento pasivo, con los resultados obtenidos en las mediciones se pudo observar que existe un gradiente de temperatura adecuado para desarrollar proyectos de esta índole en suelos arenosos de la costera Veracruzana; sin embargo, se continuará con el desarrollo del prototipo experimental para verificar la temperatura del aire dentro del recinto después de ceder su calor al fluido de trabajo del intercambiador. También se estudiarán los métodos de eliminación de la humedad del aire, ya que este método es sólo de enfriamiento con temperaturas superiores a las del punto de rocío; por lo tanto no se lograría el proceso de deshumidificación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado para la realización de esta investigación bajo el rubro del proyecto: 151850 "Estudio del uso del subsuelo para acondicionamiento de aire en edificaciones sustentables mediante bombas geotérmicas de baja temperatura".

Referencias

- [1] Tejeda-Martínez A, Luyando E., Jáuregui E. Average conditions of thermal stress in Mexican cities with more than one million inhabitants in the face of climatic change. *Atmósfera*, vol. 24, núm. 1, enero, 2011, pp. 15-30. Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México.
- [2] Amfield A.J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*. Vol. 23, pp. 1-26, 2003.
- [3] http://www.energia.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2011/Balance%20Nacional%20de%20Energía%202010_2.pdf.
- [4] Angulo-Córdova. Estudio del bioclima en dieciséis ciudades del estado de Tabasco mediante el índice de confort Temperatura Efectiva. *Universidad y Ciencia*, diciembre, año/vol. 20, No. 040, pp. 69-80. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 2004.
- [5] Hasegawa F., Yoshino H. and Matsumoto S. Optimum Use of Solar Energy Techniques in a Semi-Underground House: First-Year Measurement and Computer Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 2, No. 4, pp. 429-435. 1987.
- [6] Santamouris, M., Mihalakakou, G. and Asimakopoulous, D. N.. On the coupling of thermostatically controlled buildings with ground and night ventilation passive dissipation techniques. *Solar Energy*, Vol. 60, Nos. 3/4, pp. 191-197. 1997.
- [7] Yunmuras, R., Kanog, M., Bolatturkb, A. and Sirin, M. Computational model for a ground coupled space cooling system with an underground energy storage tank. *Energy and Buildings*, Vol. 37, pp. 353-360. 2005.
- [8] Hamada, I., Nakamura, M., Ochifuji, K., Nagano, K. and Yokoyama, S. Field performance of a Japanese low energy home relying on renewable energy. *Energy and Building*, Vol. 33, pp. 805-814. 2001.
- [9] Pfafferot, J. Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardized method to calculate energy efficiency. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 971-983. 2003.
- [10] Kumar, R., Ramesh, S. and Kaushika, S.C. Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building. *Building and Environment*, Vol. 38, pp. 807-813. 2003.
- [11] Alvarado J.L. and Martínez E. Passive cooling of cement-based roofs in tropical climates. *Energy and Buildings* No. 40, pp. 358-364. 2008.
- [12] Alvarado J.L., Terrell W. and Johnson M.D. Passive cooling systems for cement-based roofs. *Building and Environment* No. 44, pp. 1869-1875. 2009.
- [13] Givoni B. Indoor temperature reduction by passive cooling systems. *Solar Energy*, No. 85, pp. 1692-1726. 2011.
- [14] Chávez J. y Morillón D. "Recomendaciones bioclimáticas para el diseño arquitectónico en bioclima cálido húmedo: caso Veracruz, Ver". *Memorias de la XXVI Semana Nacional de Energía Solar*, ANES, Chetumal, Quintana Roo, México, 2002.
- [15] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, *Handbook of Fundamentals*, U.S.A. 1981.
- [16] Tejeda-Martínez A. On the evaluation of the wet bulb temperature as a function of dry bulb temperature and relative humidity, *Atmósfera*, 7, 179-184. 1994.
- [17] Secretaría de Recursos Hidráulicos. *Atlas del Agua de la República Mexicana*, México. (1976).
- [18] <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>
- [19] Olgay, V., *Design with climate*, Princeton University Press, New Jersey. 1963.
- [20] Vidal A., Gómez V. H., Domínguez J. y Sánchez A. "Exploración de perfiles de temperatura en el subsuelo para aplicaciones de enfriamiento pasivo". *Memorias del Congreso Internacional de AcademiaJournals.com*, celebrado del 08 al 10 de septiembre de 2010 en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.