DOI: https://doi.org/10.24275/issn.3061-8851.22.09

ESTUDIOS DE
ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA
VOL. I AÑO 2022
PUBLICACIÓN ANUAL DE INVESTIGACIÓN EN DISEÑO

Intercambiador de Calor Tierra-Aire en Clima Mediterráneo. Periodo Térmico de Transición Frío-Calor

Elizabeth Martínez-Bermúdez[1] (ORCID: 0000-0002-7116-5668)
Víctor Armando Fuentes Freixanet[2] (ORCID: 0000-0002-7426-2391)
Julio César Rincón-Martínez[3] (ORCID: 0000-0002-1946-3609)

1 Universidad Autónoma de Baja California | Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño | Correo: elizabeth.martinez.bermudez@uabc.edu.mx

2 Universidad Autónoma Metropolitana | Área de Arquitectura Bioclimática, Departamento del Medio Ambiente | Correo: ffva@azc.uam.mx

3 Universidad Autónoma de Baja California | Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Correo: julio.rincon@uabc.edu.mx

Resumen

La humedad en espacios interiores genera impactos negativos en toda edificación y estos pueden producir efectos negativos en la salud de los usuarios. La OMS estima que esta afecta del 10-50% de los ambientes interiores en Europa, América del Norte, Australia, India y Japón. Mediante la gestión de los niveles de humedad interior y la condensación a través de un control adecuado de la temperatura y la ventilación, es posible controlar la humedad, garantizar una larga vida útil del edificio y una buena calidad del aire interior. El intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) es el dispositivo propuesto, junto con la chimenea solar, para conformar un sistema pasivo que regule las condiciones higrotérmicas que permitan reducir los problemas de humedad en espacios interiores de la vivienda de interés social en clima mediterráneo.

Con el análisis psicrométrico del ICTA durante el mes de marzo, se observa que en momentos fríos es cuando se presenta mayor diferencia entre las condiciones higrotérmicas del ambiente exterior con respecto a la salida del ICTA, de 8 °C en temperatura y 30 % de humedad relativa. Respecto al desempeño higrotérmico, el ICTA presenta una estabilidad térmica en las tres profundidades, entre 17 °C y 20 °C, y una ligera diferencia con respecto a la salida del mismo; en los momentos fríos se observa una diferencia de casi 10 °C entre el intercambiador en sus tres profundidades y la temperatura ambiente. Los días con mayores temperaturas, la temperatura en la salida del ICTA se encuentra dentro de la zona de confort (entre 17,7 °C y 22,7 °C para el periodo de transición de frío a cálido), mientras que en días fríos las temperaturas se encuentran cercanas al límite inferior. Por su parte, la humedad relativa se mantiene cercano al 60 % durante todo el mes.

Palabras clave: Intercambiador de calor tierra-aire, Sistema pasivo, Vivienda de interés social, Desempeño higrotérmico.

Abstract

Humidity in interior spaces generates negative impacts on all buildings and these can have negative effects on the user's health. WHO estimates that it affects 10-50% of indoor environments in Europe, North America, Australia, India and Japan. By managing indoor humidity levels and condensation through proper temperature and ventilation control, it is possible to control humidity, ensure a long building life and good indoor air quality. The Earth-to-Air Heat Exchanger (EAHE) is the proposed device, together with the solar chimney, to form a passive system that regulates the hygrothermal conditions that allow reducing the humidity problems in interior spaces of social interest housing in a Mediterranean climate.

With the psychrometric analysis of the EAHE during the month of March, it is observed that in cold moments is when there is a greater difference between the hygrothermal conditions of the outside environment with respect to that of the EAHE outlet, of 8 °C in temperature and 30% of RH. Regarding the hygrothermal performance, the EAHE presents a thermal stability in the three depths, between 17 °C and 20 °C, and a slight difference with respect to output; in cold moments, a difference of almost 10 °C is observed between the exchanger in three depths and the ambient temperature. On days with higher temperatures, the temperature at the exit is in the comfort zone (between 17.7 °C and 22.7 °C for the transition period from cold to warm), while on cold days the temperatures are close to the lower limit. The relative humidity remains close to 60% throughout the month.

Introducción

La humedad en los espacios interiores genera impactos negativos en toda edificación y estos pueden producir efectos negativos en la salud de los usuarios, ya que existe un fuerte vínculo entre la humedad en los edificios y el crecimiento de moho y las enfermedades respiratorias asociadas en relación con la calidad del aire interior en los hogares (Singh, Yu, and Kim 2010). La combinación de hongos y poblaciones de esporas con diversos factores ambientales como la humedad, la temperatura y la luz, generan en la edificación lo que se denomina biodeterioro (Restrepo et al. 2007). De igual manera, diversos tipos de hongos generan micotoxinas, las cuales constituyen un problema severo para la salud humana. Las condiciones climáticas de cada ciudad, pueden propiciar el aumento en los problemas de humedad en los espacios interiores por ello es necesario identificar y considerar cuáles son los factores climáticos que pueden afectar las condiciones internas.

La OMS (2009) estima que la presencia de humedad en interiores afecta del 10-50% de los ambientes interiores en Europa, América del Norte, Australia, India y Japón; indica, además, que hay ciertos entornos, como valles o zonas costeras, en los que las condiciones de humedad son más severas que los promedios nacionales. Tanto la humedad como el crecimiento del moho pueden ser particularmente frecuentes en viviendas mal mantenidas, que se caracterizan por ser las de bajos recursos, por lo que se debe dar prioridad a remediar "las condiciones que conducen a la exposición adversa para evitar una contribución adicional a la mala salud en las poblaciones que ya viven con una mayor carga de enfermedad" (World

Health Organization, 2009). Al cumplir con los siguientes tres objetivos es posible controlar la humedad, garantizar una larga vida útil del edificio y una buena calidad del aire interior: 1) controlar el agua líquida, 2) gestionar los niveles de humedad interior y la condensación mediante un control adecuado de la temperatura y la ventilación, y 3) seleccionar materiales y diseños de ensamblaje higrotérmicos que minimicen el crecimiento de moho y otros problemas de humedad (World Health Organization 2009).

Considerando lo anterior, la investigación propone un sistema pasivo para clima mediterráneo que permita regular las condiciones higrotérmicas al interior de los espacios y que a su vez favorezca la ventilación, de manera que se reduzcan los problemas de humedad en las viviendas, principalmente de interés social. El hecho de que sea un sistema pasivo, se debe a la preocupación global por disminuir el consumo de energías convencionales y a la búsqueda de soluciones al alto consumo de estas por parte de los equipos de climatización, así como a la contaminación en general que genera la industria de la construcción, la cual representa del 30 al 45% de la demanda global de energía (Santamouris and Kolokotsa 2013). Utilizar sistemas pasivos juega un papel importante en la reducción de la demanda de energía de las edificaciones, representan una reducción de costos ya que requieren un mantenimiento mínimo, y reducen el impacto al entorno (Duraković, 2020).

Como parte de las estrategias específicas de diseño pasivo, se consideró el intercambiador de calor tierra-aire (ICTA) como uno de los dispositivos principales del sistema propuesto, junto con la chimenea solar, sin embargo, este último no se analiza en el presente documento.

Los intercambiadores de calor tierra-aire— EAHE o EAHX por su nombre en inglés: earth-to-air heat exchanger (Bordoloi et al, 2018; Khabbaz et al, 2016) — se pueden encontrar en la literatura también como intercambiador de calor aire-suelo, túnel tierra-aire, sistema de tubería enterrada o túnel de aire subterráneo (Khabbaz et al. 2016), y de manera coloquial también se les conoce como pozos canadienses. Estos se han utilizado a lo largo de la historia remontándose hasta el año 3 000 a.C. donde los arquitectos iraníes utilizaban túneles de aire subterráneos para la climatización de las edificaciones (Bordoloi et al. 2018). Un concepto similar se empleó por los persas y griegos en la era precristiana, y en el siglo XVI se reportaron construcciones que utilizaban cavidades naturales (Santamouris and Asimakopolus 1996).

El funcionamiento del intercambiador se basa en los mecanismos de transferencia de calor que se presentan en el suelo, siendo la conductividad térmica y la capacidad calorífica los parámetros principales que influyen en el comportamiento térmico del suelo (Santamouris and Asimakopolus 1996). El principio de funcionamiento del ICTA consiste en utilizar la tierra como disipador de calor, y se utiliza comúnmente en lugares cálidos como sistema de enfriamiento pasivo; sin embargo, el uso propuesto del sistema al que se refiere la investigación, consiste en utilizar el intercambiador como dispositivo de pérdida de humedad del aire, de manera que el que ingrese al espacio sea aire seco, al promover la temperatura de rocío al interior de los ductos, debido a la diferencia de temperatura entre el aire y la temperatura del suelo, a efecto de condensar cierto porcentaje de humedad relativa del aire entrante.

El presente documento tiene como objetivo mostrar los primeros avances de la investigación denominada Sistema pasivo para reducir los efectos de humedad en viviendas de interés social en clima mediterráneo, que se desarrolla dentro del Programa de Doctorado en Arquitectura, Urbanismo y Diseño de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California; se centra en el comportamiento higrotérmico del ICTA durante el periodo de transición térmico de frío a calor, específicamente en el mes de marzo 2021.

Desarrollo de la investigación

Descripción del ICTA

El ICTA analizado consiste en un sistema de circuito abierto conectado a una habitación en planta alta en una vivienda de interés social ubicada en el sector Noreste de la ciudad de Ensenada, Baja California, la cual tiene un clima mediterráneo y, de acuerdo con la clasificación García (2004), se considera del tipo BSks, que se describe como seco templado con lluvias en invierno, con verano seco y cálido e invierno húmedo, lluvioso y frío (IMIP 2009). La superficie de terreno total destinada para el intercambiador fue de 7,00 m², ya que al ser una vivienda de interés social es importante destinar la mayor cantidad de superficie para las diferentes necesidades de los usuarios, por lo que se procuró que el sistema propuesto fuera lo menos invasivo y ocupara el menor espacio posible. El ICTA está conformado por tubería de PVC de 0,10 m de diámetro con un diseño en serpentín horizontal colocado en tres niveles, que inicia a 1,50 m de profundidad y tiene una separación de 0,50 m entre cada uno; cuenta con una longitud total de 50,00 m aprox. A la tubería se le dio la pendiente mínima de 2% para dirigir el agua generada por condensación mediante un sistema de dren que consiste en puntos de desagüe en el lecho bajo del tubo en la parte más baja de la pendiente en cada una de las profundidades, tal como lo recomiendan Santamouris & Asimakopolus, (1996). La inyección del aire al interior se logró por medio de ventilación por diferencia de temperaturas a través de una chimenea solar ubicada sobre la cubierta del espacio experimental, las características de dicha chimenea no se consideran para el presente avance de investigación, sin embargo, forma parte fundamental de la investigación. La entrada del intercambiador se ubicó a 1,40 m sobre el nivel de banqueta, y se le colocó protección contra la lluvia; además, se le colocó tela mosquitera tanto en la entrada como en la salida del ICTA, como protección contra insectos. El trayecto vertical de la tubería entre la salida del sistema al nivel de suelo y la entrada en la recámara, fue aislado térmicamente por medio de un cajillo de tres caras con hoja de poliestireno extruido, espuma de poliuretano expandido y triplay marino de ¾” con el fin de mantener, en la medida de lo posible, las características higrotérmicas logradas en el nivel -2,50 m del ICTA.

Descripción del monitoreo

Se utilizó el sensor marca Onset modelo U12-012/U12-013 para medir y/o registrar las variables de humedad relativa y temperatura del aire; también se utilizaron sensores TMCx-HD para medir la temperatura de suelo, sondas marca Onset modelo S-THB-M002/008 para medir temperatura y humedad relativa en ductos y la micro-estación marca Onset modelo H21-USB para registrar la información de las sondas. La recolección de los datos medidos se llevó a cabo mediante el software HOBOware (Onset Computer Corporation 2019) versión 3.7.18, desarrollado para dispositivos y data loggers de la misma marca.

Los sensores de temperatura y humedad del aire dentro del intercambiador, se colocaron en cinco puntos estratégicos: 1) En la entrada del sistema, a 1,00 m sobre el nivel de banqueta; 2) al terminar el primer nivel del intercambiador, para observar si hay pérdida de humedad en dicho nivel; 3) al terminar el segundo nivel, para observar si hay aumento de temperatura en el primer recorrido; 4) en el tercer nivel, antes de empezar a subir a la recámara y 5) a la salida del intercambiador. En todos los casos, los sensores se ubicaron al centro geométrico de la sección transversal del tubo de 4”. Los sensores de temperatura de suelo se colocaron próximos a los sensores higrotérmicos del ducto con excepción del correspondiente a la profundidad de 1,5 m, el cual, por criterios de longitud del cable, se colocó en el mismo eje que los otros dos sensores. Además, se colocaron sensores en el exterior de la vivienda y en el centro geométrico de la habitación. Debido a que en la investigación la velocidad del aire es la variable que presenta mayor intermitencia el intervalo de medición se estableció en 5 minutos, siendo en el caso de las variables higrotérmicas valores puntuales y promedio en el caso de la velocidad del aire. Para efecto del presente documento, solo se analizaron las variables de temperatura y humedad relativa del ambiente exterior, del suelo, del intercambiador de calor y del espacio interior en el cual se instaló el prototipo. En la figura 1 se muestra el esquema general del ICTA y su posición con respecto a la vivienda, así como la ubicación de los instrumentos de medición.

Análisis de proceso psicrométrico

Como primera etapa del procesamiento de información, los datos obtenidos de temperatura de suelo, condiciones higrotérmicas del ambiente exterior y del ICTA se graficaron en la carta psicrométrica obtenida con base en la presión barométrica de la ciudad de Ensenada (1013,2 hPa), para observar y comprender el comportamiento físico del intercambiador durante el día, en momentos específicos. Para ello se seleccionaron diversos días del mes de marzo, que presentaron condiciones extremas o especiales, como lluvia, nublado, momentos fríos o cálidos; en tres horarios: 6:00 h, 12:00 h y 15:00 h (figura 2).

Tanto en momentos fríos y cálidos de los días del periodo de análisis, la temperatura del suelo se mantuvo en un rango entre 17 °C y 20 °C. En los momentos fríos, la temperatura dentro del intercambiador a la profundidad de 1,5 m se mantuvo entre 3 °C y 10 °C por encima de la temperatura ambiente mientras que, en los momentos cálidos se mantuvo entre 2 °C y 5 °C por debajo de la misma. En los momentos fríos es cuando se presenta mayor diferencia entre las condiciones higrotérmicas del ambiente exterior con respecto a la salida del ICTA, de 8 °C en temperatura y 30 % de humedad relativa. Dentro del comportamiento regular, a

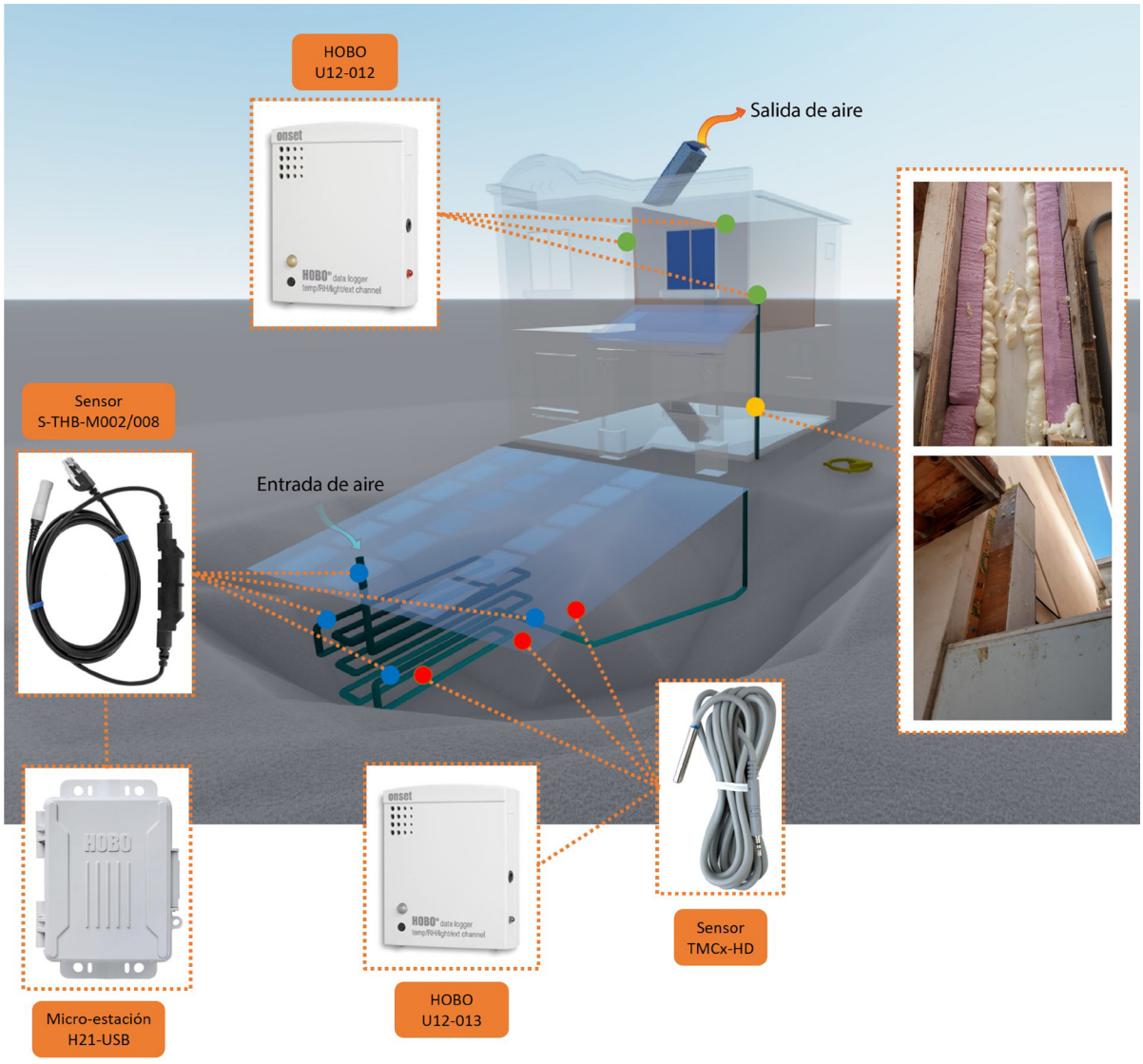

Figura 1. Esquema general del ICTA y ubicación de instrumentos de medición.

las profundidades de 2,0 y 2,5 m se presentó un ligero aumento de temperatura, de aproximadamente 0,5 °C por cada profundidad, con respecto a la profundidad 1,5 m. En la salida del intercambiador, se presentó una pérdida de las condiciones logradas en la profundidad 2,5 m esto debido al proceso de ascensión del ducto, disminuyendo temperatura conforme se reduce la profundidad; sin embargo, se mantuvo mayor con respecto a la temperatura ambiente en los momentos fríos y menor con respecto a los momentos cálidos, es decir, sí se logró una corrección de las condiciones térmicas que ingresaban al sistema.

Con respecto al porcentaje de humedad relativa, en los momentos fríos se presentó una disminución del porcentaje entre la del ambiente y la de la salida del intercambiador, manteniéndose en un rango del 60 %; durante los momentos cálidos analizados, se presentó un ligero aumento en el porcentaje de humedad relativa entre la del ambiente y la de la salida, sin embargo, en esta última se mantuvo de igual manera en un rango dentro del 60%.

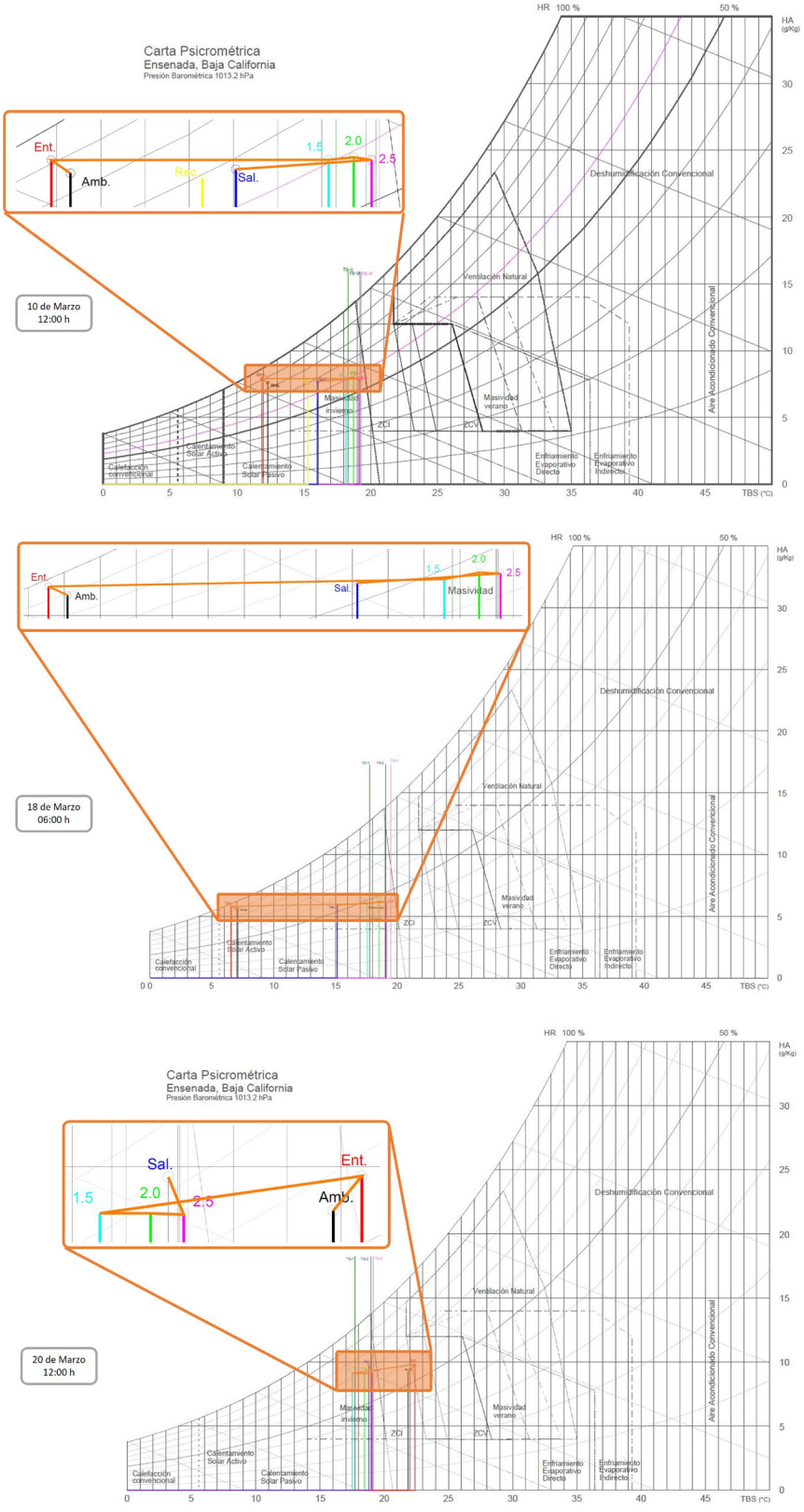

Figura 2. Comportamiento psicrométrico del ICTA.
Arriba: 10 de marzo 12:00 h; Centro: 18 de marzo 06:00 h; Abajo: 20 de marzo 12:00 h.

Como siguiente etapa del procesamiento de datos, se realizó la comparación de las variables de temperatura ambiente, temperaturas del suelo y temperaturas dentro del intercambiador en sus tres profundidades, así como de la entrada y salida del mismo; la comparación se hizo por periodo diario, en escala de 24 horas, y mensual, en escala de 31 días. A la par, se llevaron a cabo las gráficas de comparación de humedad relativa (ambiente, entrada, salida y tres profundidades del intercambiador).

Resultados y discusión

Al analizar las gráficas de temperaturas de diferentes días (figura 3), se observa que la temperatura dentro del intercambiador en las tres diferentes profundidades son similares a las temperaturas del suelo manteniendo un rango entre los 18 °C y 20 °C, por lo tanto, se puede considerar como un comportamiento estable. Se observan condiciones similares entre el ambiente exterior y la entrada del intercambiador durante todo el día, mientras que en los momentos fríos se observa una diferencia de casi 10 °C entre el intercambiador, en sus tres profundidades y la temperatura ambiente, presentó una menor diferencia en días con temperaturas más cálidas (20 de marzo).

A la salida del intercambiador, se observa una variación con respecto a la profundidad 2,5 m, sin embargo, en los diferentes días, se puede considerar un comportamiento estable con respecto a la temperatura del ambiente exterior.

Posterior al análisis diario, se analizó el desempeño del intercambiador en un periodo mensual, mediante la graficación de los datos en un lapso de 31 días, correspondientes al mes de marzo.

A pesar de que las temperaturas a la salida del intercambiador se encuentran por debajo de la zona de confort anual, la cual se encuentra entre los 20,5 °C y 25,5 °C (Huerta 2018), esta se encuentra cercana al límite inferior de la misma, en los días con bajas temperaturas, y en días con temperaturas mayores, la temperatura de salida alcanza el rango de la zona de confort durante un periodo de tiempo. Sin embargo, al analizarla con respecto a la zona de confort para el periodo de transición de frío a cálido (figura 4), establecida por Rincón-Martínez et al. (2020) entre 17,7 °C y 22,7 °C, la temperatura en la salida del intercambiador se encuentra dentro del rango, principalmente en los días con mayores temperaturas, incluso en los días fríos a pesar de que no se alcanza el rango, las temperaturas se encuentran cercanas al límite inferior.

En ella se observa la estabilidad térmica del suelo y del intercambiador de calor en sus tres profundidades. En la temperatura de salida, se observa una diferencia con respecto a la profundidad de 2,5 m.

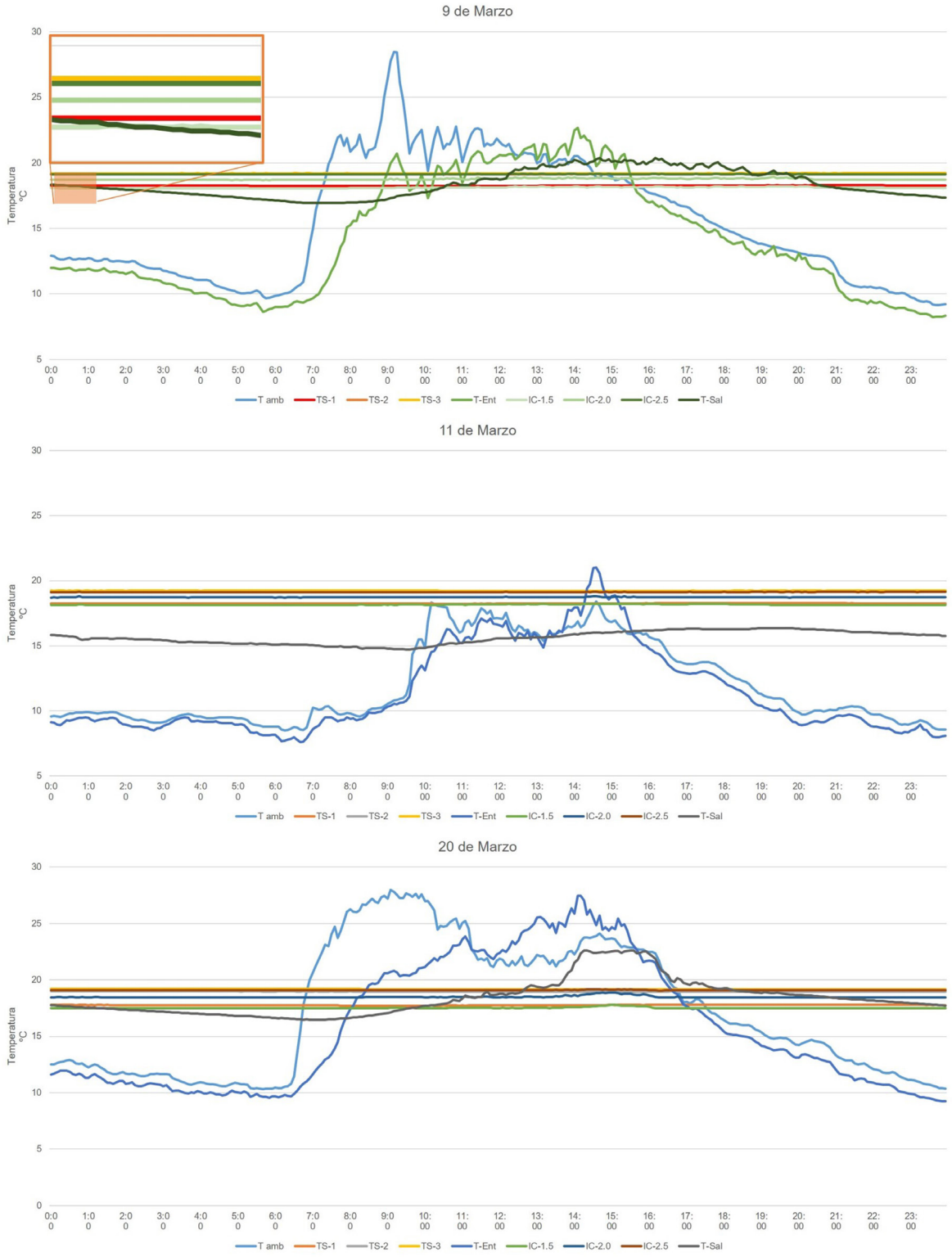

Figura 3. Gráficas diarias de comparación de temperatura.
Arriba: 9 de marzo. Centro: 11 de marzo. Abajo: 20 de marzo.

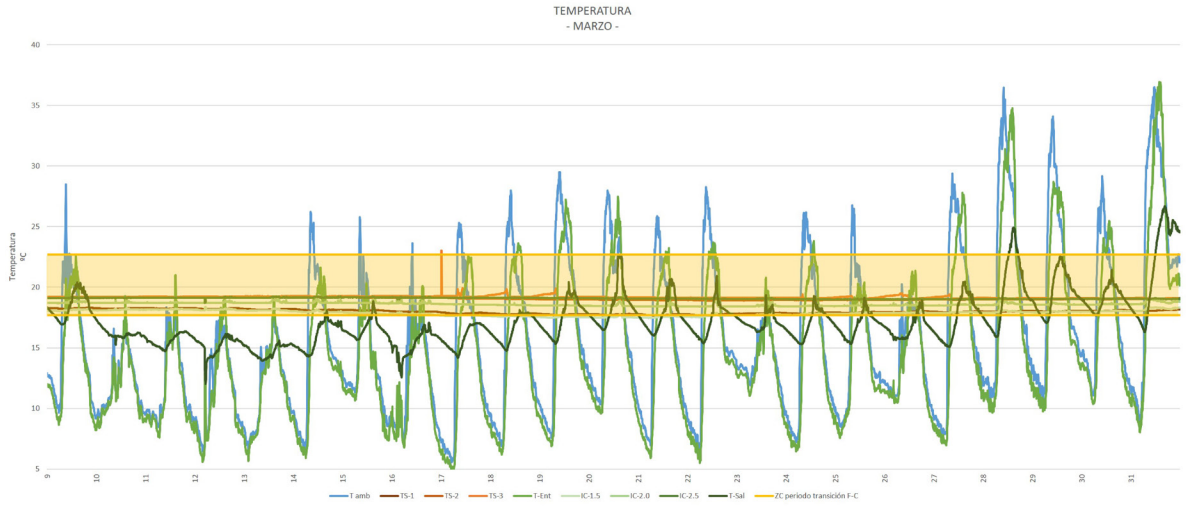

Figura 4. Gráfica mensual del comportamiento térmico del ICTA.

Con respecto al análisis de la humedad relativa (figura 5), en el análisis diario se observa un comportamiento general similar al comportamiento de la temperatura; la humedad relativa del ambiente exterior y la entrada del intercambiador es similar, mientras que en las tres profundidades del intercambiador el comportamiento es relativamente estable durante todo el día. Y de igual manera, se observa una variación entre la profundidad 2,5 m y la humedad relativa a la salida, sin embargo, mantiene un rango cercano al 65 % en los diferentes días, siendo una diferencia significativa con respecto a la humedad relativa del ambiente exterior, principalmente durante el periodo nocturno de hasta 30 %.

En el análisis mensual del desempeño hígrico (figura 6), se observa que a pesar de presentar porcentajes de humedad relativa ambiente por encima del 95 %, en el ICTA se mantiene en un rango entre 45 y 70 %, manteniendo este rango a la salida del mismo.

Al ser un periodo breve de monitoreo no se puede señalar si el funcionamiento es el óptimo para el objetivo de la investigación, sin embargo, con los datos obtenidos se observan condiciones higrotérmicas adecuadas debido a que se encuentran dentro o cercanas a la zona de confort, y en rangos que cumplen con las recomendaciones generales para el control de humedad.

Conclusiones

En este avance de investigación, se presentan las condiciones de operación y los resultados del análisis del desempeño higrotérmico, correspondientes al mes de marzo, del ICTA. Tal desempeño es conforme a lo esperado, por la revisión bibliográfica y el entendimiento de

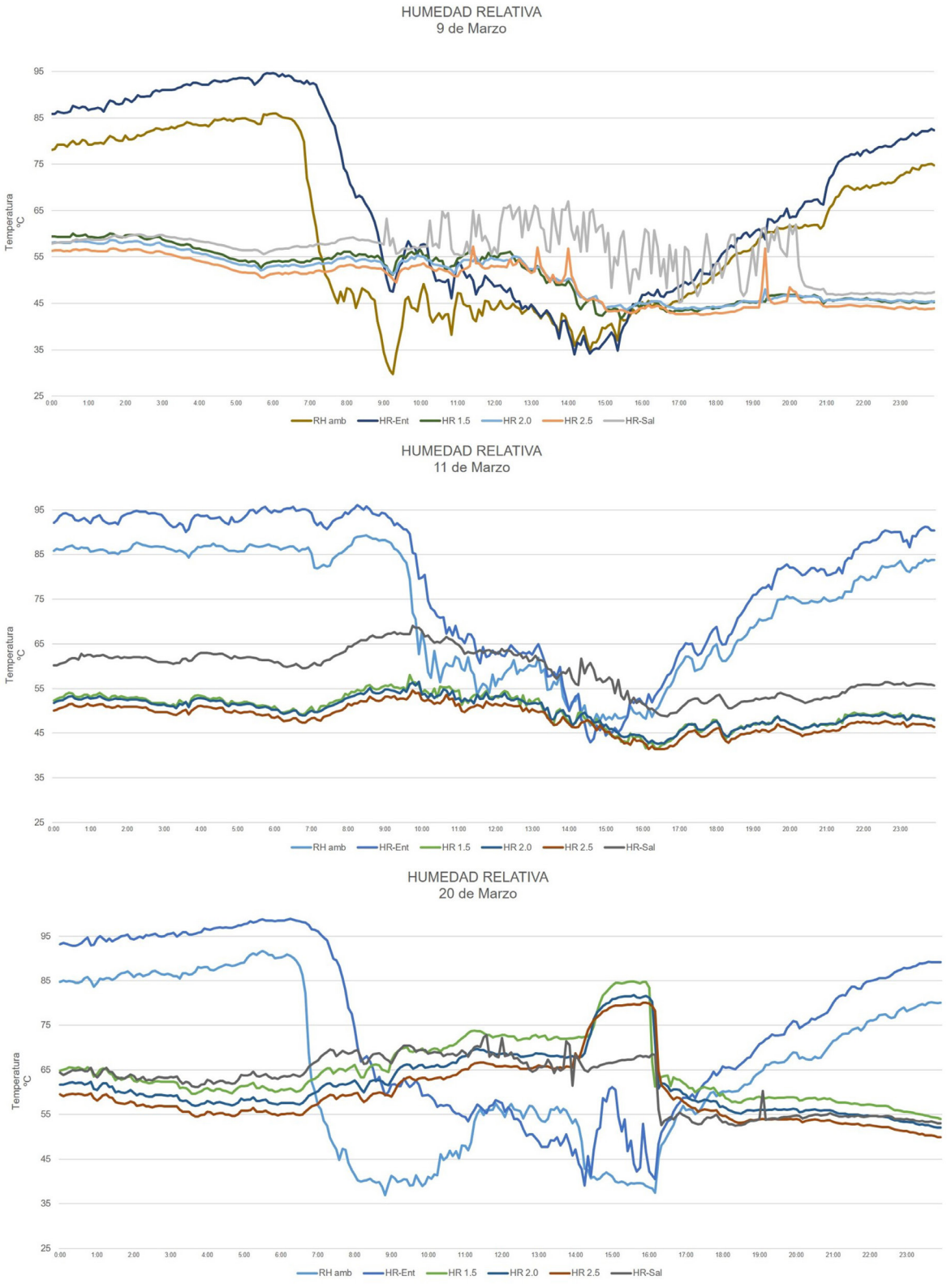

Figura 5. Gráficas diarias de comparación de humedad.
Arriba: 9 de marzo, centro: 11 de marzo, abajo: 20 de marzo.

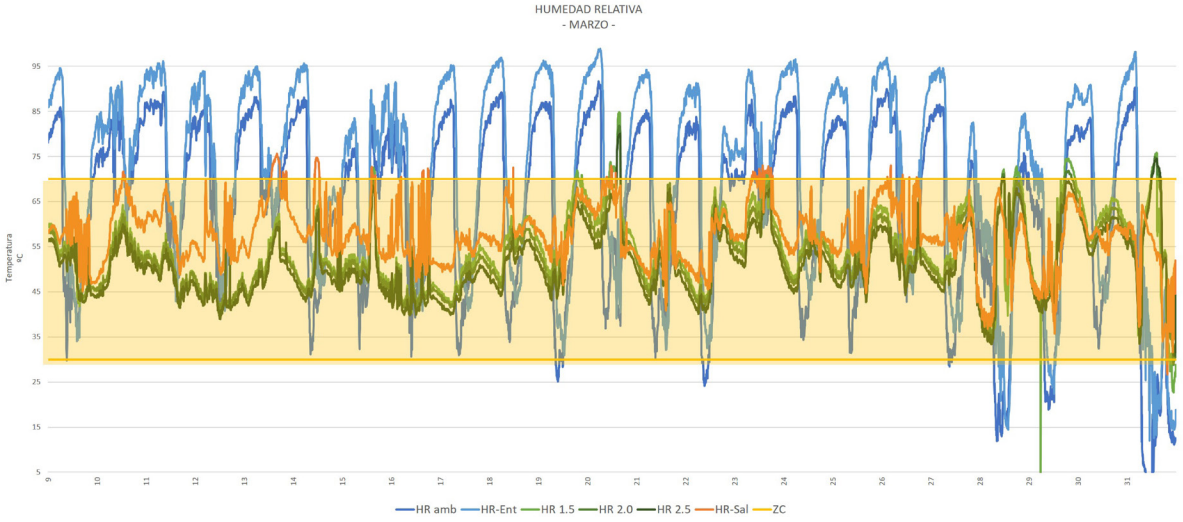

Figura 6. Gráfica mensual del comportamiento hígrico del ICTA.

los procesos psicrométricos que intervienen en su funcionamiento. La temperatura del suelo es adecuada para propiciar el punto de rocío dentro del ducto y por ende la condensación, a la profundidad de 1,50 m; mientras que en las dos profundidades restantes se logra una regulación térmica. Sin embargo, es necesario considerar que es la primera etapa de funcionamiento, siendo el periodo frío el de mayor interés, debido a que las condiciones climáticas (bajas temperaturas y la presencia de lluvias) propician la proliferación de humedad y hongos en los espacios interiores.

Es importante destacar que el avance se enfoca en un periodo de un mes, ya que el monitoreo del sistema pasivo se llevará a cabo de marzo de 2021 a febrero de 2022, periodo en el que también se analizará el desempeño del ICTA con respecto al flujo de aire, así como el desempeño de la chimenea solar como dispositivo para propiciar la inyección de aire.

Referencias bibliográficas

Bordoloi, Namrata, Aashish Sharma, Himanshu Nautiyal, and Varun Goel. 2018. “An Intense Review on the Latest Advancements of Earth Air Heat Exchangers.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 89(March):261–80.

García, E. 2004. Modificaciones Al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 5ta ed. Instituto de Geografía-UNAM.

Huerta, Yuriria. 2018. “Manual de Diseño Pasivo Para El Arquitecto: Un Reflejo Del Análisis Climático y Bioclimático de Ensenada, Baja California.” Universidad Autónoma de Baja California.

IMIP. 2009. “Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Ensenada 2008-2030.”

Khabbaz, Mohamed, Brahim Benhamou, Karim Limam, Pierre Hollmuller, Hassan Hamdi, and Amin Bennouna. 2016. “Experimental and Numerical Study of an Earth-to-Air

Heat Exchanger for Air Cooling in a Residential Building in Hot Semi-Arid Climate." Energy and Buildings 125:109–21.

Onset Computer Corporation. 2019. "HOBOware."

Restrepo, Avendaño, Carlos Alberto, Londoño Echeverri, Carlos Andres, Vela Rosero, and Miguel Angel. 2007. "Pathologies by Humidity in the Materials for Construction." Scientia Et Technica Scientia et Technica Año XIII 36(36):343–47.

Rincón-Martínez, J. C., K. E. Martínez-Torres, M. E. González-Trevizo, and F. Fernández-Melchor. 2020. "Modelos Matemáticos Para Estimar El Confort Térmico Adaptativo En Espacios Interiores: Un Estudio En La Transición Térmica de Ensenada, B.C." Ingeniería Revista Académica de La Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán 24(1):1–17.

Santamouris, M., and D. Asimakopolus. 1996. "Passive Cooling of Buildings." James & James.

Santamouris, M., and D. Kolokotsa. 2013. "Passive Cooling Dissipation Techniques for Buildings and Other Structures: The State of the Art." Energy and Buildings 57:74–94.

Shaw, B. D. 2017. Uncertainty Analysis of Experimental Data with R. Taylor $ Francis.

Singh, Jagjit, Chuck Wah Francis Yu, and Jeong Tai Kim. 2010. "Building Pathology, Investigation of Sick Buildings - Toxic Moulds." Indoor and Built Environment 19(1):40–47.

Ürge-Vorsatz, Diana, Luisa F. Cabeza, Susana Serrano, Camila Barreneche, and Ksenia Petrichenko. 2015. "Heating and Cooling Energy Trends and Drivers in Buildings." Renewable and Sustainable Energy Reviews 41:85–98.

World Health Organization. 2009. Who Guidelines for Indoor Air Quality: Dampness and Mould. edited by E. Heseltine and J. Rosen. Germany: WHO Regional Office for Europe.

Nota: Todas la imágenes son de elaboración propia.