

AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA BASADA EN EL TIEMPO DE HUMECTACIÓN DEL CLIMA TROPICAL HÚMEDO DEL ESTADO DE TABASCO

Atmospheric aggressiveness based on the time of wetness of the tropical humid climate of the state of Tabasco

E del Angel-Meraz ✉, L Veleva, M Acosta-Alejandro

(EDAM) División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carr. Cunduacán-Jalpa de Méndez Km. 1, C. P. 86690 Cunduacán, Tabasco, México. ebelia.delangel@daia.ujat.mx

(LV) Departamento de Física Aplicada, CINVESTAV-Mérida

(MAA) División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Artículo recibido: 7 de mayo de 2008, **aceptado:** 10 de agosto de 2009

RESUMEN. La combinación de datos del Complejo Temperatura-Humedad relativa atmosférico (CT-HR) juega un papel muy importante en el desarrollo de experimentos y procesos físicos, químicos o biológicos. Los cambios diarios del CT-HR, así como el tiempo de humectación de diferentes ambientes permiten realizar un análisis detallado para explicar el proceso y la velocidad de degradación de materiales, particularmente metales y aleaciones. En este trabajo se presenta un estudio estadístico y sistemático del CT-HR, basado en la correlación de datos históricos de horarios diarios de Temperatura (T) y Humedad relativa (HR), para el período 2000-2003 de dos ambientes del clima tropical húmedo, localizados en el estado de Tabasco. Estas dos regiones son consideradas como urbana (Villahermosa) y marina-costera (Paraíso). El análisis estadístico del CT-HR mostró un comportamiento diferente para las dos regiones. En el caso de la atmósfera urbana, los valores de HR y T presentaron notables cambios a lo largo del día, manteniéndose este patrón durante todo el año, con variaciones típicas debido a los periodos secos y lluviosos. La atmósfera marina-costera mostró un comportamiento de HR y T parecido al de la atmósfera urbana durante los meses secos, sin embargo, para el periodo de lluvias, el comportamiento del CT-HR no desplegó cambios apreciables. De acuerdo a la norma ISO 9223, el valor del tiempo de humectación anual indica que la atmósfera marina-costera puede ser considerada como muy agresiva (categoría τ_5 , 7470-8391 h año⁻¹), mientras la atmósfera urbana como agresiva (categoría τ_4 , 4603-5741 h año⁻¹).

Palabras clave: Corrosión atmosférica, tiempo de humectación, clima tropical húmedo, corrosión de metales.

ABSTRACT. The combination of data in the relative humidity-temperature atmospheric complex (CT-HR) plays a very important role in the development of experiments and in physical, chemical or biological processes. The daily changes in the CT-HR, as well as the time of wetness of different environments, allow making a detailed analysis to explain the process and rate of degradation of materials, particularly metals and alloys. A statistical and systematic study of the CT-HR was carried out in this study, based on the correlation of historical data of daily values of temperature (T) and relative humidity (HR) for the period 2000-2003, for two humid tropical climate environments located in the state of Tabasco. These two regions were characterised as urban (Villahermosa) and marine-coastal (Paraíso). The statistical analysis of the CT-HR showed a different behavior for the two regions. In the case of the urban atmosphere, the values of HR and T displayed marked diurnal changes that were constant throughout the year, with typical variations corresponding to the dry and rainy periods. The marine-coastal atmosphere presented a HR and a T similar to those of the urban atmosphere during the dry months. However, the behavior of the CT-HR did not present notable changes during the rainy season. According to norm ISO 9223, the annual value of the time of wetness indicates that the marine-coastal atmosphere may be considered to be very aggressive (category τ_5 , 7470-8391 h year⁻¹), and the urban atmosphere aggressive (category τ_4 , 4603-5741 h year⁻¹).

Key words: Atmospheric corrosion, time of wetness, humid tropical climate, corrosion of metals.

INTRODUCCIÓN

En un clima tropical-húmedo, las fuertes variaciones de los parámetros climáticos, tales como la humedad relativa, la temperatura, la velocidad del viento, las precipitaciones pluviales, la radiación solar, entre otros, afectan de una manera relevante muchos procesos físicos, químicos y biológicos. En el caso de los materiales, el proceso electroquímico de la corrosión de metales y aleaciones es fuertemente influenciado por dichos parámetros climáticos (Feliu et al. 1993; Shreir et al. 1994). Dentro de los parámetros más importantes, involucrados en la corrosión atmosférica de estos materiales, se encuentran la temperatura y la humedad del aire, formando el Complejo Temperatura-Humedad Relativa (CT-HR) (norma ISO 9223 1992; Corvo et al. 2008). En años recientes, el tiempo de humectación (TOW, time of wetness) ha recibido especial atención, ya que éste se considera como el tiempo durante el cual existe humedad sobre la superficie de un metal expuesto al medio ambiente (Cole & Paterson 2006), generada por lluvia, niebla, nieve, rocío, condensación capilar u otros fenómenos similares. Esta película húmeda, al disolver los contaminantes corrosivos, actúa como un conductor iónico (electrolito), dando el inicio del proceso de corrosión (Veleva & Kane 2003). De acuerdo a la norma ISO 9223 (1992), este parámetro puede ser calculado a partir del complejo CT-HR, tomando en cuenta como tiempo de humectación las horas cuando $HR \geq 80\%$ y $T \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, en una atmósfera limpia y libre de contaminantes atmosféricos higroscópicos (cloruros, por ejemplo, sulfato de amonio, etc.). Estudios realizados en el clima de la Península de Yucatán (regiones costera, urbana y rural), utilizando el sensor de cobre/oro del ASTM G84 (1989), ha confirmado que el valor crítico de HR disminuye en el rango de 50 a 60 %, cuando se incrementan los niveles de cloruros en atmósferas marinas, así mismo el tiempo de humectación ocurre a valores de $T \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Veleva & Alpuche 2002; Veleva & Kane 2003). Se reconoce que las regiones con un clima tropical húmedo presentan valores promedios de temperatura y humedad relativa muy altas anualmente, lo que acelera el proceso de corrosión en ambientes atmosféricos

agresivos, por lo que los metales tienen una vida útil mucho menor, comparada con la observada en otros tipos de clima (Maldonado & Veleva 1999a; Mariaca et al. 1999; Veleva & Kane 2003; Mendoza et al. 2004). En particular, el estado de Tabasco se caracteriza por tener un clima tropical húmedo, con períodos estacionales secos y lluviosos, que influyen fuertemente en la corrosión de los metales expuestos a la atmósfera (Del Angel et al. 2006; Veleva et al. 2007). Para esta región del sureste mexicano, se ha reportado que la mayor parte de las viviendas (63 %) presentan estructuras metálicas (láminas galvanizadas, principalmente) expuestas a la intemperie (INEGI 1990,2002), en atmósferas con diferente grado de agresividad. Hasta la fecha, no existen datos reportados del CT-HR, que permitieran calcular los tiempos de humectación, parámetro importante para un mejor entendimiento del proceso de corrosión de metales y la búsqueda de nuevas alternativas de solución en la protección anticorrosiva de los metales y su mayor vida útil en regiones tropicales. El objetivo de este trabajo es describir el comportamiento del Complejo Temperatura-Humedad Relativa (CT-HR), así como del tiempo de humectación y su distribución en rangos de temperatura de dos ambientes (urbano y marino-costero) en el estado de Tabasco, para el período 2000-2003. Basado en los valores anuales del tiempo de humectación se ha determinado la categoría de agresividad corrosiva de estas atmósferas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estado de Tabasco está situado en el sureste de México. Su escasa elevación con respecto al nivel del mar, propicia el desarrollo de climas cálidos húmedos con influencia del Golfo de México. La temperatura media anual es de $26.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, la humedad relativa promedio anual se estima en 82 % y la precipitación media anual es de 2 008 mm (INEGI 2004). El municipio de Paraíso ($18^{\circ} 23'$ de latitud norte y $93^{\circ} 12'$ de longitud oeste) presenta una atmósfera marina-costera y colinda al norte, y al este con el Golfo de México. La ciudad de Villahermosa ($18^{\circ} 20'$ de latitud norte y $93^{\circ} 15'$ de longitud oeste) es

considerada como un ambiente *urbano* y está ubicada a una distancia de 68 km de la costa del Golfo de México. Estos ambientes son importantes, debido a sus características climáticas y a la influencia que tienen sobre la infraestructura metálica existente en la región.

Procedimiento del análisis de la información

Los datos horarios de la temperatura y humedad relativa fueron proporcionados por la estación meteorológica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para la atmósfera urbana de Villahermosa y la de PEMEX (Exploración y Producción), en el caso de la atmósfera marina-costera de Paraíso, para el periodo de 2000 a 2003. Se procesaron 70 080 datos horarios de T y HR que permitió determinar los valores promedios, mínimos y máximos de T y HR (diarios y mensuales), así como, el tiempo de humectación ($HR \geq 80\%$ a $T \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) mensual y anual. El análisis estadístico del complejo diario temperatura-humedad relativa fue realizado con un software estadístico (programa en Fortran), diseñado para obtener los datos mencionados anteriormente y hacer su análisis (Veleva *et al.* 1997). Además, este análisis estadístico permitió obtener la distribución de los tiempos en los cuales se tiene una $HR \geq 80\%$ por rangos de temperatura, relevante para la determinación del tiempo de humectación y de esta forma entender la cinética del proceso de corrosión de metales y aleaciones.

RESULTADOS

Complejo temperatura-humedad relativa (CT-HR)

El análisis estadístico de los cambios horarios en los valores de HR y T del aire ha mostrado algunas características específicas, que se presentan a continuación. La Figura 1 compara los valores horarios promedios de los CT-HR durante el año 2000, considerando este período representativo del tiempo de estudio, en las atmósferas de Villahermosa y Paraíso. Se puede observar que en el ambiente urbano de Villahermosa durante la noche (20:00 h - 06:00 h) la HR aumenta linealmente, presentando valores entre 80-85 % en el mes seco (incluyendo meses de

primavera y verano) y entre 90-95 % en el mes lluvioso (meses de otoño e invierno). La HR alcanza su valor máximo alrededor de la madrugada (06:00 h). En la atmósfera marina de Paraíso, durante el día (07:00 h - 19:00 h) la HR decae progresivamente, hasta alcanzar por la tarde (15:00 h) un valor mínimo (50-65 %, periodo seco o lluvioso, respectivamente) y posteriormente inicia su incremento. Este comportamiento puede ser expresado como una dependencia polinomial de orden dos. Respecto al comportamiento de la T diaria, sus valores presentan tendencia inversa a la de la HR, alcanzando valores máximos de 31-32 °C y mínimos de 22-23 °C (Figura 1). En el caso del ambiente marino-costero de Paraíso (Figura 1), la HR y T no presentan cambios tan marcados en el día, sino en un intervalo menor, debido a la cercanía con el mar, que como un búfer termodinámico mantiene el complejo T-HR con menores oscilaciones (Veleva *et al.* 1997). Debido a su influencia, la HR presenta mayores valores mínimos (75-90 %) que los del ambiente urbano de Villahermosa. De la misma manera, la T de Paraíso presenta cambios en un menor rango de valores. Las variaciones de los valores promedios horarios de HR y T están representadas por una barra de error en cada gráfica.

La Figura 2, muestra los valores promedios mensuales de HR y T para el ambiente urbano (Villahermosa) y marino-costero (Paraíso), durante los años de este análisis (2000-2003). En el ambiente urbano se observa que la HR presenta una diferencia en los valores, marcada por el periodo seco (menores valores de HR de marzo a agosto) y lluvioso, cuando los valores promedios mensuales de HR aumentan. En el caso del municipio de Paraíso, la HR no mostró cambios significativos, en los valores, marcados por estos dos periodos, debido a la cercanía del mar. Es importante señalar que en el 2003, la ciudad de Villahermosa presentó valores promedios de HR mayores que en el municipio de Paraíso durante todo el año, debido a que en ese año se registró una cantidad mayor de precipitaciones pluviales. En ambos ambientes, los cambios en la T son una respuesta viceversa del comportamiento de la HR, con sus valores máximos en mayo-junio, en general.

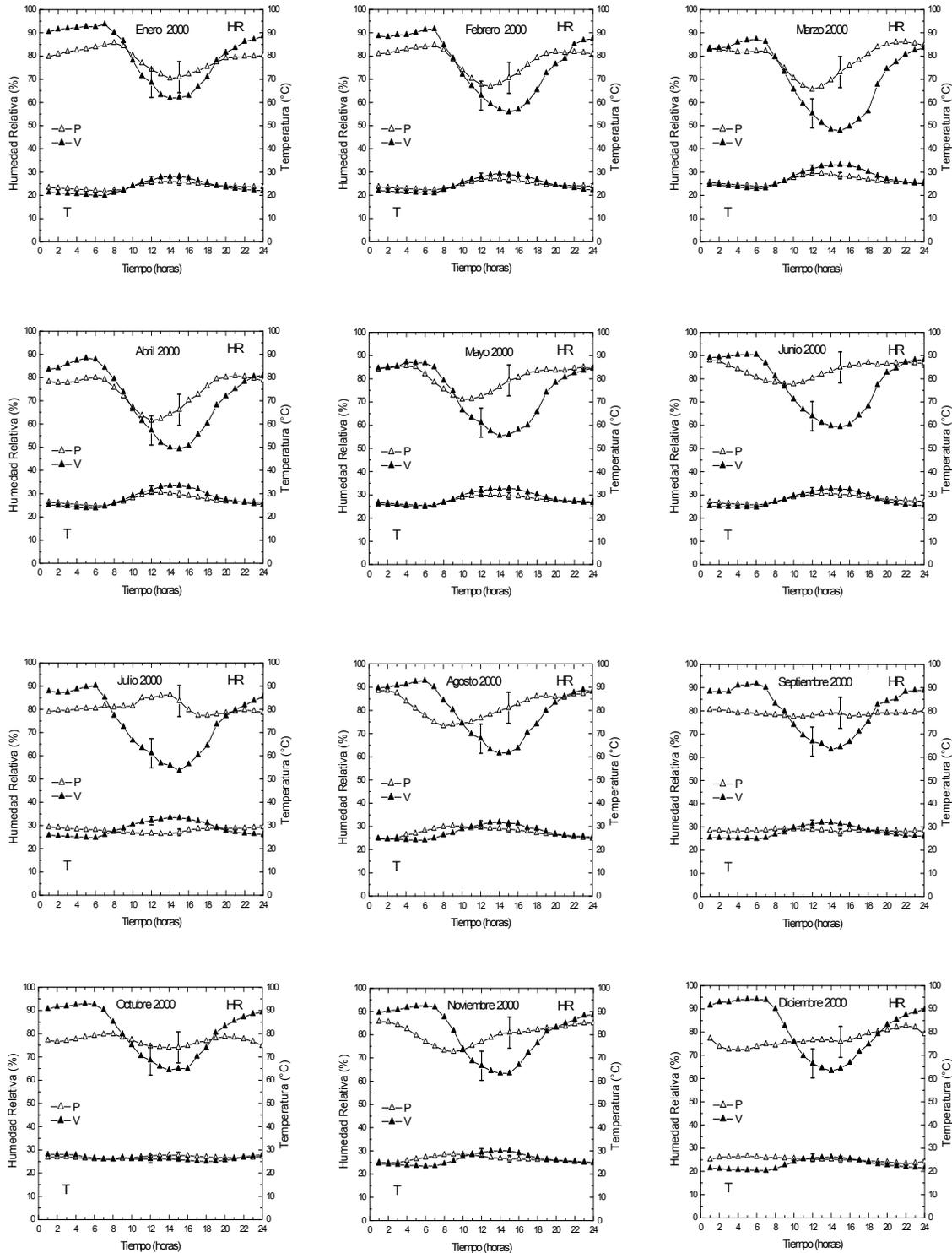


Figura 1. Comportamiento de HR y T de enero a diciembre del año 2000, representativo del periodo. Se muestra la dispersión de los datos horarios por medio de una barra para cada gráfica.

Figure 1. Behavior of HR and T for January to December 2000 (the year representing the period). The daily data dispersion is shown with a bar for each graph.

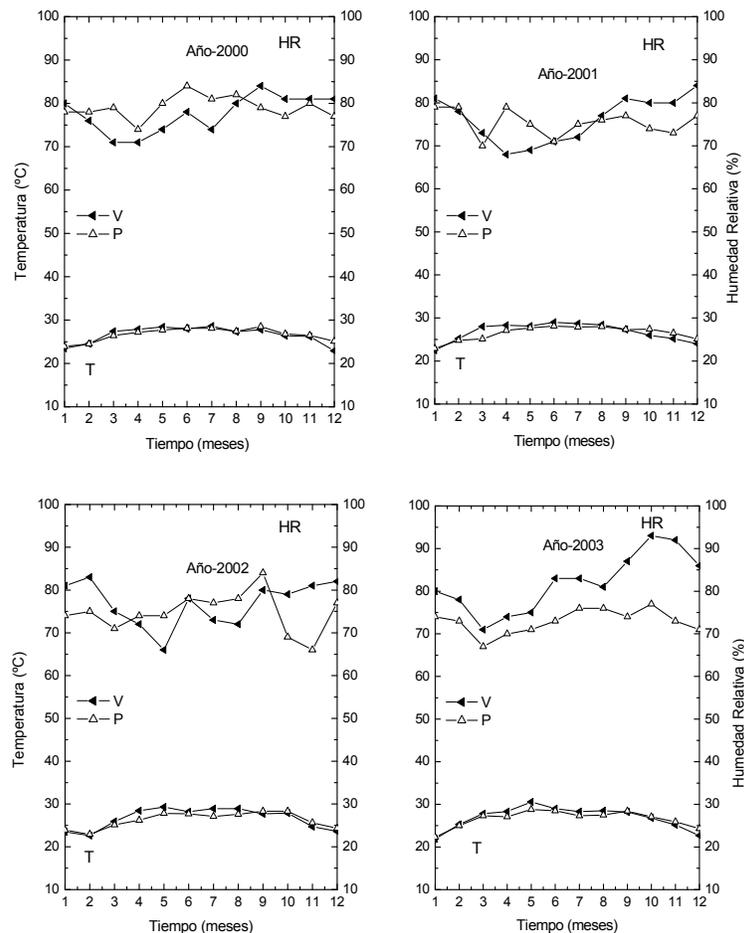


Figura 2. Valores promedio mensuales de T y HR en Villahermosa (V) and Paraíso (P), durante el periodo de estudio (2000-2003).
Figure 2. Average monthly values of T and HR in Villahermosa (V) and Paraíso (P), during the study period (2000-2003).

Tiempo de humectación

Para los cálculos del tiempo de humectación, anteriormente descrito, en el caso del ambiente marino-costero (Paraíso) se tomó como valor crítico la $HR \geq 60\%$, debido a la salinidad (presencia de cloruros), mientras en el ambiente urbano un mayor valor ($HR \geq 80\%$), como indica la norma ISO 9223 (1992), para una atmósfera libre de contaminantes higroscópicos. El menor valor crítico de la HR, en el caso del ambiente marino, como se comentó anteriormente se basa a los experimentos realizados con sensor (Veleva & Alpuche 2002), que han confirmado las correctas sugerencias en la literatura (Shreir *et al.* 1994). En las Figuras 3 y 4 se muestra la distribución del tiempo (como % del año), durante el cual se presenta una $HR \geq 80\%$ (para el caso de

Villahermosa) o una $HR \geq 60\%$ (para el caso de Paraíso) en intervalos de temperatura, respectivamente. Esta distribución incluye el tiempo de humectación ($HR \geq 80\%$ a $T \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Para el caso de la ciudad de Villahermosa, el tiempo total con $HR \geq 80\%$ presenta pequeñas variaciones con respecto a los años de estudio. Dos tendencias se observaron durante todo el año, de noviembre a abril se registraron mayores porcentajes de horas debajo de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto quiere decir que hubo mayor contribución del tiempo de humectación durante este período. De mayo a octubre hubo un mayor porcentaje de horas arriba del valor crítico de T, representado por el mes de septiembre, indicando una menor contribución al tiempo de humectación. Para el caso del municipio de Paraíso, las características fueron análogas al

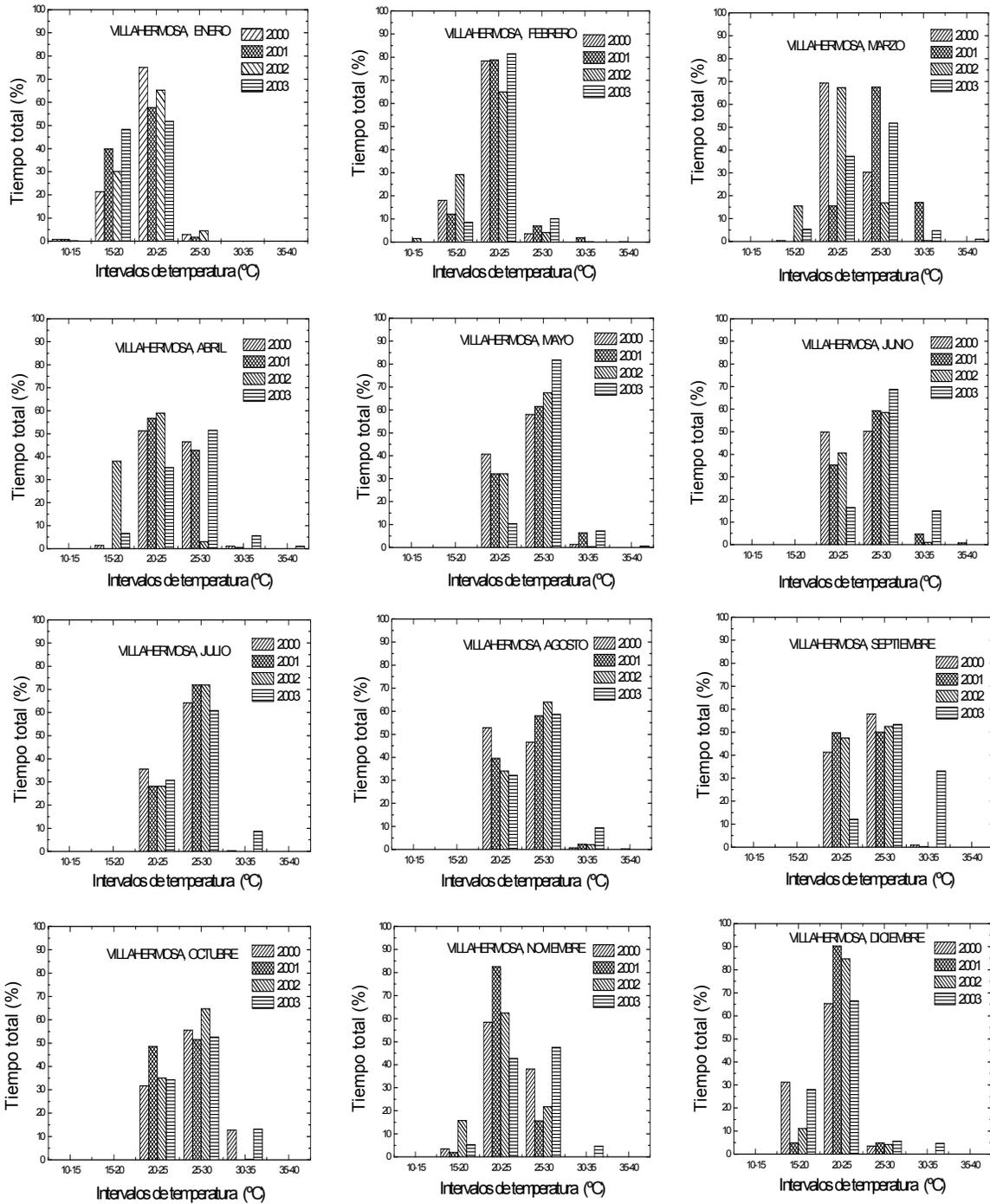


Figura 3. Distribución mensual de las horas (%) para enero a diciembre por rangos de temperaturas con una HR \geq 80 % para Villahermosa (V), durante el período 2000-2003.

Figure 3. Monthly distribution of the hours (%) for January to December by ranges of temperatures with a HR \geq 80 % for Villahermosa (V), during the period 2000-2003.

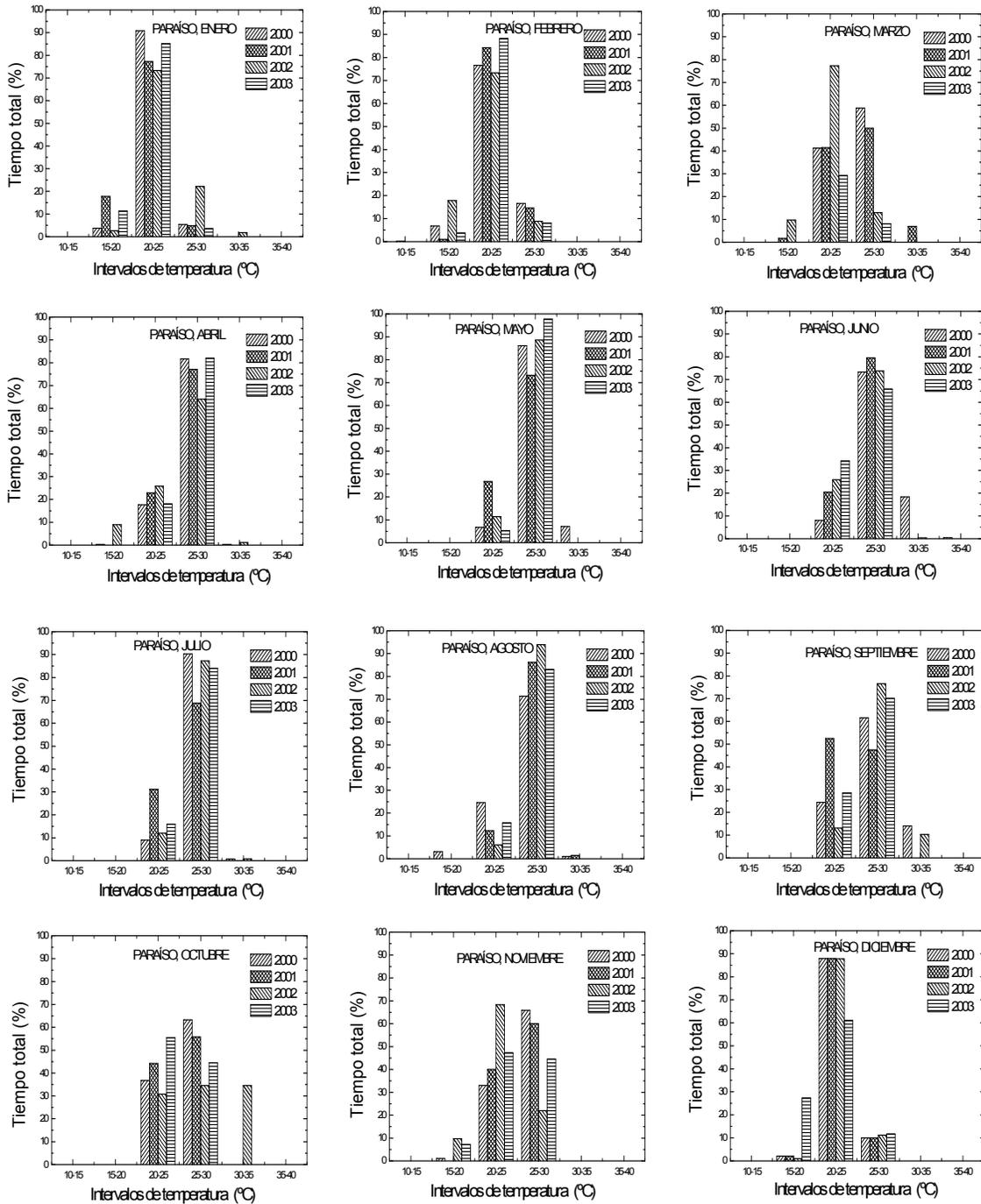


Figura 4. Distribución mensual de las horas (%) para enero y diciembre por rangos de temperaturas con una HR \geq 60% para Paraiso (P), durante el período 2000-2003.

Figure 4. Monthly distribution of the hours (%) for January to December by ranges of temperatures with a HR \geq 60% for Paraiso (P), during the period 2000-2003.

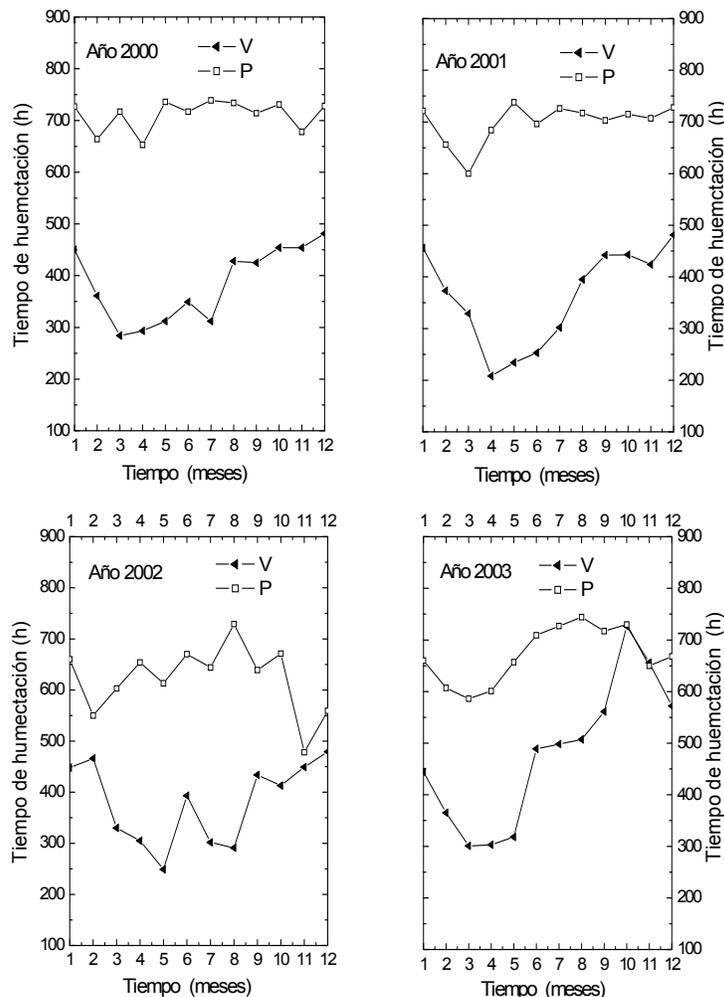


Figura 5. Distribución mensual del tiempo de humectación para Villahermosa (V) y Paraíso (P) durante el período 2000-2003.
Figure 5. Monthly distribution of the time of wetness for Villahermosa (V) and Paraíso (P) during the period 2000-2003.

caso de la ciudad de Villahermosa, sólo que se hicieron más pronunciadas. Esto indica que la mayor contribución al tiempo de humectación se da a finales y a principios del año. La Figura 5 muestra la distribución mensual de las horas con los tiempos de humectación en la ciudad de Villahermosa y de Paraíso durante el período de estudio. El ambiente de Paraíso mostró valores que oscilaron alrededor de 650-750 h (Figura 5), en los meses de febrero a abril presentó disminuciones del tiempo de humectación. Así durante todo el año, se aprecia un comportamiento casi constante en el tiempo de humectación promedio mensual, con algunas variaciones al inicio y finales del año. El tiempo de humectación por año

se situó entre 7470-8391 h. Esta estabilidad que presentaron los valores se debe a la influencia del mar que actúa como un buen termostato para el aire en este ambiente. La ciudad de Villahermosa (aproximadamente a 68 km de la costa), situada en una atmósfera urbana, presenta disminuciones en el tiempo de humectación al inicio del período, debido a la ausencia de precipitación pluvial durante el mes de marzo a agosto, donde se registraron valores menores alrededor de 208 h, aproximadamente. Con el inicio del período de lluvias el tiempo de humectación aumentó paulatinamente alcanzando valores mayores en los meses de octubre a diciembre alrededor de 727 h, aproximadamente. Esto indica que en

la atmósfera urbana de la ciudad de Villahermosa influyen los cambios provocados durante el período de seca o de lluvias. Los valores anuales del tiempo de humectación, calculados para la atmósfera de Villahermosa se situaron en el rango de 4603-5741 h. Comparando los dos sitios de estudios en relación al tiempo de humectación por año, se puede indicar que el municipio de Paraíso mostró casi el doble del tiempo de humectación con respecto a la ciudad de Villahermosa.

DISCUSIÓN

Los datos presentados muestran que durante la noche (20:00 h a 6:00 h) los valores de humedad relativa (HR) del ambiente urbano de Villahermosa son mayores, con un 10 % de diferencia, con respecto a los valores registrados en el ambiente *marino* de Paraíso. Sin embargo, durante el día (07:00 h a 19:00 h) el ambiente marino se mantiene más húmedo (mayores valores de HR), debido a la influencia del mar (el búfer termodinámico), a diferencia del ambiente urbano, donde la HR del aire presenta valores mínimos muy marcados y pronunciados, alcanzando 50 % (alrededor de las 15:00 h), mientras que en el ambiente marino en este periodo de tiempo los valores de la HR se mantiene por arriba de 70 %. Por la noche, la masa enorme de agua del mar emite al aire el calor absorbido durante el día (radiación solar), manteniendo un intercambio térmico con la atmósfera marina-costera, y la variación de la HR y T del aire se mantienen casi constantes; un proceso parecido de intercambio de calor ocurre durante el día. La temperatura (T), como un respuesta viceversa a la HR, marca las misma tendencia: mayores valores (30-35 °C) registrados en el ambiente urbano (marzo a mayo), mientras en el ambiente marino los valores mayores alcanzan 28-30 °C en el mismo periodo de tiempo. El análisis estadístico de los valores diarios de T y HR muestra que sus cambios durante la noche y el día se pueden ajustar con dos ecuaciones, de una función lineal y parabólica, respectivamente, un comportamiento similar a estudios anteriores en regiones tropicales (Veleva *et al.*

1997).

El tiempo de humectación, calculado a base del CT-HR, revela que su valor anual en el ambiente marino-costero de Paraíso ha sido de 7470 a 8391 h durante el período de estos años, por lo que se puede asignar a su atmósfera la categoría de agresividad τ_5 ("muy agresiva"), de acuerdo de la norma ISO 9223 (1992). Sin embargo, el ambiente urbano de Villahermosa es menos agresivo, con categoría τ_4 , ya que el tiempo anual de humectación está en el rango de 4603 - 5741 h. El tiempo de humectación está considerado como el tiempo real (efectivo) para los procesos de corrosión de metales, ya que estos se desarrollan solamente en la presencia de una capa húmeda, formada en la superficie metálica. Por lo tanto, debe esperarse que el deterioro de estructuras metálica sea mucho mayor en el ambiente marino. Además, la presencia de salinidad (iones cloruros) en las atmósferas marinas, acelera más el proceso de corrosión. El complejo de CT-HR del clima tropical húmedo da la explicación para las mayores velocidades de corrosión de metales, que han sido obtenidos en ambientes marino-costeros, comparadas con otro tipo de clima (Veleva & Maldonado 1998; Maldonado & Veleva 1999b; Mariaca *et al.* 1999). Por ejemplo, estudios realizados en el estado de Yucatán, en el clima tropical húmedo, revelan que las velocidades anuales de corrosión del zinc han sido de $0.82 \mu\text{m año}^{-1}$ en el ambiente rural-urbano de Mérida, mientras en el marino-costero del puerto de Progreso han llegado hasta $16.40 \mu\text{m año}^{-1}$ (Maldonado & Veleva 1999b).

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua y a Petróleos Mexicanos Región Marina Dos Bocas por proporcionar los datos de Temperatura y Humedad Relativa. A los alumnos Sergio Cruz Rosales y Omar Conde Sánchez por la captura de los datos históricos de T y HR. Este trabajo fue apoyado por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco por el Proyecto Interno UJAT-POA 2053142.

LITERATURA CITADA

- ASTM G84 (1989) Standard Practice for Measurement of Time-of-Wetness on Surfaces Exposed to Wetting Conditions as in Atmospheric Corrosion Testing, ASTM International.
- Cole IS, Paterson DA, (2006), Mathematical models of dependence of surface temperatures of exposed metal plates on environmental parameters, *Corrosion Eng. Sci. Techn.*, 41(1): 67-76.
- Corvo F, Perez T, Martin Y., Reyes J. Dzib L:R., Gonzalez S.J., Castañeda A. (2008) Time of wetness in tropical climate considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard. *Corrosion Science* 50(3): 206-219.
- Del Angel-Meraz E, Veleva-Muleshkova L, Acosta-Alejandro M (2006) Evaluación de la Corrosión Atmosférica del acero galvanizado en el clima tropical húmedo del Golfo de México (Tabasco). NACE Internacional-Congreso Latinoamericano de Corrosión, Brasil, Memoria en extenso 097.
- Feliu S, Morcillo M, Feliu SJ, (1993) The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters. *Corrosion Science* 34(3): 403-408.
- INEGI (1990) Anuario Estadístico de Tabasco. XI Censo General de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística.
- INEGI (2000) Anuario Estadístico de Tabasco. XII Censo General de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística.
- INEGI (2004) Anuario de Información Geográfica del Estado de Tabasco. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Municipio de Paraíso y Villahermosa.
- ISO 9223 (1992) Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres classification, International Organization for Standardization, Geneva.
- Maldonado L, Veleva L, (1999a) Corrosivity category maps of a humid tropical atmosphere: The Yucatán Peninsula, México. *Materials and Corrosion* 50(1): 261- 266.
- Maldonado L, Veleva L (1999b) Corrosión Atmosférica en el norte de la Península de Yucatán y el Caribe Mexicano, MICAT- México, 165-185.
- Mariaca L, Genesca J, Uruchurtu J, Salazar L (1999) Corrosividad Atmosférica. MICAT-México, 23 pp.
- Mendoza AR, Corvo F, Gómez A, Gómez J (2004) Influence of the corrosion products of copper on its atmospheric corrosion Kinetics in tropical climate. *Corrosion Science* 46(5): 1189-1200.
- Shreir LL, Jarman RA, Burstein GT (1994) Metal/Environment reactions. *Corrosion Eds.* Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. 232 pp.
- Veleva L, Alpuche M (2002) Time of Wetness (TOW) and Surface Temperature Characteristics of Corroded Metals in Humid Tropical Climate in Outdoor Atmospheric Corrosion, ASTM STP 1421, H. E. Townsend, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 48 pp.
- Veleva L, Del Angel E, Acosta M (2007) Zinc corrosion runoff process induced by humid tropical climate. *Materials and Corrosion* 58(5): 348-352.
- Veleva L, Kane R (2003) Atmospheric Corrosion (Chapter 2.2), in Vol. 13A., *Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*, International, OH, 196 pp.
- Veleva L, Maldonado L (1998) Classification of atmospheric corrosivity in humid tropical climates. *British Corrosion Journal* 33(1): 53-57.
- Veleva L, Pérez G, Acosta M (1997) Statistical analysis of the temperature-humidity complex and time of wetness of a tropical climate in the Yucatan Peninsula in Mexico. *Atmospheric Environment* 31(5): 773-776.