

CÁLCULO DEL COMPLEJO CT-HR Y SU INFLUENCIA EN LA AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA DE UNA ZONA RURAL-URBANA EN TABASCO

ESTIMATION OF THE CT-HR COMPLEX AND ITS INFLUENCE ON ATMOSPHERIC AGGRESSIVENESS IN A RURAL-URBAN AREA IN TABASCO

López-Zapata O. A. ¹, Del Ángel-Meraz E. ^{1*}, Corvo-Pérez F.E. ², Valdés-Clemente C.S. ³.

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Posgrado en Ciencias en Ingeniería.
Avenida Universidad s/n Zona de la Cultura, Colonia Magisterial CP 86690 Villahermosa Centro,
Tabasco, México.

² Centro de Investigación en Corrosión. Universidad Autónoma de Campeche.
Avenida Héroe de Nacozari 480, Chiná, Campeche, México.

³ Centro Nacional de Investigaciones Científicas
Avenida 25 y Calle 158, Playa, Habana, Cuba.

*ebelia.delangel@ujat.mx

Artículo Científico

Publicado: 31 de marzo 2025

RESUMEN

Los factores meteorológicos, como la temperatura, velocidad del viento y humedad relativa, resultan de gran interés para evaluar la corrosión atmosférica. Específicamente, el tiempo de humectación, resulta un factor crítico que depende de la humedad relativa y la temperatura y puede ser calculado a partir de las variaciones en ambos factores. Para realizar predicciones precisas sobre la corrosividad del aire, es esencial obtener y analizar datos continuos de humedad y temperatura. Este enfoque permite calcular el tiempo de humectación, proporcionando una herramienta valiosa para los estudios de corrosión atmosférica y ayudando a predecir la tasa de corrosión en diferentes ambientes. En este trabajo se presenta un estudio estadístico del Complejo Temperatura-Humedad Relativa (CT-HR),

basado en la correlación de datos recopilados de Temperatura (T) y Humedad relativa (HR) en horarios continuos para un periodo de seis meses (tres con periodos lluviosos y tres con periodos secos) en una zona rural-urbana de Cunduacán en el estado de Tabasco, México. El análisis estadístico del CT-HR mostró que los valores de HR y T, sufre dos variaciones significativas en periodos de tiempo específico. A lo largo de los 6 meses evaluados se encontró un tiempo de humectación total de 1243 horas. Con base en la categoría de la norma ISO 9223, se estableció una agresividad atmosférica de T₃. Esto permite predecir un patrón de comportamiento para meses siguientes con base en las variaciones entre periodos secos y lluviosos.

Palabras clave: Clima tropical húmedo; corrosión atmosférica; tiempo de humectación.

ABSTRACT

Meteorological factors, including temperature, wind speed and relative humidity, are of great interest to atmospheric corrosion. Specifically, wetting time is a critical factor that depends on relative humidity and temperature and can be calculated from variations in both factors. To make accurate predictions about air corrosivity, it is essential to obtain and analyze continuous humidity and temperature data. This approach allows wetting time to be calculated, providing a valuable tool for atmospheric corrosion studies and helping to predict the rate of corrosion in different environments. This paper presents a statistical and systematic study of the Temperature-Relative Humidity Compatibility (CT-RH), based on the correlation of data collected from Temperature (T) and Relative Humidity (RH) in continuous schedules for a period of six months (three with rainy periods and three with dry periods) in a rural-urban area of Cunduacan in the state of Tabasco, Mexico. The statistical analysis of the CT-HR showed that the values of HR and T undergo two significant variations in specific time periods. Throughout the 6 months evaluated, a total wetting time of 1243 hours was found. Based on the categorization of the ISO 9223 standard, an atmospheric aggressiveness category of T_3 was established. This makes it possible to predict a pattern of behavior for subsequent months based on the variations between dry and rainy periods.

Keywords: atmospheric corrosion; humid tropical climate; wetting time.

INTRODUCCIÓN

En la corrosión de metales y sus aleaciones, el complejo temperatura-humedad y los niveles de contaminación por dióxido de azufre y cloruros son los que más afectan. En la atmósfera, los iones sulfato son generados por reacciones entre el dióxido de azufre (SO_2) y el amoníaco (NH_3), formando películas húmedas que pueden incluir también compuestos como el cloruro de sodio (NaCl) [1]. Los iones sulfatos aumentan su coeficiente de absorción cuando se tienen bajos niveles de Humedad relativa (HR), debido a una fuerte relación con la velocidad de reacción de los iones sulfatos [2]. Los iones cloruro atraen moléculas de agua para formar grupos de cloruro hidratado mediante nucleación por lo que las moléculas de agua rodean a los iones cloruro, estos tienen la capacidad de incrementar su tamaño atrayendo más moléculas de agua, lo que conlleva a la creación de partículas de sal más grandes, las cuales funcionan como núcleo para la iniciación y desarrollo de la corrosión en la superficie de los metales. Entre los factores meteorológicos correlacionados con la corrosión se encuentran: la Temperatura (T), la velocidad del viento, la irradiancia solar, la humedad relativa (HR), entre otros. Esta última, presenta una relación significativa puesto que la presencia de humedad es una condición fundamental para que se desarrolle la corrosión en materiales expuestos a la atmósfera por lo que es una variable que influye en la estimación de velocidades de corrosión.

El uso de la humedad relativa promedio (HR) introduce un alto grado de incertidumbre en las ecuaciones dosis-respuesta mediante las que se estiman las tasas de corrosión atmosférica de materiales metálicos. Si bien la HR promedio proporciona una línea de base para comprender la corrosión, no tiene en cuenta la compleja interacción de los factores ambientales locales y los cambios temporales, que son cruciales para las predicciones precisas de las tasas de corrosión atmosférica por lo que a partir de las humedades relativas y las temperaturas, surge el cálculo del Complejo Temperatura-Humedad relativa (CT-HR) [3], es independiente del nivel de contaminantes y la naturaleza del material metálico [6]. Lo que permite estudiar el comportamiento de T y HR de forma independiente de los materiales expuestos [4]. De acuerdo con ISO 9223, el tiempo de humectación (TdH) “es el periodo de tiempo durante el cual la humedad relativa es superior al 80% a temperaturas superiores a 0°C y menores a 25°C, se utiliza para estimar el tiempo en que las superficies de metales están expuestas a la humedad” [5]. Este TdH es un factor relevante en el proceso de corrosión atmosférica, porque permite realizar el cálculo del tiempo de humectación con mayor precisión, durante el cual se efectúan las reacciones electroquímicas que dan paso a la corrosión. El proceso consiste en correlacionar datos de T y HR diarios y de intervalos frecuentes (<6 horas) [3], con estas variables se crea una base de datos que abarque por lo menos las horas totales de un año, así se pueden utilizar

los datos mensuales para refinar los valores anuales.

Para el cálculo del TdH, se pueden aplicar sensores para determinar la humedad relativa de la superficie (probetas expuestas) o bien, utilizar información de la humedad relativa del aire. En 2020, Hoseinpoor *et al.*, [3] hicieron la comparación entre la medición de la humedad relativa de la superficie (SRH) de un metal, en lugar de la humedad relativa del aire (RH) para determinar el tiempo de humectación y la corrosividad de las superficies metálicas. El estudio encontró que el TdH determinado a partir de datos de SRH fue un 33 a 40% más alto que el basado en datos de RH del aire. Aunque la implementación de SRH, proporciona datos más precisos, se puede decir que resulta útil cuando se tiene como objetivo estimar el tiempo de formación de película de humedad en las superficies metálicas expuestas a la atmósfera.

Algunos investigadores mencionan [6], que utilizar sensores de TdH es poco viable, debido a su alto costo, disponibilidad y porque su respuesta a la humedad cambia con el tiempo en función de los productos de corrosión y la formación de depósitos. A diferencia del cálculo del TdH que se calcula a partir de la humedad relativa del aire, sigue siendo ampliamente utilizado para predecir la corrosividad atmosférica debido a su utilidad para estimar el tiempo real en el que pueden ocurrir las reacciones de corrosión en las superficies metálicas expuestas a la atmósfera [3].

Aunque el TdH se estima en función de las características de la humedad del aire y la Temperatura del ambiente es

independiente del nivel de contaminantes y la naturaleza del material metálico.

El cálculo no abarca todos los aspectos del clima, ya que el TdH determina directamente la duración de los procesos de corrosión electroquímica. Sin embargo, es necesario aclarar la relación entre el TdH y los niveles de contaminantes en la atmósfera, ya que estos tienen efectos combinados en las tasas de corrosión [6].

Para realizar el cálculo del tiempo de humectación, se deben obtener datos de humedad relativa (%) a través de mediciones continuas no superando las seis horas entre mediciones, los datos recolectados de temperatura (°C) también deben ser recolectados de forma continua y evitando un lapso mayor a seis horas entre muestreos [7]. La base de datos debe ser bastante extensa y abarcar por lo menos las horas totales de un año, así se pueden utilizar los datos mensuales para refinar los valores anuales.

METODOLOGÍA

Selección de Área de Estudio. Se recopilaron datos horarios de temperatura (T) y humedad relativa (HR) de las estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) cubriendo el periodo de noviembre 2023 a abril 2024, de estaciones cercanas a la zona de estudio. La **Figura 1** presenta el área de monitoreo y su posición con respecto a la entidad.

Recolección de Datos. Se procesaron un total de 27685 datos horarios de T y HR. Esto permitió determinar los valores promedios, mínimos y máximos de T y HR

(diarios y mensuales), así como el tiempo de humectación mensual.

Análisis Estadístico. Se diseñó un código en el software Octave® para facilitar el cálculo de las horas de humectación por días y meses. El software se basó específicamente en realizar el análisis del complejo diario temperatura-humedad relativa (CT-HR), utilizando la norma ISO 9223, que establece que para que exista película de humedad deben tomarse en cuenta las horas cuando $HR \geq 80\%$ y $T \geq 0^\circ\text{C}$, es decir a Temperaturas menores de los 25°C y la HR arriba del 80%.

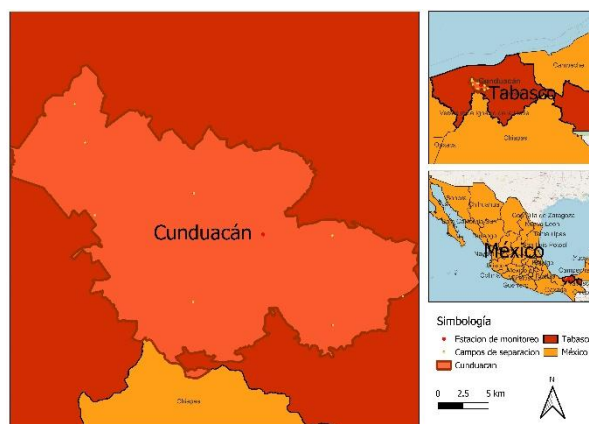


Figura 1. Mapa geográfico del sitio de estudio

RESULTADOS

Se analizaron estadísticamente 55,370 en total de datos de T y HR, correspondientes a los meses de estudio utilizando software estadístico StatGraphics. En la **Tabla 1** se presentan los valores estadísticos correspondientes a T y HR en cada uno de los meses del periodo evaluado.

La desviación estándar (α) de las temperaturas durante los meses de lluvias fue considerablemente menor, con respecto a las de los meses de seca,

mientras que las desviaciones estándar(α) para las humedades relativas, presentaron una diferencia marcada entre

un periodo y otro, también revelaron diferencias más significativas de un mes a otro dentro del mismo periodo.

Tabla 1. Resultado del análisis estadístico de las variaciones de Temperatura y Humedad relativa

	Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero		Marzo		Abril	
	T	HR	T	HR	T	HR	T	HR	T	HR	T	HR
Min	23.3	77.9	22.8	70.4	22.9	73.2	21.5	60.3	25.1	59.4	26.0	53.4
Max	27.9	91.6	27.4	88.4	27.6	90.2	27.8	82.7	32.0	84.1	33.7	80.0
α	1.35	4.59	1.52	6.09	1.53	5.53	2.15	7.41	2.30	8.16	2.5	9.5

DISCUSIÓN

Las variaciones en la desviación estándar de temperatura y humedad relativa revelan una marcada diferencia en el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa con respecto al periodo estacional.

El comportamiento diario de T y HR a lo largo del día para el ambiente rural-urbano de Cunduacán mostró variaciones con las estadísticas del municipio, en las que se indica que el clima suele presentar un régimen normal de calor con cambios térmicos en los meses de diciembre y enero [7]; sin embargo, como se observa en la **Figura 2**, que presenta el comportamiento de tres meses comprendidos para la zona rural-urbana de Tabasco en periodo húmedo, las horas de humectación están comprendidas entre las 24:00-7:00 am y de 18:00 – 23:00 pm. En la **Figura 2a**, se observa que la T no sobrepasó los 28 °C lo que corresponde con HR por encima del 78 % pero por debajo del 91 %. En diciembre, **Figura 2b**, la HR presentó porcentajes mínimos entre las 10:00 y las 17:00 horas, estas fueron las horas en las que la temperatura alcanzaba el máximo de 28°C.

La **Figura 2c** ilustra el comportamiento de las variaciones en el mes de enero, se observó una temperatura media mínima de 22.95 °C y máxima de 27.62 °C.

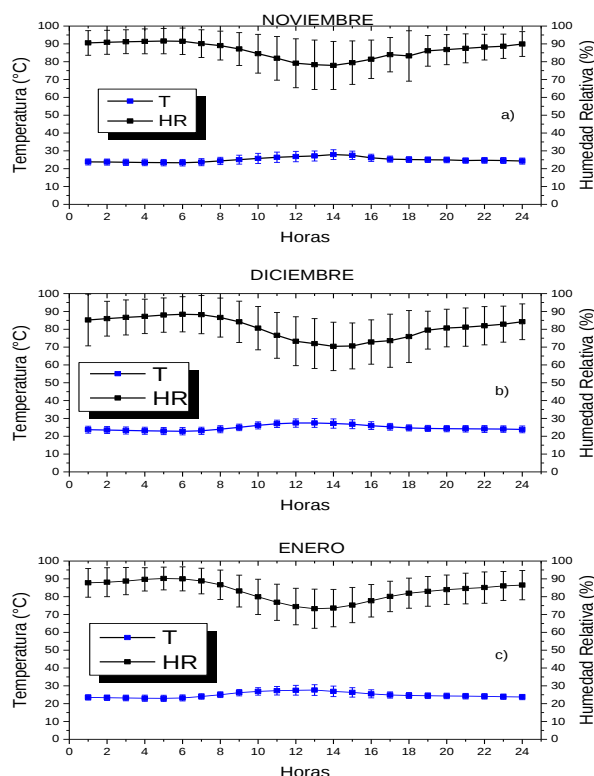


Figura 2. Variaciones de T Y HR promedio para el periodo húmedo del municipio de Cunduacán

La diferencia en los promedios mensuales de enero y diciembre resulta casi insignificante, sin embargo, las temperaturas máximas siendo que pertenecen al periodo húmedo de la región están cerca de la temperatura máxima media mensual de 30.5 °C que se suele alcanzar en mayo en el municipio de Cunduacán.

En las **Figura 3a, 3b y 3c** se observa claramente que hubo una marcada disminución en los valores de Humedad Relativa entre las 7:00 a las 18:00 horas en los meses de abril y mayo, en el caso del mes de marzo, los valores de HR bajaron hasta el 60 % y en abril descendieron hasta 50 %, lo que impacta en las horas de humectación durante esos periodos, se observa también que, en este último mes, la HR no llegó a superar el 80 % debido a las altas temperaturas.

En las **Figuras 2 y 3** se observa que en los dos periodos las tendencias de la humedad relativa debidas a la disminución del porcentaje de HR se fueron desplazando hacia la derecha conforme avanzaba el periodo de análisis húmedo y se desplazaron hacia la izquierda en los meses del periodo seco, principalmente a que los picos de temperatura se mantuvieron alrededor de los 32-35 °C.

Durante el período seco, las temperaturas mostraron fluctuaciones dentro del rango de 2,1 a 2,5 grados Celsius; sin embargo, fue evidente que hubo un aumento gradual de las temperaturas a medida que avanzaba el período. Por el contrario, las humedades relativas mostraron un mayor nivel de variabilidad en comparación con las variaciones de temperatura a lo largo del estudio.

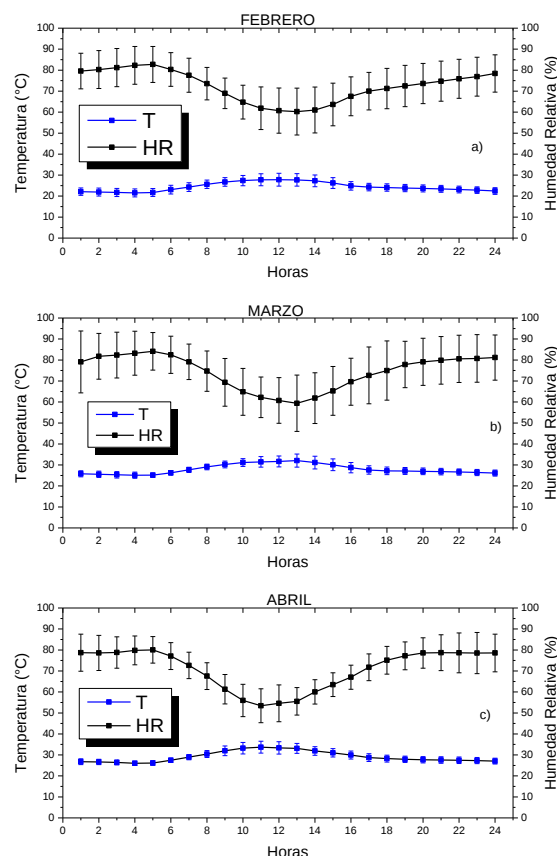


Figura 3. Variaciones de T Y HR promedio para el periodo seco del municipio de Cunduacán

Concretamente, en los meses secos, la humedad relativa osciló entre 80 y 84%, mientras que, durante los meses más fríos, mostró un rango de 88 a 91%, lo que contradecía los hallazgos reportados por Tatakis *et al.*, 2020 [8] cuyo estudio indicó que, en los meses más cálidos, los niveles de humedad relativa oscilaban entre 56 y 85, mientras que, en los meses más fríos, fluctuaban entre 54 y 90%.

Como se puede observar en la **Figura 4**, el TdH en los primeros cuatro meses es lo suficientemente alto [9-11] para favorecer la formación de una capa de humedad suficientemente gruesa. Por otra parte, se ha reportado que en sustratos de acero galvanizado la velocidad de corrosión fue de 2.02 µm/año [9], permitiendo que las

reacciones electroquímicas de corrosión en las zonas anódicas y catódicas ocurran la mayor parte del tiempo. Se observó que a partir del mes de febrero (cuando inicia el periodo ausente de lluvias) los tiempos de humectación fueron disminuyendo, esto debido a que se utilizó el criterio de $T \leq 25^\circ\text{C}$ ya que se tienen registros de que a temperaturas superiores las películas húmedas que se puedan depositar sobre las superficies susceptibles de corrosión se evaporan a mayor velocidad disminuyendo el efecto corrosivo.

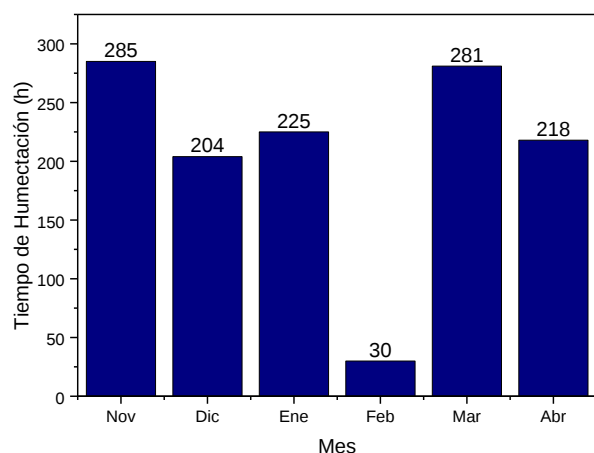


Figura 4. Tiempo de humectación calculado para el periodo noviembre 2023- abril 2024

Se observó que la duración total de la humedad (TdH) alcanzó las 1243 horas, lo que representa un valor significativamente elevado para el periodo de tiempo específico que se examina. A la luz de este resultado, cabe deducir que, según los criterios descritos en la norma ISO 9223, este valor se ajusta a la clasificación t_3 de la atmósfera, lo que indica un mayor grado de corrosividad. El análisis realizado con datos que abarcan tres meses de condiciones de lluvia y otros tres meses de clima seco sugiere que es probable que la TdH anual aumente hasta un nivel de t_4 o más, lo que significa un entorno atmosférico notablemente

agresivo, un patrón que se identifica comúnmente en las evaluaciones de regiones caracterizadas por un clima tropical y húmedo.

Estos resultados permiten proyectar una trayectoria para los próximos meses, teniendo en cuenta las distinciones entre los periodos de sequía y los de lluvias.

En comparación, otros estudios de investigación realizados durante periodos de 12 meses han demostrado que los tiempos de humectación promedio son de 3344 horas en ambientes marinos [12] y de 3568 horas en entornos urbanos [10], lo que indica la necesidad de realizar análisis más detallados para dilucidar las diferencias observadas en los patrones de humedad en los distintos lugares.

CONCLUSIONES

Se concluye que el nivel de corrosividad del aire en Cunduacán, Tabasco, México, varía de t_3 a t_4 en términos de agresividad atmosférica, según lo determinado por el tiempo de humectación; sin embargo, la alteración en las condiciones climáticas provocada por el fenómeno del calentamiento global y variables adicionales podrían hacer que esta afirmación sea inexacta. Por lo que es recomendable un enfoque integral que considere múltiples parámetros ambientales para mejorar la precisión predictiva.

El cálculo y análisis del CT-HR reveló que la duración total de la humedad (TdH) alcanzó las 1243 horas, lo que representa un valor notablemente alto dentro del periodo considerado (6 meses). Este resultado lleva a deducir que, de acuerdo con los criterios descritos en la norma ISO

9223, este valor en particular se ajusta a la clasificación t_3 , lo que indica un entorno de corrosión significativamente agresivo. El examen de los datos que abarcan tres meses de estación húmeda y tres meses de estación seca respalda la proyección de que es probable que el TdH anual caiga dentro de la categoría t_4 o superior, lo que significa una atmósfera extremadamente corrosiva, como lo demuestran los estudios realizados en regiones caracterizadas por climas tropicales y húmedos.

Estos hallazgos permiten anticipar un patrón de comportamiento en los próximos meses, teniendo en cuenta las distinciones entre los períodos secos y húmedos. Mediante el análisis de las fluctuaciones del TdH, resulta posible medir la vulnerabilidad de las superficies metálicas, especialmente en el contexto de las investigaciones sobre corrosión, en medio de condiciones ambientales cambiantes, que a menudo están sujetas a variabilidad debido a los impactos del cambio climático.

La utilización de modelos basados en datos sobre el tiempo de humectación permite generar previsiones fiables sobre el avance de la corrosión durante períodos prolongados, lo que facilita la toma de decisiones bien fundamentadas en relación con la elección de materiales y las estrategias de mantenimiento. Este análisis minucioso del tiempo de humectación no solo ayuda a evaluar la susceptibilidad a la corrosión, sino que también contribuye a una mejor comprensión de los mecanismos que rigen la dinámica de la corrosión.

REFERENCIAS

- [1] Karimova, N. V., McCaslin, L. M., Gerber, R.B., (2019), Ion reactions in atmospherically-relevant clusters: mechanisms, dynamics and spectroscopic signatures, *Faraday Discuss* 217, 342–360. <https://doi.org/10.1039/C8FD00230D>.
- [2] Pei, W., Pang, S., (2022), Kinetic study on the heterogeneous reaction of SO_2/NH_3 with mixed $\text{NaCl}/\text{NH}_4\text{NO}_3$ droplets by ATR-FTIR. *Advances in Energy Materials and Environment Engineering*, 273–278. <https://doi.org/10.1201/9781003332664-39>.
- [3] Hoseinpoor, M., Prošek, T., Babusiaux, L., Mallégo, J. (2020), Toward more realistic time of wetness measurement by means of surface relative humidity. *Corrosion Science*, 177, 108-999. <https://doi.org/10.1016/J.CORSCI.2020.108999>.
- [4] Daneshian, B., Höche, D., Knudsen, O.Ø., Skilbred, A.W., (2023), Effect of climatic parameters on marine atmospheric corrosion: correlation analysis of on-site sensors data. *Materials Degradation*, 7, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41529-023-00329-6>.
- [5] ISO, ISO 9223:2012 Corrosion of metals and alloys- corrosivity of Atmospheres- Classification, determination and stimation.
- [6] Thandar, W., Win, Y.Y., Khaing, T., Suzuki, Y., Sugiura, K., Nishizaki, I. (2022), Investigation of Initial Atmospheric Corrosion of Carbon and Weathering Steels Exposed to Urban Atmospheres in Myanmar. *International Journal of Corrosion* <https://doi.org/10.1155/2022/4301767>.

- [7] ISO, ISO 8565:2011 Metals and alloys Atmospheric corrosion testing General requirements, 2011.
- [8] Titakis, C., Vassiliou, P., (2020), Evaluation of 4-Year Atmospheric Corrosion of Carbon Steel, Aluminum, Copper and Zinc in a Coastal Military Airport in Greece, *Corrosion and Materials Degradation*,1, 159–186. <https://doi.org/10.3390/CMD1010008>.
- [9] Camuffo, D., (2019) Measuring Time of Wetness and Moisture in Materials, Microclimate for Cultural Heritage, 459–482. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64106-9.00019-5>.
- [10] Tejero, M.C., Del Ángel, E., Bautista, R.G., Hernández, N.E., (2015) Corrosividad atmosférica del cobre y del acero en dos localidades de Villahermosa, Tabasco. *Ingeniería. investigación y tecnología*, 16, 2, 197-206. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432015000200004&lng=es&nrm=iso.
- [11] H. Yao, R. Li, H. Xiang, X. Liu, H. Jin, C. Wang, (2023) Experimental study on the dew point corrosion behavior in atmospheric tower system, *Mater Today Commun*, 36 <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106829>.
- [12] Vera, R., Valverde, B., Olave, E., Sánchez, R., Díaz G., E., Muñoz, L., Rojas, P.(2023) Atmospheric corrosion and impact toughness of steels: Case study in steels with and without galvanizing, exposed for 3 years in Rapa Nui Island, *Heliyon*, 9, 17811. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2023.E17811>.

