

Estudio de la corrosividad atmosférica del acero al carbono en nueve ciudades del Ecuador

Francisco X. Cadena^{1*} y Jaime E. Sosa²

(1) Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador
(correo-e: francisco.cadena@epn.edu.ec)

(2) Facultad de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
(correo-e: jaime.sosa@epn.edu.ec)

* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

RESUMEN

El estudio presentado muestra los resultados de la medida de la corrosividad atmosférica para el acero al carbono, mediante ensayos de campo bajo normativas ISO y ASTM, en el Ecuador. En el presente artículo se reportan los valores obtenidos durante un año de experimentación, en nueve ciudades del país: Quito (dos estaciones), Guayaquil (dos estaciones), Santo Domingo, Manta, Portoviejo, Esmeraldas, Machala, Cuenca y Latacunga. Los ensayos de campo permitieron determinar la categoría corrosiva de estas ciudades; siendo Esmeraldas y Cuenca las de mayor agresividad. Los resultados obtenidos en este primer año de ensayo, permiten advertir un comportamiento que depende de la zona de exposición, presentándose diferencias particularmente remarcables en las zonas marinas, industriales, mixtas y aquellas con una humedad relativa alta

Palabras Claves: acero al carbono; corrosión; corrosión atmosférica

INTRODUCCIÓN

El estudio del deterioro atmosférico de los materiales de ingeniería es muy importante pues ello permite determinar aspectos tan críticos como son: el diseño adecuado de equipos industriales y tuberías, la vida útil de los materiales, las necesidades de su protección, los riesgos en instalaciones metálicas expuestas al ambiente exterior, etc. (Iribarren et al., 2017). A la corrosión metálica se le atribuyen pérdidas entre el 4 al 5% del producto interno bruto de un país; y, alrededor del 50% de ellas corresponden a la corrosión atmosférica. (Surnam, 2013; Vera et al., 2012).

El comportamiento de los materiales metálicos en la atmósfera depende de múltiples factores y es fuertemente dependiente del sitio geográfico de exposición, lo cual determina la necesidad de desarrollar ensayos de exposición natural en los sitios de interés (Alcántara et al., 2017). El primer estudio realizado en el Ecuador de corrosión atmosférica fue en 1998 por parte del proyecto "Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica" MICAT en el cual se obtuvieron valores de corrosión y contaminación en varias ciudades ecuatorianas: Guayaquil, Esmeraldas, Riobamba, Salinas y San Cristóbal (Marrocos et al., 1998). Por otra parte, la Escuela Politécnica Nacional (EPN) ha realizado algunos estudios de este tipo, en los cuales se determinó el nivel de agresividad atmosférica de ciudades como Quito, Santo Domingo y Esmeraldas (Navarrete y Salgado, 2007). El último estudio realizado en el país, desarrollado en la provincia de Manabí, evidencia la influencia de la deposición de cloruros, a diferentes distancias, frente al mar en la corrosión atmosférica (Guerra et al., 2019). Pero, los estudios realizados no han considerado la extensión de todas las ciudades aquí analizadas ni tampoco los materiales anticorrosivos empleados (a excepción del zinc) que se presentarán en posteriores entregas.

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo analizar la corrosividad atmosférica en nueve ciudades de interés en el país con base en su importancia productiva, económica y social: Quito (dos estaciones de ensayo), Guayaquil (dos estaciones de ensayo), Santo Domingo, Manta, Portoviejo, Esmeraldas, Cuenca, Latacunga y Machala. En las ciudades de Manta, Machala, Cuenca y Latacunga no existen estudios previos de contaminación ni de corrosión atmosférica.

PARTE EXPERIMENTAL

Determinación de la agresividad atmosférica de estaciones

La agresividad atmosférica de las estaciones analizadas se determinó por medio de ensayos de campo normalizados de exposición metálica de acero al carbono, midiendo, además, las variables meteorológicas y de contaminación con el objetivo final de caracterizar adecuadamente las estaciones de cada ciudad.

Ensayos de campo normalizados de exposición metálica

Considerando la importancia económica e industrial del país, se seleccionaron varias ciudades enlistadas en la Tabla 1, donde DSNM es la distancia sobre nivel del mar (m)

Tabla 1: Sitios de exposición en cada ciudad estudiada

Ciudades	Código	DSNM (m)	Longitud	Latitud	Tipo de Estación
Santo Domingo	SD	625	79°12'23.7"W	0°13'56.9"S	Subtropical
Guayaquil (Sector Centro)	G1	4	79°56'06.5"W	2°06'12.3"S	Urbana Marina
Guayaquil (Puerto Marítimo)	G2	4	79°52'37.1"W	2°08'56.6"S	Marina
Portoviejo	P	53	80°27'24.0"W	1°02'29.5"S	Urbana
Quito (Centro norte)	Q1	2850	78°29'44.8"W	0°11'03.6"S	Urbana
Quito (centro sur)	Q2	2850	78°29'19.9"W	0°12'36.2"S	Urbana
Latacunga	L	2750	78°36'54.9"W	0°47'23.3"S	Urbana
Machala	MC	12	79°58'34.3"W	3°15'10.1"S	Marina Urbana
Manta	MN	6	80°44'43.8"W	0°57'05.4"S	Marina Urbana
Cuenca	C	2560	78°58'23.6"W	2°52'54.0"S	Industrial
Esmeraldas	E	15	79°40'36.2"W	0°55'50.2"N	Marina Industrial

Se analizaron muestras de acero de bajo contenido de carbono con 1,1 mm de espesor; se extrajeron dos muestras cada 3 meses hasta completar un año. (ASTM G50, 2015; ISO 8565, 2012). Una vez que las probetas fueron expuestas (limpiadas previamente con un solvente orgánico) y extraídas de acuerdo con los tiempos establecidos, se realizó una observación visual por medio de registro fotográfico y microscopia óptica con el objetivo de conocer el tipo de ataque corrosivo que tuvieron las probetas. A su vez, se caracterizaron los contaminantes y tipos de corrosión por medio de Difracción de Rayos X (DRX), en el equipo Norelco Philips D2 Phaser. (Persson et al., 2017).

La cuantificación del grado de corrosión de las muestras de acero al carbón se lo determinó mediante la Ecuación 1, donde G es el grado de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$, cuando la corrosión es uniforme), W es el peso perdido del material (g), T es el tiempo de exposición (h), B es el área de la probeta (cm^2), D es la densidad del material (g/cm^3) y K es la constante de unidades a expresar el grado de corrosión.

$$G = \frac{K W}{B T D} \quad (1)$$

Por medio de esta ecuación se evaluó la pérdida de espesor o de masa de las probetas (medidas gravimétricas), de acuerdo con la norma ASTM G1-03. (ASTM G1, 2017; ISO 4287, 1999)

Ensayos de contaminación y variables meteorológicas

En el presente trabajo se obtuvo el Tiempo de Humectación (TDH) mediante el procesamiento de los datos obtenidos de la Dirección de Aviación Civil del Ecuador (DAC) (ISO 9223, 2012). El nivel de concentración de contaminantes de dióxido de azufre, y óxido de nitrógeno y de cloruros (en el caso de las estaciones cercanas al mar), se obtuvieron con la ayuda de los equipos de la Secretaría de Ambiente de Quito.

Caracterización de zonas ensayadas

Los grados de corrosión obtenidos y las variables meteorológicas monitoreadas en el año de ensayo fueron utilizados para clasificar las ciudades seleccionadas mediante la norma ISO 9223.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Categorización de la agresividad atmosférica de estaciones

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la corrosión de acero al carbono al término de un año en todas las estaciones, se indican las variables meteorológicas y de contaminación, así como los valores de la rugosidad y los principales productos de corrosión: Lepidocrocita (L), Goethita (G), Akaganeita (A), En función de esos resultados, para cada ciudad se establece la categoría ISO 9223 correspondiente: Corrosividad (C), Contaminación (P), Salinidad (S) y Tiempo de Humectación (T).

Tabla 3: Caracterización de las ciudades ensayadas en el año de estudio

Estación código	Corrosión (μm)	Categoría corrosividad ISO	Grado de contaminación SO_2	Grado de contaminación cloruros	Tiempo de Humectación
Quito (Centro Norte)	7,3	C ₂	P ₀	S ₀	T ₄
Portoviejo	8,7	C ₂	P ₀	S ₁	T ₅
Quito (Centro Sur)	9,7	C ₂	P ₀	S ₀	T ₄
Santo Domingo	9,7	C ₂	P ₀	S ₀	T ₅
Guayaquil (sector Centro)	14,5	C ₂	P ₀	S ₁	T ₄
Manta	20,3	C ₂	P ₁	S ₂	T ₅
Latacunga	21,3	C ₂	P ₁	S ₀	T ₄
Machala	21,6	C ₂	P ₁	S ₁	T ₄
Guayaquil (Puerto)	22,8	C ₂	P ₁	S ₁	T ₄
Cuenca	41,9	C ₃	P ₁	S ₀	T ₄
Esmeraldas	51,8	C ₄	P ₂	S ₁	T ₅

De los resultados se puede advertir que acero al carbono tuvo mayores pérdidas en la atmósfera marino-industrial de Esmeraldas debido al efecto sinérgico de los contaminantes gaseosos y la salinidad de estos ambientes. La ciudad de Cuenca presenta también un valor de corrosión muy alto porque la estación se colocó en el Parque Industrial lugar en el cual se presenta una alta concentración de empresas industriales. En la ciudad de Guayaquil, influenciada por la cercanía al mar y el tráfico vehicular, presenta valores de corrosividad medio, las ciudades de Manta y Machala son ciudades costeras sus niveles de corrosión son algo menores a Guayaquil porque presentan un menor tráfico vehicular. La estación de Latacunga muy cercana al volcán Cotopaxi que, eventualmente, ha emitido emisiones gaseosas a lo largo del año, aunque no muy significativas. La estación de Santo Domingo está en un sector de poca afluencia vehicular, pero es muy húmeda por lo cual sus valores de corrosividad son similares a las estaciones de Quito y Portoviejo que son atmósferas urbanas con mayor nivel de tránsito.

En la Figura 1, se observa la velocidad de corrosión en función del tiempo para el primer año de exposición para cada una de las estaciones en todos los casos se puede advertir la disminución de esta velocidad a medida que crece la capa de corrosión que se forma sobre la placa metálica en las atmósferas más agresiva es más evidente esta disminución porque el ataque inicial es más alto.

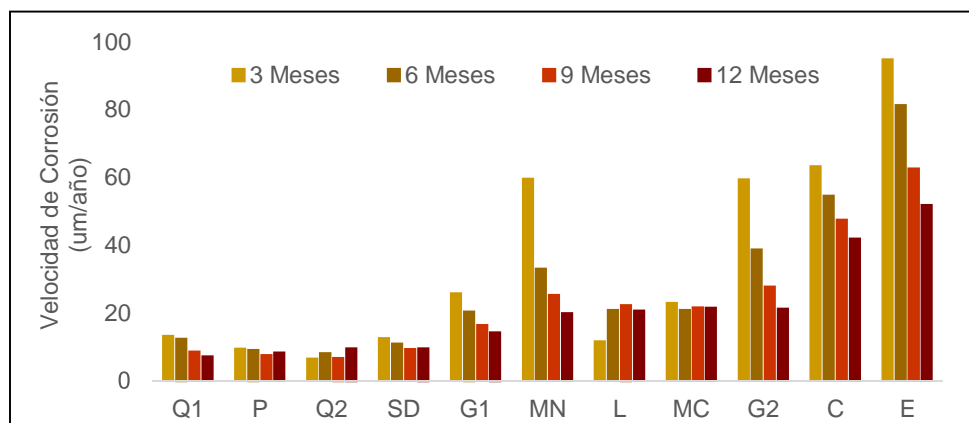


Fig. 1: Velocidad de Corrosión del acero al carbón a lo largo del año de estudio de las ciudades ensayadas

CONCLUSIONES

Se obtuvo la mayor agresividad corrosiva en la ciudad de Esmeraldas (nivel de categoría ISO *alto*), a Cuenca se la categorizó con un nivel de corrosividad medio y se evidenció que el resto de las ciudades analizadas mostraron una categoría baja.

Los niveles de tiempo de humectación son bastante altos en todas las estaciones, particularmente, en las ciudades costeras y en Santo Domingo, ello implica que, si los valores de contaminación se incrementan, fácilmente se elevarán los valores de la agresividad de las estaciones estudiadas.

El estudio continuará hasta obtener valores de corrosividad de hasta siete años en las estaciones con lo cual se podrá construir un modelo muy fiable para el pronóstico de la corrosión atmosférica. No obstante, con los valores ya determinados en el primer año y las estimaciones de las normas ISO.

Se dará continuidad con el proyecto de investigación instalando 6 estaciones más en la Amazonía para determinar la agresividad atmosférica y el comportamiento de diferentes recubrimientos protectores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Escuela Politécnica Nacional, al Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros por el financiamiento otorgado para la realización del Proyecto Junior 17-02 “Desarrollo de revestimientos poliméricos de alto desempeño para la protección de materiales sometidos a condiciones atmosféricas agresivas en el Ecuador”. También presentan sus agradecimientos a FEDIMETAL, a IZA, a la Dirección de Aviación Civil, a los Departamentos de Física y de Materiales (EPN) y a la Secretaría del Ambiente de Quito por su colaboración en el estudio.

REFERENCIAS

- Alcántara, J., de la Fuente, D., Chico, B., Simancas, J., Díaz, I., & Morcillo, M. *Marine atmospheric corrosion of carbon steel: A review*, <https://doi.org/10.3390/ma10040406>, *Materials*, 10(4), 1–67, (2017).
- ASTM G1, *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test*; 1–9, West Conshohocken, United States (2017).
- ASTM G50, *Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals 1*; 1–6, West Conshohocken, United States (2015).
- Castañeda, A., Carlos, J., Mera, G., Valdés, A. C., José, J., & Albear, H., *Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador*. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 47(Noviembre), 17–29 (2016).
- Empresa Pública Municipal de Movilidad, *Informe de Calidad Aire Cuenca*, 50-54, Cuenca, Ecuador (2018).
- Guerra, J., Castañeda, A., Corvo, F., Howland, J., & Rodríguez, J. *Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea*. <https://doi.org/10.1002/maco.201810442>, *Materials and Corrosion*, 70(3), 444–460 (2019).
- Iribarren, J., Liesa, F., Alemán, C., & Armelin, E., *Corrosion rate evaluation by gravimetric and electrochemical techniques applied to the metallic reinforcing structures of a historic building*, <https://doi.org/http://dx.dpi.org/10.1016/j.culher.2017.04.009>, *Cultural Heritage*, 4(9), 10–14 (2017).
- ISO 4287, *Especificación geométrica de productos (GPS) Calidad superficial: Método del perfil Términos, definiciones y parámetros del estado superficial*, 1–26, Madrid, España (1999).
- ISO 8407, *Corrosión de los metales y aleaciones. Eliminación de los productos de corrosión sobre las probetas de ensayo de corrosión*, 1–15, Madrid, España (2014).
- ISO 8565, *Metales y aleaciones. Ensayos de Corrosión Atmosférica. Requisitos Generales*, 1–18, Madrid, España (2012).
- ISO 9223, *Corrosión de metales y aleaciones. Corrosividad de Atmósferas. Clasificación, determinación y estimación*, 1–15, Madrid, España (2012).
- Kusmieriek, E., & Chrzescijanska, E., *Atmospheric corrosion of metals in industrial city environment*, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.02.017>, *Data in Brief*, 3(June), 149–154, (2015).
- Leygraf, C., Odnevall, I., Tidblad, J., & Graedel, T., *Atmospheric Corrosion*, 2ª Ed., I. John Wiley & Sons Edition, New Jersey, United States (2016).
- Marrocos, M., Almeida, E., & Rosales, B. *Corrosión y Protección de metales en las atmósferas de Iberoamérica*, 11ª Ed., CYTED, Madrid, España (1998).

- Montero, F. *Evaluación del efecto del material sedimentable atmosférico sobre la corrosión metálica, en las ciudades de Quito y Santo Domingo*, 1ª Ed., EPN, Quito, Ecuador (2011).
- Navarrete, E., & Salgado, O., *Determinación de la corrosividad atmosférica de las ciudades de Santo Domingo y Esmeraldas*, 1ª Ed., EPN, Quito, Ecuador (2007).
- Pan, C., Lv, W., Wang, Z., Su, W., Wang, C., & Liu, S., *Journal of Materials Science & Technology Atmospheric Corrosion of Copper Exposed in a Simulated Coastal-Industrial Atmosphere*, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2016.03.024>, Journal of Manufacturing Systems, 33(6), 587–595 (2017).
- Surnam, B., *Prevention and cost of atmospheric corrosion in Mauritius*, <https://doi.org/10.1108/00035591311308047>, Emerald Insight, 60(2), 73–83 (2013).
- Thierry, D., LeBozec, N., Le Gac, A., & Persson, D., *Long-term atmospheric corrosion rates of hot dip galvanised steel and zinc-aluminium-magnesium coated steel*, <https://doi.org/10.1002/maco.201911010>, Materials and Corrosion, May, 1–8 (2019).
- Torres, M., & Saltos, J., *Caracterización de los parámetros de Contaminación Atmosférica más importantes para la corrosión atmosférica en las ciudades de Esmeraldas y Santo Domingo de los Colorados Parte I*, 1ª Ed., EPN, Quito, Ecuador (2010).
- Vera, R., Puentes, M., Araya, R., Rojas, P., & Carvajal, A., *Mapa de corrosión atmosférica de Chile : resultados después de un año de exposición*, <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2012000200007>, Revista de La Construcción, 11(2), 11 (2012).