

## **Evaluación de la Corrosividad Atmosférica en la Ciudad de Poza Rica Veracruz**

Ernesto Gallardo, Gabriela Lugo, Aurora Galicia, José Oseguera y Diana Castillo

E. Gallardo, G. Lugo, A. Galicia, J. Oseguera y D. Castillo.  
Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Campus Poza Rica Tuxpan. Av. Venustiano Carranza S/N,  
col. Revolución, CP: 93390.  
ecastan2008@hotmail.com

M. Ramos., V. Aguilera., (eds.) . Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago,  
Guanajuato, 2014.

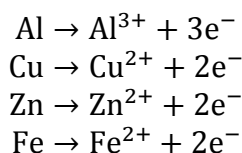
## Abstract

Faculty of Chemistry and the Institute of Engineering of the Universidad Veracruzana have developed a project for the construction of the map of corrosivity of the State of Veracruz, where the city of Poza Rica, located north of the state, has industrial and oil activities, making it important to evaluate the atmospheric corrosion of different metallic materials and alloys exposed to the atmosphere. The studies were done through the direct effect of the atmosphere on flat specimens of aluminum (Al), copper (Cu), carbon steel (Fe) and galvanized (Zn) installed on a display panel adjustable applying ISO standards and electrochemical methods. The electrochemical evaluation was done in each season through techniques, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), polarization resistance (LPR), polarization curves (CP). Finally, XRD studies were made to know the corrosion products formed in the metal surface. The results obtained by ISO standards and electrochemical methods denote high atmospheric corrosivity to copper, steel and galvanized attributable to selective attack the main producing aggressive agents such as SO<sub>2</sub>, chlorides and SiO<sub>2</sub>. XRD studies demonstrate the formation of corrosion products (metal oxides).

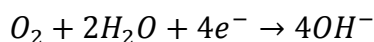
## 3 Introducción

En las industrias la mayoría de las instalaciones productivas se encuentran constituidas de diversos metales, por lo que el proceso de corrosión puede ser muy destructivo ocasionando grandes pérdidas económicas. Todavía no es posible evitar totalmente los fenómenos corrosivos pero haciendo un estudio adecuado, las pérdidas por corrosión que se podrían evitar pueden llegar al 25%, a través el uso de recubrimientos anticorrosivos, inhibidores de corrosión o quizás haciendo el uso de la protección catódica (Morcillo, 1982).

La corrosión como proceso electroquímico de los materiales expuestos a la atmósfera consta de reacciones de oxidación y reducción. La oxidación se encuentra representada por la disolución metálica de los diferentes materiales expuestos a la atmósfera:



El equilibrio para la reducción es:



En la ciudad de Poza Rica la agresividad de la atmósfera depende de diversos factores, tales como la contaminación proveniente principalmente de la industria petrolera, esto sin duda alguna afecta a los metales que se corroen más fácilmente, aportando graves daños a las estructuras y provocando un impacto económico, inclusive accidentes humanos y ambientales.

Los parámetros climáticos que tienen una mayor influencia en la corrosión atmosférica son la temperatura, la humedad relativa, la precipitación y el viento (dirección y velocidad). Además de los factores climáticos, la severidad de la corrosión varía en función de los niveles de contaminación y de los agentes agresivos presentes en el aire (Rosas, 2013).

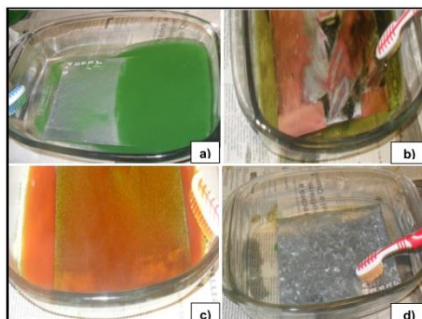
La metodología CLIMAT establece evaluar la agresividad atmosférica de los metales con la exposición directa de los cupones de metal con el ambiente, el cálculo de la velocidad de corrosión por pérdida de masa y la determinación de contaminantes depositados (SO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>) (Genescá, 1999). En el presente trabajo de investigación la metodología CLIMAT se complementa con la aplicación de métodos electroquímicos que proporcionan información del proceso de corrosión en un menor periodo de tiempo y con análisis de XRD para conocer los productos de corrosión formados en la superficie metálica.

### 3.1 Materiales y métodos

#### Metodología MICAT

Se evaluó el nivel de corrosividad ISO 9223 con probetas planas de 4x5x1/32 pulgadas de cobre (Cu), aluminio(Al), acero al carbono (Fe) y galvanizado (Zn), respectivamente. La exposición de las probetas se realizó de acuerdo a las especificaciones de las normas ISO 8565 y ASTM G116-93, utilizando un panel de exposición con un ángulo de inclinación de 45° con respecto a la horizontal y a 1m de altura del piso, el panel se instaló directamente de frente a los vientos dominantes (normalmente provenientes del norte-este) en un lugar alto y sin obstáculos que pudiesen obstruir la incidencia directa de estos (ISO 9223). Para la limpieza química de las probetas se aplicaron los procedimientos descritos en la norma ASTM G1 (figura 1) (Morcillo, 1992).

**Figura 3** Limpieza química de las probetas después de un año de exposición a la atmósfera a) aluminio b) cobre c) acero al carbono y b) galvanizado



Para la metodología ISO al término del año se bajaron las probetas metálicas expuestas, se realizó la limpieza de productos de corrosión a partir de los métodos químicos, posteriormente se volvieron a pesar obteniendo la diferencia de peso con respecto a las probetas originales. Finalmente se calculó la velocidad de corrosión con lo establecido en la ecuación (Morcillo, 1982).

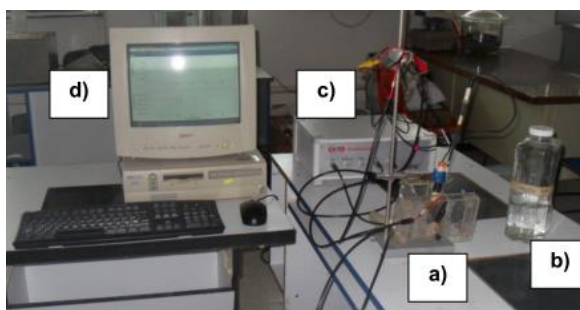
$$V_{corr} = [(p_i - p_f) / \rho A t] \times 10^4 = \mu m / año \quad (3.1)$$

Donde  $p_i$  es el peso inicial en g,  $p_f$  el peso final en g,  $\rho$  la densidad del metal en g/cm<sup>3</sup>, A el área de exposición en cm<sup>2</sup> y t el tiempo de exposición en años.

## Métodos Electroquímicos

En la aplicación de los métodos electroquímicos se utilizó una celda electroquímica constituida por; un electrodo de referencia de calomel (SCE), un electrodo auxiliar de platino y el electrodo de trabajo conformado por la placa metálica de 1 cm<sup>2</sup> en las condiciones superficiales que se desarrollaron durante la exposición atmosférica en cada estación del año. La solución usada en la celda electroquímica fue Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 M (electrolito estándar). Se empleó un potenciostato de campo ACM y las técnicas electroquímicas: Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y Curvas de Polarización Potenciodinámicas (CP) (figura 2) (Ramírez, 2007).

**Figura 3.1** Equipo utilizado para la aplicación de los métodos electroquímicos. a) Celda electroquímica, b) Solución Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 M como electrolito, c) Potenciostato, c) Equipo de cómputo



Los materiales metálicos expuestos a la atmósfera actúan de distinta manera formando productos de corrosión que en algunos casos suelen ser películas muy protectoras que brindan mayor resistencia al sustrato metálico. Sin embargo, materiales como el acero al carbono forman continuamente productos de corrosión solubles no protectores. El nivel de autoprotectividad de los materiales se puede medir considerando la ecuación 2, donde LPR final es la resistencia a la polarización final y LPR inicial es la resistencia a la polarización inicial.

$$\text{Auto-protectividad} = \text{LPR}_{\text{final}} / \text{LPR}_{\text{inicial}} \quad (3.2)$$

Se realizaron estudios de Difracción de Rayos X (XRD) para identificar los productos de corrosión formados en la superficie metálica y así complementar los resultados obtenidos con la técnica EIS.

## 3.2 Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados obtenidos de evaluar la corrosividad atmosférica por metodología ISO y métodos electroquímicos en la ciudad de Poza Rica.

**Tabla 3** Velocidad de corrosión de acuerdo a la normatividad ISO 9226 (Marzo 2013-Marzo 2014)

Material	P <sub>i</sub> (g)	P <sub>f</sub> (g)	ΔP (g)	(V <sub>corr</sub> ) μm/año	Categoría	Nivel de corrosividad
Al	23.0983	23.2727	-	-	-	-
Cu	79.0748	76.3411	2.7337	10.3353	C5	Muy alta
Zn	109.071	108.4159	0.6551	3.1080	C4	Alta
Fe	11.5324	103.9501	7.5823	32.6784	C3	Media

**Tabla 3.1** Resultados de las mediciones electroquímicas de las probetas de acero al carbono, aluminio, cobre y galvanizado expuestos en la atmósfera de Poza Rica (Marzo2013 - Marzo 2014)

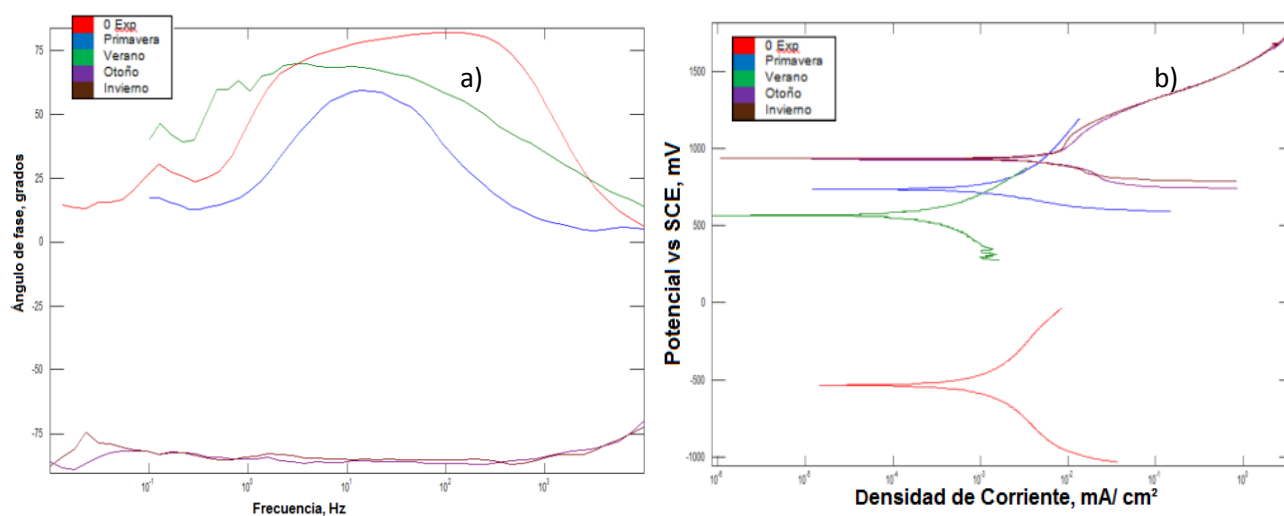
Material	Estación	E <sub>Corr</sub> (mV)	RPL (Ω · cm <sup>2</sup> )	i <sub>corr</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	V <sub>corr</sub> (mm/año)	Autoprotectividad
Al	0 Exp	-436.05	51216	5.09 x10 <sup>-4</sup>	5.54x10 <sup>-3</sup>	0
	Primavera	1415.9	461.28	5.65x10 <sup>-2</sup>	6.15 x10 <sup>-1</sup>	9.00x10 <sup>-3</sup>
	Verano	501.73	245460	1.06 x10 <sup>-4</sup>	1.15 x10 <sup>-3</sup>	4.7926
	Otoño	547.92	22735	1.14 x10 <sup>-3</sup>	1.24 x10 <sup>-2</sup>	0.4439
	Invierno	633.25	1576800	1.80 x10 <sup>-4</sup>	7.09 x10 <sup>-3</sup>	30.7872
Cu	0 Exp	-22.124	112150	2.32x10 <sup>-4</sup>	5.41x10 <sup>-3</sup>	0
	Primavera	55.589	1924.6	1.35x10 <sup>-2</sup>	1.57x10 <sup>-1</sup>	1.71x10 <sup>-2</sup>
	Verano	48.816	1615.2	1.61x10 <sup>-2</sup>	1.87x10 <sup>-1</sup>	1.44x10 <sup>-2</sup>
	Otoño	2.0445	6985.5	3.73x10 <sup>-3</sup>	4.34x10 <sup>-2</sup>	6.22x10 <sup>-2</sup>
	Invierno	45.064	1498.6	1.74x10 <sup>-2</sup>	2.02x10 <sup>-1</sup>	1.33x10 <sup>-2</sup>
Zn	0 Exp	-1048.2	1838.8	1.41x10 <sup>-2</sup>	2.12x10 <sup>-1</sup>	0
	Primavera	1095.1	884.83	2.94x10 <sup>-2</sup>	4.41x10 <sup>-1</sup>	4.81x10 <sup>-1</sup>
	Verano	1091.5	2085.8	1.25x10 <sup>-2</sup>	1.87x10 <sup>-1</sup>	1.1343
	Otoño	1102.1	1076.8	2.42x10 <sup>-2</sup>	3.62x10 <sup>-1</sup>	5.85x10 <sup>-1</sup>
	Invierno	1097.9	2120.4	1.23x10 <sup>-2</sup>	1.84x10 <sup>-1</sup>	1.1531
Fe	0 Exp	-660.56	783.16	3.33x10 <sup>-2</sup>	3.86x10 <sup>-1</sup>	0
	Primavera	299.23	467.2	5.58x10 <sup>-2</sup>	6.47x10 <sup>-1</sup>	5.96x10 <sup>-1</sup>
	Verano	492.28	126.3	2.06x10 <sup>-1</sup>	2.3938	1.61x10 <sup>-1</sup>
	Otoño	384.35	375.24	6.95x10 <sup>-2</sup>	8.05x10 <sup>-1</sup>	4.79x10 <sup>-1</sup>
	Invierno	194.57	1584.2	1.64x10 <sup>-2</sup>	1.90x10 <sup>-1</sup>	2.0228

En la tabla 3 se registra la velocidad de corrosión de acuerdo a lo establecido en la normativa ISO. La probeta de cobre es el material que tiene un nivel de corrosividad muy alta encontrándose en la categoría 5. El Zn denota un nivel de corrosividad alta y el acero media.

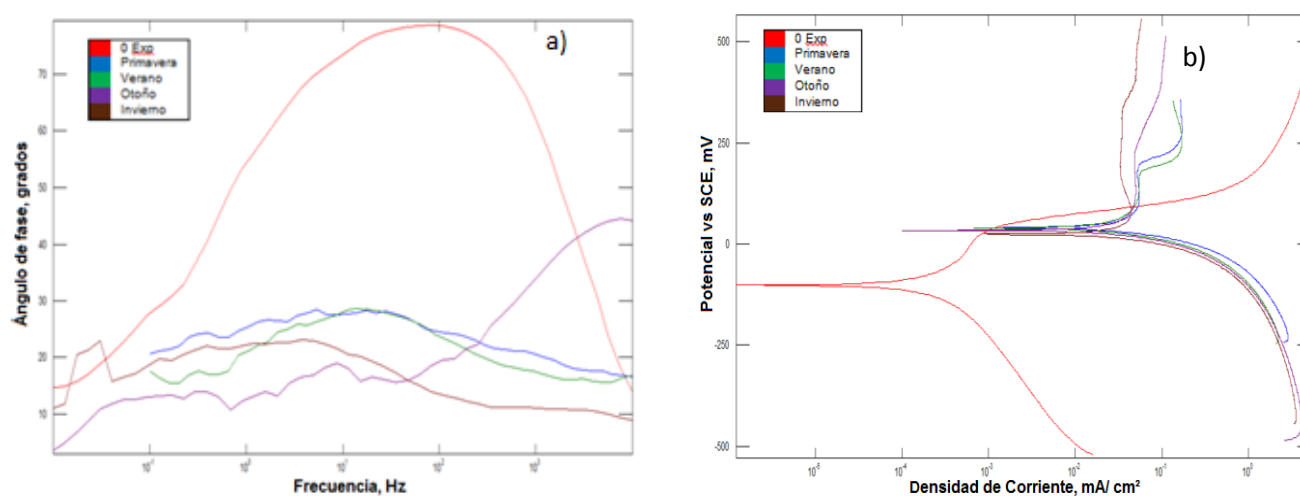
Para el aluminio no se registró pérdida de masa debido a la película de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) formada y detectada por EIS y XRD muy adherente y difícil de remover (por métodos químicos) que crece en relación estequiométrica y produce un incremento de masa.

En la tabla 3.1 los niveles de autoprotectividad para Cu y el Zn son bajos y la densidad de corriente es elevada comparada con atmósferas de menor agresividad, lo que se encuentra vinculado a los resultados obtenidos por la normativa ISO, mostrando la ventaja de usar los métodos electroquímicos debido a que proporcionan información del mecanismo de corrosión en un menor periodo de tiempo.

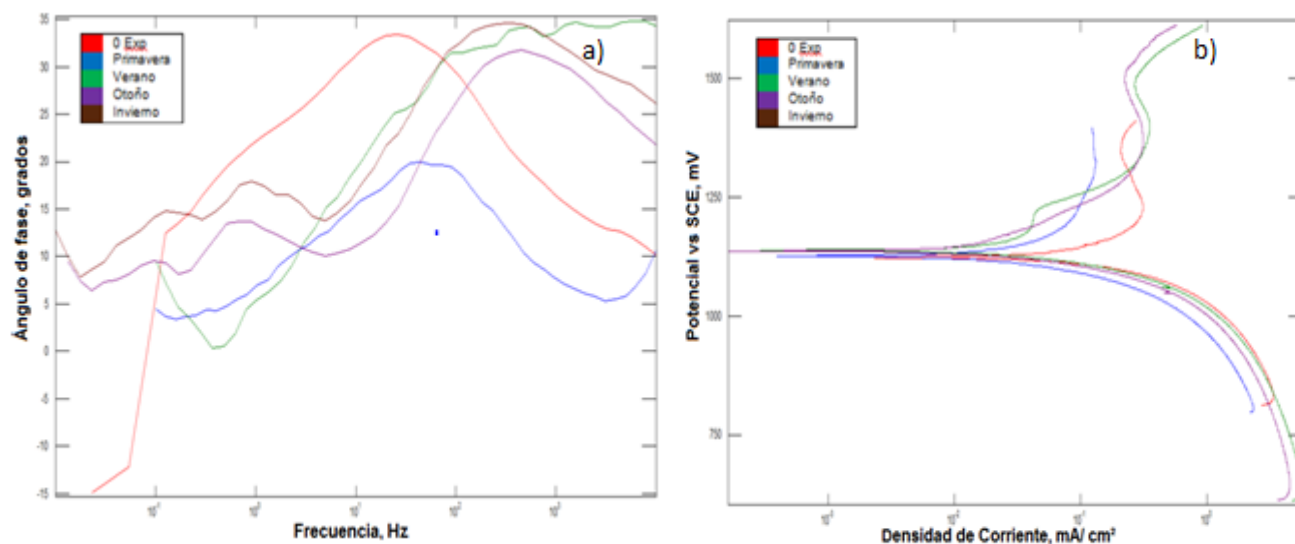
**Figura 3.2** a) Diagramas de impedancia en Bode (frecuencia, ángulo de fase) y b) curvas de polarización para el aluminio (Al) en exposición atmosférica de Poza Rica



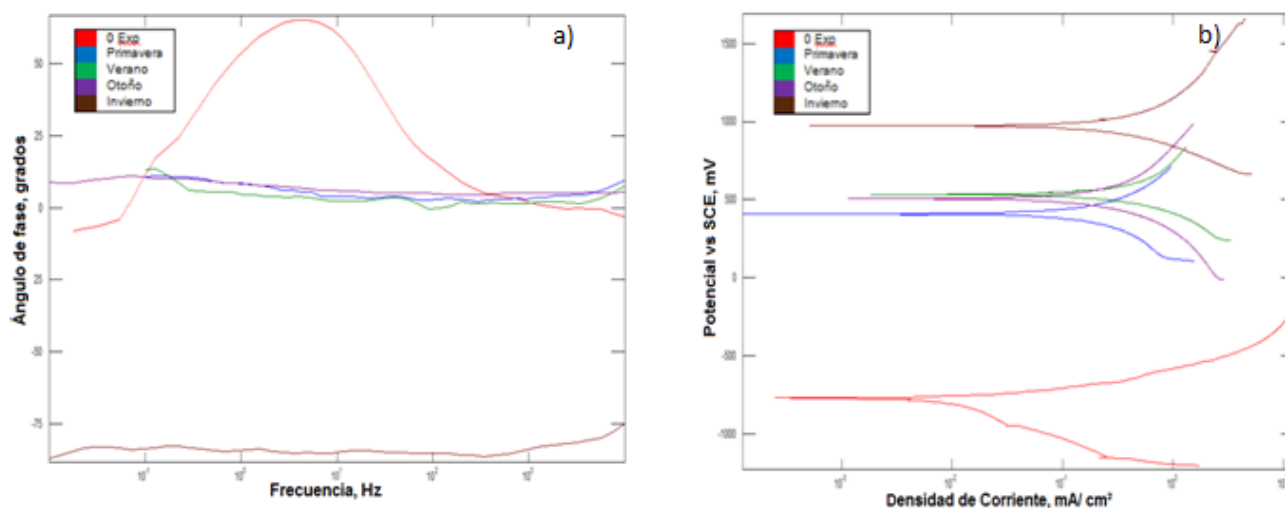
**Figura 3.3** a) Diagramas de impedancia en Bode (frecuencia, ángulo de fase) y b) curvas de polarización para el cobre (Cu) en exposición atmosférica de Poza Rica



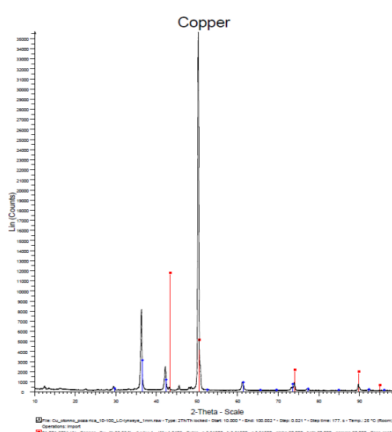
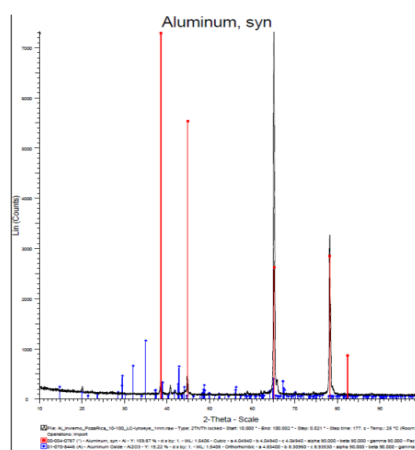
**Figura 3.4** a) Diagramas de impedancia en Bode (frecuencia, ángulo de fase) y b) curvas de polarización potenciodinámicas para el acero galvanizado (Zn) en exposición atmosférica de Poza Rica



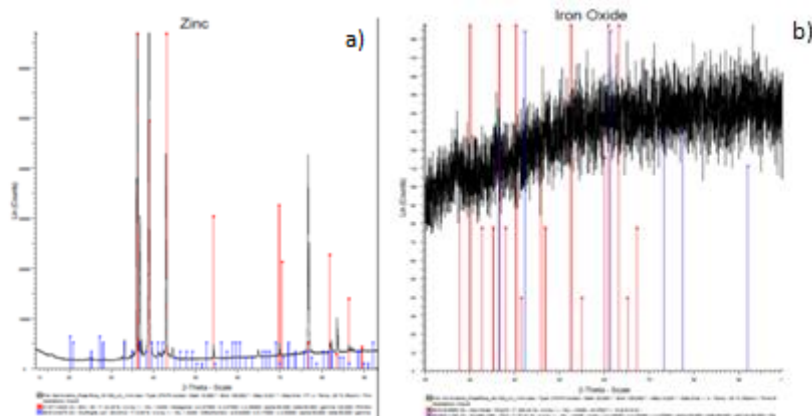
**Figura 3.5** a) Diagramas de impedancia en Bode (frecuencia, ángulo de fase) y b) curvas de polarización potenciodinámicas para el acero al carbono (Fe) en exposición atmosférica de Poza Rica



**Figura 3.6** a) Difractograma de la probeta de aluminio después de un año de exposición en la atmósfera de Poza Rica. Los picos azules corresponden a la fase del óxido de aluminio III ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y los rojos al aluminio (Al). b) Difractograma de la probeta de cobre después de un año de exposición en la atmósfera de Poza Rica. Los picos azules corresponden a la fase del óxido de cobre I ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) y los rojos al cobre (Cu)



**Figura 3.7** a) Difractograma de la probeta de acero galvanizado después de un año de exposición en la atmósfera de Poza Rica. Los picos azules corresponden a la fase de hidróxido de zinc II ( $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ) y los rojos al zinc (Zn). b) Difractograma de la probeta de acero al carbono después de un año de exposición en la atmósfera de Poza Rica. Los picos azules corresponden a la fase del óxido de hierro II ( $\text{FeO}$ ) y los rojos al óxido de hierro III ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )



### 3.3 Discusión

En la figura 3 a), para el aluminio en cero exposición se observa en la región de media frecuencia (100-102 Hz) control del proceso de corrosión por transferencia de carga cuando la muestra aún no tiene productos de corrosión (Ramírez, 2005). En la región de alta frecuencia (102-104 Hz) para las demás estaciones del año se ha detectado una película de productos de corrosión (óxido de aluminio, figura 7 a)) que brinda resistencia y protección al sustrato metálico principalmente en la estación de verano.

En la zona de baja frecuencia (10-2-100 Hz) se observa difusión limitada de las especies electroactivas. Las curvas de polarización (figura 3 b) indican un control tipo mixto observándose mayor velocidad de corrosión para la estación de primavera (tabla 2).

En la figura 5 a), para el cobre en cero exposición (media frecuencia) se aprecia una elevada resistencia a la transferencia de electrones cuando la superficie se encuentra libre de productos de corrosión. En la zona de alta frecuencia para las demás estaciones de año se aprecian películas protectoras de productos de corrosión de  $\text{Cu}_2\text{O}$ , identificadas por XRD (figura, 7b)). Sin embargo, en la zona de media frecuencia se tiene un incremento del mecanismo de corrosión por activación. Para las estaciones de primavera, verano e invierno se tiene un dominio del proceso corrosión con difusión limitada. La agresividad atmosférica sobre la probeta de cobre es consecuencia de la atmósfera industrial producto de actividades petroleras y urbanas de la región (Rosas, 2013).

En la figura 5 a), se aprecia la formación de capas de productos de corrosión de zinc formados y detectados en la alta frecuencia, lo cual se interpreta por el taponamiento por productos de corrosión del zinc sobre los poros generados en las capas de galvanizado que incrementan la autoprotectividad y la resistencia a la transferencia de electrones (ver tabla 2). La estación más agresiva para el zinc fue la primavera. Las curvas de polarización (figura 5 b) indican un mecanismo de corrosión tipo mixto, con una cinética anódica lenta. El principal producto de corrosión detectado por XRD es el  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  (figura 8 a).



En la figura 6 a), se observa, en la región de alta frecuencia, la formación de capas de productos de corrosión que brindan muy baja autoprotectividad (tabla 2) al metal base conforme aumenta el tiempo de exposición. Sin embargo, la porosidad de dichas capas se incrementa con el tiempo al presentarse la influencia del proceso de difusión en la región de baja frecuencia ocasionando bajas resistencias, a nivel de la interfase metal–electrolito se observa la formación de capas de productos de corrosión. En la figura 6 b), se observa un control tipo mixto de las reacciones anódicas y catódicas. Los estudios de XRD denotan la presencia de óxidos de hierro II y III, productos de corrosión que no logran proteger la superficie del sustrato.

### 3.4 Conclusiones

La atmósfera de Poza Rica es muy agresiva para los materiales evaluados de acuerdo a los estándares ISO, principalmente para el cobre y el acero galvanizado, debido a que se cuenta con una atmósfera Industrial derivado de actividades petroleras con influencia de la atmosfera marina por la cercanía con las costas del Golfo. Los métodos electroquímicos indican que las estaciones primavera y otoño son de mayor agresividad atmosférica sobre el aluminio, el acero al carbono y el galvanizado, esto puede ser por la elevada humedad relativa, mientras que las lluvias de verano disminuyen el proceso de corrosión debido al efecto lavador de contaminantes sobre la superficie metálica. Sin embargo, para el cobre todas las estaciones climáticas del año son muy agresivas.

### Agradecimientos

Al Programa de Mejoramiento del Profesorado, dependiente de la Subsecretaria de Educación Superior por el apoyo al Proyecto “Corrosividad Atmosférica en la Región Norte del Estado de Veracruz”; así como a la Dirección General de Desarrollo Académico, la Facultad de Ciencias Químicas y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana por la gestión y facilidades para llevar a cabo las actividades del proyecto.

### Referencias

- Genesca L. J., Mariaca R. L., Uruchurtu Ch. J y Hernandez H. L. S. (1999). *Corrosividad atmosférica (MICAT-Mexico)*. Mexico D.F.: Plaza y Valdes S.A. de C.V.
- ISO 8407. (1991). *Corrosion of metals and alloys. Removal of corrosion products from corrosion test specimens*.
- ISO/DP 9223. (1986). *Corrosion of metals and alloys. Classification of Corrosivity. Categories of atmospheres*.
- Morcillo M. (1982). *Corrosión y protección de metales en las atmósferas de Ibero América; Mapas de Iberoamerica de Corrosion Atmosferica*. Barcelona: Bellaterra S.A.
- Ramírez J.L., (2007). *Metodos Experimentales en la ciencia de la Corrosion*. Veracruz: Ed. instituto de Ingenieria ,UV, Veracruz.
- Rosas P. (2013). *Indices de Corrosividad y Parametros Agresivos en la Ciudad de Tuxpan Veracruz, Mexico*. Tuxpan, Ver.