

Corrosión atmosférica del acero bajo en carbono en un ambiente marino polar. Estudio del efecto del régimen de vientos^(·)

S. Rivero*, B. Chico**, D. de la Fuente** y M. Morcillo**

Resumen

En el trabajo se estudia la corrosión atmosférica del acero al carbono (UNE-EN 10130) en un ambiente marino polar (Base Científica Antártica Artigas (BCAA), Uruguay), en función de la salinidad atmosférica del lugar y del tiempo de exposición. Se establece una relación lineal entre corrosión en el primer año de exposición atmosférica y velocidad de deposición de salinidad en el intervalo de salinidades medias encontrado (125-225 mg Cl⁻/m²·d), así como una relación bilogarítmica entre corrosión y tiempo de exposición (1-4 años). Se relaciona la salinidad atmosférica con la velocidad media mensual del viento y su dirección característica, a partir del concepto de recorrido del viento. Velocidades de depósito de iones cloruro inferiores a 300 mg Cl⁻/m²·d se deben a vientos lejanos oceánicos y vientos costeros con velocidades, fundamentalmente, en el intervalo 1-40 km/h, en tanto que velocidades de depósito superiores (300-700 mg Cl⁻/m²·d) obedecen a vientos marinos costeros, de cierta persistencia, en los que la velocidad alcanza valores situados en el intervalo 41-80 km/h.

Palabras clave

Corrosión atmosférica. Acero al carbono. Salinidad. Viento. Antártida.

Atmospheric corrosion of low carbon steel in a polar marine environment. Study of the effect of wind regime

Abstract

The present work studies the atmospheric corrosion of carbon steel (UNE-EN 10130) in a sub-polar marine environment (Artigas Antarctic Scientific Base (BCAA), Uruguay) as a function of site atmospheric salinity and exposure time. A linear relationship is established between corrosion rate and airborne salinity deposition rate, valid in the deposition range encountered (125-225 mg Cl⁻/m²·d), and a bilogarithmic relationship is established between corrosion and exposure time (1-4 years). Atmospheric salinity is related with the monthly wind speed average, based on the concept of the wind run. Chloride ion deposition rates of less than 300 mg Cl⁻/m²·d are related with remote (oceanic) winds and coastal winds basically of speeds between 1-40 km/h, while higher deposition rates (300-700 mg Cl⁻/m²·d) correspond to coastal marine winds of a certain persistence with speeds of between 41-80 km/h.

Keywords

Atmospheric corrosion. Low-carbon steel. Salinity. Wind. Antarctica.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión atmosférica es un proceso de naturaleza electroquímica. El electrólito está constituido, bien por una película de humedad extremadamente delgada (unas pocas monocapas) o bien por una película acuosa (de centenares de micrómetros de espesor) cuando el metal aparece perceptiblemente mojado^[1].

Se ha demostrado que la humedad relativa (HR) ejerce un papel decisivo en la corrosión atmosférica.

Por debajo de un determinado nivel de HR la corrosión es insignificante, pues no existe película apreciable de electrólito sobre el metal. Generalmente, la corrosión del hierro y otros metales es despreciable a humedades relativas por debajo del 60-80 %, dependiendo del metal. Aún cuando la HR exceda de este nivel, para que la velocidad de corrosión sea realmente importante, la atmósfera debe estar, además, contaminada.

El proceso de corrosión atmosférica es suma de los procesos parciales (individuales) de corrosión que

(·) Trabajo recibido el día 21 de febrero de 2007 y aceptado en su forma final el día 23 de abril de 2007.

* Facultad de Ingeniería. Sección Corrosión (SeCorr). Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, 2do Piso, CP 11300 Montevideo (Uruguay).

** Departamento de Ingeniería de Materiales, Degradación y Durabilidad. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC). Av. Gregorio del Amo 8, 28040-Madrid (España).

tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrolito sobre el metal. Las precipitaciones acuosas (lluvia, nieve o niebla) y la condensación de humedad por cambios de temperaturas (rocío), conjuntamente con la presencia de partículas depositadas en la superficie metálica, son, sin duda, los principales promotores de la corrosión en la atmósfera. La suma de tiempos parciales de humectación constituye el llamado tiempo de humectación (TDH), durante el cual es posible la corrosión metálica. Se ha encontrado una buena correlación entre el TDH y el tiempo en que la HR supera un determinado nivel de humedad, por lo general, superior al 70 %.

Condiciones de alta humedad conjuntamente con altas temperaturas suelen favorecer, notablemente, los procesos de deterioro de los materiales en la atmósfera. Por el contrario, a bajas temperaturas y en atmósferas secas, la corrosión metálica puede ser ignorada a efectos prácticos.

El cloruro sódico y el dióxido de azufre son los principales contaminantes y agentes corrosivos de la atmósfera. El cloruro sódico se incorpora a la atmósfera desde el mar, siendo sus efectos muy acusados cerca de la orilla, donde el aire transporta grandes cantidades de sal, pudiéndose llegar a producir una continua pulverización de agua. El dióxido de azufre se encuentra en las atmósferas que están impurificadas por humos industriales y residenciales y se origina al quemar combustibles que contienen azufre. Estas dos sustancias químicas estimulan grandemente la corrosión de las superficies metálicas humedecidas, ya que aumentan la actividad de la película acuosa. Así, la corrosión atmosférica en puntos cercanos a la orilla del mar puede exceder considerablemente a lo previsible en el caso de una atmósfera pura. Igual sucede en los complejos industriales, grandes urbes (atmósferas contaminadas por SO_2) etc, en cuyos entornos los procesos corrosivos se aceleran notablemente.

1.1. Efecto de la temperatura del aire

La temperatura del aire ocasiona efectos antagónicos en la corrosión atmosférica. Por un lado, hay que considerar que un aumento de la temperatura acelera las velocidades de los diversos procesos físicos y químicos involucrados en la corrosión metálica: reacciones químicas y electroquímicas y procesos de difusión. Sin embargo, un aumento de la temperatura también conduce a velocidades más altas de desorción de la película acuosa, reduciendo, por tanto, el tiempo de humectación de la superficie metálica^[2]. Un aumento de la temperatura reduce, asimismo, la solubilidad de los gases en la película de humedad y, por tanto, del contenido de oxígeno disuelto, funda-

mental para el desarrollo del proceso catódico en el mecanismo de corrosión electroquímica de los metales en la atmósfera. El efecto resultante de un aumento de la temperatura suele ser un incremento de la velocidad de corrosión bajo condiciones de humectación permanente de la superficie metálica, tales como las que ocurren durante la precipitación. Sin embargo, bajo condiciones de humectación variable, la velocidad de corrosión aumenta con la temperatura hasta un cierto valor máximo y, posteriormente, decrece.

Debido a la presencia de constituyentes gaseosos de la atmósfera disueltos en la capa de humedad, el punto de congelación de la capa líquida desciende por debajo de 0 °C, de tal modo que se tienen velocidades significativas de corrosión a -5 °C. A más bajas temperaturas del aire (por debajo de -5 °C) el agua se presenta, por lo general, en estado sólido, dificultándose su actuación como electrolito de transporte^[3].

1.2. Efecto de la salinidad atmosférica

Son diversas las fuentes que motivan la presencia de cloruros en la atmósfera, siendo la actividad industrial (origen antropogénico) y el agua de mar (origen natural) las más importantes.

El depósito de partículas salinas sobre la superficie metálica acelera su corrosión, sobre todo si, como en el caso de los cloruros, pueden dar lugar a productos de corrosión solubles en lugar de los escasamente solubles que se forman en agua pura. Por otro lado, los cloruros, disueltos en la capa de humedad, elevan considerablemente la conductividad de la película del electrolito sobre el metal y colaboran en la desestabilización de eventuales películas pasivantes.

Para que el ion cloruro acelere la corrosión es necesario que la superficie metálica esté humedecida. El valor de HR, a partir del cual la sal comienza a absorber agua de la atmósfera (higroscopicidad), parece ser crítico desde el punto de vista de la corrosión. Ambler y Bain^[4] comprobaron que la humedad del 78 %, que es la de equilibrio con una solución saturada de NaCl, coincidía con una fuerte aceleración de la corrosión del acero al carbono.

La salinidad de las atmósferas marinas varía dentro de muy amplios límites, desde valores extremos, en áreas de aguas muy agitadas (rompientes), a valores bajos en zonas de agua de mar en calma. Entre las variables con influencia en la salinidad atmosférica destacan^[5]: régimen de vientos dominantes (dirección y velocidad), distancia a la costa, topografía de la zona, altitud, densidad rocosa costera, morfología de las olas, temperatura del agua de mar, etc. Cabe

mencionar que, en el caso que nos ocupa, se han hecho determinaciones sobre el electrólito precipitado sobre las superficies metálicas en exposición (en general, en forma de escarcha o hielo desmenuzado) y recogido en diferentes épocas, a lo largo de un año, cuya información ha sido publicada anteriormente [6].

La relación existente entre salinidad y corrosión metálica, mostrada en la figura 1 y obtenida a partir de una exhaustiva recopilación de información publicada en atmósferas marinas[7], muestra claramente la linealidad (trazo discontinuo) entre ambas variables en un amplio intervalo (0-500 mg Cl⁻/m²·d) de concentraciones de ion cloruro. Por encima de 500 mg Cl⁻/m²·d, la corrosión aumenta, sólo ligeramente, frente a incrementos de la salinidad atmosférica, llegando a estabilizarse.

1.2.1. Origen de la salinidad atmosférica procedente del mar

Las olas se producen por la transferencia de energía del viento al mar y se originan en espacios denominados “zonas de generación” asociadas, por lo general, a fuertes vientos y tormentas. La altura de las olas depende no solamente de la velocidad del viento sino, también, del tamaño de la zona de generación a través de la cual sopla el viento y del número de horas en que el viento está soplando (persistencia), así como del estado previo de la mar (condiciones iniciales)[8].

La descarga de energía cinética (rompiente) de las olas es una contribución importante a la formación

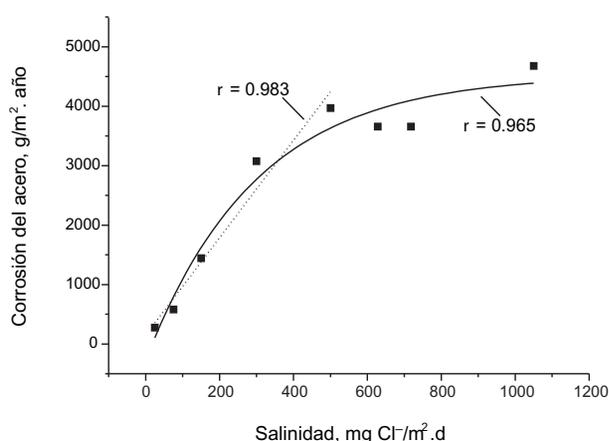


Figura 1. Relaciones entre salinidad atmosférica y velocidad de corrosión del acero al carbono. ρ = coeficiente de correlación.

Figure 1. Relationships between atmospheric salinity and low-carbon steel corrosion rate. ρ = correlation coefficient.

de aerosol marino[9-12]. La agitación y la turbulencia asociadas a ello arrastran aire que forma burbujas debajo de la superficie del agua. Cuando estas burbujas se liberan al aire, estallan al entrar en contacto con la atmósfera, produciendo una miríada de finas gotas salinas que dan lugar a una suspensión de solución de agua de mar en aire, conocida como aerosol marino. Este mecanismo es importante en la generación de partículas salinas en la atmósfera, a velocidades de viento bajas e intermedias. Mar adentro, cuando el mismo comienza a agitarse por la acción del viento, se forman pequeñas islas de espuma, conocidas como “cabrillas”, cuya densidad y abundancia depende de la intensidad del viento.

A velocidades del viento superiores a 10 m/s, tiene lugar, en alta mar, la formación de una ola de altura considerable, que conlleva un barrido mecánico de sus crestas por la acción del flujir del viento a su través, dando lugar a una formación secundaria de partículas salinas mediante la formación de espuma y producción de ciertas gotas de tamaño considerable, conocidas como “spray”.

Cuando las olas llegan a la costa por la propia dinámica de la onda marina, son inestables y descargan naturalmente su energía cinética rompiendo, una vez alcanzada la interfase arena-agua-atmósfera, o bien impactan en los rompedores (*breakers*) de olas, dando lugar, también, a la formación del aerosol marino, de diferente naturaleza en ambos casos. Predomina, en el primer caso, el *film drop* y el *jet drop* y, en el segundo, el “spray”.

La profundidad del mar en la zona costera influye enormemente en la existencia de rompientes (*surf*) que dan lugar a una producción elevada de salinidad.

La magnitud del aerosol marino producido en alta mar está estrechamente ligada a la extensión de espuma que, a su vez, está relacionada con la latitud del lugar. En zonas costeras, conviene diferenciar el aerosol originado en los rompedores de olas como resultado de la acción de fuertes vientos del que se origina por la acción de bajas intensidades de vientos. En el primer caso, la intensidad del viento local tiene una notable influencia en el tamaño de las olas que rompen en la línea de costa, en tanto que, en el segundo, el estado del mar viene determinado, principalmente, por las olas generadas en zonas lejanas a la rompiente.

La producción de aerosol marino en una rompiente depende de los vientos locales. Una estimación de la concentración de sal ($S, \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) en el aire debida a este efecto viene dada por la expresión:

$$\ln S = 0,23 U_2 + 3,05 \quad (1)$$

donde, U_2 es la velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) a 2 m por encima del nivel del mar[13].

1.2.2. El transporte del aerosol marino

Las partículas de aerosol marino pueden ser arrastradas por los vientos marinos hacia el interior del continente, donde tienden a sedimentar después de cierto tiempo y después de haber recorrido una cierta distancia o bien a impactar y adherirse sobre superficies. La salinidad se elimina de la atmósfera por depósito húmedo y depósito seco^[12].

La disminución de la concentración de partículas de aerosol marino en los primeros cientos de metros a partir de la línea de costa está causada, principalmente, por un proceso de depósito seco. Dos mecanismos son, básicamente, los responsables de ello: la sedimentación por efecto de la gravedad y la eliminación por impacto (fricción), a través del contacto de la masa de aire con la rugosidad del terreno. La velocidad del viento y la fricción tienen una influencia apreciable en la disminución de la salinidad, conforme se avanza terreno adentro. Las partículas mayores tienen una mayor velocidad de sedimentación por lo que, por lo general, no son transportadas a largas distancias.

En un estudio de los autores^[7] se realizó una recopilación de información existente en la bibliografía sobre la disminución de la salinidad atmosférica en función de la distancia a la línea de costa. Los estudios realizados en distintas partes del mundo (Fig. 2) mostraban, todos ellos, una rápida disminución de la salinidad en los primeros cientos de metros de la línea de costa, seguida de un decrecimiento más moderado, tendiendo a un valor asintótico que podría corresponder a los valores de fondo de salinidad atmosférica típicos de los distintos lugares donde se llevaron a cabo los estudios.

Existen distintas expresiones para describir este comportamiento. Johnson y Stanners^[14] sugieren el siguiente modelo matemático de decrecimiento exponencial

$$Y = C e^{-Ax} + D e^{-Bx} \quad (2)$$

donde, Y es el valor medio de salinidad (mg Cl⁻/m²·d) a una distancia de x metros de la línea de costa; A y B son constantes de decrecimiento; y C y D son los valores de salinidad a distancia cero (línea de costa), correspondientes a los dos tipos de partículas que contribuyen a la salinidad atmosférica: partículas sedimentables que se depositan rápidamente por la acción de la gravedad y partículas flotantes, de menor tamaño, que permanecen en el aire durante largo tiempo y que se van eliminando del aire turbulento por el contacto (fricción) con los obstáculos. El modelo de la ecuación (2) ofrece una razonable justificación física a las primeras observaciones de Ambler

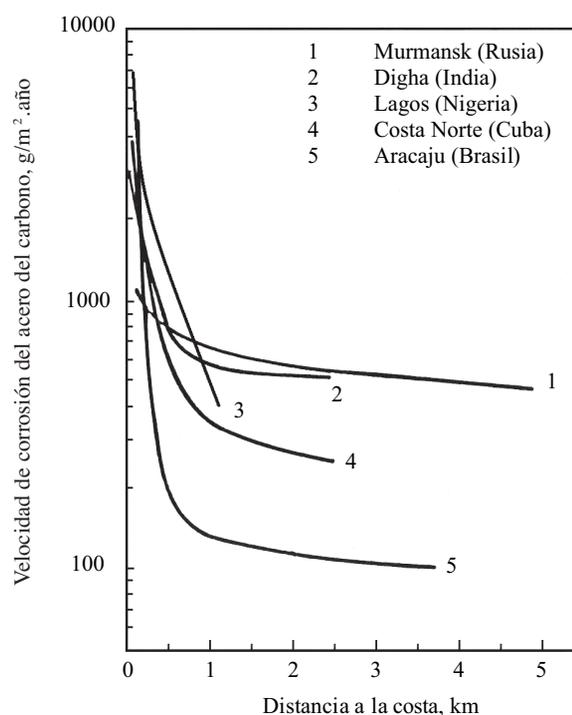


Figura 2. Variación de la velocidad de corrosión del acero al carbono en función de la distancia a la costa en diferentes partes del mundo.

Figure 2. Variation of low carbon steel corrosion rate with distance from the sea in different parts of the world.

y Bain en Nigeria^[4] en uno de los primeros estudios realizados sobre esta temática.

Para diferentes puntos de Australia, King y Carberry^[15] establecieron la siguiente relación hiperbólica

$$\ln \text{corrosion} = A + \frac{B}{1 + Cx} \quad (3)$$

siendo A, B y C constantes y x la distancia a la costa.

A partir de estudios realizados en distintas partes del mundo con probetas *climat*^[16], Doyle y Godard^[17] apuntaban que la disminución de la corrosión con la distancia a la costa se ajustaba a una curva hiperbólica del tipo

$$X^{1/3} + Y^{1/3} = K \quad (4)$$

donde, x es la distancia a la costa, y es el índice de corrosión marina y K es una constante.

De acuerdo con Feliu *et al.*^[18] la posibilidad de que las partículas de aerosol alcancen puntos más o menos distantes de la línea de costa, es el resultado de las dos tendencias predominantes: su arrastre hacia el interior por los vientos marinos y su depósito sobre

el terreno por los dos mecanismos mencionados anteriormente. Se apunta la siguiente expresión

$$C = C_0 \exp(-\beta x) + A \quad (5)$$

donde, C es la velocidad de corrosión, C_0 es una constante (prácticamente coincide con el valor de la velocidad de corrosión en la línea de costa cuando $C_0 \gg A$), β es una constante, x es la distancia a la costa y A es la velocidad de corrosión a salinidad cero. Los datos experimentales disponibles no permitieron discernir entre la ecuación (5) y la ecuación del tipo

$$C = C_0 \exp(-\beta x) \quad (6)$$

ecuación similar a la que obtuvieron para la variación de la salinidad con la distancia a la costa

$$S = S_0 \exp(-\alpha x) \quad (7)$$

De acuerdo con Cole *et al.*^[19] la producción de aerosol marino es la suma de la producción en la zona de rompiente y la producción en el océano. Esta última está condicionada a la actividad de las cabriñas mientras que la producción en la zona de rompiente puede ser modelada en función de los vientos locales. La concentración del aerosol generado en la zona de rompiente disminuye rápidamente en un kilómetro de la línea de costa, en tanto que el aerosol generado en el océano puede ser transportado hacia el interior a distancias superiores a los 50 km. La variación de la concentración salina con la distancia a la línea de costa se puede estimar mediante un decrecimiento exponencial. Así, en el caso de la zona de rompiente

$$A(d) = A_i [(0,9 e^{-d/0,1}) + (0,1 e^{-d})] \quad (8)$$

donde, A_i es la concentración salina en la línea de costa y $A(d)$ la concentración a una distancia d de la línea de costa

Para el aerosol producido en el océano

$$O(d) = O_i \exp^{-d/x} \quad (9)$$

donde, O_i y O_d son las concentraciones de aerosol en la línea de costa y a una distancia d de la línea de costa, respectivamente, y x es la constante de decaimiento.

1.2.3. Efecto del régimen de vientos en la salinidad atmosférica

Es de gran interés conocer la influencia del régimen de vientos presente en un determinado punto de exposición en la magnitud de la salinidad atmosférica.

Varios estudios han intentado relacionar el nivel de salinidad, tanto en alta mar como en la costa, con la velocidad del viento. Lovett^[20] y Taylor^[21] formularon una relación lineal ente ambas variables. En cambio, en otros estudios se presentan funciones de tipo exponencial o potencial para expresar el gran efecto de esta variable en la producción del aerosol marino, especialmente cuando la velocidad del viento supera los 3-5 m/s. Frente a vientos más moderados la relación viento-aerosol marino es menos evidente.

La velocidad del viento no es el único factor a considerar en la formación del aerosol. En efecto, cualquier factor que favorezca la rotura de las olas en la zona de rompiente contribuye a esa formación de aerosol. Esos factores están asociados a las características de las olas tales como la altura, período, dirección, etc. y a las características de la costa: perfiles longitudinal y transversal, topografía, densidad y morfología de las formaciones rocosas inmersas en la costa, etc. Asimismo, la formación de aerosol está relacionada con el tipo de rompedores de olas existente en la costa, y con la amplitud de la zona de rompiente^[5].

En principio, parecería razonable pensar que los vientos marinos, con su velocidad, dirección y duración, serían el factor que gobernase la presencia de masas de aerosol marino en las regiones costeras. Sin embargo, la topografía y la orografía del terreno y, en general, el régimen de vientos de la zona pueden condicionar que los vientos continentales también tengan influencia en los valores de salinidad. Este hecho se ha puesto de manifiesto en un estudio de la Academia de Ciencia de Rusia, llevado a cabo por Strekalov^[22] en Murmansk y Vladivostok, en el que los autores concluían que el arrastre de cloruros desde el mar al interior dependía de la velocidad media de los vientos totales (marinos + continentales) y del producto (recorrido) de la velocidad del viento por su duración.

Morcillo *et al.*, en una publicación anterior^[5], aplicaron las ideas de Strekalov a la información experimental obtenida en una zona de la costa Mediterránea Española, Tarragona, llegando a la conclusión sobre la existencia de ciertas direcciones de vientos marinos, que denominaron vientos salinos, cuyo recorrido es el responsable de la salinidad atmosférica del lugar.

Rivero *et al.*^[23-25] han dedicado un esfuerzo importante al estudio del comportamiento de ambientes marinos de diferente severidad, en especial en el ambiente polar que nos ocupa en el presente trabajo, siguiendo algunos criterios derivados de la aproximación de Strekalov *et al.*^[22] anteriormente citada, mostrando la influencia de las distintas vertientes direccionales en la concentración de salinidad ambiente, más allá del aporte exclusivo de los vientos estrictamente ligados a la costa cercana.

Si bien se han realizado estudios sobre el efecto del viento en la producción de aerosol marino mar adentro, en el océano la información relativa al efecto del viento en la zona de rompiente es más escasa. Cole *et al.*^[19] desarrollaron un modelo que considera por separado la producción y transporte del aerosol marino en el océano y en rompientes, que validaron en el sur de Australia.

Investigaciones sobre esta materia son de gran interés en el campo de las predicciones de corrosión atmosférica a partir de datos ambientales: meteorológicos, contaminación atmosférica, etc. El poder estimar la salinidad atmosférica en zonas costeras, analizando simplemente la información sobre el régimen de vientos disponibles en las bases de datos meteorológicos de un país y su inclusión en las numerosas funciones de daño publicadas entre corrosión y factores ambientales^[26], que duda cabe, constituiría un paso decisivo en el campo de la predicción de la corrosión atmosférica.

En este trabajo se conjugan las experiencias derivadas del trabajo de Rivero *et al.*^[23-25] y Morcillo *et al.*^[5, 7, 8 y 18], en diferentes zonas marinas. En particular se describe una experiencia llevada a cabo en una zona climática y geográfica muy singular de la región Antártica, conocida como “frente polar”, en donde las bajas temperaturas y el particular régimen de vientos pueden condicionar enormemente la formación del aerosol marino.

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

La experimentación se realizó en un sitio antártico^[23-25], ubicado en un archipiélago perteneciente a las islas Shetlands del Sur (latitud: 62° S, longitud:

58° N), concretamente en la Isla Rey Jorge, rodeada por el mar de Drake al norte y el estrecho de Bransfield al sur (Fig. 3). Como es conocido, en esta zona geográfica, el mar se congela, periódicamente, en la región costera este.

La estación de corrosión atmosférica (Fig. 4) en la que se expusieron las muestras metálicas, así como la candela húmeda para la captación del aerosol marino, se encontraba situada cercana a la Base Científica Antártica Artigas, en el extremo sur-occidente de la Isla Rey Jorge, aledaño a una bahía situada entre las puntas Suffield y Nebles.

Se ha hecho uso de la información de velocidad y dirección del viento recabadas a partir de los registros instantáneos almacenados en el adquisidor correspondiente de la estación meteorológica situada en la mencionada Base Científica (Fig. 4). Para ello,

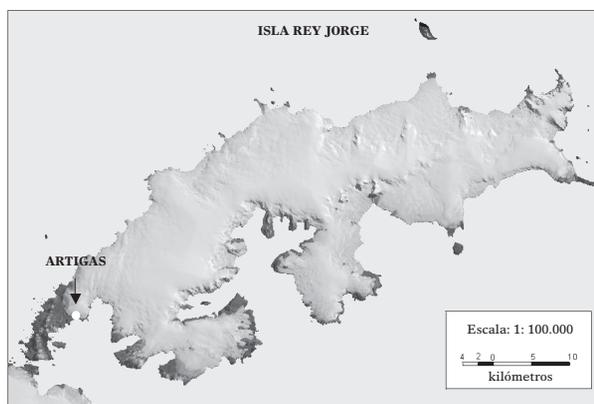


Figura 3. Localización geográfica de la Base Científica Antártica “Artigas”.

Figure 3. Geographic location of Antarctic Scientific Base “Artigas”.

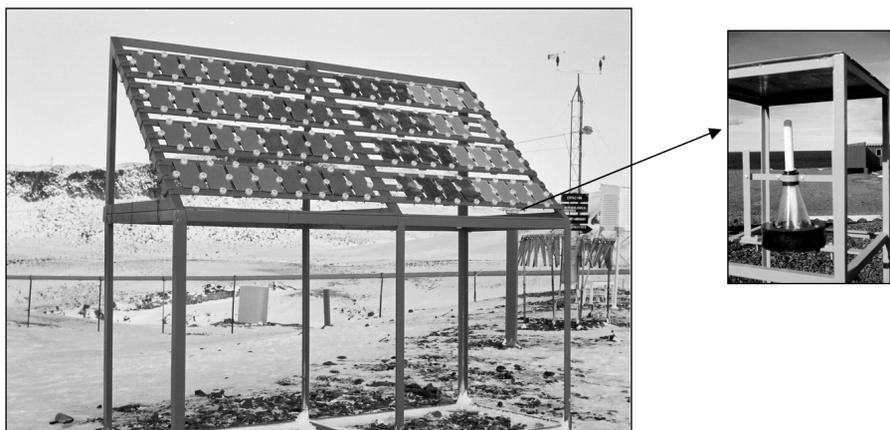


Figura 4. Vista de la estación de ensayo Antártica.

Figure 4. View of Antarctic test station.

se ha dispuesto de un medidor de viento (magnitud y dirección) inserto en una unidad automatizada, previsto para el funcionamiento en zonas de temperaturas extremas ($-55 \dots + 55$ °C). Dispone de un anemómetro de cazoleta, y de una veleta que, en ambos casos, cuenta con calefacción distribuida en el total de ambos cuerpos, desde una aproximación que busca la optimización del funcionamiento aerodinámico. El instrumento trabaja en un rango de velocidad de $0,4-75$ m/s $\pm 0,5$ m/s, $0-360^\circ \pm 3^\circ$. El instrumento de medida ha estado ubicado en superficie terrestre, a 10 m de altura respecto al nivel del terreno, el cual, a su vez, se encuentra nivelado a 17 m de la altura SNM.

Para la obtención de las velocidades de depósito de la salinidad ambiente se ha seguido el método de la candela húmeda según la norma ISO 9225 [27]. El tiempo de exposición de la candela es de un mes, sustituyéndose sucesivamente por otra, mes tras mes. El período experimental se ha extendido desde mayo 1995 a noviembre 1999.

Para la preparación de las superficies iniciales se ha seguido la norma ISO 8407 [28], empleándose chapas de acero laminado en frío, bajo en carbono (UNE-EN 10130: C 0,05 %, Cu 0,021 %, Ni-Cr 0,012 %), de dimensiones 100×150 mm y de 1 mm de espesor, atendiendo a un cronograma de exposiciones de 1, 2, 3 y 4 años. Durante todo el período experimental se expusieron probetas que permanecían expuestas durante un año, sustituyéndose sucesivamente por otras al cabo de ese tiempo. Para la determinación de la corrosión experimentada por las muestras metálicas se siguió la norma ISO 9226 [29].

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Datos de corrosión

En las figuras 5 y 6 se exponen los datos de corrosión (pérdida de masa) y los de salinidad media obtenidos en los distintos períodos de exposición.

3.2. Datos de salinidad y viento

Se ha seguido la siguiente metodología para trabajar con las series mensuales obtenidas de salinidad y viento:

a) Se seleccionaron 26 series de salinidad y viento, que reunían las siguientes condiciones: ausencia de congelación del mar, pérdidas menores del 5 % en la recolección de datos de viento y períodos de

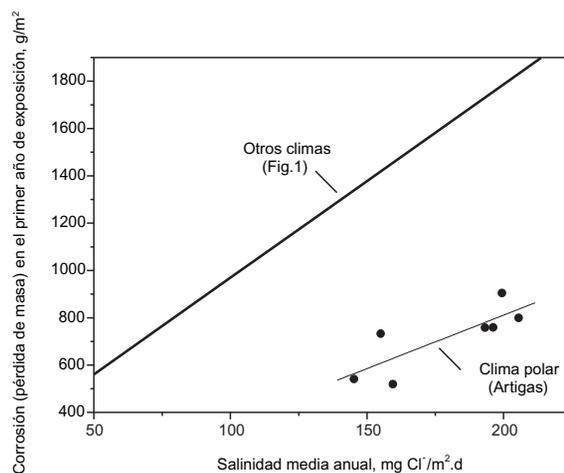


Figura 5. Variación de la corrosión (pérdida de masa) del acero al carbono en el primer año de exposición atmosférica con la salinidad media anual.

Figure 5. Variation of the first year corrosion (weight loss) of low carbon steel with annual average salinity.

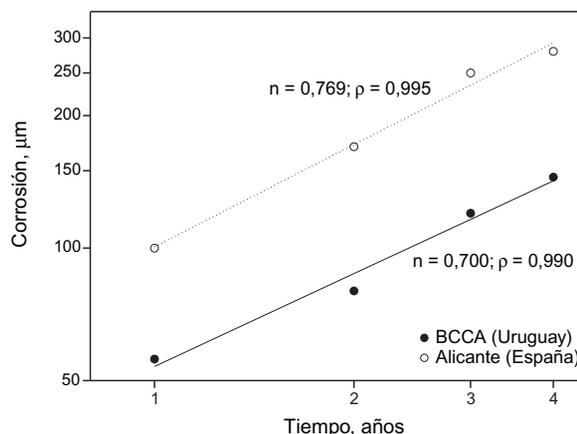


Figura 6. Evolución de la corrosión del acero con el tiempo de exposición. n = exponente de la ecuación (11). ρ = coeficiente de correlación.

Figure 6. Evolution of low carbon steel corrosion with exposure time. n = exponent in equation (11). ρ = correlation coefficient.

exposición de las candelas de salinidad de 30 ± 3 d. En la figura 7 se representan los datos de salinidad de esas 26 series, en orden creciente de su magnitud.

b) Se subdividieron las categorías de salinidad ambiente en los siguientes tres intervalos: 50-100, 100-300 y 300-700 mg Cl⁻/m².d.

c) Se procedió al cálculo del parámetro denominado recorrido del viento (R , km), definido para cada sector del siguiente modo:

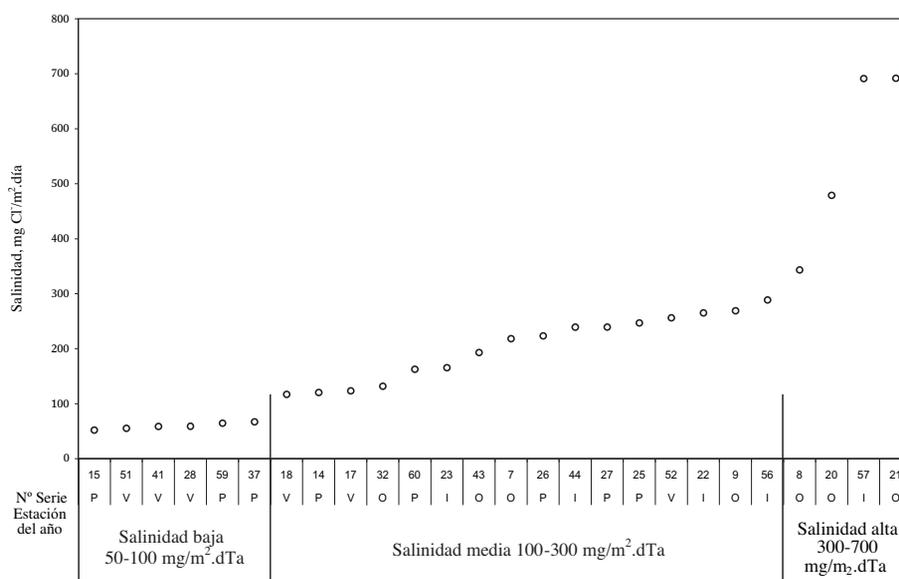


Figura 7. Velocidades obtenidas de deposición de salinidad atmosférica. P: Primavera; V: Verano; O: Otoño; I: Invierno

Figure 7. Values obtained for the atmospheric airborne salinity deposition rates. P: Spring; V: Summer; O: Autumn; I: Winter.

$$R = \sum [\text{velocidad media}_{\text{intervalo } i, \text{ dirección } j} * \text{duración}_{\text{de la condición } ij}] \quad (10)$$

donde, el intervalo de velocidades se ha establecido considerando la amplitud máxima del intervalo de velocidades registradas durante el estudio (1-80 km/h), y subdividiendo el mismo en intervalos más pequeños de acuerdo con la escala Beaufort^[30]. Mientras que la velocidad del viento se mide, generalmente, a través de la velocidad del movimiento horizontal del aire, los números Beaufort (que denotan categorías) proveen de una medida de la fuerza del viento con referencia a su efecto sobre la superficie del mar. La escala Beaufort ha sido derivada para dar cuenta del estado del mar desde una aproximación subjetiva que categoriza, vinculando efectos con fuerzas del viento, establecidas sobre la base de una escala arbitraria numérica. Este recurso permite una visión del viento desde la superficie, aún cuando las medias de viento provengan de 10 m de altura.

La escala Beaufort ordena las velocidades de viento según el efecto que éstas producen en la interfase océano-atmósfera:

- 1-20 km/h (velocidades asociadas al movimiento de la masa de aire no más intenso que la brisa suave).
- 21-40 km/h (velocidades asociadas al movi-

miento de la masa de aire que produce el efecto entre brisa suave y fuerte).

- 41-60 km/h (velocidades asociadas al movimiento de la masa de aire que produce el efecto entre la brisa suave y viento sostenido y fuerte).
- 61-80 km/h (velocidades asociadas al movimiento de la masa de aire que produce, en intensidad, un efecto por encima del anterior).

Se han considerado, como velocidades medias para cada sub-intervalo, 10, 30, 50 y 70 km/h, respectivamente. Se entiende, por duración de la condición ij, el tiempo (número de horas) que el viento ha soplado en la dirección j con una velocidad correspondiente a cada sub-intervalo, al cual se asigna una velocidad media v_i .

Los resultados de este cálculo se presentan en la figura 8, en función de las diferentes categorías de salinidad definidas anteriormente. Para la categoría intermedia de salinidad (100-300 mgCl⁻/m²·d) se diferencian dos períodos: primavera-verano (p-v) y otoño-invierno (o-i). En cada una de estas figuras se representan los recorridos del viento en función de las categorías Beaufort, en los cuatro sectores definidos del siguiente modo:

- Sector S1: comprende las direcciones NNE al ENE

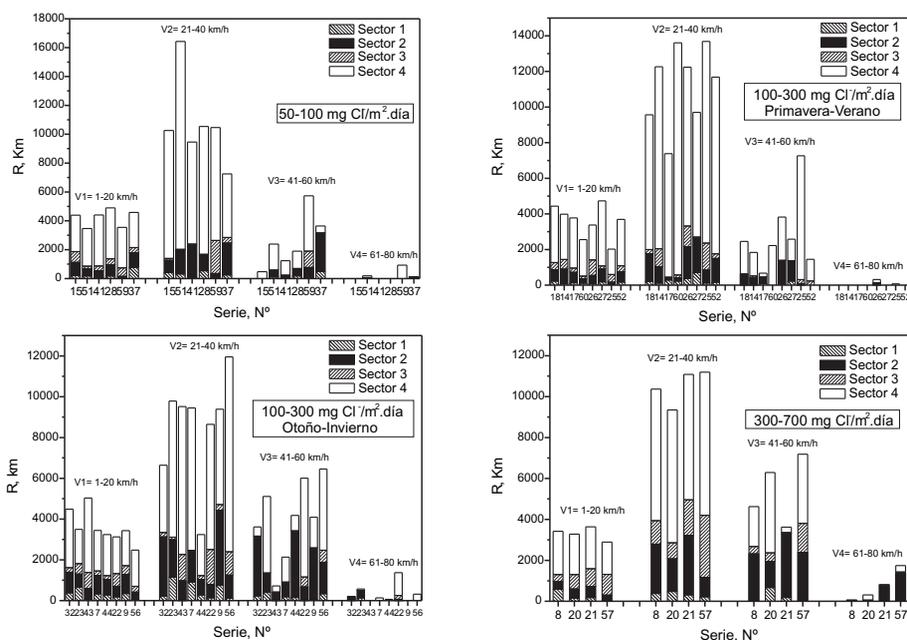


Figura 8. Recorridos del viento (R) para las diferentes series en función del sector y velocidad del viento, para cada intervalo de velocidad de deposición de salinidad.

Figure 8. Wind run for the different series, as a function of sectors and wind velocities, for each range of airborne salinity deposition rate.

- Sector S2: comprende las direcciones E al SSE
- Sector S3: comprende las direcciones S al WSW
- Sector S4: comprende las direcciones W al N

4. DISCUSION

4.1. Corrosión atmosférica. Efecto de la salinidad

En la figura 5 se presenta la variación de la corrosión anual del acero al carbono con la salinidad atmosférica en la Base Científica Antártica Artigas (trazo inferior), junto con el trazo superior correspondiente al intervalo de salinidades de 50 a 200 mg Cl/m².d de la relación entre ambas variables en otros lugares del mundo (Fig. 1). Como puede observarse, para salinidades análogas la corrosión del acero es notablemente inferior en el sitio antártico, donde las extremadas bajas temperaturas durante largos períodos de tiempo y bajos tiempos de humectación (TDH) limitan el proceso de corrosión metálica^[31 y 32].

La velocidad de corrosión media anual del acero en este sitio antártico se corresponde con una categoría de corrosividad C₄-C₅^[33]. El sitio se corresponde con

una categoría de corrosividad estimada desde datos del medioambiente C₄-C₅ ($\tau_4, S_{2,3}, P_0$)^[33 y 34]. Es interesante observar que el clima antártico en cuestión se caracteriza por un tiempo de humectación (τ_4) relativamente elevado a temperaturas bajas, por lo que se le denomina con el apelativo frío templado (*cold temperate*), justamente por la presencia de salinidad ambiente. Si nos desplazamos más hacia el sur se convierte en un clima “frío”, y “extremadamente frío”, respectivamente, con atenuaciones importantes en la velocidad de corrosión. Hughes *et al.*^[35] nos muestran esta realidad con los valores alcanzados por probetas de acero en distintas latitudes en dirección del polo sur: Rothera, península antártica (27,1 $\mu\text{m/año}$), Mawson, 67° S (3,35 $\mu\text{m/año}$), Vostok, 78° S (0,05 $\mu\text{m/año}$), Polo Sur, 90° S (0,03 $\mu\text{m/año}$). Las experiencias llevadas a cabo en conjunto con el grupo MICAT^[36], que ha dispuesto de tres sitios antárticos emplazados en diferentes zonas y configuraciones, destacan en los tres casos la influencia de la presencia de la salinidad ambiente, alcanzándose velocidades entre 24 y 68 $\mu\text{m/año}$, con valores extremos de hasta 120 $\mu\text{m/año}$.

En cuanto al progreso de la corrosión del acero con el tiempo de exposición, la figura 6 muestra en coordenadas doble logarítmicas una relación lineal entre ambas variables, cumpliéndose una vez más la

ley bilogarítmica, como ocurre generalmente en la corrosión atmosférica de metales y aleaciones^[37]. Es decir, el cumplimiento de una función de potencia entre corrosión y tiempo de exposición

$$C_t = C \cdot t^n \quad (11)$$

en la que C_t representa la corrosión al cabo de t años y C es la corrosión durante el primer año de exposición.

En esta misma figura 6 se representa también la gráfica correspondiente a Alicante (España)^[38], un lugar que exhibe una salinidad media anual similar a la que se presenta en Base Artigas. Como puede observarse, aunque las pendientes de ambas gráficas son similares, la magnitud del proceso corrosivo en la Antártica es notablemente inferior al que experimenta el acero al carbono en Alicante, localidad de clima templado-húmedo con verano seco (mediterráneo).

En relación a las velocidades de corrosión que se presentan en el sitio antártico, existe una disminución de la velocidad con el tiempo ($V_{4 \text{ años}} = 0,56 V_{1 \text{ año}}$). La función que describe el comportamiento cinético entre uno y cuatros años de exposición incluye un exponente, n , de 0,7, que induce a pensar sobre una cierta capacidad protectora de los productos de corrosión formados.

4.2. Efecto del viento en la salinidad atmosférica

Para abordar la interpretación y discusión de los resultados obtenidos resulta de gran utilidad conocer previamente el comportamiento característico de los vientos del lugar, haciendo uso de los registros históricos del viento local. En la figura 9 se expone la rosa de vientos del lugar correspondiente al período 1986-1995^[39], representada por los valores medios de intensidad y frecuencia de la dirección del viento, discriminados por dirección, con la inclusión de 16 direcciones distribuidas en los cuatro sectores mencionados anteriormente.

De acuerdo con la figura 9, el componente de mayor frecuencia del viento viene, en primer término, desde el norte (N), con un segundo aporte, en orden de importancia, que sopla desde el oeste (W). Con relación a la intensidad, desde una visión a través de la velocidad media anual, los valores dominantes se corresponden con las direcciones N y ESE.

La velocidad media mensual del viento es bastante constante a lo largo del año, incrementándose algo en la primavera. Los valores medios anuales se sitúan en el entorno de los 27 km/h. La circulación característica de los vientos que soplan desde el W se correspondería con aquellos debidos a la circulación general para dicha

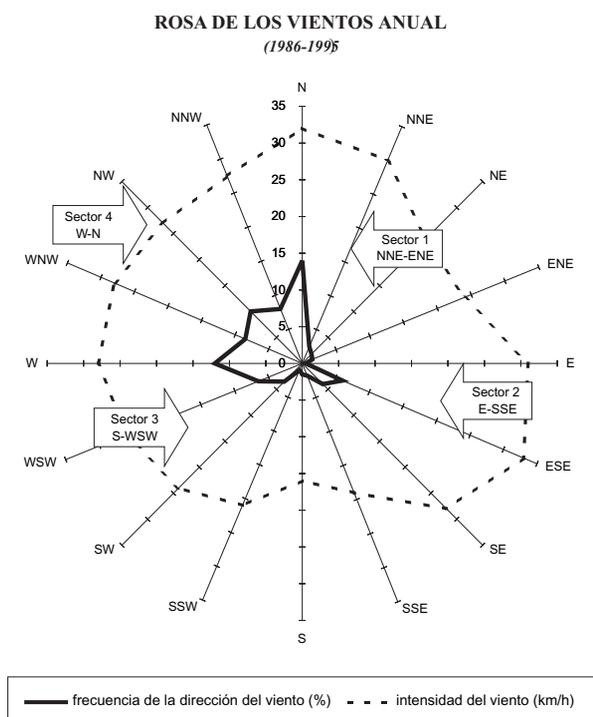


Figura 9. Rosa de vientos del lugar para el período 1986-1995.

Figure 9. Wind rose of the site for the 1986-1995 period.

zona (bajas sub-polares). Esta zona es límite entre los “oestes” de latitudes medias y los “estes” de latitudes polares, siendo una región de poca calma.

Por otro lado, en cuanto a situaciones puntuales en la información de vientos del lugar, cabe señalar que los valores más altos en la magnitud de la velocidad de deposición de salinidad, están asociados a vientos que fluyen desde el ESE y el SE (Sector 2), relacionados con situaciones de escala sinóptica anómala, generando eventos de alta velocidad cuya presencia se vincula a los meses de junio a octubre.

Se menciona que la isla sufre congelamiento de las aguas oceánicas superficiales, principalmente al sur, con lo que se produce una interrupción en la transferencia de partículas salinas desde el océano hacia la atmósfera. En dicha región el congelamiento ocurre normalmente hacia junio-agosto, requiriendo una calma previa absoluta del mar. Esta condición es imprescindible para que precipiten los primeros cristales que darán lugar a la expansión y el espesamiento de la capa de hielo que recubre la superficie. Esta dinámica modifica la concentración vertical de la salinidad en el mismo mar y el contenido atmosférico salino sufre un paulatino descenso, a partir de junio, recuperándose a partir del deshielo y alcanzando su máximo en febrero, mes en el cual se

registra la mayor temperatura en superficie. Existe otro fenómeno local, que ocasionaría impedimentos al flujo del viento, como es la presencia de enormes bloques de hielo (icebergs) que llegan a alcanzar 80 m de altura por 100 m de largo. Estos fenómenos ayudan a explicar la coexistencia de altos recorridos, y bajas salinidades, típicos de algunas series que no han sido incluidas en la presente comunicación.

Con referencia a la información de velocidad de vientos y salinidad asociada recogida en el período mayo 1995 – noviembre 1999 (Fig. 8), es posible observar un aumento sustancial del recorrido correspondiente al Sector 2 en los intervalos de velocidad 41-60 y 61-80 km/h, conforme nos desplazamos hacia las series con velocidad de deposición de salinidad creciente, fundamentalmente debido al aumento del componente de velocidad y a la verificación de que en dichas situaciones la persistencia del viento suele hacerse presente. Al mismo tiempo, esta preponderancia del Sector 2 se acompaña de una franca retracción de los vientos dominantes del Sector 4, a costa de un paulatino aumento de los vientos del Sector 3, realidad claramente visible en el trazado de las figuras 10 y 11. La figura 10 presenta una síntesis por sectores de los valores medios de recorridos totales del viento en función de los intervalos de salinidad atmosférica. La figura 11 informa de la velocidad del viento de acuerdo con los intervalos Beaufort definidos anteriormente.

Se aprecia, en la figura 8, que el número de series posible de elegirse en concordancia con concentraciones extremas de salinidad ambiente resulta bastante menor que la suma de las que componen el resto de las categorías salinas, tratándose de eventos infrecuentes. En particular, los mismos tienden a manifestarse en la temporada preferencial de otoño e invierno, siendo la primavera y el verano temporadas de mayor benevolencia en torno a la presencia de salinidad.

A partir de las bases de datos de frecuencia mensual del viento, discriminados por velocidad, se calcula el número de eventos para cada sector (S1 a S4) y para cada intervalo de velocidades según la escala Beaufort elegida (1-20, 21-40, 41-60, 61-80 km/h), en función de su duración. Se han elegido los siguientes intervalos de tiempo: 1-6, 7-12, 13-18, 19-24, 25-50, 51-100 h. Se pretende, con ello, estudiar la contribución de cada flujo de viento en el tiempo (duración), en cada período experimental, clasificado por la velocidad (intervalo Beaufort) y discriminado por sectores.

Se observan dos tipos de comportamiento: uno, que podría denominarse “característico”, que concuerda con los registros históricos, vinculado a los vientos de todos los sectores, aunque con preponderancia a los sectores 4 y 2, más que los sectores 3 y 1, en orden decreciente de recorrido, con velocidades

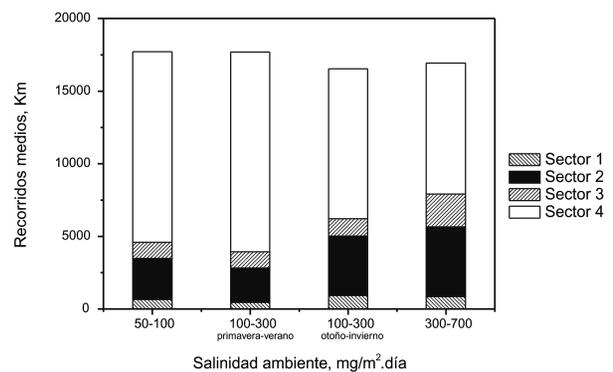


Figura 10. Recorrido medio del viento para cada categoría de salinidad ambiente

Figure 10. Wind run average for each range of atmospheric airborne salinity deposition rate.

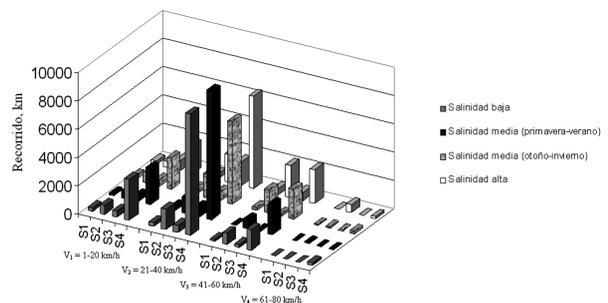


Figura 11. Recorrido medio del viento por sector, rango de velocidad y categoría de salinidad.

Figure 11. Wind run average for each sector, velocity and salinity ranges.

relacionadas, en general, con los intervalos 1-20 y 21-40 km/h; otro, “episódico”, en que se visualizan contribuciones que hacen dominante al Sector 2, junto con aportes del Sector 3, es decir, vientos marinos cercanos, dotando al recorrido correspondiente de una magnitud llamativamente mayor, en virtud de la influencia de la intensidad de flujo correspondiente, fundamentalmente, a los intervalos de 41-60 y 61-80 km/h. Estos órdenes de magnitud pueden promover un notable aumento de la salinidad ambiente.

En general, se observa que el aumento en los valores de velocidad de deposición de salinidad ambiente está relacionado con la estacionalidad. Los episodios clasificados como salinidad baja están asociados a las estaciones de primavera y verano. Para salinidades intermedias (100-300 mg/m².d), se observan dos tipos de comportamiento en el cálculo del recorrido, según se trate de las estaciones primavera-verano

(p-v) o, bien, otoño-invierno (o-i). La diferencia vendría dada por el (los) sector(es) desde los cuales se produciría el aporte importante al recorrido.

Este avance en el tratamiento de la información sugiere unificar algunas series mensuales sobre la base de contemplar dos grandes tendencias de los vientos cercanos (Fig. 12):

- (a) relación $R2+R3/R4$ del orden de 0,3, y
- (b) relación $R2+R3/R4$ del orden de 0,8.

La figura 13 muestra la variación de la frecuencia de eventos (%) en función de la salinidad. Se puede observar que la salinidad ambiente estaría aportada por la presencia de vientos marinos cercanos (costeros) que comparten la permanencia con los vientos marinos lejanos (oceánicos), igualmente imbuidos de salinidad, pero paulatinamente despojados de ella a través de los procesos de deposición seca a lo largo de su recorrido por el territorio. Este proceso parecería tener una dependencia directa de la magnitud del propio recorrido, y el desplazamiento de sus componentes de aporte hacia velocidades de mayor intensidad. Estos comportamientos son típicos del verano y la primavera. Al cambiar la temporada, los vientos marinos cercanos se hacen presentes con mayor contribución, dando ocurrencia a intervalos de salinidad ambiente caracterizados por la presencia de un notable recorrido asociado al Sector 2, y en la región de más alta salinidad es altamente significativa también la contribución del Sector 3. El aporte de los vientos marinos lejanos se retrae apreciablemente en dichas ocasiones. Esto indica que los mismos podrían tener, cuando están presentes, un sig-

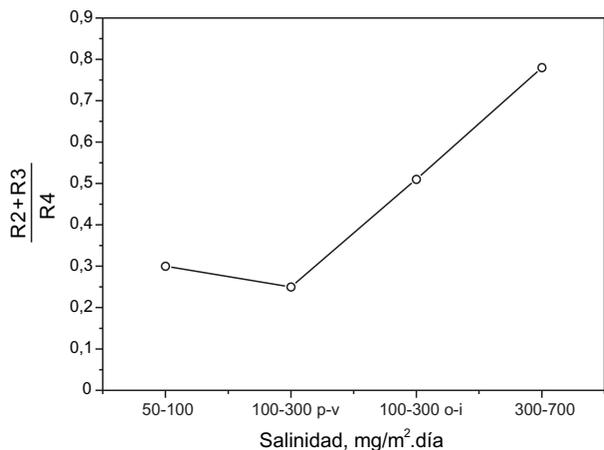


Figura 12. Variación de la relación de recorridos $\frac{R2+R3}{R4}$ con la salinidad atmosférica.

Figure 12. Variation of wind runs relation $\frac{R2+R3}{R4}$ with atmospheric salinity.

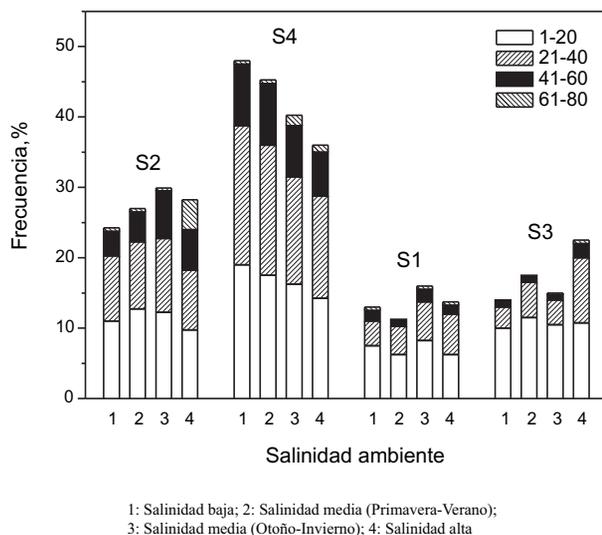


Figura 13. Frecuencia de eventos (%) en función de la velocidad del viento (intervalos según Beaufort).

Figure 13. Frequency of events (%) as function of wind velocity (Beaufort classes), sectors and salinity categories.

nificativo efecto de dilución, dada su naturaleza, del mismo modo que los provenientes del sector 1, y más aun en este último caso.

La figura 13, pone de manifiesto que más que el valor del recorrido total, que en términos medios es un criterio válido, el incremento de salinidad ambiente estaría más fuertemente vinculado al tipo y número de eventos en donde la velocidad del viento alcanza niveles en los intervalos 41-60 y 61-80 km/h, con preponderancia del aporte desde los Sectores 2 y 3, respectivamente. Existiría un recorrido específico caracterizado por ciertos umbrales de velocidad mínima necesaria y duración del aporte, que dan cuenta del aumento no lineal de la velocidad de deposición de sal, sobrepasando con creces los 300 mg/m².d, y que no necesariamente dan lugar a un aumento radicalmente más alto de la cantidad de recorrido.

La tabla I refuerza argumentos a favor de jerarquizar el efecto de las contribuciones del Sector 2 en el intervalo de velocidades 41-60 y 61-80 km/h, con una diversificación en la duración del “tipo de evento”, suplementado por un incremento de la participación del Sector 3, fundamentalmente ligado a velocidades en el intervalo 41-60 km/h, paralelamente a la ya comentada atenuación en la participación de los vientos desde el Sector 4. Nótese la magnitud, ciertamente pequeña, de algunas frecuencias que hacen el aporte sustantivo de salinidad. A partir de los datos disponibles de frecuencia del viento, se ha

Tabla I. Frecuencia de eventos-tipo (%) y duración (h) de eventos-tipo correspondientes a velocidades de viento de 41-60 y 61-80 km/h en función del sector y categorías de salinidad atmosférica.

Table I. Frequency (%) and duration (h) of events corresponding to wind velocities of 41-60 and 61-80 km/h as function of sectors and categories of atmospheric salinity.

Sector	Salinidad (mg Cl ⁻ /m ² ·día)	Frecuencia (%)		Duración (h)	
		41-60 km/h	61-80 km/h	41-60 km/h	61-80 km/h
2	100-300 p-v	4,21	0,41	1-6, 7-12	1-6
	100-300 o-i	6,56	0,51	1-6, 7-12, 19-24	1-6
	300-700	6,19	2,32	1-6, 7-12, 13-18, 25-50	1-6, 7-12
3	100-300 p-v	0,72	—	1-6	—
	100-300 o-i	0,72	0,1	1-6	1-6
	300-700	2,23	0,19	1-6, 7-12	1-6
4	100-300 p.v	8,44	0,31	1-6, 7-12, 13-18, 19-24, 25-50	1-6
	100-300 o.i	7,08	1,23	1-6, 7-12, 13-18, 25-50	1-6, 7-12
	300-700	6,58	0,77	1-6, 7-12, 13-18, 19-24, 25-50	1-6

podido calcular que el ambiente antártico es, la mayoría del tiempo, de una salinidad S_2 , resultando S_3 un 17 % del mismo, de acuerdo con ISO 9223 [33].

5. CONCLUSIONES

- La corrosión atmosférica del acero laminado en frío, bajo en carbono, en esta región antártica, C4-C5 de acuerdo a ISO 9223 [33], alta en términos relativos, es notablemente inferior a la obtenida en otros climas (p. ej., templados o tropicales) con salinidades de la atmósfera similares.
- La atenuación de la corrosión con el tiempo de exposición sigue una función de potencia (modelo bilogarítmico) encontrada también en otros tipos de clima. La capa de productos de corrosión promueve un cierto efecto protector.
- La relación que vincula el viento con la concentración de aerosol marino es compleja. Existe una clara influencia de vientos marinos cercanos (costeros), con aportes desde los Sectores 2 y 3, que justifican los valores de salinidad atmosférica comprendidos entre 100-300 y 300-700 mg Cl⁻/m²·d, para las temporadas de otoño e invierno, con una relación de recorridos $(R_2+R_3)/R_4$, entre 0,5-0,8 para cada intervalo de salinidad.
- Los vientos marinos lejanos (oceánicos) y contribuciones de vientos marinos cercanos (costeros), en una relación $(R_2+R_3)/R_4$ próxima a 0,3, explican los valores de salinidad atmosférica comprendidos entre 50-300 mg/m²·d, para las esta-

ciones de primavera y verano, con velocidades del viento en el intervalo 1-40 km/h.

- Se verifica que la salinidad ambiente aumenta de 50-300 a 300-700 para saltos en la velocidad del viento en la escala Beaufort de 1-40 km/h a 41-80 km/h, mostrando una relación no lineal, confirmando trabajos de otros investigadores.

Agradecimientos

Se agradece la amable colaboración de Mario Bidegain y José Cataldo de la Facultad de Ciencias y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR), Uruguay, respectivamente, así como a Christopher Leygraf, del Royal Institute of Technology KTH, Suecia, por sus contribuciones y observaciones. Se reconoce asimismo el apoyo logístico brindado por el Instituto Antártico Uruguayo (IAU), así como el suministro de información puntual proveniente de la base científica antártica aledaña "King Sejong".

REFERENCIAS

- [1] S. FELIU Y M. MORCILLO, *Corrosión y protección de los metales en la atmósfera*. Ed. Bellaterra, Barcelona, España, 1982, p. 1.
- [2] C. LEYGRAF Y T.E. GRAEDEL, *Atmospheric corrosion*, John Wiley and Sons, New York, EE. UU., 2000, p. 98.

- [3] K. BARTON, *Protection against atmospheric corrosion*, John Wiley and Sons, New York, EE. UU., 1976, p. 10.
- [4] H.R. AMBLER Y A.A.J. BAIN, *J. Appl. Chem.* 5 (1955) 437.
- [5] M. MORCILLO, B. CHICO, L. MARIACA Y E. OTERO, *Corros. Sci.* 42 (2000) 91-104.
- [6] S. RIVERO et al., *Revista del Instituto Antártico Uruguayo*, 4 (1993) 7-17.
- [7] M. MORCILLO, B. CHICO Y E. OTERO, *Mater. Perform.* (1999) 72-77.
- [8] S. FELIU, M. MORCILLO Y B. CHICO, *Br. Corros. J.* 36 (2001) 157-160.
- [9] D.C. BLANCHARD Y A.H. WOODCOCK, *Ann. NY Acad. Sci.* 338 (1980) 330-347.
- [10] J.W. FITZGERALD, *Atmos. Environ.* 25A (1991) 533-545.
- [11] J. WU, *Science*, 212 (1981) 324-326.
- [12] I.S. COLE, D.A. PATERSON Y W.D. GANTHER, *Corros. Eng. Sci. Technol.* 38 (2003) 129-134.
- [13] W.A. MCKAY, J.A. GARLAND, D. LIVESLEY, C.M. HALLIWELL Y M.I. WALKER, *Atmos. Environ.* 28 (1994) 3.299-3.309.
- [14] K.E. JOHNSON Y J.F. STANNERS, *Rept. EUR 7433*, Luxembourg, 1981.
- [15] G.A. KING Y B. CARBERRY, *Technical Report TR 92/1*, CSIRO, Australia, 1992.
- [16] D.P. DOYLE Y H.P. GODARD, *Nature* 200 (1963) 4912.
- [17] D.P. DOYLE Y H.P. GODARD, *Proc. 3rd Int. Cong. Metallic, Vol. IV, Corrosion*, MIR Publishers, Moscú, 1969, pp. 429-437.
- [18] S. FELIU, M. MORCILLO Y B. CHICO, *Corrosion* 55 (1999) 883-891.
- [19] I.S. COLE, W.Y. CHAN, G.S. TRINIDAD Y D.A. PATERSON, *Corros. Eng. Sci. Technol.* 39 (2004) 89-96.
- [20] R.F. LOVETT, *Tellus* 30 (1978) 358.
- [21] N.J. TAYLOR Y J. WU, *J. Geophys. Res.* 97 (1992) 7355.
- [22] P.V. STREKALOV, YU. M. PANCHENKO, *Prot. Met.* 30 (1994) 254.
- [23] S. RIVERO Y P. KRECL, *Proc. 15th Int Corrosion Congress*, Granada, 2002, Trabajo N° 650.
- [24] S. RIVERO, *Conferencia 15, URUMAN 2005*, LATU, Uruguay, Abril 2005,.
- [25] S. RIVERO, *Trabajo 23, LATINCORR 2006*, Fortaleza (Brasil), 2006,.
- [26] S. FELIU, M. MORCILLO Y S. FELIU JR., *Corros. Sci.* 34 (1993) 403.
- [27] ISO 9225, Geneve (1992).
- [28] ISO/DIS 8407, Geneve (1992).
- [29] ISO 9226, Geneve (1992).
- [30] Escala Beaufort, <http://www.crch.noaa.gov/lot/webpage/beaufort>.
- [31] E. ALMEIDA, M. MORCILLO Y B. ROSALES, *Mater. Corros.* 51 (2000) 865-874.
- [32] E. ESCUDERO, M.J. BARTOLOME, V. LOPEZ, J. SIMANCAS, J.A. GONZALEZ, M. MORCILLO Y E. OTERO, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 133-138.
- [33] ISO 9223, Geneve (1992).
- [34] RIVERO, S., *Trabajo para el título Magister en Ingeniería*, Udela R (1996).
- [35] J.D. HUGHES, G.A. KING Y D.J. O'BRIEN, *Proc. 13th ICC*, Melbourne, Australia, 1996.
- [36] *Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica, Parte I-Mapas de Iberoamérica de Corrosividad Atmosférica* (Proyecto MICAT, XV.1/CYTED), Eds. M. Morcillo, B. Rosales, J. Uruchurtu y M. Marrocos, CYTED, Madrid, España, 1999, p. 492.
- [37] S. FELIU, M. MORCILLO Y S. FELIU JR., *Corros. Sci.* (1993) 415-422.
- [38] M. MORCILLO, J. SIMANCAS Y S. FELIU, *Atmospheric corrosion*, ASTM STP 1239, Eds. W.W. Kirk y H.H. Lawson Eds., ASTM, Philadelphia, EE. UU., 1995, 195-212.
- [39] S. BELLO, M. BIDEGAIN Y H. LOBATO, *Características Climatológicas de la Bahía Collins (Isla Rey Jorge)*, Dirección Nacional de Meteorología, Uruguay, 1995.