

02-022

## CHARACTERIZATION OF THE ENVIRONMENT FOR THE PROJECT OF STRUCTURES

Ortega Fernandez, Francisco; Alonso, Guillermo; Vigil Berrocal, Miguel Angel; Andrés Vizán, Sara

Universidad de Oviedo

Structures are designed to withstand the loads to which they are subjected but also, especially in the case of metal structures, to withstand the losses that occur in their bearing capacity as a result of the surrounding environment. It is necessary to achieve a balance between the durability of the structure and its cost, so that they use the least possible resources compatible with an adequate useful life.

There are several standards that set the levels of aggressiveness of the environment and provide an idea of the need for extra thickness depending on it. Unfortunately these classifications are based on values that are hardly available. When a structure is put out to tender, there are generally no measurements of accumulated sulphates or chlorides and averages characteristic of the site. This problem leads to non-optimal structures for risk avoidance, with the consequent increase in costs and material consumption.

In this work, an approximation is presented in which, on the basis of generally available data, it is possible to characterise the environment in any work without the need for long sampling periods, with the consequent economic and, especially, environmental savings.

**Keywords:** *Corrosion; Structural design; metallic structures*

## CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE PARA EL PROYECTO DE ESTRUCTURAS

Las estructuras se diseñan para resistir las cargas a las que se ven sometidas pero además, especialmente en el caso de estructuras metálicas, para soportar las pérdidas que se producen en su capacidad portante como consecuencia del ambiente que las rodea. Es necesario conseguir un equilibrio entre la durabilidad de la estructura y su coste, de modo que e usen los menores recursos posible compatibles con una vida útil adecuada.

Existen diversas normas que fijan los niveles de agresividad del entorno y que proporcionan una idea de las necesidades de sobreespesor necesarios en función de este. Desafortunadamente estas clasificaciones están basadas en valores que difícilmente están disponibles. Cuando se licita una estructura no se dispone en general de medidas de sulfatos o cloruros acumuladas y medias características del lugar. Este problema lleva a estructuras no óptimas para evitación de riesgos, con el consiguiente incremento de los costes y el consumo de materiales.

En este trabajo se presenta una aproximación en la que, a partir de datos disponibles de forma generalizada, se logra caracterizar el entorno en cualquier obra sin la necesidad de grandes periodos de muestreo con el consiguiente ahorro económico y, especialmente ambiental.

**Palabras clave:** *Corrosión; Diseño estructural; estructuras metálicas*

Correspondencia: fran@api.uniovi.es

Acknowledgements/Agradecimientos: Este trabajo se enmarca dentro del grupo de investigación patrocinado por el Gobierno del Principado de Asturias a través del proyecto IDI/2018/000225.



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

La corrosión se puede definir como el fenómeno de degradación de material o sus propiedades debido a la reacción con el ambiente que le rodea. Es la destrucción gradual de materiales, normalmente más acentuada y referida en metales, por reacciones químicas y/o electroquímicas debidas a su ambiente de exposición (Alter & Mestres, 2003).

El impacto económico de la corrosión en estructuras metálicas es un problema de gran relevancia a lo largo de todo el mundo. La Asociación Mundial de la Corrosión (WCO con sus siglas en inglés), cifra una estimación de costes directos debidos a la corrosión entre 1,3 y 1,4 billones, que es equivalente al 3,8% del PIB a nivel mundial (Chico et al., 2017). Más de la mitad de los daños debidos a corrosión son resultado de la contaminación atmosférica, punto lógico considerando que la mayoría de equipamientos y estructuras metálicas operan en ambientes aéreos exteriores. Por esta razón, la actuación de estos contaminantes atmosféricos y otras consideraciones cómo humedad, precipitación o temperatura, sobre los metales es uno de los problemas en la ciencia de la corrosión (Simillion et al., 2014).

Además, a añadir a lo anteriormente planteado, está la falta de una metodología clara y efectiva para tratar la corrosión en las fases de diseño de los proyectos (I. Cole & I.S. Cole, 2017). Esta falta de herramientas da lugar a una incertidumbre a la hora de caracterizar la corrosividad de las atmósferas en las que la nueva estructura va a ubicarse.

Con la finalidad de evitar los riesgos que esta incertidumbre genera (Bastidas-Arteaga & Stewart, 2015), tales como impactos ambientales, humanos o socioeconómicos, normalmente, se utilizan predicciones y caracterizaciones conservativas con la consecuente ineficiencia de uso de materiales.

Este uso ineficaz de materiales resulta en sobrecostes en los proyectos, pero, además, va en contra de los principios de la ingeniería de construcción sostenible, cómo la utilización de menor cantidad de materias primas, o la menor necesidad de mantenimiento durante la vida útil de la estructura, ligado a un menor consumo energético, de repuestos, y no menos importante, tiempo y dinero de los gestores de las infraestructuras.

En suma, la corrosión sufrida por las estructuras metálicas a lo largo de su vida útil es un factor clave para los diseñadores (Landolfo, Cascini & Portioli, 2010), que, aparte de los puntos mencionados anteriormente, debido también al presupuesto de la estructura, que afectará directamente a la capacidad competitiva del proyecto en una subasta, así como también tiene relación con la seguridad de cumplir las garantías que los procesos de licitación imponen.

Por todo ello, resulta claro que para progresar en la mejora de eficiencia de uso de materias primas es necesario desarrollar herramientas avanzadas que provean información lo más completa y fiable posible, así, los usuarios podrán realizar un correcto diseño de la estructura para toda su vida útil

El objetivo de este artículo es el desarrollo de un modelo predictivo de la corrosividad atmosférica para estructuras metálicas, centrado en zinc y aluminio, ya que son los metales más usados comúnmente en recubrimiento de estructuras.

## 2. Problemática y objetivos

La necesidad de esta investigación, tal y como se introduce anteriormente, nace en el proceso de diseño de nuevas estructuras metálicas, ya que, los procedimientos actuales basados en la normativa internacional no son lo suficientemente eficientes para los nuevos retos que la sociedad moderna, sostenible y competitiva, requiere. Por ello, se ahondará en la normativa

vigente para reseñar la problemática actual y definir así el objetivo de este trabajo, dar respuesta a esta deficiencia con un modelo de categorización de corrosividad atmosférica.

## 2.1 Problemática relativa a la normativa vigente

La normativa vigente internacionalmente respecto a corrosión atmosférica es la *ISO 9223:2012 Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación*. Fue desarrollada en las décadas de 1980 y 1990, convirtiéndose en la primera normativa con clasificaciones cuantitativas, ya que las normativas anteriores sólo disponían de clasificaciones cualitativas.

**Tabla 1. Categorías de corrosión atmosférica de los principales metales basada en las velocidades de corrosión del primer año de exposición.**

Categoría de corrosión	Intervalos de corrosión de metales importantes				
	Unidades	$r_{\text{corr}}$			
		Acero al carbono	Zinc	Cobre	Aluminio
C1	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$r_{\text{corr}} \leq 10$	$r_{\text{corr}} \leq 0.7$	$r_{\text{corr}} \leq 0.9$	Despreciable
	µm/a	$r_{\text{corr}} \leq 1.3$	$r_{\text{corr}} \leq 0.1$	$r_{\text{corr}} \leq 0.1$	-
C2	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$10 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$0.7 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$0.9 < r_{\text{corr}} \leq 5$	$r_{\text{corr}} \leq 0.6$
	µm/a	$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$0.1 < r_{\text{corr}} \leq 0.7$	$0.1 < r_{\text{corr}} \leq 0.6$	-
C3	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$200 < r_{\text{corr}} \leq 400$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 15$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 12$	$0.6 < r_{\text{corr}} \leq 2$
	µm/a	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$0.7 < r_{\text{corr}} \leq 2.1$	$0.6 < r_{\text{corr}} \leq 1.3$	-
C4	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$400 < r_{\text{corr}} \leq 650$	$15 < r_{\text{corr}} \leq 30$	$12 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$2 < r_{\text{corr}} \leq 5$
	µm/a	$50 < r_{\text{corr}} \leq 80$	$2.1 < r_{\text{corr}} \leq 4.2$	$1.3 < r_{\text{corr}} \leq 2.8$	-
C5	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$650 < r_{\text{corr}} \leq 1500$	$30 < r_{\text{corr}} \leq 60$	$25 < r_{\text{corr}} \leq 50$	$5 < r_{\text{corr}} \leq 10$
	µm/a	$80 < r_{\text{corr}} \leq 200$	$4.2 < r_{\text{corr}} \leq 8.4$	$2.8 < r_{\text{corr}} \leq 5.6$	-
CX	g/(m <sup>2</sup> ·a)	$1500 < r_{\text{corr}} \leq 5500$	$60 < r_{\text{corr}} \leq 180$	$50 < r_{\text{corr}} \leq 90$	$r_{\text{corr}} > 10$
	µm/a	$200 < r_{\text{corr}} \leq 700$	$8.4 < r_{\text{corr}} \leq 25$	$5.6 < r_{\text{corr}} \leq 10$	-

Nota: Tabla obtenida de la normativa ISO 9223:2012.

La clasificación se basa en los resultados de ensayos a escala real y de laboratorio de los efectos de la corrosión atmosférica en diferentes ambientes realizados hasta esa fecha. Estos resultados fueron obtenidos principalmente bajo las condiciones de clima templado de Europa y Norteamérica. Sin embargo, la situación técnica-económica de globalización actual, que involucra zonas de toda tipología (desiertos, tropicales, subtropicales, tundras, polares, etc.) hace que la insuficiencia de la normativa sea evidente (Mikhailov, Tidblad & Kucera, 2004).

La normativa ofrece dos maneras de evaluar la categoría de corrosividad de una atmósfera, una basada en la velocidad de corrosión del primer año y otra basada en medidas ambientales de contaminación, temperatura y humedad relativa medias.

Los especímenes de muestra usados para determinar la velocidad de corrosión del primer año fueron placas rectangulares planas, de dimensiones 100x150 mm de espesores comprendidos entre 1 y 3 mm. Los metales estudiados fueron acero (acero no aleado, Cu 0,03% a 0,10% y P <0,07%), zinc (98,5% min.), cobre (99,5% min.) y aluminio (99,55% min.). Más detalles y especificaciones de las muestras se pueden obtener en la normativa ISO 9226:2012.

Dentro de la normativa, se especifican seis categorías de corrosividad atmosférica (Tabla 1), basadas en velocidades de corrosión de primer año tanto en g/m<sup>2</sup> a, como en µm/a, menos el

aluminio, en el que los fenómenos de picaduras localizadas hacen que las medidas de corrosión relativas a espesores no sean válidas, asique sólo se especifican corrosiones por pérdida de masa. Así, para unos valores de velocidad de corrosión conocidos, se puede obtener la categoría de la atmosfera de estudio si se ha testado dicha velocidad con muestras.

La otra forma de obtener la corrosividad de la atmósfera es obteniendo la velocidad de corrosión del primer año utilizando la formulación de la norma. Así, utilizando valores medios de deposición seca de sulfatos y de cloruros, así como valores de temperatura y humedad relativa medios anuales, se obtiene un valor con el que comparar de nuevo en Tabla 1 para obtener la categoría de corrosividad de la atmósfera estudiada. Sin embargo, estos valores obtenidos son mucho menos exactos que los que se pueden obtener mediante un ensayo real. Directamente en la norma se muestran los valores de calidad de la formulación, que es especialmente poco precisa para el caso del aluminio.

En conclusión, se encuentran principalmente dos problemas interrelacionados a la hora de categorizar una nueva corrosividad atmosférica utilizando la normativa vigente. En primer lugar, la dificultad de obtener estos contaminantes atmosféricos, ya que encontrar datos históricos de deposiciones de sulfatos o cloruros no es habitual, y si fuese necesario tener que elaborar una campaña de toma de datos, requeriría gran cantidad de recursos y tiempo. Así, no es posible realizar categorizaciones de corrosividad atmosférica de nuevas localizaciones sin esos datos. Además, el otro inconveniente es la incertidumbre de la categorización, ya que aún se disponga de los datos necesarios, el modelo de regresión lineal no establece un procedimiento para determinar la “calidad” del valor obtenido.

## 2.2 Objetivos del trabajo

Una vez expuesta la problemática que surge durante la fase de diseño de un proyecto de estructuras metálicas (relativo al uso de la normativa vigente), es evidente la necesidad de mejorar la metodología actual de categorización de corrosividad atmosférica y la consecuente elección de protección superficial.

El objetivo principal de esta investigación es el desarrollo de un nuevo procedimiento que mejore el uso de la normativa vigente, principalmente en tres puntos:

- **Precisión:** Las categorías en las que se expresa corrosividad atmosférica según la normativa engloban unos rangos demasiado amplios, que dan lugar a un uso ineficiente de material. El nuevo procedimiento ha de buscar ser capaz de recortar estos rangos.
- **Calidad:** Un factor clave en cualquier modelización es la veracidad del valor obtenido. El nuevo procedimiento ha de ser capaz de otorgar una calidad (por ejemplo, en porcentaje) de la categorización de corrosividad atmosférica de cada caso. Usando la normativa actual, sólo se conoce una calidad global que puede no ser representativa para determinados casos.
- **Parametrización:** El nuevo procedimiento ha de ser capaz de dar un resultado siempre, para ello, se requerirá definir unas variables que sean fácilmente definibles para cada caso y evitar utilizar parámetros que conlleven gran gasto de recursos como las que usan los estándares internacionales.

En busca de lograr desarrollar un procedimiento que cumpla dichos objetivos, se estima cómo la mejor opción y objetivos del trabajo, la creación de una base de datos global de casos de exposición a corrosión atmosférica, con la que, gracias a técnicas de minería de datos, se desarrollará un modelo de caracterización de corrosividad. Este modelo podrá ser implementado en una herramienta de fácil uso, como una hoja de cálculo, por ejemplo, y así disponer de un nuevo procedimiento que mejorará la toma de decisiones relativas a la

corrosividad atmosférica durante la fase de diseño en proyectos de estructuras metálicas (zinc y aluminio).

### 3. Metodología

El trabajo de investigación ha tenido claramente dos fases diferenciadas a la hora de llevarse a cabo. En primer lugar, se ha elaborado una base de datos fusionando los datos generados por proyectos internacionales de cooperación, estudios independientes y las nuevas variables que se han estimado oportunas.

Una vez creada la base de datos, se realizó un modelo de clustering de distancias euclídeas cómo modelo de predicción de corrosividad atmosférica, apoyado en la base de datos anteriormente elaborada.

#### 3.1 Elaboración de la base de datos

Las principales fuentes de dónde se han obtenidos los datos para desarrollar el modelo, siguiendo la metodología CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining) (McCue, 2015), puede dividirse en dos grupos principalmente, el primero procedente de programas colaborativos internacionales, y el segundo procedente de metodologías propias.

Con el objetivo de desarrollar un nuevo modelo para la corrosión atmosférica, el primer paso, ha de ser obtener datos que muestren el comportamiento del fenómeno de corrosión. Tal y como se introdujo anteriormente, varios programas colaborativos internacionales han desarrollado a lo largo de los años experimentos de exposición de muestras y toma de datos de contaminantes atmosféricos, sin embargo, los más conocidos e importantes son los proyectos ISOCORRAG y MICAT:

- **ISOCORRAG:** Este proyecto fue diseñado por el Grupo de Trabajo/WG 4 de ISO 156 Technical Committee “Corrosion of metals and alloys”, con el objetivo de estandarizar los ensayos de corrosión atmosférica. Este programa comenzó en 1986 y ha sido la base que se ha tomado a la hora de redactar la normativa vigente a día de hoy sobre corrosión atmosférica (Knotkova, Dean & Kreislova, 2010). Estas normativas están basadas en un gran programa de colaboración internacional coordinado por el equipo ISOCORRAG a lo largo de Norte América, Europa y Asia. El objetivo de estas normativas fue desarrollar un proceso y unas líneas maestras para que los ingenieros pudiesen establecer aquellas medidas anti-corrosión tales como pasivación, recubrimientos, etc. basadas en la categorización de la corrosividad de la atmósfera de la ubicación de la pieza metálica obtenida con dicho procedimiento. Las muestras utilizadas en este programa fueron tanto paneles planos (descritos en el punto anterior) como muestras helicoidales. Comparando los resultados entre ambos especímenes, se puede observar un incremento de la corrosión relacionado con la orientación de la muestra, puesto que para aquellos casos en los que ambas tipologías compartieron la misma atmósfera (coincidentes en tiempo) y por tanto la contaminación atmosférica y meteorologías fueron idénticas, se ha recogido una mayor corrosión para los casos helicoidales que para los casos de paneles planos. La mayor parte de las muestras estudiadas han sido utilizadas para estudiar la velocidad de corrosión en el primer año de exposición, aunque también se han dispuesto muestras para estudiar el comportamiento a más años, hasta 8 años como máximo.
- **MICAT:** El proyecto MICAT (Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica) comenzó en 1988 como una parte del programa internacional CYTED (Ciencia y Tecnología para el Desarrollo) y terminó tras seis años de vida. Catorce países participaron en el proyecto, en el que las principales metas pueden enumerarse como: obtener un mayor conocimiento de la corrosión atmosférica en Iberoamérica, desarrollar modelos matemáticos capaces de predecir la corrosión atmosférica

basados en parámetros de contaminantes atmosféricos y construir mapas de corrosión de la región Iberoamericana (Morcillo, 1995). Este programa comenzó más tarde que el proyecto ISOCORRAG, y en la mayoría de sus partes (referido al muestreo y toma de datos) los procedimientos llevados a cabo son los mismos, así, los datos obtenidos por ambos proyectos pueden ser comparados o combinados. Sin embargo, la mayor diferencia entre ambos proyectos ha sido que en el caso de MICAT no se han dispuesto especímenes helicoidales, siendo todas las muestras paneles planas, orientados al norte geográfico e inclinados 45-30° sobre la horizontal (igual que en ISOCORRAG).

A parte de estos dos programas, también se han añadido a la base de datos los obtenidos por un proyecto de ámbito local en Arabia Saudí (Syed, 2011). La razón ha sido la de aumentar la tipología de localizaciones que son parte de la base de datos, así como la amplitud geográfica. Este muestreo comparte las características comunes de los especímenes utilizados en los programas internacionales, y se estudió el efecto de la corrosión en lugares cercanos a la costa, estando la mitad de ellos afectados por grandes industrias contaminantes y la otra mitad no.

Para cada proyecto, sólo se recogieron los datos de corrosión de los metales de estudio (zinc y aluminio). También se añadió a la base de datos los correspondientes a la contaminación atmosférica de cada muestreo, a saber, concentración de sulfuros en el aire, deposición seca de cloruros y el tiempo de humectación (TOW). El TOW corresponde a la fracción anual de horas en las que la temperatura registrada supera los 0°C y la humedad relativa del ambiente es también superior al 80%.

En cuanto a los datos recogidos sobre contaminación de sulfuros y deposición seca de cloruros, existían diferencias entre ambas bases de datos. Por ello, se estimó oportuno convertir los datos de ambos casos a un único parámetro, siendo la concentración en el aire de sulfuros y la salinidad, entendida como la deposición seca de cloruros, las variables finales elegidas.

Uno de los objetivos de esta investigación es desarrollar un modelo de categorización de corrosividad atmosférica sin la necesidad de utilizar datos de contaminación atmosférica específicos y difíciles de obtener (gran carga de recursos). Para ello, se requiere elaborar una retahíla de nuevas variables que reemplacen dichas concentraciones de contaminación.

Tras un estudio en profundidad del estado del arte en modelos de corrosión (I. Cole & I.S. Cole, 2017), se estiman necesarias seis variables nuevas para caracterizar el ambiente. Tres de ellas responden a la tipología de la localización, y las otras tres responden al clima de la localización.

El objetivo buscado con las primeras tres variables es recoger el comportamiento que la contaminación de concentración de sulfuros y de la deposición seca de cloruros tienen sobre la corrosión.

Para el caso de caracterizar el comportamiento de la deposición de cloruros, se crea la variable Marino. La caracterización de ambientes marinos ya ha sido estudiada enfocada a su vinculación con la corrosión de metales (Chico et al., 1998), llegando incluso, a ser incluida en otras normativas nacionales (Francis, 2012). Así, este parámetro estará ligado con la distancia a la costa de la localización de estudio, estimándose como ambiente Marino aquel a menos de quince kilómetros de la costa para este estudio.

El efecto de la concentración de sulfuros en el aire se caracterizará mediante las variables Urbano/Rural e Industrial. Para la primera variable, se definirá el carácter urbanístico de la localización, denotándose como urbano para aquellas áreas con más de 5000 habitantes o una densidad de población mayor a 300 habitantes por kilómetro cuadrado (Gisbert & Martí, 2015).

Para la caracterización industrial de la localización, se han tenido en cuenta dos puntos principalmente. En primer lugar, aquellas localizaciones con industrias que generan grandes cantidades de sulfuros, principalmente causado por la quema de combustibles fósiles, tales como refinerías, siderurgias, centrales térmicas, etc., se estimarán como zonas industriales. Además, grandes concentraciones y conurbaciones urbanas, como por ejemplo capitales nacionales, en las que hay una gran superficie dedicada a fines industriales son también categorizadas como industriales.

En cuanto a las variables derivadas del clima de la localización se han dispuesto tres nuevas variables, temperatura media anual, humedad relativa anual y tipología climática de la precipitación (Kottek et al., 2006). Los valores de temperatura y humedad relativa (RH) media anual se obtienen de servicios web que utilizan estaciones meteorológicas repartidas por todo el mundo. Para el caso de las muestras de corrosión de la base de datos conjunta de los proyectos anteriormente citados, se recogió la información del año 2018.

Una vez obtenida la temperatura media y humedad relativa con periodicidad horaria de todas las localizaciones de muestreo de los proyectos, también ha sido posible elaborar por su definición el TOW correspondiente a estas medidas de temperatura y humedad, que sustituirá al recogido por los programas de muestreo.

Estas nuevas siete variables han sido determinadas para cada localización de muestreo de velocidad de corrosión, siguiendo las reglas mencionadas con anterioridad. Así, este procedimiento asegura que nuevas localizaciones puedan ser caracterizadas fácilmente sin necesidad de caras y largas campañas de medida, y se pueda comparar con la base de datos elaborada en este proyecto.

### **3.2 Modelización**

Se han estudiado muchas tipologías de modelos a la hora de escoger el que mejor se ajuste a las características de los datos del proyecto, sin embargo, se ha dispuesto que la mejor tipología es un modelo de clustering de distancias, que sea capaz de con los inputs de búsqueda, obtener el caso más parecido perteneciente a la base de datos, siendo la categoría de corrosividad de este caso más parecido la predicción del caso introducido al modelo. Además, el modelo será capaz de otorgar una calidad de la predicción en forma de porcentaje de parecido entre el caso introducido y el caso más parecido de la base de datos, basado en la distancia euclídea entre ambos casos.

El funcionamiento del modelo se basa en las distancias euclídeas. Es una función no negativa utilizada en diversos contextos para calcular la distancia entre dos puntos, primero en el plano y luego en el espacio (Bronstein & Semendiaev, 1993). También sirve para definir la distancia entre dos puntos en otros tipos de espacios de tres o más dimensiones, y para encontrar la longitud de un segmento definido por dos puntos de una línea, el plano o espacios de mayor dimensión. Funciona sobre la base de la aplicación del Teorema de Pitágoras en los triángulos rectángulos, donde la distancia euclidiana suele ser la longitud de la hipotenusa del triángulo rectángulo formado por cada punto y los vectores proyectados en los ejes directores al nivel de la hipotenusa.

Para el correcto funcionamiento del modelo, se opta por normalizar los datos, tanto los de entrada como los pertenecientes a la base de datos, para posteriormente calcular las distancias entre ellos.

El primer objetivo es obtener la localización más parecida de la base de datos para las entradas introducidas. Como resultado se mostrarán cuatro opciones, con el fin de que el usuario pueda decidir cuál le conviene más, ordenadas por su mayor similitud con los datos de entrada expresada como porcentaje de calidad. En cambio, si el porcentaje de calidad es

pobre, el modelo está indicando que, para los datos introducidos, no hay casos similares en la base de datos y las predicciones pueden ser menos fiables.

Este porcentaje de calidad, es calculado, aparte de por la similitud de los datos de entrada con uno de los casos la base de datos, por el número de dimensiones introducidas. La razón de realizar esta comparación se basa en que hay diversos casos de la base de datos que no están completos, es decir, no todas las variables tienen dato, por lo que se considera importante que se tenga en cuenta.

Como objetivo final, y más interesante para el usuario, el modelo muestra la categoría de corrosión de ambiente de cada localización sugerida. Esta categoría es calculada como una media de todos los valores categóricos que toma la misma ciudad en la base de datos. Por ejemplo, si hay cuatro casos de Londres con categorías C1, C3, C3 y C4 respectivamente, el modelo mostrará una categoría de C3 para datos de entrada parecidos a los de Londres.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Base de datos

Una vez realizada la metodología de trabajo mencionada en el punto anterior, se ha elaborado una base de datos con todos los datos congregados. En primer lugar, en la Tabla 2, se pueden observar las estadísticas básicas de los parámetros registrados en la base de datos a partir de estudios independientes y los programas colaborativos internacionales.

**Tabla 2. Estadísticas de las variables recogidas de los programas de cooperación internacional ISOCORRAG y MICAT.**

Variable	Unidades originales	Unidades del S.I.	Mínimo	Medio	Máximo	Vacíos
Sedimentación de SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>2</sup> día	kg/m <sup>2</sup> día	0.3	4.236	72.2	1034
Concentración de SO <sub>2</sub>	µg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	0.375	20.763	214.6	215
TOW de bases de datos	h/año	h/año	26	3657	8760	112
Sedimentación de NaCl	mg/m <sup>2</sup> día	kg/m <sup>2</sup> día	0.3	39.99	1093	850
Sedimentación de Cl <sup>-</sup>	mg/m <sup>2</sup> día	kg/m <sup>2</sup> día	0.4	8.962	367	888
Salinidad	mg/m <sup>2</sup> día	kg/m <sup>2</sup> día	0.2	34.01	740	269
Corrosión de Zn	µm	m/s	0.09	3.087	226.4	295
Categoría de Zn	C1 - CX	-	-	-	-	295
Corrosión de Al	g/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	0.01	1.959	65.88	300
Categoría de Al	C1 - CX	-	-	-	-	300
Años	-	-	1	2.142	8	0
Especímenes	Plano o Helicoidal	-	-	-	-	0
Latitud	°	°	-62.23	-	69.45	0
Longitud	°	°	-122.99	-	174.91	0

Tal y como se puede observar, se han recogido variables tanto numéricas como categóricas. En cuanto al número de casos sin valor (vacíos) para cada parámetro, se puede observar la diferencia entre Sedimentación y Concentración de SO<sub>2</sub> (se utilizará para el modelo la Concentración, ya que se han convertido todos los valores a dicha magnitud) y entre Sedimentación de NaCl, Cl<sup>-</sup> y Salinidad (se utilizará Salinidad para el modelo, aunando magnitudes).

A pesar de todos estos procedimientos, el número de casos con variables sin dato aún considerable, además, no existe un patrón de correlación entre las ausencias de datos, ya que suelen estar alternadas dichas ausencias. Debido a ello, se ha considerado necesario la normalización de todas las variables y la posibilidad de modelar a diferentes dimensiones para no eliminar aquellos casos con algún dato vacío, pues la muestra no es muy extensa (1459 casos).

Además, por cada lugar de muestreo se han ejecutado varias muestras de exposición, pues si bien los datos recogidos variarán, deberían ser variaciones mínimas correlacionadas con las variaciones en la corrosión observada. Sin embargo, existen cantidad de casos de alta variabilidad en la corrosión registrada para una misma localización, sin cambios significativos en los parámetros de exposición. Esto puede deberse a los procedimientos de estimación de la corrosión (efectos localizados como picaduras, por ejemplo) o fallos en la toma de datos entre otras causas. Este punto ha sido clave a la hora de elegir el tipo de modelo de predicción a utilizar.

Sin embargo, sí que se pueden establecer en algunas localizaciones patrones comunes como la reducción en contaminación de SO<sub>2</sub> a lo largo de los años para las mismas ubicaciones, probablemente causado por políticas anticontaminación.

No obstante, la extensión geográfica de la base de datos si se muestra suficiente tras haber unido al proyecto ISOCORRAG otros trabajos.

En cuanto a las variables introducidas en la base de datos originadas en este trabajo, de nuevo se diferencian en categóricas y numéricas tal y como se observa en Tabla 3 y Tabla 4.

**Tabla 3. Estadísticas de las nuevas variables numéricas.**

Variable	Unidades originales	Unidades del S.I.	Mínimo	Medio	Máximo	Vacíos
Temperatura media anual	° C	K	-15.5	14.47	29.1	0
Humedad media anual	%	%	33	74.69	98	0
TOW	h/año	h/año	37	2723	6350	292

**Tabla 4. Nuevas variables categóricas introducidas.**

Variable	Rango	Leyenda
Rural/Urbano	0 – 1	0 para Urbano y 1 para Rural
Industrial	0 – 1	0 para No Industrial y 1 para Industrial
Marino	0 – 1	0 Para No Marino y 1 para Marino
Precipitación	0 – 5	Basado en el clima
Número de exposición	0 - 1459	Número de seguimiento para cada caso expuesto

Estudiando las variables denominadas como numéricas (Tabla 3) se observa que el rango de muestreo de la base de datos es amplio, así como la ausencia de casos sin datos para Temperatura Media Anual y Humedad Relativa Media Anual.

Sin embargo, para el TOW, existen casos en los que los datos de Temperatura y Humedad no eran lo suficientemente representativos temporalmente, pues no estaban correctamente distribuidos a lo largo del año, pudiéndose entonces obtener un TOW erróneo. Por ello, en dichos casos se estimó dejar vacío ese campo. Además, se constata que en valores extremos del TOW quizás esté subestimado, pues en la base de datos se recogen casos tropicales que prácticamente deberían corresponder a un TOW cercano al año completo (8760 horas).

En cuanto a las variables categóricas mostradas en la Tabla 4, los casos más comunes corresponden a casos Urbanos (912), mientras que el número de casos Industriales y Marinos son más o menos parejos a sus contrarios (608 y 856 de 1459 respectivamente). La variable Precipitación recoge la naturaleza del clima de la localización de exposición, siendo los climas templados y/o continentales lo más comunes (1044 de 1459).

#### 4.2 Modelo clustering de distancias euclídeas

El modelo de predicción utilizado finalmente ha sido un modelo de clustering de distancias, ya que los demás modelos considerados (como regresivos, por ejemplo), no resultaban satisfactorios. Por ello, finalmente se predecirá la corrosividad atmosférica basándose en la comparación de similitud con los casos recogidos en la base de datos. Un ejemplo de aplicación para la predicción de corrosividad atmosférica en Dortmund (Alemania), se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5. Ejemplo de aplicación del modelo para corrosión de Zinc**

Variable	Ejemplo	Resultado 1	Resultado 2	Resultado 3
Lugar	Dortmund	Bergisch-Gladbach	Saint Denis	Stratford, East London
Calidad	-	98,10%	98,00%	86,60%
Dimensión	-	7	7	7
Rural/Urbano	Urbano	Urbano	Urbano	Urbano
Industrial	Sí	Sí	Sí	Sí
Marino	No	No	No	No
Precipitación (K-G)	2	2	2	2
Temperatura Media Anual (°C)	11,98	11,8	12,3	12,5
Humedad Relativa Anual (%)	72,1	73	73	74
Concentración SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NA	15,1	40	19
Tiempo de Humectación TOW (h/año)	3218	3149	3146	4021,3
Salinidad (Cl <sup>-</sup> mg/m <sup>2</sup> día)	NA	1,1	18,8	7,8
Velocidad de Corrosión (µm/año)	-	1,60	1,48	1,67

Variable	Ejemplo	Resultado 1	Resultado 2	Resultado 3
Categoría de Corrosión	-	C3	C3	C3

Se observa en los resultados obtenidos que la fiabilidad de la predicción es alta, ya que se han encontrado casos muy similares al de estudio dentro de la base de datos (valor que refleja la calidad en forma de porcentaje). Además, se puede también comprobar cómo todos los valores de las diferentes variables son muy similares, así como la corrosión estimada para el primer año y coinciden todas las categorías de corrosión.

Intencionadamente en el ejemplo expuesto se han dispuesto dos variables de entrada cómo no disponibles (*Not Available*). Estas entradas pues, no se han tenido en cuenta a la hora de realizar el modelo, tal y cómo muestra el número de dimensión utilizado (7, la suma del resto de variables de entrada). Sin embargo, si aquellos casos más parecidos al de estudio sí contienen datos de dichas variables, se muestran, otorgando más información al usuario a la hora de mejorar su toma de decisiones.

Finalmente, cabe mencionar que el modelo también puede dar como resultado ningún caso parecido, con lo que así, el usuario ha de percatarse que dentro de la base de datos no existe ningún caso similar al planteado, con la derivada toma de decisiones necesaria. Para evitar estos problemas, es posible en un futuro seguir incrementando la base de datos con nuevos estudios o experiencias, eso sí, manteniendo los mismos criterios que los utilizados en la base actual, sobre todo, en cuanto a la metodología de la medición de la corrosión de las probetas, así como la forma, orientación y materiales de dichas probetas.

## 5. Conclusiones

La corrosión atmosférica es una problemática para los proyectistas a la hora de diseñar estructuras metálicas, ya que la corrosión da lugar a sobrecostes en recubrimientos, protecciones y mantenimiento de las estructuras para cumplir las garantías que los proyectos exigen hoy en día.

La fuente de datos más importante para determinar la corrosividad atmosférica de una localización son los programas internacionales de ISOCORRAG y MICAT, que han sido la base de las normativas actualmente vigentes.

Sin embargo, la utilización de la norma conlleva ciertas limitaciones como la incertidumbre de la predicción obtenida, la necesidad de datos de contaminación atmosférica difícilmente accesibles y el poco rango geográfico de los datos del proyecto ISOCORRAG.

Las principales conclusiones obtenidas de este artículo son las siguientes:

- El uso de técnicas de minería de datos de clustering, como las distancias euclídeas, pueden mejorar la elaboración de modelos de corrosividad atmosférica a la hora de predecir esta corrosividad en nuevos emplazamientos.
- Es posible adaptar variables de contaminación atmosférica de campañas con gran consumo de recursos tales como concentración de SO<sub>2</sub> o deposición seca de Cl<sup>-</sup> por variables basadas en la naturaleza del emplazamiento, como su carácter rural o urbano, industrial y su cercanía a la costa.
- Ha sido posible desarrollar un modelo usando estas técnicas y variables para predecir la corrosividad atmosférica de una localización, otorgando, además, una calidad a dicha predicción basada en la similitud de las variables de entrada del caso de estudio con las variables de los casos de la base de datos.
- El modelo desarrollado ha podido ser implementado en una herramienta de fácil uso y manejo, con la finalidad de facilitar su uso como una herramienta de toma de decisiones en la fase de diseño de estructuras metálicas.

- Es difícil estimar los beneficios económicos asociados a la implantación de esta herramienta, pero se puede concluir que esta herramienta da lugar a tomar decisiones más objetivas basadas en una metodología definida.

## 6. Referencias

- Alter, L. B. & Mestres, F. L., (2003). Corrosión y protección. Edición UPC.
- Bastidas-Arteaga, E., Stewart, M.G. (2015). Damage risks and economic assessment of climate adaptation strategies for design of new concrete structures subject to chloride-induced corrosion, *Structural Safety*, 52, 40-53.
- Bronstein, I. & Semendiaev, K. (1993). *Manual de matemáticas para ingenieros y estudiantes*. Moscú; Madrid: Mir ; Rubiños.
- Chico, B., Fuente de la, D., Díaz, I., Simancas, J. & Morcillo, M. (2017). Annual atmospheric corrosion of carbon steel worldwide. An integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT Databases, *Materials*, 10, 601.
- Chico, B., Otero, E., Mariaca, L. & Morcillo, M. (1998). La corrosión en atmósferas marinas. Efecto de la distancia a la costa, *Revista de Metalurgia*, 34, 71-74.
- Cole, I. & Cole, I.S., (2017). Recent progress and required developments in atmospheric corrosion of galvanised steel and zinc, *Materials*, 10 (11), 1288.
- Francis, R., (2012). AS 4312: An Australian atmospheric corrosivity standard, *Steel Construction*.
- Gisbert, F. J. G. & Martí, I. C. (2015). Estimaciones de la población rural y urbana a nivel municipal, *Estadística española*, 57, 5-28.
- ISO 9223:2012. Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación.
- ISO 9226:2012. Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Determinación de la velocidad de corrosión de las probetas de referencia para la evaluación de la corrosividad.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F. (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated, *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 259-263.
- Knotkova, D., Dean, S. W. & Kreislova, K., (2010). ISOCORRAG International atmospheric exposure program: Summary of results, *ASTM International*.
- Landolfo, R., Cascini, L. & Portioli, F. (2010). Modelling of metal structure corrosion damage: A state of the art report, *Sustainability*, 2 (7), 2163-2175.
- McCue, C. (2015). Process models for data mining and predictive analysis. En *Data mining and predictive analysis*, (pp. 51-74). Boston: Butterworth-Heinemann.
- Mikhailov, A. A., Tidblad, J., & Kucera, V., (2004). The classification system of ISO 9223 Standard and the dose-response functions assessing the corrosivity of outdoor atmospheres. *Protection of Metals*, 40 (6), 541-550.
- Morcillo, M., (1995). Atmospheric Corrosion in Ibero-America: The MICAT Project, *Atmospheric Corrosion*.
- Similion, H., Dolgikh, O., Terry, H., Deconinck, J. (2014). Atmospheric corrosion modelling. *Corrosion Reviews*, 32 (3), 73-100.
- Syed, S. (2011). Studies of galvanised steel atmospheric corrosion in Saudi Arabia. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 46 (3), 302-307.