

(04-021) - Modelling chloride dispersion in the atmosphere through the study of climatic variables.

Terrados Cristos, Marta ¹; Fernández Iglesias, Ana ¹; Vergara González, Eliseo ¹

¹ Universidad de Oviedo

Atmospheric corrosion, especially in coastal environments, is a significant issue impacting various metallic structures. Approximately 40% of the world's population resides within 100 km of the coast, and industries are often situated in these areas. The challenge of accurately determining the chlorine concentration in the region is typically addressed by assuming a predetermined value if the structure is located within 10 km. However, various studies indicate this approach is flawed, as seasonal winds exert considerable influence on chlorine dispersion. This study aims to develop a model using historical climatological data from the study area to estimate annualized chloride concentrations. Since prior tests did not account for the sea-oriented wind direction, non-destructive comparative experimental trials were conducted at diverse locations, employing various sampling techniques and study periods. Chlorine deposition values obtained are analyzed and compared with satellite meteorological data characterization at each site. Experimental results, with sufficient statistical significance ($p < 0.05$), demonstrate the potential to identify corrosion-susceptible areas using satellite-based remote sensing information considering wind orientation, wind conditions, and wind origin. This can enhance the precision of designing and remotely monitoring structures, ensuring stability.

Keywords: Corrosion; Resilient metallic structures; Atmospheric pollutants; Marine aerosols.

Modelización de la dispersión del cloro en la atmósfera mediante el estudio de variables climáticas.

La corrosión atmosférica, especialmente en entornos costeros, afecta significativamente a estructuras metálicas, y dado que aproximadamente el 40% de la población mundial reside a menos de 100 km de la costa, las industrias suelen ubicarse en estas zonas. La dificultad para determinar con precisión la cantidad de cloro en la zona se soluciona al considerar un valor predeterminado si la estructura está a menos de 10 km. Sin embargo, estudios demuestran que este enfoque es incorrecto debido a la influencia significativa de los vientos estacionales en la propagación del cloro. Este estudio tiene como objetivo desarrollar un modelo que, utilizando datos climatológicos históricos, estime la concentración anualizada de cloruros. Se llevaron a cabo pruebas experimentales comparativas no destructivas, considerando la orientación hacia el mar del viento, diferentes ubicaciones, técnicas de muestreo y períodos de estudio. Se analizaron los valores de deposición de cloro y se compararon con datos meteorológicos satelitales en cada sitio. Los resultados, con significancia estadística ($p < 0.05$), indican que se pueden identificar áreas más susceptibles a la corrosión mediante información de satélites basada en la orientación, condiciones y origen del viento. Esto facilita un diseño y monitoreo remoto más preciso de estructuras, asegurando su estabilidad.

Palabras clave: Corrosión; Estructuras metálicas resilientes; Contaminantes atmosféricos; aerosoles marinos.

Correspondencia:



©2024 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

Las estructuras civiles pueden deteriorarse de varias maneras (Avci et al., 2021). El envejecimiento, las condiciones climáticas adversas, la degradación de componentes, los diseños deficientes y los desastres naturales son algunas de las principales causas que pueden llevar al daño, al fallo e incluso al colapso de una estructura civil (Seguel & Meruane, 2018). Aunque algunos de estos problemas pueden provocar un fallo rápido, los daños debidos a la corrosión o la fatiga tienden a producirse durante largos periodos de tiempo. No obstante, estos daños pueden evitarse si se toman medidas correctivas a tiempo (Wu & Jahanshahi, 2020). Por lo tanto, es de suma importancia monitorizar continuamente las estructuras civiles para evaluar sus condiciones estructurales y proporcionar una alerta temprana contra los daños estructurales (Mishra et al., 2022).

La degradación química es uno de los principales defectos estructurales de las estructuras metálicas (Tan et al., 2017), especialmente en entornos costeros (Abbas & Shafiee, 2020). El desafío añadido de que este problema pueda surgir en cualquier ubicación (Wasim & Djukic, 2022) complica la evaluación visual, que de por sí ya es una tarea costosa, poco precisa y que demanda mucho tiempo (Ziaja & Nazarko, 2021). Tradicionalmente, el diagnóstico de daños en estructuras civiles se fundamenta en gran medida en la inspección visual. No obstante, el tamaño y las condiciones de las estructuras están volviendo este proceso cada vez más desafiante. La globalización ha fomentado la concepción y ejecución de numerosos proyectos remotos, lo que complica la supervisión regular y resalta la necesidad de emplear datos de teledetección por satélite para abordar los problemas medioambientales a escala global. (Gong et al., 2022).

Debido a los recientes avances en los sistemas de detección y adquisición de datos, el uso de técnicas de monitorización de la salud estructural (Gordan et al., 2022) en aplicaciones de ingeniería se ha convertido en un desarrollo interesante. Existen múltiples ejemplos de diferentes aplicaciones, como la modelización de la resistencia y la respuesta estructurales (Lee & Lee, 2014; Salehi & Burgueño, 2018), los estudios basados en el control de vibraciones (Avci et al., 2021; Das et al., 2016; Shadan et al., 2016), el uso de técnicas de aprendizaje automático (Avci et al., 2018; Daneshvar et al., 2021; Entezami et al., 2020; Hassan Daneshvar & Sarmadi, 2022; Sarmadi et al., 2021), y nuevos enfoques, como las soluciones multisensoriales centradas en smartphones (Ozer & Feng, 2020).

Todos estos esfuerzos se centran en controlar, prever o prevenir la ocurrencia de daños, dado que la detección precoz de daños constituye una preocupación crucial para la comunidad científica civil (Rafiei & Adeli, 2017). Sin embargo, un enfoque más eficaz consiste en diseñar o rediseñar las estructuras en función de estos problemas potenciales.

La mayoría de los proyectos de ingeniería civil implican estructuras metálicas, generalmente de acero desnudo o revestido (Yan et al., 2020), que sufren corrosión atmosférica (Diler et al., 2021). La degradación de las estructuras en las zonas costeras es un problema especialmente importante por su trascendencia para la sociedad (Santosh Kumar et al., 2021). Aproximadamente el 40% de la población mundial vive a menos de 100 km de la costa (Brett, Nigel, 2019) y es precisamente en estas zonas donde suelen ubicarse las industrias. Numerosos estudios han corroborado que la velocidad de deposición del cloruro es un factor crítico que afecta a la corrosión atmosférica de los metales (Choi et al., 2020) y a la influencia de los ambientes contaminados por cloruros en la durabilidad (Russo et al., 2022).

Por consiguiente, investigar experimentalmente los mecanismos de deposición de contaminantes atmosféricos y establecer vínculos con datos obtenidos mediante satélites puede contribuir a prever y prevenir posibles daños estructurales. Al conocer previamente las áreas más vulnerables, podría ser innecesario destinar recursos a la vigilancia de grandes y

complejas estructuras civiles, limitando así el problema de la monitorización de la salud estructural a áreas específicas.

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es proponer un método innovador para el análisis preliminar de posibles daños estructurales. En este estudio de caso, se pretende relacionar la información de teledetección con los resultados de estudios experimentales no destructivos para caracterizar potenciales daños estructurales. Este enfoque proporciona información valiosa de manera simplificada, lo que facilita el diseño y la supervisión de estructuras de manera remota y con mayor precisión.

En este documento, tras presentar la problemática y definir los objetivos de la investigación, se procede a explicar la metodología utilizada en el estudio. Después, se analizan los resultados obtenidos, y finalmente se exponen las conclusiones y se delinean las posibles líneas de investigación futuras.

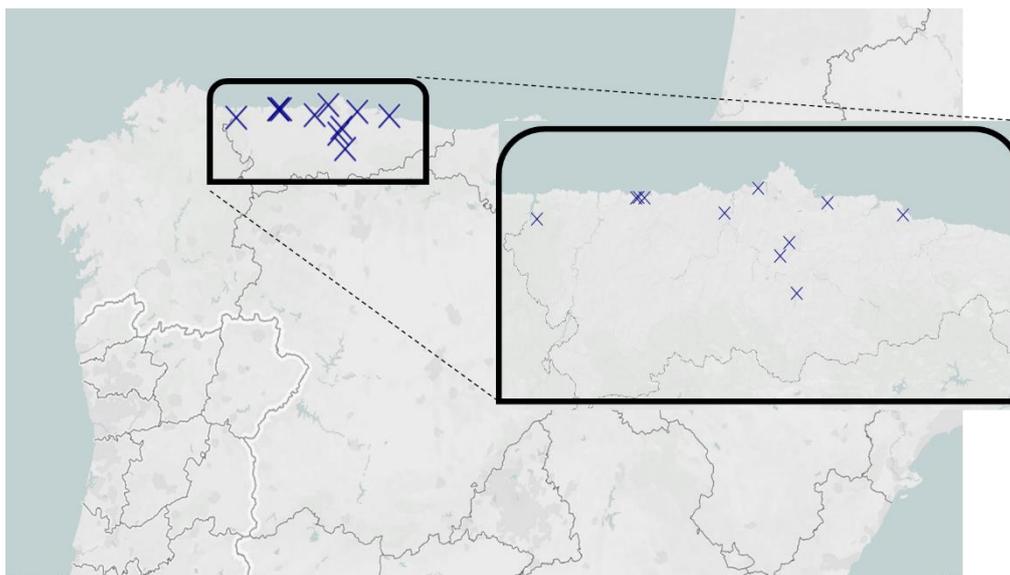
2. Materiales y métodos

El análisis bibliográfico resalta la importancia de los aerosoles marinos como agentes altamente agresivos, cuyo efecto aún no está completamente definido. Por lo tanto, un objetivo secundario es ampliar el conocimiento existente sobre la acción de estos contaminantes. Los modelos actuales de deposición de cloruros, que se basan en funciones que lo relacionan inversamente con la distancia al mar, tienen limitaciones significativas (de la Fuente et al., 2011) (Liu et al., 2019). La distancia al mar no refleja verdaderamente la capacidad de los cloruros para estar presentes en una zona determinada, ya que su prevalencia está condicionada por factores climáticos e incluso orográficos. Este estudio pretende abordar la brecha en la literatura sobre la modelización del cloro y su efecto en la corrosión, dada la dificultad para encontrar valores de este elemento en las ubicaciones de las estructuras.

El estudio sobre la degradación de estructuras en zonas costeras se enfocó en la investigación de la deposición de cloruro, vinculando datos experimentales con datos meteorológicos. Para esto, se llevaron a cabo una serie de ensayos distribuidos y localizados en la zona Norte de España, cuyos resultados se complementaron con registros históricos climáticos de cada punto durante el período de estudio y el año anterior.

Dado el carácter multifactorial del problema, que dificulta la extracción de conclusiones debido a las numerosas interacciones entre las variables, los datos de la bibliografía se complementaron con información específica obtenida mediante ensayos diseñados para determinar la influencia de las variables clave. Se colocaron seis muestras en once ubicaciones, cuatro de ellas a 90 grados y las restantes expuestas en todas las direcciones. Las ubicaciones se seleccionaron de manera que abarcaran diversas distancias al mar, debido a la importancia atribuida a esta variable en la bibliografía analizada. Además, en una de las ubicaciones, las muestras se colocaron en tres períodos temporales distintos para examinar el efecto del cambio en la dirección del viento predominante. La Figura 1 muestra la distribución de las muestras en los diferentes puntos de ensayo. Las ubicaciones de experimentación incluyeron muestras de una, dos o tres técnicas.

Figura 1: Localización de las muestras de los ensayos de deposición de cloro.



La disposición de las muestras en estas condiciones se debe al profundo interés de comprender la influencia tanto de la orientación del viento y su procedencia (marina o terrestre), como del efecto combinado y aislado de la lluvia y el viento en el proceso de deposición de cloruros. Este enfoque multifacético busca desentrañar las complejas interacciones entre los factores ambientales y la corrosión estructural.

Las muestras orientadas se someten a un análisis meticuloso utilizando el método de la Placa Seca, que permite simular las condiciones de exposición al viento en una dirección específica. Por otro lado, las muestras expuestas al ambiente se estudian mediante el método de la Vela Húmeda, el cual aborda de manera integral el impacto del viento y la lluvia desde múltiples direcciones. Este enfoque holístico pretende capturar la variabilidad en la deposición de cloruros en diferentes escenarios climáticos y topográficos.

El objetivo fundamental de esta investigación radica en identificar los umbrales de velocidad del viento que inciden en la deposición y transporte de cloruros en condiciones ambientales específicas. Además, se profundiza en el papel que desempeña la dirección del viento en relación con la ocurrencia de precipitaciones, con el fin de esclarecer cómo estos dos fenómenos interactúan para influir en la corrosión estructural.

Además de explorar los efectos combinados de la lluvia y el viento, este estudio introduce un innovador método denominado Vela Cubierta, diseñado específicamente para aislar y evaluar el impacto exclusivo de la lluvia en la deposición de contaminantes. La incorporación de una muestra de control en estas probetas permite comparar los resultados y obtener una comprensión más completa de la influencia de las precipitaciones en el proceso de corrosión.

Una vez finalizado el período de exposición de las muestras, se lleva a cabo una minuciosa extracción y procesamiento de las mismas, siguiendo rigurosamente las pautas establecidas por la norma ISO 9225:2012 (ISO/TC 156 Corrosion of metals and alloys, s. f.). Posteriormente, las muestras son sometidas a un análisis detallado mediante cromatografía iónica utilizando un equipo METROHM 883 Basic IC plus, con el objetivo de cuantificar y caracterizar los niveles de cloruros presentes en cada muestra y comprender así la relación entre la deposición de cloruros y la corrosión estructural.

2.1 Tratamiento de los datos

Como mencionado anteriormente, se emplearon tres técnicas para determinar la deposición de cloruros en las muestras expuestas durante los ensayos, siguiendo los procedimientos establecidos por la norma ISO 9225:2012.

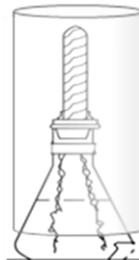
- Placa seca. Esta técnica se basa en exponer una superficie conocida de gasa de doble capa protegida de la lluvia y medir, mediante análisis químico, la cantidad de cloruros capturados procedentes de una dirección y depositados en la superficie de la gasa [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$]. La preparación de las muestras, la duración del ensayo, la gestión de la solución final y el cálculo de los resultados se definen en el anexo E de la norma ISO 9225:2012 (ISO/TC 156 Corrosion of metals and alloys, s. f.).
- Vela húmeda. La técnica consiste en una superficie textil húmeda envuelta en forma de cilindro y un depósito de agua para mantener la condición húmeda de la gasa. Este método permite recoger aerosoles procedentes de todas las direcciones. La cantidad de cloruro depositado se determina mediante análisis químico para, posteriormente, calcular la tasa de deposición de cloruro [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$].

Los dispositivos de muestreo y la solución utilizados, así como la recogida de las muestras y el cálculo final de la deposición, se describen en el anexo D de la norma ISO 9225:2012 (ISO/TC 156 Corrosion of metals and alloys, s. f.).

Sin embargo, estos métodos no permiten aislar el efecto de la lluvia de la influencia del viento, ya que la vela húmeda está expuesta a la lluvia y al viento en todas las direcciones. Esto es relevante en ubicaciones donde las estructuras están protegidas del viento, pero expuestas a la lluvia, como plazas rodeadas de rascacielos. Por lo tanto, se desarrolló un método específico, llamado vela cubierta, basado en el método de la vela húmeda.

El método de la vela cubierta consiste en una superficie textil húmeda similar a la de la vela húmeda envuelta en forma de cilindro sobre un depósito de agua para mantener su humedad (Figura 2). Estos elementos son cubiertos con una funda de material aislante que aisle los laterales de la acción del viento, manteniendo un cono suficiente de apertura en la parte superior para permitir el paso de la lluvia, pero sin que se produzca el impacto del viento, en cualquier dirección, sobre la gasa. Como en el caso anterior la cantidad de cloruro depositado se determina mediante análisis químico para, posteriormente, calcular la tasa de deposición de cloruro [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$].

Figura 2: Esquema propuesto para la recogida de muestras en el método de la vela cubierta.



Los datos obtenidos en las pruebas experimentales se analizaron estadísticamente mediante el programa SPSS 22.0. Se utilizó la prueba t de *Student* para muestras independientes para evaluar si existían diferencias estadísticas significativas entre las medias a un nivel de confianza de $p < 0,05$ para cada una de las variables cuya influencia se pretende estudiar.

3. Resultados

La precisión en la caracterización del efecto de los cloruros sobre la corrosión representa un elemento fundamental para mejorar la eficacia de cualquier modelización futura. Aunque hay fuentes de cloruros de origen antropogénico, la mayor parte de estos compuestos en la atmósfera provienen de la proximidad al mar. Por lo tanto, resulta crucial modelar la evolución de su concentración considerando factores como la distancia, orientación y velocidad del

viento, así como las condiciones meteorológicas, además de la simple distancia al mar. Esta aproximación permitiría mejorar la precisión de los modelos en entornos costeros.

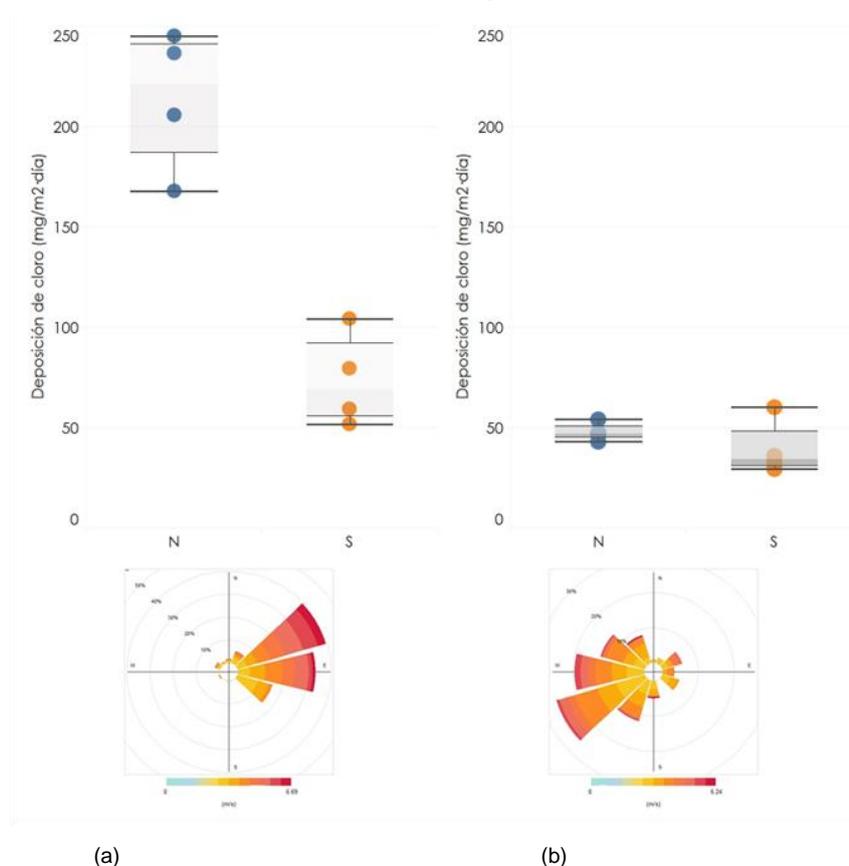
Para lograr esto, se llevaron a cabo estudios exhaustivos de la caracterización meteorológica, analizando las principales variables atmosféricas en los lugares de estudio durante el período de ensayos y en años anteriores. Estos análisis proporcionan una base sólida para comprender cómo los factores meteorológicos influyen en la deposición de cloruros y, por lo tanto, en el proceso de corrosión en estructuras cercanas a la costa. Igualmente, se realizan los ensayos experimentales propuestos, los cuales constituyen un paso crucial para comprender mejor la relación entre la presencia de cloruros y el deterioro estructural en estas ubicaciones. La Figura 3 ejemplifica algunas de las muestras utilizadas y procesadas para la toma de información sobre la deposición de cloro de acuerdo con la metodología propuesta.

Figura 3: Ejemplos de muestras tomadas y procesadas en las diferentes localizaciones.



En la Figura 4 se presentan los resultados de la prueba localizada, donde se investigó la deposición de cloruros en distintos periodos de tiempo. En la parte superior de la figura, se muestran los resultados de deposición de cloruros durante el primer (izquierda) y segundo intervalo de tiempo (derecha). Justo debajo, se incluye la rosa de los vientos correspondiente a cada periodo de estudio, que proporciona información sobre la dirección predominante del viento en cada momento. Los puntos azules representan las muestras orientadas al norte (frente al mar), mientras que los puntos naranjas representan las muestras orientadas al sur (opuestas al mar).

Figura 4: Resultados de la deposición de cloro sobre las probetas en función de su posición y periodo: (a) primer periodo, (b) segundo periodo. La parte inferior muestra la rosa de los vientos en cada periodo.



En el primer período, con un viento predominantemente del noreste, de origen marino, las muestras expuestas al viento en barlovento presentaron depósitos mayores en ambas alturas con una diferencia altamente significativa ($p < 0,00028$) respecto a las muestras orientadas hacia el sur. En contraste, durante el segundo período de estudio, los vientos predominantes provenían del suroeste y el resultado final fue muy diferente: no presenta diferencia significativa ($p > 0,16$) en la deposición de contaminantes marinos entre las muestras que recibieron más viento aunque de origen no marino y aquellas con poca exposición al viento pero cuyo viento provenía del mar.

La energía de transporte de contaminantes, calculada según la metodología propuesta por Meira et al. (Meira et al., 2017) resulta similar en ambos casos (diferencia poco significativa, $p > 0,1$), lo que permite afirmar que son equivalentes. Esto demuestra la relevancia del origen del viento (marino o no) sobre los resultados de deposición.

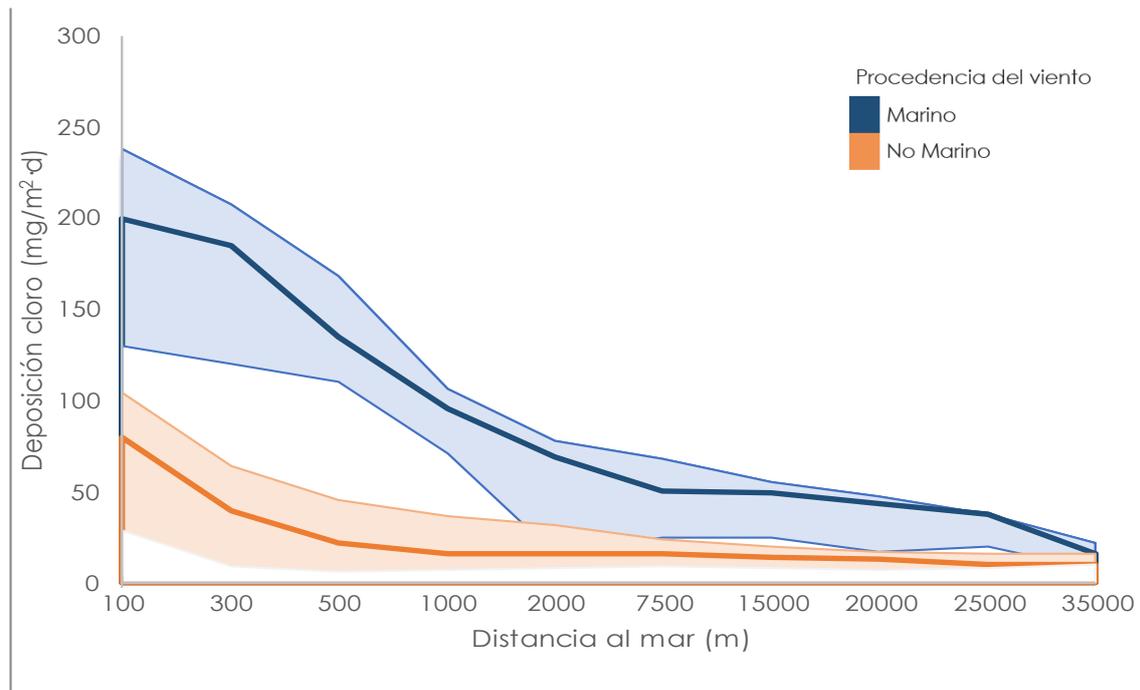
Igualmente, se detectó la existencia de una diferencia apreciable en otro parámetro menos estudiado: las precipitaciones. Durante el primer período de ensayos, la precipitación acumulada fue hasta cuatro veces menor que en el segundo período. Según indican otros estudios (Binyehmed et al., 2017) la presencia de precipitaciones abundantes tiende a disminuir el contenido de contaminantes presentes en la atmósfera. Sin embargo, al comparar los resultados de deposición, se observa que no hubo diferencia significativa en la deposición ($p < 0,03$). Por lo tanto, la relación entre la orientación y el origen del viento fue el factor más relevante.

Así, se confirman dos puntos:

- Además de la posición relativa entre la orientación del viento predominante y la estructura, el origen de estas ráfagas de viento (del mar o no) resulta crucial para el resultado de deposición de iones de cloruro.
- El papel del viento no solo es un mecanismo de transporte sino que interactúa con el entorno, limpiando las estructuras o reduciendo el contenido de cloruro en la atmósfera.

La Figura 5 muestra los datos considerando la procedencia del viento de cada conjunto de muestras y su distancia al mar.

Figura 5: Deposición de cloruro en función de la distancia al mar en metros (escala logarítmica).



La llamativa diferencia entre las deposiciones de cloruro en las localizaciones de menos de 100 metros del mar y el resto se corresponde con los distintos periodos de estudio. Esto concuerda con lo que Binyehmed et al. (Binyehmed et al., 2017) concluyeron después de analizar los resultados de sus estudios experimentales, corroborando una mayor tasa de deposición de cloruro en las estaciones secas en comparación con las estaciones húmedas. Analizando los valores máximos se observa que el contenido de cloruro disminuye a medida que aumenta la distancia. Sin embargo, se aprecian diferencias significativas entre las orientaciones para una misma distancia. Más específicamente, todas las muestras expuestas al viento marino (procedente del norte) tuvieron deposiciones más altas que las de otras direcciones ($p < 0,01$), aunque estas deposiciones disminuyen progresivamente en todos los casos a medida que se alejan de la costa. Ciertamente, a medida que aumenta la distancia al mar disminuye la sensibilidad de la orientación, probablemente por el mayor efecto de la difusión.

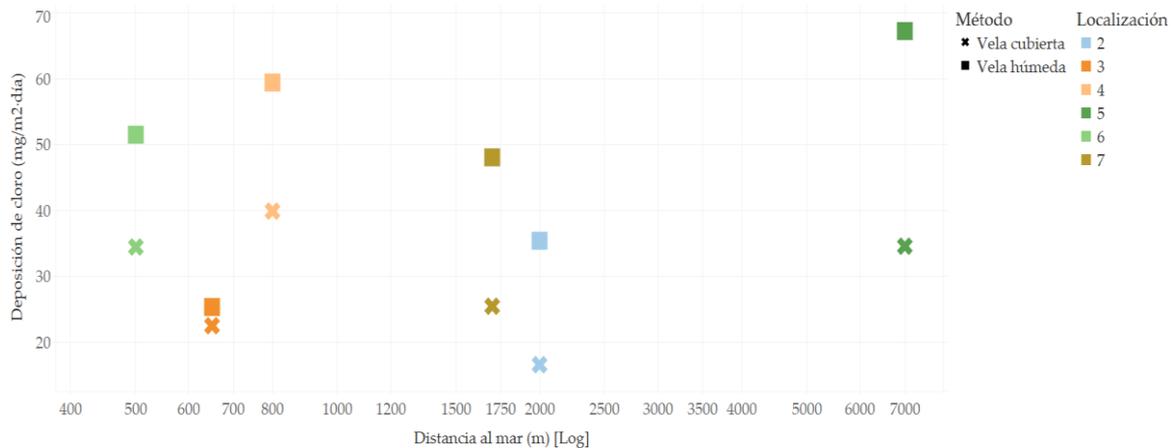
Por último, para poder comprobar el efecto de la lluvia se realiza un nuevo experimento en el que se analizan los valores de deposición mediante dos métodos distintos: el tradicional de la vela húmeda y el método alternativo diseñado para este trabajo de vela cubierta.

Se trata del mismo estudio y condiciones meteorológicas, excepto por el hecho de que el método de la vela húmeda está expuesto al viento y el método de la vela cubierta no lo está. Por tanto, la vela cubierta proporciona los niveles de deposición exentos del barrido del viento

de modo que, a partir de la diferencia entre los dos métodos, se detecta el efecto derivado de la precipitación.

Los resultados se presentan en la Figura 6 que muestra los valores de deposición en estas nuevas muestras en función de la distancia desde la costa. Cada ubicación está representada por un color; por lo tanto, las muestras del mismo color estuvieron sujetas a las mismas condiciones meteorológicas durante el período de estudio, pero con técnicas de muestreo distintas.

Figura 6: Representación de la deposición de cloruro y distancia a la costa.



Los valores obtenidos utilizando el método de la vela húmeda estándar son significativamente más altos que los de la vela cubierta ($p < 0,01$), validando la importancia del viento como principal mecanismo de transporte y deposición de contaminantes por encima de las precipitaciones.

Además, los resultados de la ubicación 5, con mayor deposición de cloro estando a mayor distancia del mar que el resto demuestran, de nuevo, que es arriesgado simplificar la relación entre la deposición de contaminantes marinos y la distancia al mar, porque la eficacia del transporte o la existencia de fuentes alternativas son también importantes.

4. Conclusiones

La comprensión de la corrosión en entornos costeros es fundamental para la preservación de estructuras expuestas a la intemperie. De los análisis de los ensayos experimentales realizados se derivan las siguientes conclusiones:

- Los ensayos que correlacionan la deposición de contaminantes de cloruro con la orientación relativa entre la estructura y la dirección y origen del viento demuestran, con significancia estadística suficiente ($p < 0,05$), la importancia esencial de examinar estos factores para comprender la corrosión en entornos costeros. Todas las muestras expuestas al viento marino presentan depósitos significativamente más altos que las expuestas a otras direcciones ($p < 0,01$), y estos depósitos disminuyen gradualmente a medida que se alejan de la costa.
- La velocidad del viento y su umbral mínimo para el transporte de partículas juegan un papel importante en la deposición de contaminantes. Se demuestra que un cambio mínimo en el umbral de velocidad del viento ($<1\text{m/s}$) tiene un impacto significativo en la determinación de la dirección predominante del viento y, por lo tanto, en la deposición.

- Este nuevo enfoque propuesto para medir la deposición de iones cloruros (llamado "vela cubierta") permite separar las contribuciones atribuibles al viento de las causadas por la lluvia, lo que contribuye a una comprensión más profunda del fenómeno.
- El método de muestreo demostró que, aunque la precipitación también influye en la deposición de cloruros por un proceso de lavado, el viento es el mecanismo principal de transporte y deposición de contaminantes.
- La distancia al mar no es el único factor determinante en la deposición de cloruro; la sensibilidad de la orientación disminuye a medida que aumenta la distancia. Esto sugiere que la difusión tiene un mayor efecto en ubicaciones más alejadas de la costa.

Los resultados de esta investigación destacan la importancia de considerar la orientación del viento, el origen marino o no marino de los vientos y su velocidad en la predicción de la corrosión atmosférica. Estos hallazgos son fundamentales para mejorar la gestión y protección de estructuras expuestas a condiciones atmosféricas variables en áreas costeras.

5. Referencias

- Abbas, M., & Shafiee, M. (2020). An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. *Marine Structures*, 71, 102718. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102718>
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077>
- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., & Inman, D. J. (2018). Wireless and real-time structural damage detection: A novel decentralized method for wireless sensor networks. *Journal of Sound and Vibration*, 424, 158-172. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.03.008>
- Binyehmed, F. M., Abdullah, A. M., Zawawi, R. M., Elawad, R. E., & Youssef, K. (2017). *Deposition rate of chloride DRC as a corrosive agent in several locations in the Klang Valley, Malaysia.* /paper/DEPOSITION-RATE-OF-CHLORIDE-DRC-AS-A-CORROSIVE-IN-Binyehmed-Abdullah/70e77c2a5af8dade765db8f12750a583f55ec71a
- Brett, Nigel. (2019). *Why we should care about vulnerable coastal communities.* <https://ani.seafdec.org.ph/handle/20.500.12174/5473>
- Choi, W., Lee, D., & Bahn, C. B. (2020). Quantitative Analysis Methods of Chloride Deposition on Silver for Atmospheric Corrosion Monitoring in South Korea. *Corrosion*, 77(1), 53-61. <https://doi.org/10.5006/3622>
- Daneshvar, M. H., Gharighoran, A., Zareei, S. A., & Karamodin, A. (2021). Early damage detection under massive data via innovative hybrid methods: Application to a large-scale cable-stayed bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(7), 902-920. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777572>
- Das, S., Saha, P., & Patro, S. K. (2016). Vibration-based damage detection techniques used for health monitoring of structures: A review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3), 477-507. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0168-5>

- de la Fuente, D., Díaz, I., Simancas, J., Chico, B., & Morcillo, M. (2011). Long-term atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, 53(2), 604-617. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.10.007>
- Diler, E., Peltier, F., Becker, J., & Thierry, D. (2021). Real-time corrosion monitoring of aluminium alloys under chloride-contaminated atmospheric conditions. *Materials and Corrosion*, 72(8), 1377-1387. <https://doi.org/10.1002/maco.202112302>
- Entezami, A., Shariatmadar, H., & Mariani, S. (2020). Early damage assessment in large-scale structures by innovative statistical pattern recognition methods based on time series modeling and novelty detection. *Advances in Engineering Software*, 150, 102923. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2020.102923>
- Gong, M., O'Donnell, R., Miller, C., Scott, M., Simis, S., Groom, S., Tyler, A., Hunter, P., Spyrakos, E., Merchant, C., Maberly, S., & Carvalho, L. (2022). Adaptive smoothing to identify spatial structure in global lake ecological processes using satellite remote sensing data. *Spatial Statistics*, 100615. <https://doi.org/10.1016/j.spasta.2022.100615>
- Gordan, M., Sabbagh-Yazdi, S.-R., Ismail, Z., Ghaedi, K., Carroll, P., McCrum, D., & Samali, B. (2022). State-of-the-art review on advancements of data mining in structural health monitoring. *Measurement*, 193, 110939. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110939>
- Hassan Daneshvar, M., & Sarmadi, H. (2022). Unsupervised learning-based damage assessment of full-scale civil structures under long-term and short-term monitoring. *Engineering Structures*, 256, 114059. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114059>
- ISO/TC 156 Corrosion of metals and alloys. (s. f.). *ISO 9225:2012 Corrosion of metals and alloys—Corrosivity of atmospheres—Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres*. <https://www.iso.org/>
- Lee, S., & Lee, C. (2014). Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete flexural members without stirrups using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 61, 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.001>
- Liu, B., Mu, X., Yang, Y., Hao, L., Ding, X., Dong, J., Zhang, Z., Hou, H., & Ke, W. (2019). Effect of tin addition on corrosion behavior of a low-alloy steel in simulated coastal-industrial atmosphere. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(7), 1228-1239. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.01.008>
- Meira, G. R., Pinto, W. T. A., Lima, E. E. P., & Andrade, C. (2017). Vertical distribution of marine aerosol salinity in a Brazilian coastal area – The influence of wind speed and the impact on chloride accumulation into concrete. *Construction and Building Materials*, 135, 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.181>
- Mishra, M., Lourenço, P. B., & Ramana, G. V. (2022). Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. *Journal of Building Engineering*, 48, 103954. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103954>
- Ozer, E., & Feng, M. Q. (2020). 13—Structural health monitoring. En F. Pacheco-Torgal, E. Rasmussen, C.-G. Granqvist, V. Ivanov, A. Kaklauskas, & S. Makonin (Eds.), *Start-Up*

- Creation (Second Edition)* (pp. 345-367). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819946-6.00013-8>
- Rafiei, M. H., & Adeli, H. (2017). A novel machine learning-based algorithm to detect damage in high-rise building structures. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26(18), e1400. <https://doi.org/10.1002/tal.1400>
- Russo, N., Gastaldi, M., Schiavi, L., Strini, A., Zanoni, R., & Lollini, F. (2022). 78_Effect of cracks on the service life of RC structures exposed to chlorides. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 33, 511-517. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.33.0511>
- Salehi, H., & Burgueño, R. (2018). Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. *Engineering Structures*, 171, 170-189. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>
- Santosh Kumar, B., Sannasiraj, S. A., & Murali, K. (2021). Effect of Climate Change in the Deterioration of a Berthing Structure in a Tropical Environment. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(3), 697-703. <https://doi.org/10.1007/s40030-021-00532-1>
- Sarmadi, H., Entezami, A., Saeedi Razavi, B., & Yuen, K.-V. (2021). Ensemble learning-based structural health monitoring by Mahalanobis distance metrics. *Structural Control and Health Monitoring*, 28(2), e2663. <https://doi.org/10.1002/stc.2663>
- Seguel, F., & Meruane, V. (2018). Damage assessment in a sandwich panel based on full-field vibration measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 417, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.11.048>
- Shadan, F., Khoshnoudian, F., & Esfandiari, A. (2016). A frequency response-based structural damage identification using model updating method. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(2), 286-302. <https://doi.org/10.1002/stc.1768>
- Tan, C. H., Mahamd Adikan, F. R., Shee, Y. G., & Yap, B. K. (2017). Non-destructive fiber Bragg grating based sensing system: Early corrosion detection for structural health monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, 268, 61-67. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.10.048>
- Wasim, M., & Djukic, M. B. (2022). External corrosion of oil and gas pipelines: A review of failure mechanisms and predictive preventions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 100, 104467. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104467>
- Wu, R.-T., & Jahanshahi, M. R. (2020). Data fusion approaches for structural health monitoring and system identification: Past, present, and future. *Structural Health Monitoring*, 19(2), 552-586. <https://doi.org/10.1177/1475921718798769>
- Yan, L., Diao, Y., Lang, Z., & Gao, K. (2020). Corrosion rate prediction and influencing factors evaluation of low-alloy steels in marine atmosphere using machine learning approach. *Science and Technology of Advanced Materials*, 21(1), 359-370. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1746196>
- Ziaja, D., & Nazarko, P. (2021). SHM system for anomaly detection of bolted joints in engineering structures. *Structures*, 33, 3877-3884. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.086>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

