

Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador

Juan Carlos Guerra Mera, Abel Castañeda Valdés*, Juan José Howland Albear.**

Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Ave Urbina y Che Guevara, Portoviejo, Manabí, Ecuador. jguerra@utm.edu.ec *Grupo de Protección de Materiales. Dirección de Medio Ambiente. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Ave 25 y 158, Apartado Postal 6414, Playa, La Habana, Cuba abel.castaneda@cnic.edu.cu **Facultad de Ingeniería Civil. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Apartado Postal 19390, Marianao, La Habana, Cuba. jhalbear@civil.cujae.edu.cu

Recibido: 1 de septiembre de 2016.

Aceptado: 11 de octubre de 2016.

Palabras clave: deposición, iones cloruro, agresividad corrosiva, corrosión, aerosol marino.

Key words: deposition, chloride ions, aggressivity corrosion, corrosion, marine aerosol.

RESUMEN. Se realizó un estudio de estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera, como un resultado preliminar, en el puente Los Caras. Este puente comunica a los cantones (municipios) de Bahía de Caráquez y San Vicente en el estado de Manabí, República del Ecuador. Para esto, se seleccionaron tres sitios de exposición a la intemperie, situados sobre las vigas de enlace del puente. En cada sitio se colocaron soportes de madera con captadores de contaminantes atmosféricos: vela o paño seco y vela húmeda para la medición de las sales de iones cloruro. La secuencia de medición se realizó cada quince días durante el trimestre septiembre-octubre del 2015. Se obtuvieron, dos valores por el método del paño seco y uno por el de la vela húmeda. Los resultados demostraron, que es posible a partir de la evaluación preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera, obtener los primeros resultados que permitirán la toma de medidas de protección, con el propósito de incrementar la durabilidad y vida útil en las edificaciones. La zona de estudio es indicativa de la existencia de un elevado nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera y la presencia de una atmósfera costera. Por otra parte, se demostró, la influencia de los factores meteorológicos como la humedad relativa, la temperatura, así como la velocidad y dirección del flujo de viento en la deposición de las sales de iones cloruro como agente agresivo principal, causante del fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en la zona de estudio.

ABSTRACT. A study of estimation of corrosion aggressivity atmosphere, as preliminary result in the bridge Los Caras, was carried out. This bridge connects the Bahia de Caraquez and San Vicente cantons (municipalities) in Manabí state, Republic of Ecuador. Three outdoor exposure sites located on link beams of the bridge were selected. Wooden rack with two dry plate devices and wet candle devices for chloride deposition measurement were place in each outdoor exposure site. Sequences of measurements fortnightly were carried out, during the quarter September-October 2015. Two values by dry plate device and one value by wet candle were obtained. The results showed that is possible from preliminary evaluation of corrosion aggressivity atmosphere to obtain the first results that allow the taking of protective measures with the purpose of durability and useful life increase. The study zone is indicative of the existence of level of corrosion aggressivity of the atmosphere high and the presence of coastal atmospheres. On the others hand, influence of meteorological parameters as relative humidity, temperature, as well as wind speed flow on chloride deposition rate as main aggressive agent causing atmospheric corrosion on steel reinforced concrete was demonstrated.

INTRODUCCIÓN

El deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado en zonas costeras, provocado por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, es identificado como uno de los problemas más complejos a solucionar en la ciencia y la tecnología a nivel mundial en los últimos 20 años. Numerosos investigadores han planteado la necesidad de realizar estudios que conduzcan a la obtención de herramientas y metodologías que permitan prevenir el fenómeno, en lugar de combatirlo.¹⁻⁸

Los costos en los trabajos de mantenimiento y reparación de las estructuras a nivel mundial han sido económicamente muy significativos, sobre todo en países del primer mundo.⁹⁻¹¹

Una alternativa que se utiliza en esta materia es la aplicación de programas de procesamiento por computación que permitan a los proyectistas prever los plazos de vida útil de las estructuras. Sin embargo, los programas más actualizados en el campo de la durabilidad, no tienen en cuenta los procesos temporales transitorios ocurridos en la atmósfera, como es el caso de la penetración del aerosol marino, las variaciones de la humedad relativa, la temperatura, así como la fuerza y dirección del flujo de viento. Estos procesos tienden a acelerar el fenómeno de la corrosión atmosférica, no solo del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, sino también en cualquier material metálico de la construcción expuesto directamente a la atmósfera. Entre estos materiales metálicos se destacan el acero al carbono, cobre, aluminio y cinc.^{12, 13}

La ejecución de los preventivos e importantes estudios de diagnósticos a pie de obra, antes de que se produzca un marcado desarrollo del fenómeno en el tiempo, así como los posteriores trabajos de mantenimiento derivados de los propios estudios, son muy insuficientes en la actualidad. Esta insuficiencia se debe a la carencia de personal altamente especializado, así como de la tecnología destinada a la ejecución de los trabajos de diagnóstico. Otro factor que influye es el elevado precio de los materiales y productos utilizados en los trabajos costosos de reparación en las estructuras intensamente afectadas por el fenómeno.

Precisamente, como herramienta fundamental que permite prever el deterioro anticipado están los estudios basados en la evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera, o lo que es lo mismo, la evaluación del impacto del ambiente agresivo sobre las estructuras.

Los resultados obtenidos facilitarán la toma de medidas y decisiones ingenieriles, con el fin de incrementar la durabilidad y vida útil de las estructuras, no solo de hormigón armado, sino de las construidas con los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. Prever en inversiones, es economía.

El perfil costanero del Ecuador hacia el Océano Pacífico cuenta con una extensión territorial de 640 km. De estos, 350 km pertenecen a la provincia de Manabí para un 54,6%. De ahí, la importancia de realizar estudios basados en la evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera en dicha zona de elevado potencial constructivo. Precisamente en zonas aledañas al puente Los Caras, existen un gran número de estructuras principalmente de hormigón armado muy afectadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.

Los estudios de agresividad corrosiva de la atmósfera o corrosión atmosférica en América Latina, han sido ejecutados en zonas costeras del Océano Pacífico, el Océano Atlántico, el Golfo de México y el Mar Caribe. Este resultado es obtenido de acuerdo con la distribución de los sitios de exposición o de estudio, en dependencia de la cercanía de la línea costera en la mayoría de los países (Tabla 1).¹⁴ Alguno de los resultados obtenidos han permitido la elaboración de mapas de agresividad corrosiva de la atmósfera como es el caso de Cuba.¹⁵ Se destaca la posterior confección del Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT) en el cual estuvieron involucrados varios países de la región, dentro de ellos el Ecuador.¹⁶ Más reciente, fue dado a conocer el Mapa de la Agresividad Corrosiva de la Atmósfera de Chile.^{17, 18}

Los trabajos investigativos realizados no han valorado si los niveles o categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera obtenidos para los principales materiales metálicos (acero al carbono, cobre, cinc y aluminio), pueden ser tenidos en cuenta para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, como una herramienta o guía segura y eficaz que permita prevenir el deterioro en las estructuras en zonas costeras de elevado potencial constructivo.

La interpretación de los resultados presentados en la tabla 1, hace llegar a varias reflexiones relacionadas con los estudios de corrosión atmosférica en los últimos 30 años, según la bibliografía consultada.

Primero que todo, es de notar los países del continente donde más se han realizado estudios de corrosión atmosférica. En este caso se destacan: México, Brasil, Chile y Cuba. No se encontraron reportes de los países faltantes que pertenecen a la región de América Latina en cuanto a estudios de corrosión atmosférica.

Tabla 1. Distribución de los sitios de exposición de acuerdo con los estudios de corrosión atmosférica realizados en América Latina en los últimos 30 años.

Países	Sitios de exposición					Total
	Litoral costero del Océano Pacífico	Litoral costero del Océano Atlántico	Litoral costero del Golfo de México	Litoral costero del Mar Caribe	Resto*	
Estados Unidos Mexicanos	4	-	29	15	1**4	53
Costa Rica	-	-	-	1	1***,2	4
Panamá	3	-	-	2		5
Venezuela	-	-	-	11	1	12
Colombia	2	-	-	2	8	12
Perú	3	-	-	5	-	8
Bolivia	-	-	-	-	1	1
Ecuador	3	-	-	-	3	6
Brasil	-	36	-	-	15	51
Uruguay	-	3	-	-	2	5
Argentina	-	8	-	-	7	15
Chile	36	-	-	-	-	36
Cuba	-	37	-	10	5	52
Total	51	84	29	46	50	260

*Sitios de exposición ubicados en zonas rurales muy alejados de las costas. **Golfo de California, ***Golfo de Nicoya.

Por otra parte, es de apreciar como la mayoría de los sitios de exposición han sido ubicados en zonas costeras del Océano Atlántico (84 sitios). Las regiones costeras del Golfo de México y el Mar Caribe también han sido de gran objeto de estudio (75 entre las ambas situaciones geográficas). Llama la atención, como el litoral costero del Océano Pacífico con una gran extensión, compuesto por 10 países en América Latina, no ha sido muy explotada en cuanto estudios de agresividad corrosiva de la atmósfera o corrosión atmosférica, con la excepción de Chile. De ahí, la necesidad de establecer los requisitos por durabilidad y vida útil en dicha zona donde se encuentran ubicadas varias ciudades costeras con un elevado potencial constructivo a partir de la ejecución de estudios de corrosión atmosférica.

Entre las ciudades costeras está la de Bahía de Caráquez ubicada en la provincia de Manabí, Ecuador. Es una ciudad ecuatoriana de la región geográfica costanera perteneciente al cantón Sucre, en la jurisdicción de la provincia de Manabí. Está situada en la desembocadura del río Chone, y posee una reconocida infraestructura turística que la ubica como cabecera cantonal. Precisamente la zona de estudio seleccionada en Bahía de Caráquez es el puente "Los Caras" que une Bahía de Caráquez con la ciudad de San Vicente (Fig. 1).



Fig.1. Puente "Los Caras" que une Bahía de Caráquez con la ciudad de San Vicente, Ecuador.

Cuando se habla de requisitos por durabilidad y vida útil en este caso para las estructuras de hormigón armado, se trata de la obtención de una serie de requerimientos ingenieriles que no deben quedar ausentes.

Como primera actividad ingenieril, debe partirse siempre de la evaluación de la agresividad corrosiva, corrosividad de la atmósfera o impacto del ambiente agresivo costero en la zona donde se procederá con las construcciones de las obras.¹⁹ Esta evaluación se ejecuta a partir de tres variantes o vías según las normativas de la especialidad. Dos variantes permiten la estimación de la agresividad y la otra permite su determinación. Al hacer una comparación entre la estimación y la determinación de la agresividad corrosiva de la atmósfera para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción, a partir de esta última se tiene un menor nivel de incertidumbre.²⁰

El objetivo de este trabajo consistió en la evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera a partir de su estimación en el Puente "Los Caras" como un resultado preliminar durante un tiempo de estudio de tres meses.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Selección de los sitios de exposición.

Se seleccionaron tres sitios de exposición en los elementos vigas de enlace en las pilas 15, 30 y 40, tomando como referencia los extremos del puente (15 y 40) y su parte central (30) (Fig.2).



Fig.2. Ejemplo de uno de los sitios de exposición colocados en una de las vigas de enlaces del puente.

El puente presenta una longitud 1 980 m de extremo a extremo. En cada sitio de exposición se colocaron soportes de madera con captadores de contaminantes atmosféricos del tipo paño o vela seca, además de la vela húmeda; ambos para la determinación de la deposición de las sales de iones cloruro (Fig. 2).

Determinación de la deposición de las sales de iones cloruro

La determinación de la deposición de las sales de iones cloruro (DCI⁻ en mg/m²d) se realizó de acuerdo con la metodología indicada en la norma ISO 9225-2012 para ambos métodos.²¹

El captador utilizado fue el paño o vela seca. Este consiste en una pieza de tela antiséptica de gran capacidad adsorbente de forma rectangular de dimensiones 320 x 220 mm. La zona más estrecha presentó un dobladillo que admitió pasar un cable recubierto con un aislante polimérico por el cual se extiende el captador (Fig. 2). Este cable permite a la vez sujetar al captador de los aislantes de material cerámico atornillados al soporte de madera. Se colocaron tres captadores, 1, 2 y 3 por cada soporte a un ángulo de inclinación de 45° con respecto a la horizontal realizando el cambio quincenalmente. Los nuevos captadores que se colocaron y los de retiro, fueron almacenados en bolsitas de polietileno bien selladas con el propósito de no ponerlos en contacto con los contaminantes de la atmósfera durante su traslado desde y hacia el laboratorio.

Se determinaron dos valores de deposición en los captadores 1 y 2 (dimensiones 320 x 220 mm). La secuencia de medición consistió en la obtención del valor medio cada quince días entre los meses de septiembre a noviembre del año 2015. Estos valores fueron graficados en función del período de mediciones (Tabla 2).

Con relación al método de la vela húmeda, este consistió en la tela de gasa enrollada a un soporte cilíndrico de goma expuesta al medio agresivo, donde la tela permaneció en contacto directo con el agua destilada del Erlenmeyer. El cambio de captadores se realizó con la misma frecuencia del paño o vela seca. Para este caso solo se determinó un valor de deposición de las sales de iones cloruro en los tres sitios de exposición.

Tabla.2. Secuencia utilizada para la determinación de la deposición de las sales de iones cloruro en cada uno de los sitios de exposición.

Vigas	Fechas de medición					
	No.	Septiembre	No	Octubre	No	Noviembre
			2	2-10-2015	5	13-11-2015
15, 30 y 40	1	18-09-2015	3	16-10-2015	6	27-11-2015
			4	30-10-2015		

Obtención de los parámetros meteorológicos.

Los valores del complejo humedad relativa temperatura en la misma secuencia medición, así como la fuerza y dirección del flujo de viento fueron obtenidos en la estación meteorológica de Bahía de Caráquez. Esta estación es reconocida por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador y está ubicada muy próxima a la zona de estudio a unos 0° 39' 34" de latitud sur y a uno 80°23' 51" W de longitud oeste.

En estos tipos de estudio, cuando no se cuenta con una tecnología de medición para estos importantes parámetros meteorológicos, es necesario acudir a las estaciones del servicio meteorológico más próximas a la zona de estudio.²²

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del complejo humedad relativa temperatura y velocidad del flujo de viento.

En estos tipos de estudios siempre es recomendable comenzar con el análisis del comportamiento de los parámetros meteorológicos, como factores fundamentales que influyen en la agresividad corrosiva de la atmósfera basada en la penetración del aerosol marino en zonas costeras.

Es de notar primero que todo, como los valores promedios de humedad relativa y el promedio total entre las seis frecuencias de mediciones (HRp) están por encima del 75% (Fig. 3). A pesar de que este resultado es preliminar, este es un indicador de la posible existencia de la obtención de niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera entre elevado (C4), muy elevado (C5) y quizás extremo (CX) para los principales materiales metálicos más usados en la

industria de la construcción (acero al carbono, acero galvanizado, cobre, cinc y aluminio), así como para las estructuras de hormigón armado, precisamente en la zona al interior de la bahía donde se procedió con la construcción del puente Los Caras.

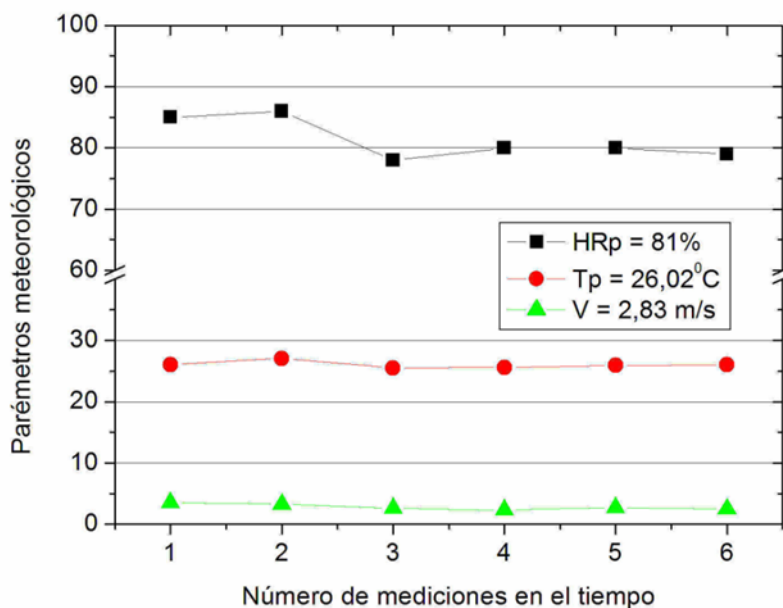


Fig.3. Comportamiento del complejo humedad relativa temperatura y velocidad del flujo de viento.

Por otra parte, la obtención de estos valores de humedad relativa propicia que la deposición de las sales de iones cloruro como principal agente agresivo ocurra en forma de solución salina y no en forma de cristales de sales o deposición seca.²³ Esto influye de forma considerable en el deterioro de las estructuras ya sean de hormigón armado, de acero al carbono y acero galvanizado a partir del inicio y desarrollo del fenómeno de la corrosión atmosférica en la zona de estudio.

Como la zona de estudio comprende tres sitios de exposición encima de las vigas de enlace de un puente en el interior de una bahía, existe la posibilidad de que se sigan obteniendo valores promedios elevados de humedad relativa ya sea diario, cada diez días (decenas como se le tiende a llamar en la meteorología) y de forma mensual. Por tanto, para nada resultaría asombroso, la obtención a un año de estudio, de valores elevados de tiempos de humectación. No obstante, con los datos que se analizan se está en presencia de un clima tropical costero muy dañino para todo tipo de estructuras que se pretenden construir en condiciones de bahía. Los valores de temperatura promedio no presentaron, al igual que la humedad relativa, una gran variación en función del tiempo de medición, más bien su comportamiento fue casi constante. El valor promedio total (Tp) indica la presencia de un clima cálido, típico de climas tropicales costeros. Esto se justifica al observar los valores de temperatura máximas y mínimas (Tabla 3).

Tabla.3. Valores de temperaturas máximas y mínimas.

Número de mediciones	Temperaturas	
	Tmáx. (°C)	Tmín. (°C)
1	31,53	20,6
2	31,87	22,4
3	30,39	19,9
4	30,94	20,3
5	31,37	20,4
6	30,4	21,3
Promedio	31,08	20,8

La existencia de climas cálidos húmedos, debido a los elevados regímenes de humedad relativa y temperatura es otro indicador que demuestra la elevada agresividad corrosiva de la atmósfera en la zona de estudio.

La diferencia elevada entre los valores de temperatura máximas y mínimas, es un indicio en cuanto a la existencia de rápidos procesos de humectación y secado en la superficie de las estructuras ya sean metálicas o de hormigón armado.²⁴ Estos procesos inducen a serios deterioros en las mismas debido al fenómeno de la corrosión atmosférica y más si la película de agua líquida depositada en la superficie está acompañada de agentes agresivos como sucede en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Para el caso de las estructuras de hormigón armado se originan y desarrollan además procesos de cristalización de las sales que tienden a ocurrir en el recubrimiento de hormigón. Esto hace que se intensifique mucho más su deterioro en climas tropicales costeros.

Con relación al análisis de la fuerza y dirección del flujo de viento, es de observar la existencia de dos rangos de valores en la zona de estudio. El primer rango que comprende valores entre 2,2 – 2,8 m/s y un segundo rango entre 3,2 – 3,8 m/s (Fig. 4)

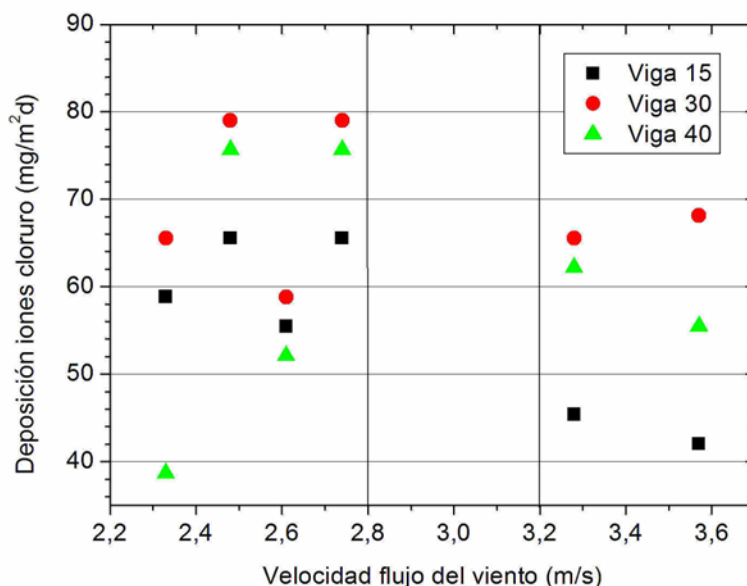


Fig. 4. Comportamiento de la velocidad del flujo de viento en la zona de estudio.

Estudios realizados en clima tropicales costeros, pero no en zonas costeras del pacífico, basados en la penetración del aerosol marino han tenido en cuenta la medición de la deposición de las sales de iones cloruro a diferentes distancias desde el mar. Se ha demostrado en los estudios, que la deposición de dichas sales se incrementa a partir de valores de velocidad del flujo de viento entre 3,0 y 7,1 m/s.²⁵⁻²⁹

Se trata del umbral de velocidad del flujo de viento, variable que debe ser muy considerada en estudios de corrosión atmosférica como un criterio para el incremento de la durabilidad y vida útil de las estructuras. Su determinación le permitirá al personal calificado de la construcción establecer la adecuada posición de la estructura con el propósito de que su impacto con el ambiente agresivo costero se vea reducido.

Sin embargo, es de notar como en este estudio aparece un rango entre 2,2 y 2,8 m/s, es decir, 12 valores de 18 inferiores a lo establecido en la literatura de la especialidad (Fig. 4). La velocidad del flujo de viento es una de las variables climatológicas que más influye en la formación y penetración del aerosol marino hacia el interior de la tierra, así como en la deposición de las sales de iones cloruro en las superficies de las estructuras.

Todo parece indicar que para la zona de estudio seleccionada y como un resultado preliminar, los mayores niveles de deposición de las sales de iones cloruro se pudieran obtener, así como incrementar, para ambos rangos de velocidad del flujo de viento o quizás para uno de ellos.

Lo que sí debe quedar claro es que, al proceder con la construcción de una estructura en climas tropicales costeros, específicamente bajo condiciones de bahía, el conocimiento de la fuerza y dirección del flujo de viento, constituye un parámetro muy importante como un requisito de durabilidad y vida útil. Más cuando se demuestra que el viento es capaz de originar elevados valores de deposiciones de contaminantes atmosféricos o agentes agresivos, como son las sales de iones cloruro.

Análisis del comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro

Lo referido anteriormente, es totalmente confirmado al observar detenidamente el comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro para ambos captadores, en función del número de mediciones en cada uno de los sitios de exposición seleccionados (vigas) (Fig. 5 a), b) y c)).

De forma general, la deposición obtenida por el método de la vela húmeda (VH) representó casi el doble a la del método del paño o vela seca (VS). Por tanto, se cumple con lo establecido en la normativa de la especialidad que plantea, la vela húmeda es capaz de captar una mayor cantidad de sales de iones cloruro, procedentes del mar y transportadas en el aerosol marino debido a la permanente humedad del captador. Estas sales manifiestan una mayor deposición al presentar carácter higroscópico o delicuescencia.

Resulta lógico que los valores de deposición de las sales de iones cloruro en estos tipos de estudio resulten diferentes entre la vela húmeda y el paño o vela seca. Primero que todo, existe una diferencia entre la forma y el tipo de superficie de deposición entre ambos métodos (forma cilíndrica/plana del captador-superficies húmeda/seca).

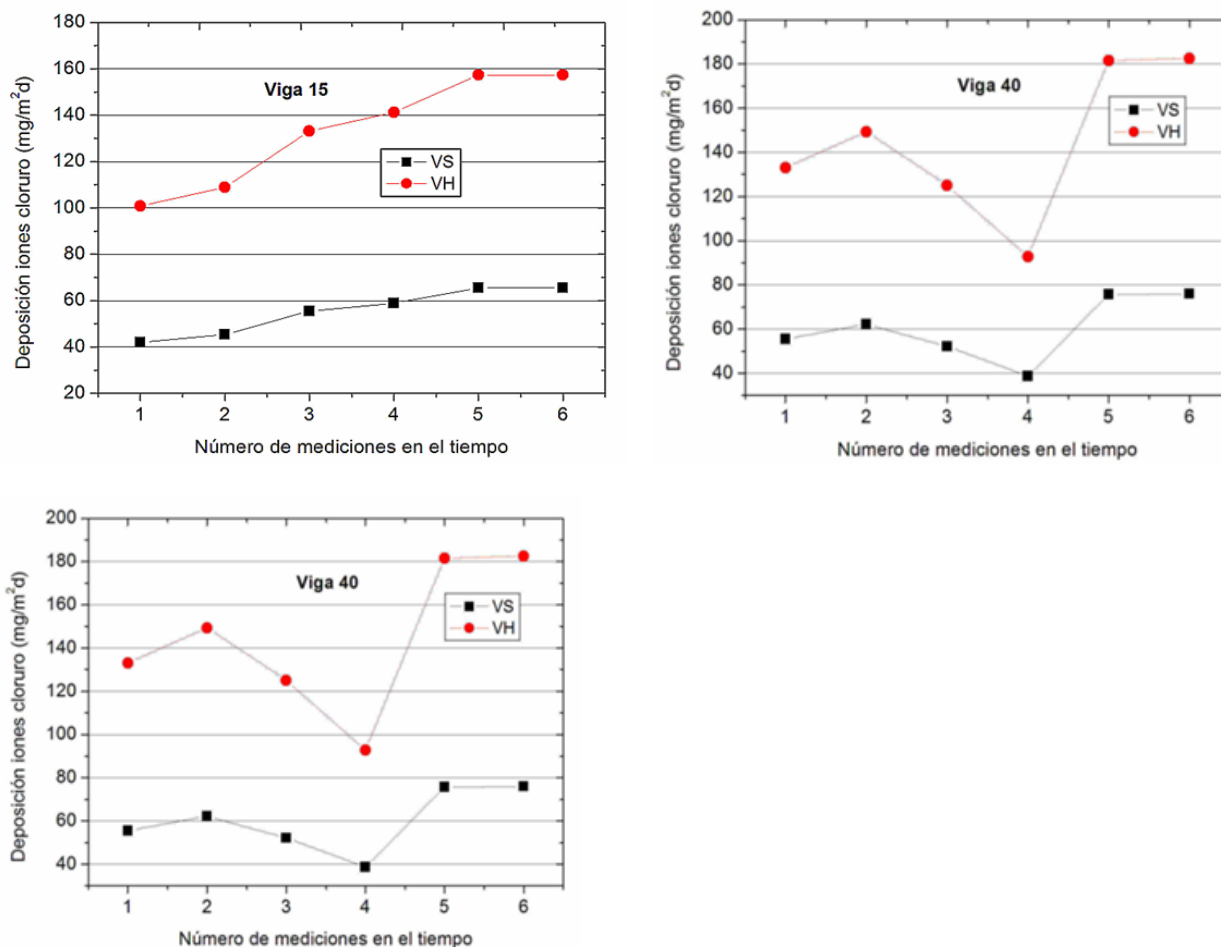


Fig. 5. Comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro en cada uno de los sitios de exposición, a) Viga 15, b) Viga 30 y c) Viga 40.

De acuerdo con la normativa de la especialidad, los valores de deposición obtenidos por ambos métodos ofrecen una baja correlación a períodos de tiempos mensuales debido a la gran variación de las condiciones del clima. No obstante, existe una elevada correlación para los valores promedios mensuales en zonas costeras durante un año de estudio.²¹ Sin embargo, es de notar en este caso, la buena correlación entre ambos métodos, es decir, entre vela o paño seco (VS) y vela húmeda (VH) sin llegar al año de estudio (Fig. 6)

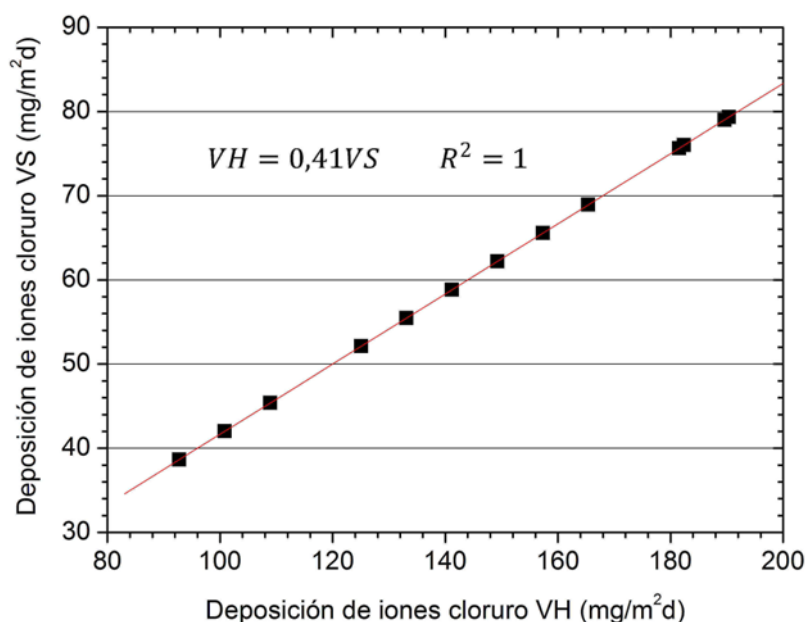


Fig. 6. Correlación obtenida entre los dos métodos de captación de las sales de iones cloruro sin llegar al año de estudio.

Al hacer uso de los valores promedios de las seis mediciones y del valor promedio total, se observa como para ambos métodos la deposición de las sales está por encima de los 60 mg/m²d (Tabla 4). Esto confirma la posible existencia de una atmósfera costera en la zona de estudio, es decir, en las tres vigas de enlace donde se colocaron los soportes de madera con los captadores de paño o vela seca y la vela húmeda.

Por tanto, todo parece indicar como resultado preliminar, la existencia de una atmósfera costera en las partes inferiores del puente además de una elevada agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera. Se trata de una de las atmósferas más agresivas en zonas de elevado potencial constructivo, debido precisamente a la deposición elevada de sales de iones cloruro.

Tabla 4. Valores promedios de deposición por ambos métodos para cada uno de los sitios de exposición.

Sitios de exposición	Deposición de iones cloruro (mg/m ² d)		Clasificación según VH
	VS	VH	
Viga 15	55,46	133,12	S ₂ 60 < S _d ≤ 300
Viga 30	69,53	166,87	
Viga 40	60,01	144,02	
Promedio total	61,66	148,00	

Se impone la necesidad de colocar hormigones homogéneos, compactos, es decir, de muy baja porosidad efectiva (< 10 %) en climas tropicales costeros de agresividad corrosiva elevada con el fin de mantener en el tiempo las condiciones iniciales de vida útil de proyecto en las estructuras. Estas condiciones iniciales son: estética, funcionalidad y seguridad sin costos inesperados en los trabajos de mantenimiento y principalmente de reparación.

Por otra parte, se debe tener en cuenta además el uso de sistemas eficaces de protecciones secundarias a base de recubrimientos acrílicos para las estructuras de hormigón armado sometidas a condiciones similares, con el fin de incrementar mucho más la durabilidad y vida útil de proyecto.⁶

La evaluación de la agresividad corrosiva de la atmósfera, es lo primero que debe realizar antes del proceder con las labores de ejecución de las estructuras, sobre todo cuando se trata de zonas costeras que se caracterizan e identifican por ser de elevado potencial constructivo.

Los resultados obtenidos permitirán implantar medidas encaminadas a la disminución de la importación de aditivos, tecnologías y productos especializados de un elevado precio en el mercado, los cuales son muy utilizados en los trabajos costosos de reparación de las estructuras intensamente dañadas por el fenómeno.

Entre los objetivos fundamentales en la rama de la construcción se encuentran:

- Racionalizar el uso de los recursos disponibles para la construcción de estructuras, la conservación y renovación de las viviendas existentes.
- Satisfacer las necesidades y expectativas de los inversionistas y usuarios en cuanto a la calidad y durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

El aporte económico proporcionará también la aplicación de soluciones óptimas para la protección, principalmente primaria y posteriormente secundaria de las estructuras, lo cual permitirá obtener una vida útil de proyecto superior a los 50 años.

Por otra parte, los valores de deposición de sales de iones cloruro obtenidos por ambos métodos durante el tiempo de estudio son muy superiores al compararlos con los valores promedios anuales de otros estudios investigativos realizados en varias zonas del perfil costanero del Ecuador haciendo uso del captador de la vela húmeda (Tabla 5).^{31, 32} Sin embargo, la atmósfera puede ser clasificada generalmente como costera en estos sitios de exposición seleccionados en los estudios previos.

Por tanto, todo parece indicar que la zona de estudio, específicamente los interiores de la Bahía de Caráquez, en las vigas de enlace del puente, pudiera considerarse como una de las zonas de mayor agresividad corrosiva de la atmósfera en el perfil costanero del Ecuador como un resultado preliminar. Se impone la necesidad de realizar estos tipos de estudio permaneciendo los captadores durante un año, donde la determinación de los valores de deposición se realiza de forma mensual para la obtención de los promedios anuales en cada sitio, como bien indica la normativa de la especialidad. De esta forma, se llegará a resultados más precisos basados en la estimación de la agresividad corrosiva de la atmósfera en la zona de estudio seleccionada antes de proceder con las labores de construcción en perfiles costanero.

Tabla 5. Valores de deposición de sales de iones cloruro obtenido por el captador de vela húmeda en varias zonas del perfil costanero del Ecuador.

Sitios de exposición	Deposición de iones cloruro (mg/m ² d)	Clasificación de la atmósfera
Guayaquil	1,0	Rural
Salinas	47,3	Costera
Esmeralda	19,0	Costera
San Cristóbal	25,0	Costera
Refinería/Esmeralda	12,07	Industrial*
Colegio Tello/Esmeralda	16,40	Costera
Capitanía del puerto/Esmeralda	25,97	Costera
Municipio/Esmeralda	19,35	Costera

*La deposición de compuestos de azufre fue de 31,6 mg/m²d.

Análisis de los factores que influyen en la deposición de las sales de iones cloruro

En estos tipos de trabajos investigativos durante un año, han estado escasos los análisis en cuanto a la influencia de los factores climáticos que influyen en la deposición de las sales de iones cloruro en las zonas de estudio, fundamentalmente en forma de soluciones salinas, debido a la obtención de valores promedios elevados de humedad relativa.²⁵⁻²⁹

La normativa de la especialidad establece que los factores que influyen en el transporte de las partículas salinas en el flujo vertical resultante del aerosol marino y su deposición en forma de solución salina son: la fuerza y dirección del

flujo del viento, la topografía de la zona, es decir, el relieve de la tierra, así como la distancia desde el mar.²⁰ Sin embargo, ha quedado ausente tanto en la normativa de la especialidad como en la literatura, la influencia de los factores climáticos como son la humedad relativa y la temperatura.

Es de notar, de acuerdo con el ajuste de modelos estadísticos matemáticos de regresiones múltiples basados en funciones exponenciales crecientes para ambos captadores y en cada uno de los sitios de exposición, la existencia de una influencia conjunta entre el complejo humedad relativa y temperatura, así como la velocidad del flujo de viento en la deposición húmeda de las sales de iones cloruro (Tablas 6 y 7).

Todo parece indicar como un resultado preliminar, la existencia de otros factores climáticos, es decir, no solo la velocidad del flujo de viento, que influyen en la deposición húmeda sin llegar al año de estudio, donde sí debe tenerse en cuenta el factor climático que más pudiera incidir.

Este resultado es otra herramienta que debe tenerse en cuenta antes de proceder con las labores de construcción de las obras en zonas costeras de elevada agresividad corrosiva de la atmósfera.

Tabla 6. Modelos estadísticos matemáticos ajustados para cada uno de los sitios de exposición. Captador paño o vela seca.

Sitios de exposición	Captador paño o vela seca		
	Regresión n = 6		R ² (%)
	$DCl^- = a + be^{HR} + ce^T + de^v$		
Viga 15	$DCl^- = 41,84 - 2,97E - 36e^{HR} + 1,27E - 10e^T - 0,04e^v$		95
Viga 30	$DCl^- = 20,53 - 4,94E - 36e^{HR} + 2,21E - 10e^T + 1,19e^v$		70
Viga 40	$DCl^- = -33,34 - 8,84E - 36e^{HR} + 4,23E - 10e^T + 2,10e^v$		85

Tabla 7. Modelos estadísticos matemáticos ajustados para cada uno de los sitios de exposición. Captadora vela húmeda.

Sitios	Captadora vela húmeda		
	Regresión n = 6		R ² (%)
	$DCl^- = a + be^{HR} + ce^T + de^v$		
Viga 15	$DCl^- = 110,42 - 7,14E - 36e^{HR} + 3,05E - 10e^T - 0,11e^v$		95
Viga 30	$DCl^- = 49,27 - 1,18E - 35e^{HR} + 5,32E - 10e^T + 2,85e^v$		70
Viga 40	$DCl^- = 80,02 - 2,12E - 35e^{HR} + 1,01E - 09e^T + 5,06e^v$		85

Los modelos ajustados para cada sitio tienen coincidencia con los ajustados de forma general para la zona de estudio, es decir, donde se tuvo en cuenta los 18 valores de deposición de las sales de iones cloruro en forma de solución salina por ambos captadores:

$$DCl_{vs}^- = 10,06 - 5,51E - 36e^{HR} + 2,56E - 10e^T + 1,06e^v \quad (1)$$

R² = 40% p = 0,015 n = 18

$$DCl_{vh}^- = 23,22 - 1,34E - 35e^{HR} + 6,18E - 10e^T + 2,60e^v \quad (2)$$

R² = 40% p = 0,016 n = 18

Por tanto, se confirma que la deposición de las sales de iones cloruro en forma de solución salina, no solo pudiera estar influenciada por la velocidad del flujo de viento, sino también por el complejo humedad relativa-temperatura.

CONCLUSIONES

Se demostró, que es posible a partir de la evaluación preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera, obtener los primeros resultados que permitirán la toma de medidas de protección, con el propósito de incrementar la durabilidad y vida útil en las edificaciones en la Ciudad de Bahía de Caráquez y las aledañas al Puente "Los Caras. De esta forma, se alargarán en el tiempo los trabajos costosos de reparación constituyendo un ahorro de los montos destinados a estas labores. Se demostró a partir de la evaluación y el comportamiento en el tiempo de la deposición de las sales de iones cloruro determinada por ambos métodos, que la zona de estudio es indicativa de la existencia de un nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera elevado y la presencia de una atmósfera costera, siendo la misma una de las más agresivas para las estructuras de hormigón armado y las construidas con los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. Se demostró, la influencia de los factores meteorológicos como la humedad relativa, la temperatura, así como la velocidad y dirección del flujo de viento en la deposición húmeda de las sales de iones cloruro como agente agresivo principal, causante del fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en la zona de estudio. La posición geográfica del puente basado en su ubicación en una zona de bahía, constituye otro factor determinante en la deposición de tan peligroso agente agresivo. La deposición de las sales de iones cloruro, como uno de los principales agentes agresivos en el deterioro de las estructuras, fue determinada por ambos métodos, siendo el método de la vela húmeda el que mostró una mayor eficacia debido a la obtención de valores mayores de deposición de las sales de iones cloruro en la zona de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Luca, B., Matteo, G., Maria-Pia, P., Prevention of steel corrosion in concrete exposed to seawater with submerged sacrificial anodes. *Corrosion Science*. 44, (2002), pp. 1497-1513.
2. Shamsad, A., Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review. *Cement & Concrete Composites*. 25, (2003), pp. 459–471.
3. Feliu, S., González, J. A., Miranda, J. M., Feliu, V., Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures. *Corrosion Science*. 47, (2005), pp. 217-238.
4. Ferreira, R. M., Optimization of RC structure performance in marine environment. *Engineering Structures*. 32, (2010), pp. 1489-1494.
5. Miranda, J., González, J. A., Several questions about electrochemical rehabilitations methods for reinforced concrete structure. *Corrosión Science*. 48, (2006). pp. 2172-2188.
6. Castañeda, A., Rivero, C., Corvo, F., Evaluación de sistemas de protección contra la corrosión en la rehabilitación de estructuras construidas en sitios de elevada agresividad corrosiva en Cuba. *Revista de la Construcción de Chile*. 11, (2012), pp. 49-61.
7. Castañeda A., Howland, Albear, Juan, José., Corvo, Francisco., Marrero, Rigoberto, Estudio de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en La Habana, Cuba. *Revista de la Construcción de Chile*. 14 (2014), pp. 32-40.
8. Castañeda A., Howland, Albear, Juan, José., Corvo, Francisco., Marrero, Rigoberto., Estudio de la agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en La Habana. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. Volumen 35. No.2, pp. 173-188. 2014.
9. Val, D. V., Effect of different limit states on life-cycle cost of RC structures in corrosive environment. *J Infrastruct Syst, ASCE* 2005; 11(4):231–40.
10. Pradhan, B., Bhattacharjee, B., Rebar corrosion in chloride environment. *Construction and Building Materials*. 25, (2011), pp. 2565-2575.
11. Abdulrahman, A., Raja, Rizwan, H., Rajeh, A., Abdulaziz, A, Investigation of severe corrosion observed at intersection points of steel rebar mesh in reinforced concrete construction. *Construction and Building Materials*. 37, (2012), pp. 67–81.
12. Zhao, Y., Jiang, Y., Weiliang, J., Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion. *Corrosion Science*, 53, (2011), pp. 3388-3397.
13. Zhao, Y., Hong, D., Haiyang, R., Weiliang, J., Experimental study of the modulus of steel corrosion in a concrete port. *Corrosion Science*, 56, (2012), pp. 17-25.
14. Morcillo, M., Chico, B., De la Fuente, D., Simancas., J. Looking Back on contribution in the field of Atmospheric Corrosion Offered by the MICAT Ibero-American Testing Network, Hindawi Publishing Corporation, *International Journal of Corrosion*. 2012 (2011) 1-24.
15. Corvo, F., y col., Segunda Variante de Mapa Regional de Agresividad Corrosiva de la Atmósfera de Cuba. *Proceedings. Primer Taller Internacional de Corrosión, CONACYT-CINVESTAV, Mérida, Yucatán, México, 23-28 marzo, 1992.*
16. Morcillo, M., Almeida, E., Rosales, B., Uruchurtu, J., Marrocos, M., MICAT.CYTED. *Graficas Salué. España*. 1999.

17. Vera, R., y col., Construcción de mapas de corrosión atmosférica de Chile. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 32, (2012), pp. 269-276.
18. Vera, R., y col., Mapa de corrosión atmosférica de Chile: resultados después de 1 año de exposición. *Revista de la Construcción*. 12, (2012), pp. 61-72.
19. Trocónis, O., Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brasil, 1997.
20. ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification determination and estimation.
21. ISO 9225:2012. Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Measurement of environmental parameters affecting corrosivity of atmospheres.
22. Liboria, M., Carmina, M., Estela, S., Sarmiento, O., Ramirez, J., Uruchurtu J., Atmospheric Corrosion Dose/Response Functions from Statistical Data Analysis for Different Sites of Mexico. *Innovations in Corrosion and Materials Science*.4 (2014), pp.11-20.
23. Zezza, F., Macri, F., 1995. Marine aerosol and stone decay. *Science of Total Environment*.167 (1995), 123-143.
24. Corvo, F., Pérez, T., Martin, Y., Reyes, J., Dzib, L, R., González-Sánchez, J., Castañeda, A. Atmospheric corrosion in tropical humid climates. *Environmental Degradation of Infrastructure and Cultural Heritage in Coastal Tropical Climate*. Transworld Research Network, Kerala, India, 2009.
25. Meira, G, R., y col., Efecto de la distancia al mar en la agresividad por cloruros en estructuras de hormigón en la costa brasileña. *Revista Materiales de Construcción*. 271 - 272, (2003), pp. 175 – 189.
26. Meira, G, R., y col., Measurement and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. *Revista Atmospheric Environment*. 40, (2006), pp. 5596–5607.
27. Meira, G, R., y col., Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone - A tool for corrosion studies. *Corrosion Science*. 50, (2008), 2724–2731.
28. Gustafsson, E, R., Franzén, G., Island transport of marine aerosol in southern Sweden. *Revista Atmospheric Environment*. 34, (2000), pp. 313-325.
29. Morcillo M., Gonzalez-Calbet J. M., Jimenez, J. A., Diaz, I., Alcántara, J., Chico. B., Mazario-Fernandez, A., Gomez-Herrero, A., Llorente, I., De la Fuente, D., Environmental conditions for akaganeite formation in marine atmosphere mild steel corrosion products and its characterization, *Corrosion Science*. 71 (2015) 872-886.
30. Strekalov, P., V. Atmospheric corrosion of electroplates in sea climate: Protective decorative functions and service life of plate. *Protec. Met.* 37, (2000), pp.176-196.