

Clasificación de la agresividad atmosférica en Colombia mediante métodos estadísticos multivariados

Classification of atmospheric aggressiveness in Colombia using multivariate statistical methods

Juan Delgado, Juan Guillermo Castaño, Esteban Correa, Alex Restrepo, Félix Echeverría*

Grupo de Corrosión y Protección, Sede de Investigación Universitaria, Universidad de Antioquia, Calle 62 N.º 52-59, Torre 2, Lab. 330, Medellín, Colombia

(Recibido el 15 de mayo de 2009. Aceptado el 24 de agosto de 2009)

Resumen

Los estudios de corrosión atmosférica, a menudo, requieren una clasificación de las atmósferas en función de su agresividad, lo cual implica el procesamiento de una gran cantidad de datos relacionados con variables meteorológicas y de contaminación. En este trabajo se realizó una clasificación de diferentes atmósferas colombianas, bajo las cuales se encuentran las principales líneas de transmisión eléctrica, mediante el método de análisis de *cluster*, teniendo en cuenta información meteorológica. Con base en esta clasificación, se eligieron 21 sitios representativos para realizar mediciones en campo de la corrosión del acero y el acero galvanizado, la concentración de SO₂ y cloruros, la temperatura y el tiempo de humectación. Con esta información, se clasificaron nuevamente las atmósferas y se establecieron relaciones entre las variables atmosféricas, el tiempo de exposición y la corrosión, empleando modelos de regresión y métodos estadísticos multivariados.

----- *Palabras clave:* agresividad atmosférica, corrosión, métodos estadísticos multivariados, sector eléctrico colombiano, acero

Abstract

Studies of atmospheric corrosion often require a classification of environments based on their aggressiveness, which involves the processing of a large amount of data related to weather and pollution variables. In this

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 66 79, fax: + 57 + 4 + 219 65 65, correo electrónico: jcasta@udea.edu.co (J. Castaño).

work, a classification of different Colombian environments, under which the main power transmission lines are placed, was made based on weather data and using the cluster analysis method. Based on this classification, 21 representative sites were chosen to perform field measurements of corrosion of steel and galvanized steel, deposition of SO₂ and chloride, temperature and time of wetness. With this information, atmospheres were classified again and correlations were established between atmospheric variables, exposure time and corrosion, using regression models and multivariate statistical methods.

----- **Keywords:** atmospheric aggressiveness, corrosion, multivariate statistical methods, colombian electrical sector, steel

Introducción

La corrosión atmosférica es un fenómeno complejo en el cual intervienen una cantidad importante de variables estrechamente interrelacionadas que tienen que ver con el material, el ambiente que lo rodea y la interfase material-atmósfera [1, 2]. La clasificación de las atmósferas en función de su agresividad requiere del procesamiento de una gran cantidad de datos relacionados con variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura, tiempo de humectación de la superficie) y de contaminación (principalmente dióxido de azufre (SO₂) y cloruros), debido a la gran variación que éstas pueden presentar con el tiempo.

Es común relacionar la corrosión atmosférica con el tiempo de humectación (TDH), que se refiere al tiempo durante el cual el metal está lo suficientemente húmedo para que la corrosión ocurra. Se define como una función del tiempo (t), la temperatura (T) y la humedad relativa (HR). El TDH corresponde al tiempo total cuando T > 0 °C y HR > 80%, simultáneamente [3]. Con base en la información generada en un programa de comportamiento de materiales en la atmósfera durante 8 años y que involucró a 14 países, se obtuvo la siguiente correlación, que permite estimar el tiempo de humectación en función de datos promedio mensuales de temperatura y humedad relativa, de una manera rápida y útil para efectos de clasificación de atmósferas [4]:

$$TDH = 730,5 (-1,12 + 0,012 T + 0,019 HR), R^2 = 0,65 (1)$$

Donde T corresponde a la temperatura (en °C) y HR es la humedad relativa (en %).

La temperatura tiene un doble efecto en la corrosión atmosférica, aunque su acción es principalmente indirecta, afectando a la humedad relativa y al TDH, por lo cual el proceso de corrosión se vería desfavorecido. Sin embargo, al mismo tiempo puede favorecer la cinética de los procesos de difusión y reacción, con lo cual se incrementaría la velocidad de corrosión [5]. Además, en lugares con bastante elevación sobre el nivel del mar la radiación solar puede ser mayor y tener incidencia en la humedad relativa y, por ende, en la velocidad de corrosión [6].

El dióxido de azufre (SO₂) es el más importante de los gases corrosivos y proviene tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Su corrosividad es alta por incorporarse fácilmente a las películas de humedad que se forman sobre los metales, para transformarse en ácido sulfúrico [1, 7]. En cuanto a los cloruros, su principal fuente es la sal marina, aunque eventualmente pueden originarse por la emisión de cierto tipo de gases en procesos como la producción del gas cloro y compuestos clorados. Debido a su alta higroscopicidad los iones cloruro pueden aumentar el TDH. Además, pueden aumentar la conductividad de la capa de humedad formada sobre el metal, o ser precursor del ácido clorhídrico, incrementando la tasa de corrosión [8].

La infraestructura del sector eléctrico nacional abarca extensas regiones geográficas que constituyen microclimas diversos, lo que supone la exposición de distintos materiales a atmósferas de variada agresividad, siendo los más empleados el acero y el acero galvanizado. La determinación

del efecto, tanto técnico como económico, de la corrosión atmosférica sobre dicha infraestructura ha venido preocupando desde varios años atrás a las empresas del sector.

Los métodos estadísticos multivariados son útiles para ayudar a los investigadores a hacer que tengan sentido algunos conjuntos grandes y complejos de datos que constan de un gran número de variables medidas en números grandes de unidades experimentales o individuos. El objetivo primario del Análisis Multivariado es resumir grandes cantidades de datos por medio de relativamente pocas variables, analizando las relaciones entre las variables respuesta y entre las unidades experimentales. Las técnicas dirigidas por las variables son el análisis de componentes principales, el análisis de factores, el análisis de regresión y el análisis de correlación canónica. Las dirigidas por los individuos o unidades experimentales son el análisis discriminante, el análisis de cluster (agrupamiento) y el análisis multivariado de varianza (Manova) [9].

En este trabajo se realizó una clasificación de diferentes atmósferas colombianas, bajo las cuales se encuentran las principales líneas de transmisión eléctrica, mediante el método de análisis de cluster, teniendo en cuenta información sobre la humedad relativa, la temperatura, el tiempo de humectación y la altitud. Se eligieron 21 sitios representativos para realizar mediciones de corrosividad atmosférica durante 14 meses, con el propósito de establecer la corrosión del acero y el acero galvanizado, medir la concentración de los contaminantes atmosféricos de mayor incidencia en el fenómeno –SO₂ y cloruros–, clasificar nuevamente las atmósferas con dicha información adicional y recomponer los clusters, para posteriormente establecer relaciones entre las diferentes variables atmosféricas, el tiempo de exposición y la corrosión (expresada como pérdida de masa), empleando modelos de regresión y métodos estadísticos multivariados.

Metodología

Como punto de partida se obtuvo una muestra inicial de 114 sitios, cuya selección se realizó

teniendo en cuenta su distancia a las líneas de transmisión (máximo 5 kilómetros) y que en la zona hubiese una estación del IDEAM que suministrase los datos meteorológicos requeridos.

El siguiente paso consistió en clasificar los 114 sitios en diferentes grupos o familias. Para realizar la clasificación se eligieron cuatro variables: HR, temperatura, altitud y TDH. En esta primera clasificación no se incluyeron contaminantes porque no había información disponible sobre la concentración de los mismos en todos los sitios considerados.

Como datos de entrada para el análisis se obtuvieron datos promedio mensuales de HR y temperatura en los últimos 5 años, los cuales fueron suministrados por el IDEAM, al igual que la altitud de cada sitio. El TDH mensual para cada sitio se calculó a partir de esta información, empleando la ecuación (1). La clasificación se realizó mediante análisis de agrupamientos o *clusters*, empleando en particular el método de Ward y distancia euclidiana.

Una vez agrupados los sitios, se procedió a seleccionar dos sitios representativos de cada grupo o familia. En los sitios elegidos, se realizaron registros continuos de HR y temperatura. Además, se determinó bimensualmente el contenido de SO₂ y cloruros mediante captadores, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D-2010 [10] y ASTM G-140 [11], respectivamente. Con base en estos datos bimensuales, acumulados, se hizo una nueva clasificación de los sitios elegidos, mediante análisis de agrupamiento (clusters), tomando las variables anteriormente mencionadas, además de la temperatura promedio y la altitud, como variables de entrada, obteniendo una clasificación de grupos de características semejantes con relación al nivel de corrosividad. La exposición se realizó entre septiembre de 2006 y noviembre de 2007, tiempo que se considera suficiente para que, con base en las concentraciones de SO₂ y cloruros, se determinaran las categorías de corrosividad, según la norma ISO 9223 [3], con el propósito de comparar esta clasificación con la hallada mediante el análisis de agrupamiento.

Finalmente, se desarrollaron modelos predictivos de corrosión del acero y acero galvanizado para cada grupo, mediante regresión no lineal. Estos modelos correlacionan la pérdida de masa de los materiales con las variables atmosféricas medidas y con el tiempo de exposición. Para este propósito, en cada uno de los sitios elegidos se expusieron muestras de acero al carbono AISI-SAE 1016 y acero galvanizado en caliente, preparadas de acuerdo con la norma ASTM G-1 [12]. Cada dos meses se retiraban tres muestras de cada material en cada sitio, y se calculaba la pérdida de masa de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma anterior.

Resultados y discusión

Determinación de las estaciones de muestreo

Para la clasificación de la muestra inicial de 114 sitios, se obtuvo información histórica de cuatro variables: HR, temperatura, TDH y altura. De cada variable se contaba con datos mensuales obtenidos durante un período de 5 años. La clasificación se realizó mediante análisis de agrupamientos o Clusters, empleando en particular el método de Ward con distancia euclidiana, que permite agrupar las estaciones en grupos o subgrupos de modo que las unidades experimentales que estén dentro de un mismo subgrupo sean semejantes entre sí. La clasificación de los grupos o clusters debió hacerse con nuevas variables no correlacionadas, llamadas factores adyacentes, que se obtienen por el método de reducción de dimensión, análisis de factores, para resolver el problema de la multicolinealidad en los datos y reducir la dimensión de estos.

Mediante el método clásico de análisis de factores y con rotación *Varimax*, se obtuvieron indicadores (o nuevas variables) que son combinaciones lineales de las variables originales que recogen la información de éstas, con una mínima pérdida de información. Con estos nuevos indicadores se realizó la agrupación. En la tabla 1 se muestra el número de nuevas variables o factores adyacentes (dos) cuyo valor propio es mayor que

1, es decir, que las cuatro variables se convierten en dos nuevas variables o índices, que explican el 99,99% de la variabilidad de las variables originales. En la tabla 2 se muestra la matriz de cargas después de realizar la rotación *Varimax*, lo cual significa que el factor 1 está compuesto por la altitud y la temperatura, y el factor 2 por la HR y el TDH, ya que éstas tienen una carga o peso alta en los respectivos factores, y unos pesos muy bajos (menores que 0,4) en los no correspondientes.

Tabla 1 Nuevas variables o factores obtenidos mediante el análisis de factores

Factor No.	Valor Eigen	% de varianza	% acumulado
1	2,19408	55,370	55,370
2	1,76841	44,628	99,998
3	0,0000606833	0,002	100,000
4	0,0	0,000	100,000

Tabla 2 Matriz de cargas después de la rotación *Varimax*

Variable	Factor 1	Factor 2
Altitud	0,980558	0,0319507
HR	0,36224	0,932084
T	-0,998562	-0,0534007
TDH	-0,303918	0,952697

Luego, se utilizan las nuevas variables para clasificar los sitios de acuerdo a su similaridad, mediante el método de análisis de cluster, utilizando el método de Ward y la distancia euclidiana, donde se encontraron 6 grupos de sitios similares entre sí (familias), como lo muestran las figuras 1 y 2. Nótese en la figura 2 que los grupos no se traslapan.

De cada grupo se eligieron 2 sitios representativos, para un total de 12 sitios. El criterio inicial para la selección de los dos sitios representativos de cada familia fue su cercanía al centroide o vector de medias de las variables involucradas.

Además, se tuvo en cuenta el criterio de expertos respecto a la contaminación de la atmósfera dependiendo de aspectos como la cercanía al mar y a zonas industriales, comerciales, residenciales y rurales, así como resultados de estudios de corrosión atmosférica realizados previamente por el grupo [13-15]. De esta manera, se buscaba que los resultados obtenidos en el estudio en los dos sitios representativos se pudiesen extrapolar a los demás lugares del grupo respectivo. Por otro lado, se seleccionaron 3 ciudades de acuerdo con los siguientes criterios: que fuesen ciudades importantes, que correspondieran a 3 alturas diferentes y que al menos en una se contase con la cercanía al mar. Se eligió a Barranquilla (ciudad costera), Medellín (ciudad de altura intermedia) y Bogotá (ciudad de mayor altura sobre el nivel del mar). En cada ciudad se eligieron 3 sitios diferentes, correspondientes con distintos tipos de actividad comercial (industrial, comercial y residencial). De esta manera, se contaba con un total de 21 sitios (12 obtenidos de la clasificación estadística y 9 sitios más repartidos en 3 ciudades). En la figura 3 y la tabla 3 se muestran las estaciones o sitios seleccionados. En la tabla 3 se indica además el grupo o familia al cual pertenecen.

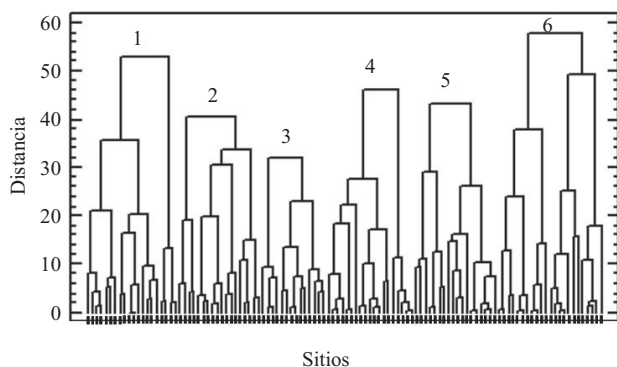


Figura 1 Dendrograma en el que se agrupan los 114 sitios analizados en 6 familias

Mediciones en campo

Una vez realizados los ensayos en campo en los 21 sitios elegidos durante 14 meses, se elaboraron tablas similares a la tabla 4 para cada sitio. En cada tabla se incluyeron los datos registrados

bimensualmente de pérdida de masa de cada material, TDH (calculado a partir de los datos de humedad relativa y temperatura), contenido de cloruros y dióxido de azufre, así como el tiempo de exposición. A inicios de 2007 se presentó una fuerte temporada invernal en la costa caribe que correspondió a un aumento sustancial del contenido de cloruros en las estaciones costeras, lo cual tuvo una apreciable influencia en los modelos obtenidos para este grupo de estaciones.

Tabla 3 Sitios seleccionados y grupo al que pertenecen

No.	Sitio	Grupo
1	Barrancabermeja	4
2	Cartagena	4
3	Barranquilla, industrial	ciudades
4	Barranquilla, residencial	ciudades
5	Barranquilla, comercial	ciudades
6	Chinú (Córdoba)	2
7	Ocaña (Norte de Santander)	1
8	San Felipe (Tolima)	3
9	La Virginia (Risaralda)	1
10	Yumbo (Valle)	2
11	San Bernardino(Cauca)	6
12	La Unión (Antioquia)	5
13	Pasto	5
14	Sochagota (Boyacá)	6
15	La Reforma (Meta)	3
16	Bogotá, industrial	ciudades
17	Bogotá, comercial	ciudades
18	Bogotá, residencial	ciudades
19	Medellín, industrial	ciudades
20	Medellín, comercial	ciudades
21	Medellín, residencial	ciudades

Tabla 4 Datos medidos y calculados bimensualmente en Barranquilla (estación N.º 5)

Período	Pérdida de masa – acero (g)	Pérdida de masa – acero galvanizado (g)	TDH (%)	Contenido de cloruros ($mg\ m^{-2}\ día^{-1}$)	Contenido de SO_2 ($mg\ m^{-2}\ día^{-1}$)	Tiempo de exposición (días)
1	3,86	0,20	49,6	53,93	5,37	60
2	5,27	0,29	81,2	36,67	7,09	120
3	9,40	0,73	55,6	203,84	7,65	180
4	24,62	0,82	79,5	187,54	9,44	240
5	34,45	1,57	74,3	24,22	9,20	300
6	39,88	1,19	76,6	73,35	7,65	360
7	45,29	0,96	75,2	14,21	14,19	420

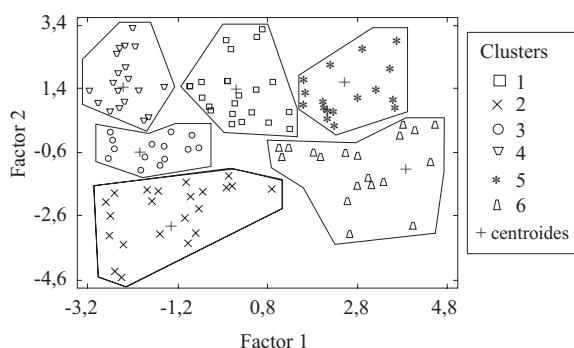


Figura 2 Representación gráfica de los 114 sitios y su clasificación en las 6 familias o *clusters*, de acuerdo con las variables Factor 1 y Factor 2

Nueva clasificación

En la nueva clasificación de sitios en grupos de similar agresividad, realizada mediante análisis de *clusters*, se consideraron como variables de entrada el TDH, el contenido de contaminantes (cloruros y dióxido de azufre) y la pérdida de masa del material expuesto. Esta clasificación se ajusta más a la realidad al tenerse en cuenta, además, los contaminantes y la pérdida de masa, datos desconocidos al inicio de estudio, pero obtenidos posteriormente mediante las mediciones en campo. En la figura 4 se muestra el gráfico de dispersión de puntos correspondientes a las 21 estaciones de acuerdo a los factores o nuevas variables, teniendo en cuenta las variables descritas en el

párrafo anterior, llamadas variables originales; en esta gráfica se pueden observar los grupos bien definidos y su distancia al centroide. De esta manera, los sitios considerados se clasificaron en 4 grupos con diferentes características de agresividad atmosférica.

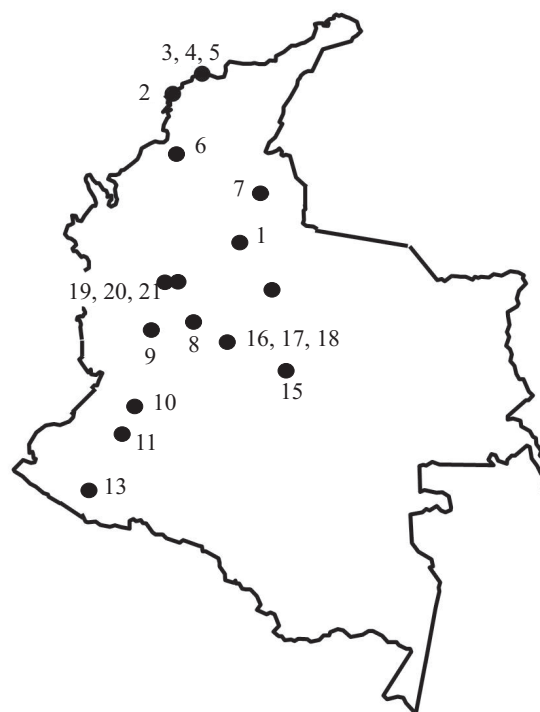


Figura 3 Sitios seleccionados para los ensayos de campo

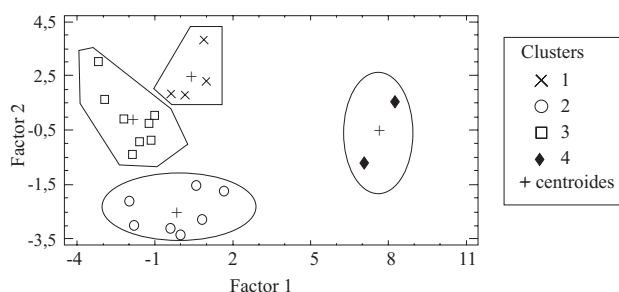


Figura 4 Gráfico de dispersión de los factores analizados y clasificación de los 21 sitios

La tabla 5 del análisis discriminante muestra la clasificación de las estaciones, tomando como grupos, los obtenidos por el análisis de cluster, donde se puede observar un 100% de clasificación correcta para todas las estaciones que hacen parte de las seleccionadas para el estudio, de acuerdo al grado de agresividad atmosférica de cada estación. La tabla 6 indica los sitios o estaciones que pertenecen a cada grupo. La reagrupación en cuatro familias clasificadas mediante los métodos ya descritos, permitió entonces agrupar los sitios

de mayor cercanía a la costa (Cartagena –Estación 2– y los 3 sitios de Barranquilla –Estaciones 3, 4 y 5–). Adicionalmente, se observa que Chinú –Estación 6–, con carácter más rural que costero, hace parte del grupo 3, resultado que está más acorde con lo observado en campo y con los datos de contaminación muestreados.

Tabla 5 Clasificación de nuevos grupos

Grupo actual	Tamaño	Predicción			
		1	2	3	4
1	4	4 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
2	8	0 (0,00%)	8 (100,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)
3	7	0 (0,00%)	0 (0,00%)	7 (100,00%)	0 (0,00%)
4	2	0 (0,00%)	0 (0,00%)	0 (0,00%)	2 (100,00%)

Tabla 6 Estaciones que hacen parte de cada grupo determinado estadísticamente

	Grupo 1 <i>estaciones costeras</i>	Grupo 2 <i>estaciones urbanas y suburbanas</i>	Grupo 3 <i>estaciones rurales</i>	Grupo 4 <i>estaciones industriales</i>
Estación No.	2, 3, 4, 5	7, 9, 10, 13, 17, 18, 21	1, 6, 8, 11, 12, 14, 15,	16, 19
Total	4	7	20	8

El análisis de clasificación, además, permitió clasificar los 93 sitios restantes que hacían parte de la muestra inicial (recordando que inicialmente se contaba con 114 sitios) en los 4 grupos resultantes. También se tuvieron en cuenta una serie de condiciones que caracterizan la agresividad de las zonas o áreas de estudio, como la cercanía de focos de contaminantes (fábricas, carreteras, etc.), la cercanía al mar y la actividad económica predominante en la zona. De esta manera, es posible incluir sitios no considerados en este estudio, someterlos al análisis discriminante y predecir a cuál de los cuatro grupos pertenece. Para obtener los datos

de entrada necesarios para el análisis, deberá hacerse una exposición corta de materiales y de medición de las variables involucradas en el estudio, en estaciones sobre o cerca de la línea que puedan representar características específicas de agresividad de la atmósfera respectiva.

Una vez definida la clasificación estadística, se hizo una comparación con la clasificación a partir de los datos de contaminantes atmosféricos según la norma ISO 9223, la cual discrimina las estaciones en niveles de agresividad a partir de los datos de contaminación por cloruros y por dióxido de azufre. En la figura 5 se puede

observar los diferentes grupos y comparar sus niveles de contaminantes atmosféricos. El primer grupo clasificado estadísticamente (2, 3, 4 y 5) corresponde a las clasificaciones ISO P_0S_1 y P_0S_2 (estaciones costeras con influencia de los cloruros). Se destaca también el grupo conformado por las dos estaciones industriales (16 y 19), que corresponde a la categoría ISO P_1S_0 (estaciones moderadamente industriales). En ambos casos hay una alta concordancia. La norma clasifica los 15 sitios restantes en la categoría de agresividad más baja (P_0S_0). Sin embargo, la clasificación estadística divide estos sitios en dos grupos, debido probablemente a que en el análisis por Cluster se tiene en cuenta el TDH, que tiene una gran incidencia en la corrosión en atmósferas con bajo contenido de contaminantes.

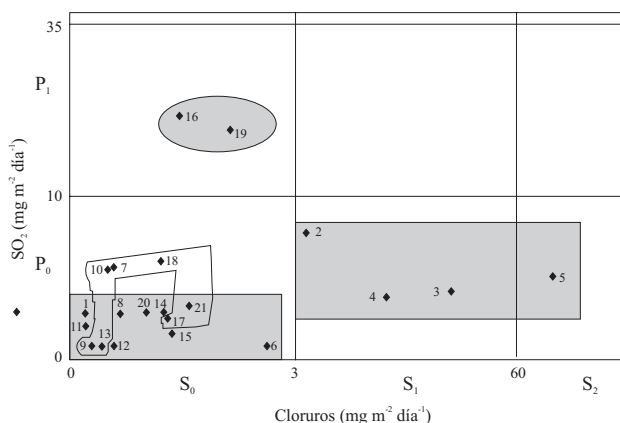


Figura 5 Clasificación según ISO 9223 de las estaciones y agrupación final estadística

Elaboración de los modelos

Se hizo un análisis exploratorio de los datos para su validación, caracterización y detección de valores atípicos. Luego, bajo la idea de ajustar un modelo para cada grupo de estaciones o microclimas cercanamente similares entre ellas, de acuerdo al grado de agresividad, se modelaron los centroides, encontrándose modelos de regresión no lineal logístico de muy buen ajuste y acorde con lo esperado del comportamiento de la pérdida de masa de los materiales en estudio, pero con pocos datos. Entonces, se consideró pertinente, para tener más grados de libertad,

tomar aleatoriamente de cada estación del mismo grupo una de las tres probetas expuestas y obtener un promedio, es decir, conformar una nueva base de datos, donde cada grupo estaría representado por tres valores en lugar de uno (el centroide) en el ajuste del modelo para las diferentes estaciones del grupo.

Una vez obtenida la nueva base de datos, se realizó la estandarización de los datos de días de humectación acumulados (DH) –obtenidos con base en el TDH–, contenido de cloruros acumulado (Cl), contenido de dióxido de azufre acumulado (S) y tiempo (t), restando a cada dato la media de la variable respectiva del grupo a que pertenece, y dividiendo por la desviación estándar de la variable correspondiente del mismo grupo, y en los 14 meses de estudio.

Posteriormente, se realizó un análisis de componentes principales, para la reducción de la dimensión de los datos, y se crearon las nuevas variables independientes o componentes principales, donde los coeficientes que ponderan las variables originales, permiten determinar las componentes principales o nuevas variables independientes, lo que resuelve el problema de colinealidad entre las variables de entrada o explicativas y la componente o nueva variable denominada Índice de agresividad (IA). Cabe anotar, por un lado, que en esta reducción de dimensión de los datos y la creación del índice de agresividad, se tuvieron en cuenta todas las variables de entrada excepto la pérdida de masa del material en cuestión, para poder determinar la relación entre la pérdida de masa y el índice de agresividad. Por otro lado, además, hay que resaltar que se hizo uso del análisis de componentes principales, en lugar del análisis de factores, porque no fue necesario rotar los ejes mediante el método *Varimax* en análisis de factores, ya que el método de componentes, al igual que el de factores, explican con la nueva variable (IA) un 99,9% de la variabilidad de la variables originales, lográndose incluso un mejor ajuste del modelo de predicción. Para cada grupo se obtuvo una ecuación diferente para el IA. A modo de ejemplo, en la tabla 7 se muestran los coeficientes o pesos de cada variable original, hallados para el grupo 1 (atmósferas costeras).

Tabla 7 Coeficientes derivados se análisis de componentes principales para el grupo 1

Coeficientes Grupo 1	
Constante	3
DH (Días de humectación)	0,506691
Cl (Cloruros)	0,487225
S (Sulfatos)	0,498247
t (Tiempo)	0,507569

Tomando como variable dependiente la pérdida de masa y como variable independiente el índice de Agresividad (IA), se ajustaron los modelos de regresión no lineal, para los diferentes grupos. Los modelos obtenidos arrojaron coeficientes de correlación R^2 superiores al 90%, en la mayoría de los casos. Se estima que los modelos obtenidos permiten realizar extrapolaciones para predecir el comportamiento de los materiales considerados (expresado como pérdida de masa) a corto plazo. A manera de ejemplo, las ecuaciones (2) y (3) corresponden a los modelos obtenidos para el acero al carbono y el acero galvanizado, respectivamente, en el grupo 1:

$$PM_{AC} = 26,1698 / (1 + 12,634 e^{(-0,8045 IA)}), R^2 = 98,2 \quad (2)$$

$$PM_{AG} = 0,7747 / (1 + 5,3945 e^{(-0,8533 IA)}), R^2 = 92,03 \quad (3)$$

Donde PM_{AC} acero es la pérdida de masa del acero (en gramos) y PM_{AG} acero es la pérdida de masa del acero galvanizado (en gramos). En ambas ecuaciones, IA está dado por la ecuación (4):

$$IA = 3 + 0,5067 DH + 0,4872 Cl + 0,4982 S + 0,5076 t \quad (4)$$

En la figura 6 se ilustra el comportamiento de los modelos ajustados y los datos experimentales de IA. Puede observarse que la curva tiene una forma de “S”, que se explica porque el proceso de corrosión en sus etapas iniciales es lento, luego experimenta una etapa de aceleración a partir del segundo período, pero hacia el final del período evaluado se presenta una atenuación en la pérdida de masa. Este comportamiento puede modelarse

adecuadamente con los modelos de tipo logístico presentados en las ecuaciones (2) y (3).

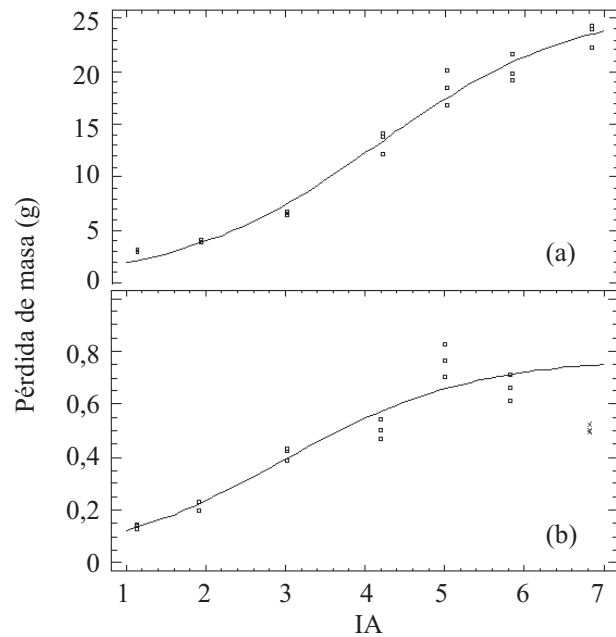


Figura 6 Pérdida de masa en estaciones costeras en función del índice de agresividad (IA): (a) acero al carbono, (b) acero galvanizado

Conclusiones

La clasificación de las atmósferas en función de su agresividad requiere del procesamiento de una gran cantidad de datos medioambientales relacionados con diferentes variables, que pueden presentar una gran variación con el tiempo. Los métodos estadísticos multivariados son de gran utilidad para procesar y analizar conjuntos grandes y complejos de datos, como los que se consideran en este tipo de estudios. De esta manera, la clasificación de los sitios se pudo realizar con un alto grado de confiabilidad, lo que asegura la representatividad de los sitios elegidos.

Los sitios considerados se clasificaron en 4 grupos, correspondientes a ambientes costeros, urbanos y suburbanos, rurales e industriales. Esta clasificación estadística está de acuerdo en buena medida con las clasificaciones propuestas por la norma ISO 9223, y además tiene en cuenta

factores que son muy importantes como el TDH, la inspección de la infraestructura por expertos y criterios de ingeniería de corrosión que permiten asegurar su correcta interpretación.

Se obtuvieron modelos de regresión no lineal que describen la pérdida de masa del acero y el acero galvanizado en función de la agresividad de la atmósfera, útiles para hacer predicciones a corto plazo, con coeficientes de determinación R^2 superiores al 90% en la mayoría de los casos.

A través de este enfoque es posible fácilmente, ante la creación de nuevas líneas de conducción de energía, hacer una exposición corta de materiales y de medición de las variables involucradas en el estudio, en estaciones sobre o cerca de la línea que puedan representar características específicas de agresividad de la atmósfera respectiva, y entrar esta información en el análisis discriminante y predecir a qué grupo pertenece.

Referencias

1. C. Leygraf, T. Graedel. *Atmospheric Corrosion.*, Ed. Wiley. New York. 2000. pp. 9-65.
2. V. Kucera, E. Mattsson. "Atmospheric corrosion". F. Mansfeld. *Corrosion Mechanisms*. Ed. Marcel Dekker. New York. 1987. pp. 211-284.
3. International Organization for Standardization. *Corrosion of Metals and Alloys – Corrosivity of Atmospheres: Classification*. Geneva. ISO. (Norma: ISO 9223). 1992. pp. 1-13.
4. J. Tidblad, A. Mikhailov, V. Kucera. "A Model for Calculation of Time of Wetness Using Relative Humidity and Temperature Data". *Proceedings 14th International Corrosion Congress*. Cape Town. South Africa. 1999. pp. 1-10.
5. P. W. Brown, L.W. Masters. "Factors Affecting the Corrosion of Metals in the Atmosphere". W. H. Ailor. *Atmospheric Corrosion*. Ed. John Wiley and Sons. New York. 1982. pp. 31-50.
6. J. A. Rocha. "Atmospheric Corrosion at High Altitudes Over Sea Level". *Proceedings 15th International Corrosion Congress*. Granada. 2002. pp. 1-8.
7. M. Morcillo, E. Almeida, B. Rosales, J. Urruchurtu, M. Marrocos. *Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica, Parte I*. CYTED. Madrid. 1998. pp. 1-54.
8. M. Morcillo, B. Chico, L. Mariaca, E. Otero. "Salinity in Marine Atmospheric Corrosion: Its Dependence on the Wind Regime Existing in the Site". *Corros. Sci.* Vol. 42. 2000. pp. 94-101.
9. D. E. Jonson. *Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos*. Ed. Thomson. México. 2000. pp. 93-485.
10. ASTM. *Standard Test Methods for Evaluation of Total Sulfation Activity in the Atmosphere by the Lead Dioxide Technique*. West Conshohocken, PA. ASTM (Norma: ASTM D-2010). 2004. pp. 1-6.
11. ASTM. *Standard Test Method for Determining Atmospheric Chloride Deposition Rate by Wet Candle Method*. West Conshohocken, PA. ASTM (Norma: ASTM G-140). 2002. pp. 1-4.
12. ASTM. *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. West Conshohocken. PA. ASTM (Norma: ASTM G-1). 1999. pp. 1-7.
13. A. Valencia, C. Arroyave, J. Minotas, R. Pérez. "Avances en los Estudios de Corrosividad Atmosférica en Colombia". *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. Vol. 13. 1996. pp. 32-42.
14. F. Corvo, J. Minotas, J. Delgado, C. Arroyave. "Changes in Atmospheric Corrosion Rate Caused by Chloride Ions Depending on Rain Regime". *Corros. Sci.* Vol. 47. 2005. pp. 883-892.
15. D. de la Fuente, J. G. Castaño, M. Morcillo. "Long-term Atmospheric Corrosion of Zinc". *Corros. Sci.* Vol. 49. 2007. pp. 1420-1436.