

Mapas de Corrosividad Atmosférica para el Sistema de Transmisión Troncal de Edelca

Aray Rojas Marlene

UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela, marleurb_2710@hotmail.com

Linares Lizeth

Centro de Investigaciones Aplicadas, Corpoelec, Puerto Ordaz, Venezuela

Mayra D'Armas

UNEXPO, Puerto Ordaz, Venezuela, mdarmas@unexpo.edu.ve, mjdarmasr@yahoo.es

RESUMEN

El Sistema de Transmisión Troncal de Edelca transporta grandes bloques de energía a largas distancias, para tal fin, cuentan con subestaciones en todo el país, que requieren de mantenimiento por efecto de la corrosión. De lo anterior, surge la necesidad en el Laboratorio de Corrosión que pertenece al Centro de Investigaciones Aplicadas de Edelca, de evaluar estadísticamente el conjunto de datos obtenidos de los parámetros meteorológicos (Temperatura, TDH, Precipitación, Humedad Relativa) y aeroquímicos (Sulfato y Cloruro) en las subestaciones Cuatricentenario, El Tigre, José, La Arenosa, La Horqueta y Yaracuy, a fin de hallar la relación matemática entre los parámetros antes mencionados y la velocidad de corrosión, que permita predecir el proceso de corrosión en estas áreas de estudio, además de indicar las variables que inciden en el mismo. Los resultados obtenidos demuestran que las variables Sulfato, Cloruro y TDH afectan significativamente las estructuras metálicas ubicadas en las subestaciones nombradas. Además, se construyó el mapa de corrosividad atmosférica para el sistema de transmisión troncal para evaluar el comportamiento de la velocidad de corrosión en las subestaciones estudiadas.

Palabras claves: Corrosión, velocidad de corrosión, parámetros meteorológicos, parámetros aeroquímicos, regresión lineal múltiple.

ABSTRACT

The Trunk Transmission System of Edelca transports big blocks of energy through long distances, to which end they are supported by substations all over the country which require maintenance as a result of corrosion. Due to corrosion, there arises the need in the corrosion lab which belongs to The Centre of Applied Investigations of Edelca, to evaluate statistically all data obtained from meteorological parameters, (these include, Temperature, TDH, Precipitation, Relative humidity) and air-borne chemicals (Sulphate and Chloride) in the Cuatricentenario, El Tigre, Jose, La Arenosa, La Horqueta and Yaracuy substations in order to find the mathematical relationship between the aforementioned parameters and the speed of corrosion, to predict the corrosion process in these areas of study and besides, indicate the variables that affect the said process. The obtained results show that sulphate chloride and TDH variables significantly affect the metallic structures located in the aforementioned substations. In addition to that, an atmospheric corrosion map was built for the Trunk Transmission System to evaluate the behaviors of the speed of corrosion in the substations that were studied.

Keywords: corrosion, speed of corrosion, meteorological parameters, air-borne chemicals parameters, multiple linear regression.

1. INTRODUCCIÓN

La exposición de metales a la atmósfera es la causa principal de las pérdidas en corrosión, definiéndose éste como el deterioro que sufren los materiales cuando interactúan con el medio ambiente que trabajan. Es por ello, que

realizar estudios en corrosión hace posible, predecir el comportamiento de los materiales expuestos al ambiente, aportando grandes ventajas al emplear técnicas de mantenimiento que permitan proteger las estructuras metálicas.

Las Subestaciones que pertenecen al Sistema de Transmisión Troncal de Edelca, cuentan con una serie de equipos y captadores que permiten obtener datos de parámetros meteorológicos y aeroquímicos respectivamente, la cual es procesada por el Laboratorio de Corrosión, unidad perteneciente al Área de Instalaciones y Equipos Mecánicos del Centro de Investigaciones Aplicadas (CIAP), con la finalidad de conocer el comportamiento de la corrosión en las diferentes atmósferas donde se encuentran. Sin embargo, debido a la situación geográfica de las subestaciones y la dificultad en la logística para realizar el estudio de la corrosión, se hace necesario el procesamiento estadístico de los datos obtenidos en diferentes períodos de las variables meteorológicas, aeroquímicas y de la velocidad de corrosión, a fin de obtener modelos de regresión lineal múltiple que permitan establecer una relación matemática entre ellas determinando la mejor ecuación de correlación de corrosión, e isolíneas de los mapas de corrosividad atmosférica que reflejen la acción del proceso de corrosión y predigan el comportamiento de los materiales metálicos en subestaciones donde no se posea información.

El tema es de interés, ya que señala a la corrosión atmosférica como el principal causante de la destrucción de estructuras metálicas, construcciones y aleaciones expuestas a ellas. De lo anterior, se dice que la investigación es importante para el Laboratorio de Corrosión perteneciente al Centro de Investigaciones Aplicadas, ya que permitirá a través del tratamiento estadístico de los datos, obtener ecuaciones de correlación que hagan posible predecir el dato de corrosión (velocidad de corrosión) en función de los parámetros meteorológicos y aeroquímicos, con el fin de elaborar un Mapa de Corrosividad Atmosférica para el Sistema de Transmisión Troncal de Edelca, donde se represente gráficamente el dato de corrosión de las diferentes regiones, además de disponer de información sobre el alcance de este fenómeno y criterios sobre la selección del material del que deben estar fabricados los componentes, según el grado de corrosividad del ambiente específico.

2. ANTECEDENTES

Electrificación del Caroní, C.A (Edelca) es la empresa de generación hidroeléctrica más importante que posee Venezuela, produciendo electricidad a través de sus grandes centrales hidroeléctricas, desempeñando un papel fundamental en el desarrollo económico y social de Venezuela. A partir del año 1969, Edelca empieza a desarrollar el Sistema de Transmisión Troncal, a fin de transportar, mediante líneas y subestaciones de extra alta tensión, grandes cantidades de energía a largas distancias y en niveles de voltajes muy elevados. Desde su creación, el personal del Departamento de Mantenimiento de Transmisión realiza trabajos de mantenimiento preventivo con el objetivo de garantizar el buen funcionamiento del Sistema Eléctrico. Sin embargo a partir del año 1979, las subestaciones El Tigre y San Gerónimo, comenzaron a experimentar salidas forzadas por mantenimiento, a causa de los daños por corrosión presentes en las partes metálicas de sus aisladores.

En la actualidad, el Centro de Investigaciones Aplicadas de Edelca, desde el inicio de sus funciones en el año 2004, cuenta con el Laboratorio de Corrosión que estudia las diferentes subestaciones y líneas de transmisión del país, a fin de determinar el daño de la corrosión atmosférica en los materiales. Es un hecho bien comprobado, a través de la experiencia práctica que se tiene sobre el comportamiento de estructuras reales y por los resultados de numerosos ensayos, que la velocidad de corrosión de los metales en la atmósfera puede ser decenas e incluso centenares de veces mayor en unos lugares que en otros, lo que justifica el interés de conocer las variables fundamentales que operan en la corrosión atmosférica y que originan una gran dispersión de resultados. (Berukshitis y Klark, 1966).

El tratamiento estadístico de los datos de parámetros meteorológicos, aeroquímicos y de velocidad de corrosión, es de gran importancia para evaluar la relación existente entre ellos, a través de la regresión lineal múltiple. Según Bacchini (2007), el análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables y se adapta a una amplia variedad de situaciones. Es una colección de herramientas estadísticas para encontrar estimaciones de los parámetros del modelo de regresión. Los modelos para predecir el daño por corrosión de los metales en la atmósfera tienen su utilidad para conocer la durabilidad de las estructuras metálicas. La literatura especializada en corrosión ofrece un gran número de funciones de daño que relacionan la corrosión con datos ambientales. A continuación se muestra en la Tabla 1 los resultados de diferentes estudios sobre

corrosión atmosférica referenciados por Morcillo M. et al (1999).

Tabla 1: Funciones de daño de la corrosión atmosférica anual (μm) del acero al carbono

AUTORES	ÁMBITO	FUNCIÓN DE DAÑO (Corrosión anual en μm)
Feliu y Col. (1993)	España (95 puntos)	$C = 0,78(\text{HR}) + 1,22(\text{T}) + 0,173(\text{Cl}) + 0,30(\text{S}) - 52,68$ ($R=0,832$)
Morcillo y Feliu. (1993)	España (150 puntos)	$C = 0,259(\text{S}) + 0,431(\text{Cl}) + 20,71$ ($R=0,75$)
Benaries y Lipfert. (1986)	Mundial (72 puntos)	$C = 0,34(\text{S}^*) + 36,53$
Feliu, Morcillo y Feliu Jr (1993)	Mundial (324 puntos)	$C = 26,6(\text{S}) + 57,4(\text{Cl}) + 33,0$ ($R=0,73$)
Haagenrud et al. (1985)	Noruega (15 puntos)	$C = 0,606(\text{S}) + 22,36$
Kucera et al. (1986)	Escandinavia (32 puntos)	$C = 0,47(\text{S}) + 0,42(\text{Cl}^*) + 14$
Haynie y Upham. (1974)	EEUU (57 puntos)	$C = 325 e^{[0,00275(\text{S}^*) - (163,2 \text{ HR})]}$

Se observa en la Tabla 1 que en las funciones de daño interviene un número reducido de variables significativas como son la HR= Humedad relativa media anual (%), T = Temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$), Cl = Salinidad atmosférica media anual (mg Cl.m-2.d-1), S= Velocidad de depósito de SO₂ media anual (mg. SO₂ m-2.d-1), S*= Concentración media anual de SO + Cl- (mg. SO₂ m-2.d-1), Cl*= Concentración de Cl- en precipitación (mg Cl.m-2.d-1) y S' = Concentración media anual de SO₂ en la atmosfera (ppm).

Estudios recientes establecen ecuaciones que permiten predecir los valores de la velocidad de corrosión de otros materiales a través de funciones logarítmicas (ver Tabla 2). González et al. (2007) correlacionaron la velocidad de corrosión atmosférica del cobre obtenida mediante exposición atmosférica en estaciones en la provincia de Las Palmas con las distintas variables que intervienen en el proceso corrosivo, encontrando que en las funciones de daño intervienen como variables significativas el Cl, S y TDH debido a la particularidad de las atmósferas estudiadas. Díaz (2001) estudió el efecto de la corrosión atmosférica sobre el cinc y el acero galvanizado expuestos ambos a las atmósferas de la provincia de Santa Cruz de Tenerife, y determinó la concentración de contaminantes atmosféricos tales como los iones cloruro y al anhídrido sulfuroso, además de las horas de tiempo de humectación obtenidas a partir de la humedad relativa.

Tabla 2: Funciones de daño de la corrosión atmosférica anual (μm) del Cobre y Cinc.

AUTORES	ÁMBITO	FUNCIÓN DE DAÑO (Corrosión anual en μm)
González et al. (2007)	España	$\text{Log (Vc)} = -0,3118 + 3,6836 \cdot \log t + 0,0109(\text{Cl}) + 0,5087(\text{S}) - 6,19\text{E}-04(\text{TDH})$ $R^2=0,9684$ (Ec. 1)
Díaz (2001)	España	$\text{LnVc} = 2,2635 + 0,0723 [\text{Cl}] + 0,188 \ln \text{TDH} - 0,0076 [\text{Cl}] [\text{SO}_2] -$ $(0,7943 + 0,0386 [\text{Cl}] - 0,0155 [\text{Cl}] [\text{SO}_2]) \ln t + 0,5794 \text{D}_2 + 1,0107$ $\text{D}_3 + 1,4649 \text{D}_4 + 1,4702 \text{D}_5$ (Ec.2)

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Sistema de Transmisión Troncal de Edelca, cuenta con estructuras metálicas, construidas con acero galvanizado tales como torres de alta tensión, pórticos y bastidores; además de otros elementos como cables, aisladores, pararrayos, conductores y diversos conectores construidos con diversos tipos de elementos. Para el buen desempeño de los materiales y equipos, se cuenta con un plan de mantenimiento y prevención de la corrosión, a fin de evitar el deterioro apreciable de los mismos, además de situaciones peligrosas y fallas en el sistema.

El Laboratorio de Corrosión (LACOR), tiene como principal función atender solicitudes de servicio relacionadas a la minimización y prevención de los efectos de la corrosión sobre los equipos y materiales de las subestaciones y líneas de transmisión. El LACOR, cuenta desde el año 2005 con una serie de datos registrados de variables meteorológicas (temperatura, precipitación, humedad relativa, tiempo de humectación) y aeroquímicas (cloruro y sulfato) además de categorizaciones de corrosividad atmosférica, útiles para estimar y determinar el grado de

corrosión del material acero al carbono en los diferentes microclimas del Sistema de Transmisión Troncal de Edelca. Estos datos requieren de un tratamiento estadístico a fin de determinar la mejor ecuación de correlación y construir así el mapa de corrosividad atmosférica. Para la construcción del mapa de corrosividad atmosférica, fue necesario fijar previamente la influencia de los principales parámetros en la velocidad de corrosión y conocer, además, cómo varía estos parámetros a lo largo y ancho de la geografía de un país o territorio.

4. METODOLOGÍA

El problema objeto de estudio es de tipo descriptivo (Arias, 2004), ya que se miden de forma independiente las variables (parámetros meteorológicos y aeroquímicos de las subestaciones), para su posterior tratamiento estadístico. El diseño de la investigación es del tipo documental pues la información de los datos son extraídos de la obra de otros investigadores. La población que sirve como objeto de investigación son las dieciséis (16) subestaciones que conforman el Sistema de Transmisión Troncal de Edelca. La muestra estuvo constituida por seis (6) Subestaciones: Cuatricentenario, El Tigre, La Arenosa, La Horqueta, Jose y Yaracuy por contar con mayor data histórica de los parámetros meteorológicos y aeroquímicos.

Con la finalidad de obtener y conseguir respuestas relacionadas al problema en estudio se realizaron entrevistas del tipo no estructuradas. Para el desarrollo, cálculo y análisis estadísticos de los datos del estudio se utilizó el Programa SPSS versión 17. Para la representación del dato de corrosión, los mapas de corrosividad atmosférica, se hacen a través de isolíneas, utilizando el programa SURFER versión 9, el cual genera curvas de nivel por medio de métodos estadísticos y algoritmos de cálculos que permiten representar la tendencia de cada variable y extrapolar su magnitud para áreas de las que no se dispone de datos.

El procedimiento consistió en la recopilación y revisión de la base de datos del Laboratorio de Corrosión, mediante la verificación de las unidades de medida y del período de recogida de datos de los parámetros meteorológicos y aeroquímicos, de manera que cumplieran con lo establecido en la Norma ISO 9223. Posteriormente, se aplicó el Programa de Red Neuronal Artificial del Centro de Investigaciones Aplicadas a fin de estimar la velocidad de corrosión en las zonas donde no se conocía la data.

Los datos obtenidos de los parámetros meteorológicos (temperatura, precipitación, humedad relativa y tiempo de humectación), aeroquímicos (cloruro y sulfatos) y de velocidad de corrosión, se procesaron mediante el paquete estadístico SPSS 17 para obtener un modelo de regresión lineal múltiple en cada una de las subestaciones estudiadas. Se realizaron pruebas interviniendo todos los parámetros meteorológicos y aeroquímicos e interviniendo solamente las variables TDH, Sulfato y Cloruro propuestas por la Norma ISO 9223. Además, los modelos de regresión lineal múltiple se evaluaron a través de las medidas de bondad y pruebas de hipótesis. Finalmente, para la construcción del mapa de corrosividad atmosférica del sistema de transmisión troncal del Edelca, se utilizó como de base de datos, las ecuaciones de regresión lineal múltiple obtenidas en cada una de las subestaciones en estudio, así como también valores de estaciones que se encuentran ubicadas en diferentes regiones del país y posteriormente, se procesaron los datos en el programa SURFER 9 para obtener las isolíneas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 SUBESTACIÓN YARACUY

A manera de ejemplo, se presentan los resultados obtenidos en la Subestación Yaracuy, los cuales se clasifican en dos partes. En la primera parte se presentan las pruebas interviniendo todos los parámetros meteorológicos: T (la temperatura media anual en °C), HR (humedad relativa media anual en %) P (los días de precipitación al año), TDH (fracción anual del número de horas/año en que la HR>80% y T>0°C) y aeroquímicos: SO₂ (contaminación por sulfato en mg.SO₂ /m².d) y Cl-(contaminación por cloruro mg. Cl-/m².d) con la velocidad de corrosión en µm. En la segunda parte, interviniendo únicamente las variables TDH, Sulfato y Cloruro propuestas por la Norma ISO 9223.

Regresión Lineal Múltiple utilizando las Variables Meteorológicas y Aeroquímicas. Mediante el análisis de regresión múltiple se obtuvieron los coeficientes de regresión (ver Tabla 3), que permitieron establecer el modelo de ecuación siguiente: $V_c = 135,028 - 0,767(SO_2) + 0,159(Cl^-) - 4,003(T) + 0,018(HR) - 0,021(P) + 12,289(TDH)$.

Tabla 3. Coeficientes de regresión. Subestación Yaracuy

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	135,028	21,641		6,239	,000
	Sulfato	-,767	,973	-,113	-,788	,441
	Cloruro	,159	,143	,200	1,108	,282
	Temp	-4,003	,785	-,766	-5,097	,000
	Hum_rel	,018	,203	,015	,091	,928
	Precipitacion	-,021	,023	-,185	-,951	,353
	TDH	12,289	5,499	,367	2,235	,038

A objeto de determinar si el modelo proporciona un ajuste y explicación satisfactorios para los datos que se recolectaron, se evaluó a través de las medidas de bondad de ajuste.

Medidas de Bondad del Ajuste. Las medidas que indican hasta que punto se ajusta la ecuación de regresión múltiple a los datos observados son el error estándar (Se), coeficiente de correlación (R) y el coeficiente de determinación múltiple (R^2). Los resultados arrojaron un error estándar de estimación $Se = 4,89$ indicando un alto grado de dispersión entre los valores observados y estimados, para ello se tiene en cuenta que a menor Se, existe mayor ajuste en la ecuación de predicción. Además, un coeficiente de correlación $R = 0,843$ indicando una correlación alta entre las variables independientes y la velocidad de corrosión. Finalmente, el coeficiente de determinación múltiple, $R^2 = 0,710$ indica que el modelo explica 71% la relación lineal entre la Velocidad de Corrosión y los parámetros meteorológicos y aeroquímicos.

Evaluación del modelo como un todo. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando la prueba F para evaluar si existía relación entre la variable dependiente y por lo menos una de las variables independientes. El procedimiento ANOVA, prueba la hipótesis nula de que todos los valores β son cero contra la alternativa de que por lo menos un β no es cero. Los coeficientes β_1 a β_6 del modelo de regresión se identificaron de la manera siguiente: β_1 =Sulfato; β_2 =Cloruro; β_3 =Temperatura; β_4 =Humedad Relativa; β_5 =Precipitación y β_6 =Tiempo de Humectación. De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 4 de Análisis de Varianza, el valor F calculado (F_c) es 7,754. Para un nivel de confianza del 95%, se obtuvo el valor teórico de la prueba F, siendo $F_{0,05;6,19} = 2,63$. Por lo tanto, ya que $F_c > 2,63$ ($7,754 > 2,63$) se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto se puede concluir al nivel de 5%, que existe relación lineal entre la Velocidad de Corrosión y las variables independientes.

Tabla 4. Análisis de Varianza. Subestación Yaracuy

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1113,327	6	185,554	7,754	,000 ^a
	Residual	454,685	19	23,931		
	Total	1568,012	25			

Pruebas individuales para seleccionar las variables significativas. El procedimiento para seleccionar las variables significativas consiste en introducir secuencialmente todas las variables independientes empezando por la de mayor coeficiente de correlación. El valor del estadístico F sirve de criterio para determinar si esta primera variable y cada una de las sucesivas se dejan en la ecuación de regresión o se elimina de ella. Tomando en cuenta que el valor de significancia debe ser $< 0,05$ ya que se estableció un intervalo de confianza del 95%.

En la Tabla 5 se presenta la correlación entre la Velocidad de Corrosión y las variables independientes. El nivel crítico asociado al estadístico F debe ser menor a 0,05. Tomando en cuenta este criterio, las variables Temperatura y TDH están por debajo del valor. Sin embargo, se escogió la variable con mayor coeficiente de correlación (R) para incluirla como primera variable en la ecuación de regresión, en este caso Temperatura por tener mayor correlación que el resto de las variables.

Una vez determinada la primera variable que ingresa en la ecuación de regresión, se procede a combinar con el

resto de las variables y observar el comportamiento del nivel crítico asociado al estadístico F. En la Tabla 6 se observa el aporte que tiene cada una de las variables.

Tabla 5. Correlación entre las variables. Subestación Yaracuy

VARIABLE	R	R ²	G1	G2	F	Significancia cambio en F
Sulfato	0,010	0,000	1	28	0,003	0,959
Cloruro	0,003	0,000	1	28	0,000	0,985
Temperatura	0,696	0,484	1	33	30,995	0,000
HR	0,058	0,003	1	34	0,113	0,738
Precipitación	0,004	0,000	1	34	0,000	0,984
TDH	0,406	0,165	1	30	5,920	0,021

Tabla 6. Aporte de las variables, añadiendo un segundo parámetro. Subestación Yaracuy.

VARIABLE	R	R ²	R ² Corregido	G1	G2	F	Significancia en F
Temperatura	0,716	0,513	0,477	2	27	14,212	0,000
Sulfato							0,270
Temperatura	0,782	0,612	0,583	2	27	21,293	0,000
Cloruro							0,007
Temperatura	0,696	0,485	0,452	2	32	15,048	0,000
HR							0,887
Temperatura	0,702	0,493	0,461	2	32	15,546	0,000
Precipitación							0,470
Temperatura	0,755	0,569	0,539	2	28	18,507	0,000
TDH							0,035

De acuerdo a la Tabla 6 el valor de probabilidad asociado al valor F 21,293 para la variable Temperatura y Cloruro es 0,000 y 0,007 respectivamente, siendo ésta menor al nivel de significación establecido (0,05). Además, al adicionar la variable Cloruro, el valor de R² corregido aumenta, sugiriendo un aporte significativo en la ecuación. Una vez conocidas las dos variables significativas que contribuyen al poder explicativo del modelo de regresión, se procede a ingresar una tercera variable para verificar su importancia o no para el modelo. La Tabla 7 muestra los resultados:

Tabla 7. Aporte de las variables, añadiendo un tercer parámetro. Subestación Yaracuy.

Variable	R	R ²	R ² Corregido	G1	G2	F	Significancia en F
Temperatura	0,783	0,613	0,568	3	26	13,712	0,000
Cloruro							0,016
Sulfato							0,826
Temperatura	0,786	0,618	0,574	3	26	14,006	0,000
Cloruro							0,007
HR							0,537
Temperatura	0,784	0,615	0,570	3	26	13,830	0,000
Cloruro							0,011
Precipitación							0,669
Temperatura	0,827	0,683	0,640	3	22	15,822	0,000
Cloruro							0,016
TDH							0,067

Se observa en la tabla anterior, que al añadir una tercera variable al modelo de regresión, en este caso, Tiempo de Humectación, el aumento del valor de R² corregido sugiere un aporte significativo a la ecuación. Sin embargo no

cumple con el criterio de que el nivel crítico asociado a F sea menor a 0,05.

Finalmente, las variables significativas al modelo de regresión son Temperatura y Cloruro obteniendo mediante el nuevo análisis de regresión lineal múltiple, la ecuación

$$Vc = 144,903 - 4,486(T) + 0,311(Cl); R^2 = 0,61; Se = 4,97$$

5.2 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE UTILIZANDO LAS VARIABLES RECOMENDADAS POR LA NORMA ISO 9223

A continuación se presenta el modelo de ecuación de regresión lineal para la Subestación Yaracuy, interviniendo las variables Sulfato, Cloruro y TDH con la Velocidad de Corrosión. El modelo establecido a partir del análisis de regresión (ver Tabla 8) es el siguiente:

$$Vc = 36,808 - 605(SO_2) - 0,023(Cl) + 15,404(TDH)$$

Tabla 8. Coeficientes de regresión interviniendo las variables propuestas en ISO 9223. Subestación Yaracuy

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	36,808	7,568		4,864	,000
Sulfato	-,605	1,488	-,089	-,406	,688
Cloruro	-,023	,168	-,029	-,136	,893
TDH	15,404	6,852	,459	2,248	,035

La evaluación del modelo es fundamental para determinar si proporciona un ajuste y explicación satisfactorios para los datos que se han recolectado. A continuación se presentan los resultados:

Medidas de Bondad del Ajuste. Los resultados obtenidos fueron error estándar de estimación, $Se = 7,58$, mostrando excesiva dispersión entre los valores observados y estimados, notando su lejanía del cero, el coeficiente de correlación $R = 0,439$ indicando una correlación moderada y coeficiente de determinación múltiple, $R^2 = 0,192$ indicando que el modelo explica 19,2% la relación lineal entre la Velocidad de Corrosión y las variables Sulfato, Cloruro y TDH.

Evaluación del modelo como un todo. Los coeficientes β_1 al β_3 del modelo de regresión se identificaron de la manera siguiente: β_1 =Sulfato; β_2 =Cloruro; β_3 = Tiempo de Humectación. El Análisis de Varianza (ver Tabla 9), arrojó un valor F calculado (Fc) de **1,748**. Para un nivel de confianza del 95%, se obtiene el valor teórico de la prueba F, utilizando la tabla de distribución Fisher, siendo $F_{0,05;3,22} = 3,05$

Tabla 9. Análisis de Varianza según Norma ISO 9223. Subestación Yaracuy

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	301,840	3	100,613	1,748	,186 ^a
Residual	1266,171	22	57,553		
Total	1568,012	25			

Dado que $F_c < 3,05$ se acepta la hipótesis nula, por lo tanto se puede concluir al nivel de 5%, que no existe relación lineal entre la Velocidad de Corrosión y las variables independientes. Sin embargo, es necesario realizar pruebas individuales a cada variable y determinar la contribución en el modelo de regresión.

Pruebas individuales para seleccionar las variables significativas. La correlación entre la Velocidad de Corrosión y las variables independientes propuestas en la Norma ISO 9223 se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Correlación entre variables en Yaracuy (Norma ISO 9223)

VARIABLE	R	R ²	G1	G2	F	Significancia cambio en F
Sulfato	0,010	0,000	1	28	0,003	0,959
Cloruro	0,003	0,000	1	28	0,000	0,985
TDH	0,406	0,165	1	30	5,920	0,021

El nivel crítico asociado al estadístico F debe ser menor a 0,05. Tomando en cuenta este criterio, la variable TDH está por debajo del valor, siendo la única en contribuir significativamente en el modelo de regresión. Por lo tanto, luego de realizar un nuevo análisis de regresión lineal múltiple, se obtiene la ecuación siguiente:

$$Vc = 34,680 + 12,153(TDH); R^2 = 0,165; Se = 6,61$$

De igual manera, para obtener el modelo de regresión lineal múltiple en las Subestaciones Cuatricentenario, El Tigre, José, La Arenosa y La Horqueta se aplicó la metodología antes descrita.

5.3 MODELO DE ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN PARA LAS SUBESTACIONES

A continuación en la Tabla 11 se hacen las comparaciones entre los modelos obtenidos al intervenir el subconjunto de variables (T, HR, P, TDH, SO₂, Cl⁻) y las propuestas por la norma ISO 9223 (SO₂, Cl⁻, TDH).

Tabla 11. Comparación de modelos de regresión para estimar la Velocidad de Corrosión

SUBESTACIÓN	Variables		ECUACIÓN FINAL
	T,HR,P,TDH,SO ₂ , Cl ⁻	SO ₂ , Cl ⁻ ,TDH	
Cuatricentenario	Vc=32,502+13,456 (TDH) R ² = 0,190; Se=4,40	Vc=32,502+13,456 (TDH) R ² = 0,190; Se=4,40	Vc=32,502+13,456 (TDH)
El Tigre	Vc= 46,038-0,183(HR) R ² = 0,348; Se=1,22	N/A	Vc= 46,038-0,183(HR)
Jose	Vc= 33,014-0,420 (SO ₂) +12,442(TDH) R ² = 0,344; Se=4,16	Vc= 33,014-0,420 (SO ₂) +12,442(TDH) R ² = 0,344; Se=4,16	Vc=33,014-0,420(SO ₂) +12,442(TDH)
La Arenosa	Vc=34,012+ 0,195 (Cl ⁻) R ² =0,469; Se=4,01	Vc=34,012+0,195 (Cl ⁻) R ² = 0,469; Se= 4,01	Vc= 34,012+0,195 (Cl ⁻)
La Horqueta	Vc= 35,208+1,306 (SO ₂)-0,136(HR) R ² =0,990;Se=0,4; R ² corregido=0,98	Vc= 23,350+1,717 (SO ₂) R ² =0,961;Se=0,82; R ² corregido=0,95	Vc= 35,208+1,306 (SO ₂)-0,136(HR)
Yaracuy	Vc=144,903-4,486(T)+0,311(Cl ⁻) R ² =0,612;Se=4,97; R ² corregido=0,58	Vc= 34,680+12,153 (TDH) R ² =0,165;Se=6,61 R ² corregido=0,137	Vc=144,903-4,486(T)+0,311(Cl ⁻)

De acuerdo a la tabla anterior de comparación de modelos de regresión para estimar la velocidad de corrosión, se observan las variables que inciden en el proceso de corrosión del material de acero al carbono. En la Subestación Cuatricentenario, al intervenir el subconjunto de variables (T, HR, P, TDH, SO₂, Cl⁻) y las propuestas por la normas ISO 9223 (TDH, SO₂, Cl⁻), se obtuvo el mismo modelo de ecuación, que incluye el TDH como variable significativa, debido a las precipitaciones y condensaciones propias de la región, en la Subestación El Tigre, la ecuación final se obtiene al utilizar el subconjunto de variables, quedando la HR como el elemento de mayor contribución indicando así la humedad depositada en los materiales metálicos. En la Subestación José, el modelo de ecuación es igual al incluir todas las variables e interviniendo los parámetros recomendados en la norma ISO 9223, el SO₂ es la variable aeroquímica influyente debido a los complejos industriales existentes y en cuanto a la variable meteorológica el TDH influye por el clima típico de la región. En las Subestaciones la Horqueta, (afectada por el SO₂ y HR) y Yaracuy (afectada por T y Cl⁻), el modelo de ecuación final escogido, es el que interviene todas las variables, ya que tiene mayor coeficiente de determinación múltiple, menor el error estándar y mayor el coeficiente de determinación corregido. Por último, la subestación la Arenosa obtuvo la misma ecuación

para ambos casos y es afectada por el cloruro, ya que se encuentra relativamente cercana al océano.

Las ecuaciones finales obtenidas, muestran que al utilizar las variables (T, HR, P, TDH, SO₂, Cl⁻) y aplicando, medidas de bondad de ajuste, evaluación del modelo como un todo y las pruebas individuales para seleccionar las variables significativas, es la mejor opción para definir el proceso de corrosión de los materiales metálicos.

5.4 MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA

Para la construcción del mapa de corrosividad atmosférica, se utilizan las isolíneas como medio de representación del dato de corrosión a lo largo del territorio nacional y se requiere el uso de las ecuaciones de regresión lineal obtenidas para estimar la velocidad de corrosión en las subestaciones y los valores promedios de los parámetros meteorológicos y aeroquímicos. (Ver Figura N° 1).

En la Figura 1 se observa que la mayor velocidad de corrosión se encuentra hacia el noroeste de Venezuela alcanzando los 92µm/a, indicando que factores como: temperatura, precipitación, humedad relativa, tiempo de humectación, sulfato y cloruro inciden con mayor intensidad, esto ocurre específicamente hacia las estaciones del estado Falcón. Hacia la zona central del país, la velocidad de corrosión se expresa en menor grado y se estima en 36µm/a, debido a los numerosos complejos industriales que se encuentran ubicados, además de su cercanía al mar. Finalmente, se observa que el proceso de corrosión se da hacia el norte de Venezuela, donde se ubican las subestaciones del sistema de transmisión troncal de Edelca, afectando en mayor magnitud a las subestaciones José, El Tigre, La Arenosa y Yaracuy, pues se encuentran en una atmósfera industrial-marina que facilita la agresividad en los materiales de acero al carbono, además se clasifica según la categoría de corrosividad como C3 (corrosividad media).

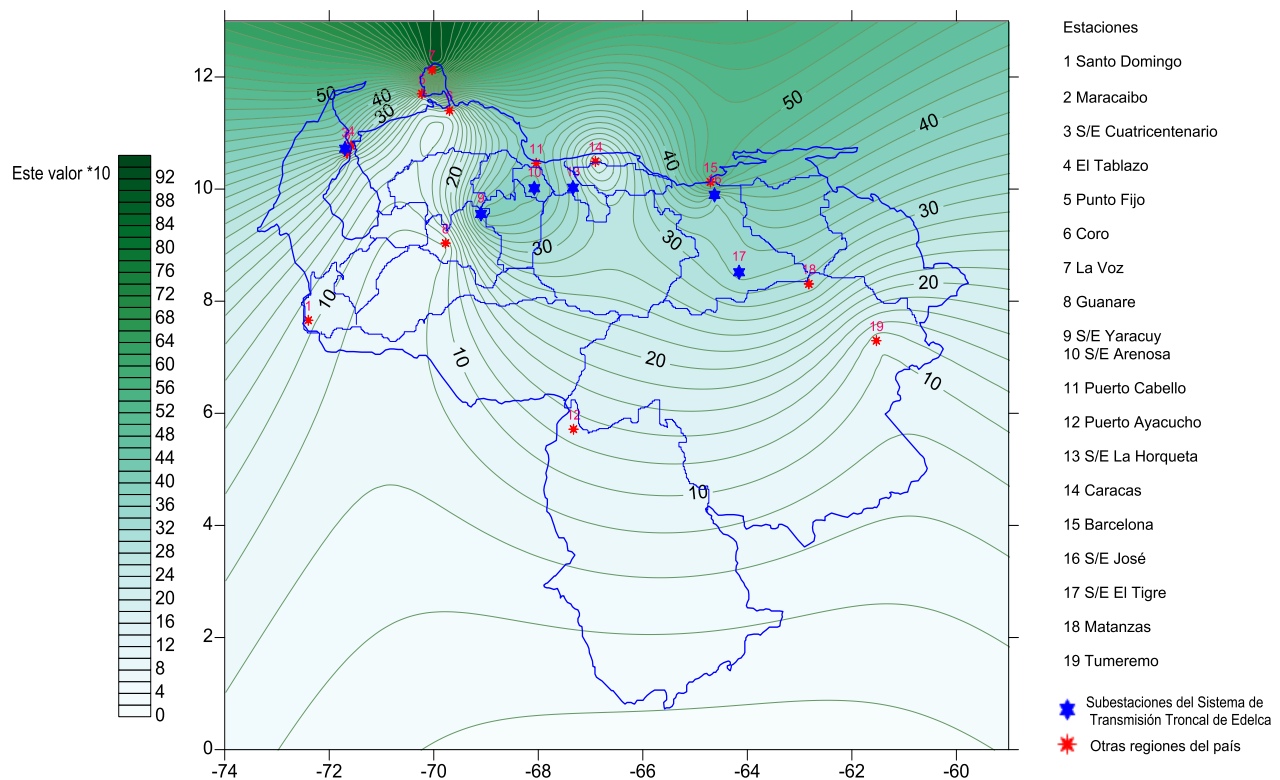


Figura 1. Mapa de Isolíneas de Corrosividad Atmosférica

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con las ecuaciones de regresión lineal obtenidas para pronosticar la velocidad de corrosión en las subestaciones del Sistema de Transmisión Troncal de Edelca, se observa que sólo unas pocas variables inciden en el proceso de corrosión:

- En la Subestación Cuatricentenario, la velocidad de corrosión está influenciada por el TDH indicando que en el sitio existen períodos de condensación y precipitación del agua que caen sobre la superficie del metal.
- En el proceso corrosivo de la Subestación El Tigre, solo incide la variable humedad relativa, mostrando que la corrosión del metal se desarrolla en películas delgadas de humedad depositadas sobre la superficie del mismo.
- En la Subestación José, el modelo de regresión se ve afectada por las variables SO₂ debido a la cercanía de centros industriales y TDH, gracias a las lluvias que se depositan en el metal.
- En la Subestación La Horqueta se nota la influencia del SO₂ y la humedad relativa.
- En la Subestación La Arenosa la velocidad de corrosión es afectada por el Cl⁻, debido a la presencia de aerosol marino, igual ocurre en la Subestación Yaracuy añadiendo a éste la temperatura.

De los modelos de regresión lineal múltiples obtenidos se deben utilizar las variables (T, HR, P, TDH, SO₂, Cl⁻) para definir el modelo de ecuación. Con la construcción del mapa de isolíneas de corrosividad atmosférica para el acero al carbono, se logra que el Laboratorio de Corrosión cuente con una representación gráfica de la estimación de la velocidad de corrosión, donde se observa la mayor potencialidad corrosiva hacia el noroeste del país donde se ubica la Subestación Cuatricentenario y hacia el centro donde se encuentra las Subestaciones La Arenosa y Yaracuy.

REFERENCIAS

- Arias, Fidias G. (2006). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (5ta ed.). Episteme, Caracas, 143 p.
- Bacchini Roberto y Lara Viviana. (2007) Estadística. Probabilidad e Inferencia utilizando Microsoft Excel y Spss. (1era ed.). Omicron Sistem, Buenos Aires, 190 p.
- Díaz Rodríguez y Francisco Miguel. (2001) Estudio de la corrosión atmosférica del cinc y el acero galvanizado. España, 2001. Universidad de la Laguna. Tesis Doctoral.
- Feliu S. y Morcillo M. (1982). Corrosión y protección de los metales en la atmósfera. CENIM, Madrid, 246 p.
- Feliu M., Manuel M. (1993). Mapas de España de corrosividad atmosférica. Programa CYTED, Madrid, 431 p.
- Genescá J. (1995). Más allá de la herrumbre. III. Corrosión y medio ambiente. Fondo de Cultura Económica. México D. F. 117 p.
- G.K. Berukshitis y G.B. Klark. (1966) Corrosion of metals and alloys. Tomashov y Mirulyubev. Jerusalem. 281 p.
- International Standards Organization (1991). Norma ISO 9223: Corrosion of Metal and alloys. Classification of corrosivity of atmospheres. Ginebra
- González, P.M., Mos, D.M., Santana, F.J. (2008). Modelación de la corrosión atmosférica del cobre en la provincia de Las Palmas. Estudios mediante técnicas clásicas y electroquímicas. Port. Electrochim. Acta, 2008, vol.26, no.1, p.125-145.
- Mariaca L., Genescá J., Uruchurtu J. y Hernández L. S. (1999). Corrosividad atmosférica. Plaza y Valdez, México, 209 p.
- Morcillo M., Almeida E. Rosales, B., Uruchurtu J. y Marrocos M. (1999). Corrosión y protección de metales en las atmósferas de iberoamérica. Parte I: Mapa de Iberoamérica de corrosividad atmosférica. CYTED, Madrid, 816 p.
- Uruchurtu J., Genescá J., Hernández L., Mariaca L. y Rodríguez C. (1994). Informe Final Proyecto MICAT.
- Walpole R., Raymond H., Myers S. y Keying Y (2007). Probabilidad y estadística para Ingeniería y Ciencias. (8va edición). Pearson Educación, México, 816 p.