



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**



**CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIVIDAD ATMOSFERICA PROVOCADA
POR AGENTES AEROQUIMICOS Y FACTORES METEOROLOGICOS QUE
AFECTAN LOS EQUIPOS Y MATERIALES EN CVG EDELCA
SUBESTACIÓN LA ARENOSA A 765 kV**

Autores:

Prof.: Julio C. Silva

Tutor Académico

Br.: Lisbeth Pèrez

C.I.: 12854231

Ing.: Lizeth Linares

Tutor Industrial

Br.: Jhon Pappa

C.I.: 12473007

Valencia, Septiembre de 2007

**CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIVIDAD ATMOSFERICA PROVOCADA
POR AGENTES AEROQUIMICOS Y FACTORES METEOROLOGICOS QUE
AFECTAN LOS EQUIPOS Y MATERIALES EN CVG EDELCA
SUBESTACIÓN LA ARENOSA A 765 kV**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO QUÍMICO

Autores:

Br.: Lisbeth Pérez

C.I.: 12854231

Br.: Jhon Pappa

C.I.: 12473007

Valencia, Septiembre de 2007

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado Titulado: **“CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIVIDAD ATMOSFERICA PROVOCADA POR AGENTES AEROQUIMICOS Y FACTORES METEOROLOGICOS QUE AFECTAN LOS EQUIPOS Y MATERIALES EN CVG EDELCA SUBESTACIÓN LA ARENOSA A 765 kV”**, realizado por los bachilleres Pérez R. Lisbeth Carolina, C.I.: 12854231 y Pappa T. Jhon Carlos, C.I.: 12473007, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo y que no nos hacemos responsables de su contenido, pero lo encontramos correcto en su forma y presentación..

Prof.: Julio C. Silva C.

Presidente

Prof.: Iván Uzcátegui
Jurado

Prof.: María C. Colmenares
Jurado

Valencia, Septiembre de 2007

AGRADECIMIENTOS

Primeramente le agradecemos a Dios Todopoderoso, nuestro Señor Jesucristo cuya palabra tan vigente nos ha dado la fortaleza necesaria para afrontar los retos y levantarnos después de cada caída.

A nuestros seres queridos por apoyarnos y estimularnos para ser cada día mejores personas.

A los profesores: Julio C. Silva por su dedicada labor como tutor académico, sus sabios consejos y su don de gente; a la Prof. Leyda Escalona por su valiosísima colaboración, apoyo y paciencia al dejarnos trabajar en el Laboratorio Tecnológico del Ambiente (LABTA), y sobre todo por su confianza.

A nuestra tutora industrial, Ing. Lizeth Linares por guiarnos hacia el mejor camino en función de realizar un excelente trabajo de investigación y por enseñarnos que con esfuerzo y dedicación se pueden lograr excelentes resultados en todas las metas trazadas.

A los Ingenieros Clemente Rodríguez y María del Valle Bastidas por su amistad, sugerencias y colaboración desinteresada.

Al personal del LABTA, Ing. Jairo Martínez por brindarnos ayuda en los momentos de más trabajo y por su amistad, así como también al Ing. Vicente Guerrero por sus consejos y oportunos asesoramientos. También a Leidy, Zuleyma Pérez y Peggy Londoño por siempre atendernos con cariño.

Al personal de la subestación EDELCA La Arenosa a 765 kV : Ing. Cándido Alonzo e Ing. Jean Pérez jefes de la subestación, al T.S.U Edgar Dudamel, Sr. Cruz Benavides por su buen humor y especialmente a los señores: Eduardo Ascanio, Anibal Valdivieso y Juan Herrera por colaborar con nosotros mes a mes en el cambio de colectores. A todos mil gracias por su apoyo y paciencia.

También de la Subestación La Arenosa a 765 kV, agradecemos especialmente a el Ing. Julián Gerdez por su apoyo desinteresado, su amistad y su oportuna ayuda al permitirnos viajar con él a diario, y a la Lic. Felicia Martínez por brindarnos su amistad y alegría a pesar de las dificultades. A Yelitza, y a la sra. Yalida por sus atenciones.

Por último y por eso no menos importante, a nuestros amigos amigos y colegas que nos han acompañado en este camino y que han compartido con nosotros tantas alegrías, sueños, tristezas, momentos difíciles, frustraciones y hasta algunos sustos. Hasta ellos nuestro agradecimiento.

DEDICATORIA

Este trabajo fruto de sacrificios, momentos felices y otros no tanto, se lo dedico con cariño:

A mis padres: Carlos y Maritza por siempre creer en mí, apoyarme y enseñarme a ser una mujer trabajadora y sin miedo al porvenir.

A mis abuelos: Ligia, Enrique Luis y especialmente a mi abuela Natalia Rosa quien se durmió en Señor esperando este gran momento y que nunca me ha abandonado. A ellos por su amor casi ciego y sus valiosas enseñanzas de vida.

A mi familia: mi esposo Frediry y mi hija Anais por su apoyo, comprensión y constante estímulo para salir adelante. Los Quiero Mucho

A mis suegros: Nora y Antonio, porque han sido para mi como mis segundos padres y por brindarme ese cariño y apoyo.

Lisbeth Pérez



SUMARIO

La presente investigación tiene como propósito categorizar la agresividad de la corrosividad atmosférica que afecta los equipos y materiales presentes en la subestación CVG Edelca – La Arenosa a 765 kV, a través de los principales agentes aeroquímicos y factores meteorológicos presentes en el medio circundante, mediante la ubicación estratégica de dispositivos (captadores y colectores) a diferentes alturas de exposición (nivel I a 1 m y nivel II a 18 m) propuestos para tal fin, se logró determinar la concentración y velocidades de deposición de los mismos en cada uno de los períodos de monitoreo.

Para clasificar la corrosividad atmosférica fue necesaria la utilización de estándares internacionales tales como la norma ISO 9223, la cual tiene parámetros bien definidos a través de las velocidades de deposición de dichos agentes aeroquímicos y factores meteorológicos que conllevan a categorizar la agresividad de la atmósfera circundante.

La metodología utilizada para el muestreo de los agentes aeroquímicos se realizó de acuerdo a las normas ISO 9225, mientras que para los análisis químicos de las muestras se emplearon métodos recomendados y eficaces tales como las normas ASTM D – 512 y D – 516, que son confiables de acuerdo a los parámetros internacionales establecidos.

La velocidad de deposición promedio del dióxido de azufre SO_2 fue de $1.793 \pm 0,001 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ y $1,937 \pm 0,001 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ para los niveles 1 y 2, respectivamente, durante todo el período de monitoreo, mientras que la velocidad de deposición promedio de cloruros Cl^- fue $38 \pm 9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ y $42 \pm 9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{día}$ para los niveles 1 y 2, respectivamente, se obtuvo también la velocidad de deposición de polvos atmosféricos fue de $2.0 \pm 0,8 \text{ g/ m}^2 \cdot \text{día}$ y $2.2 \pm 0,8 \text{ g/ m}^2 \cdot \text{día}$.



Cabe destacar que para categorizar la agresividad de la atmósfera circundante se tomó un tiempo de humectación experimental de un año (Mayo-2006 a Mayo-2007) dando un valor de 4610 horas/año, por lo que la corrosividad se clasificó en la categoría media C3.

Las velocidades de deposición de los agentes aeroquímicos no representa un ataque corrosivo importante, debido a que poseen valores bajos, no obstante, un leve ascenso en la humedad del medio puede llevar a considerar representativa la corrosividad de la atmósfera y por consiguiente en el deterioro de los equipos y materiales de la subestación.

Entre los métodos anticorrosivos recomendados podemos mencionar un recubrimiento de zinc inorgánico o fondo anticorrosivo a base de zinc para superficies de acero galvanizado y aluminio, mientras que para tanques, tuberías, accesorios, bastidores, etc, lo recomendable es un fondo anticorrosivo epoxídico o fenólico, seguido de un acabado de poliuretano del color acorde con el fluido almacenado.



SUMMARY

The present investigation must like intention categorize the aggressiveness of the atmospheric corrosivity that affects the present equipment and materials in substation CVG Edelca – La Arenosa to 765 kV through the main air-chemical agents and present meteorological factors in surrounding means, by means of the strategic location of devices (capturing and collectors) to different heights of exhibition (level 1 to 1 m and level 2 to 18 ms) proposed for such aim, in which it was managed to determine the concentration and speeds of deposition of such in each one of the periods of monitoreo.

In order to classify the atmospheric corrosivity the use of international standards was necessary such as the norm ISO 9223, which has parameters affluent defined through the speeds of deposition of these air-chemical agents and meteorological factors that entail to categorize the aggressiveness of the surrounding atmosphere. The methodology used for the sampling of the air-chemical agents was made according to norms ISO 9225, whereas for the chemical analyses of the samples recommended practices and effective were used such as norms ASTM D - 512 and D - 516, reliable ones according to the established international parameters.

The speed of deposition average of sulfur dioxide (SO_2) was of $1.793 \pm 0,001 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ and $1,937 \pm 0,001 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ for 2 levels 1 and respectively throughout the period of monitoreo, whereas the speed of deposition average of chlorides (CL^-) was $38 \pm 9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ and $42 \pm 9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ for levels 1 and 2 respectively, as well as the speed of atmospheric dust deposition was of $2.0 \pm 0,8 \text{ g m}^2 \cdot \text{day}$ and $2.2 \pm 0,8 \text{ g m}^2 \cdot \text{day}$.



Trabajo Especial de Grado



It is possible to emphasize that to categorizar the aggressiveness of the surrounding atmosphere a time from experimental humectación of (1) a year was taken (May-2006 to May-2007) giving a value of 4610 hour/year, reason why the corrosivity was classified in the category average C3. The speeds of deposition of the air-chemical agents do not represent an important corrosive attack, because they have low values, despite a slight ascent in the humidity of means can take to consider the corrosivity of the atmosphere and therefore in the deterioration of the equipment and materials of the substation representative. Between the recommended anticorrosive methods we can mention an inorganic zinc covering or anticorrosive bottom with zinc for surfaces of galvanized steel and aluminum, whereas for tanks, pipes, accessories, frames, etc, the recommendable thing is a epoxídico or phenolic anticorrosive bottom, followed of polyurethane finishing of the agreed color with the stored fluid.



SUMMARY

The present investigation must like intention categorize the aggressiveness of the atmospheric corrosivity that affects the present equipment and materials in substation CVG Edelca – La Arenosa to 765 kV through the main air-chemical agents and present meteorological factors in surrounding means, by means of the strategic location of devices (capturing and collectors) to different heights of exhibition (level 1 to 1 m and level 2 to 18 ms) proposed for such aim, in which it was managed to determine the concentration and speeds of deposition of such in each one of the periods of monitored.

In order to classify the atmospheric corrosivity the use of international standards was necessary such as the norm ISO 9223, which has parameters affluent defined through the speeds of deposition of these air-chemical agents and meteorological factors that entail to categorize the aggressiveness of the surrounding atmosphere. The methodology used for the sampling of the air-chemical agents was made according to norms ISO 9225, whereas for the chemical analyses of the samples recommended practices and effective were used such as norms ASTM D - 512 and D - 516, reliable ones according to the established international parameters.

The speed of deposition average of sulfur dioxide (SO₂) was of $1.793 \pm 0,001 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ and $1,937 \pm 0,001 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ for 2 levels 1 and respectively throughout the period of monitored, whereas the speed of deposition average of chlorides (CL⁻) was $38 \pm 9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ and $42 \pm 9 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{day}$ for levels 1 and 2 respectively, as well as the speed of atmospheric dust deposition was of $2.0 \pm 0,8 \text{ g m}^2 \cdot \text{day}$ and $2.2 \pm 0,8 \text{ g m}^2 \cdot \text{day}$.



Trabajo Especial de Grado



It is possible to emphasize that to categorizar the aggressiveness of the surrounding atmosphere a time from experimental humectación of (1) a year was taken (May-2006 to May-2007) giving a value of 4610 hour/year, reason why the corrosivity was classified in the category average C3. The speeds of deposition of the air-chemical agents do not represent an important corrosive attack, because they have low values, despite a slight ascent in the humidity of means can take to consider the corrosivity of the atmosphere and therefore in the deterioration of the equipment and materials of the substation representative. Between the recommended anticorrosive methods we can mention an inorganic zinc covering or anticorrosive bottom with zinc for surfaces of galvanized steel and aluminum, whereas for tanks, pipes, accessories, frames, etc, the recommendable thing is a epoxídico or phenolic anticorrosive bottom, followed of polyurethane finishing of the agreed color with the stored fluid.



INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
1.1. Descripción del Problema	3
1.2. Formulación del Problema	7
1.2.1. Situación Actual	8
1.2.2. Situación Deseada	8
1.3. Objetivos	
1.3.1. Objetivo General	9
1.3.2. Objetivos Específicos	9
1.4. Justificación	10
1.5. Limitaciones	11
1.6. Antecedentes	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	
2.1. El fenómeno de la corrosión	23
2.2. Mecanismos de la corrosión	24
2.3. Tipos de corrosión	26
2.4. Corrosión causada por la atmósfera	
2.4.1. Mecanismos de acción	31
2.4.2. Clasificación de la corrosión atmosférica	32
2.4.3. Tipos de atmósferas	32
2.4.4. Factores que ocasionan la corrosión atmosférica	33
2.4.5. Ciclo del azufre	35
2.4.6. Efectos de las variables meteorológicas	
2.4.6.1. Humedad relativa	36
2.4.6.2. Temperatura	37
2.4.6.3. Tiempo de humectación	38
2.5. Métodos de análisis cuantitativos	



Contenido	Pág.
2.5.1. Turbidimetría	38
2.5.2. Titulación por Precipitación (Determinación de Sulfato Norma ASTM D-516)	39
2.5.3. Titulación de Mohr (Determinación de Cloruros Norma ASTM D-512)	40
2.5.4. Método Gravimétrico (Determinación de Polvos Atmosféricos Norma ASTM D-1739)	41
2.5.5. Conductividad	41
2.6. Métodos para el control de la corrosión	
2.6.1. Selección del material	42
2.6.2. Inhibidores	43
2.6.3 Modificación del ambiente	43
2.6.4. Protección catódica	44
2.6.5. Recubrimientos	
2.6.5.1. Pinturas	45
2.6.5.2. Recubrimientos inorgánicos	46
2.6.5.3. Recubrimientos orgánicos	46
2.6.5.4. Recubrimientos metálicos	48
CAPÍTULO 3. MARCO DESCRIPTIVO	
3.1 Área de monitoreo	50
3.2 Duración del muestreo	
3.2.1 Niveles muestreados	51
3.3 Equipos y materiales para el monitoreo aeroquímico	
3.3.1 Captador de sulfatos	52
3.3.2 Captador de cloruros	53
3.3.3 Colector de polvos atmosféricos	54
3.4 Procesamiento de las muestras	
3.4.1 Análisis de sulfatos. Determinación de la sulfatación de la atmósfera	56
3.4.1.1 Fundamento del método de análisis	57



Contenido	Pág.
3.4.1.2 Materiales equipos y reactivos	58
3.4.1.3 Elaboración de la curva de calibración	59
3.4.1.4 Metodología para determinar la sulfatación de la atmósfera	63
3.4.1.5 Determinación de la concentración de sulfatos y velocidad de deposición de dióxido de azufre.	64
3.4.2. Determinación de la salinidad de la atmósfera. Análisis de Cloruros.	
3.4.2.1 Fundamento del método de análisis	66
3.4.2.2. Materiales, reactivos y equipos.	67
3.4.2.3 Determinación de la concentración y velocidad de deposición de los cloruros.	70
3.4.3. Análisis de polvos atmosféricos sedimentables	
3.4.3.1 Metodología para la cuantificación de los polvos atmosféricos sedimentables.	75
3.4.3.2 Cálculo de la velocidad de deposición	76
3.5. Categorización de la corrosividad atmosférica.	
3.5.1. Según los parámetros aeroquímicos.	77
3.5.2 Según los parámetros medioambientales	79
3.5.3 Procedimiento para la clasificación	79
3.6 Caracterización de la corrosividad atmosférica	
3.7 Procedimiento para la clasificación.	82
CAPÍTULO 4. DATOS EXPERIMENTALES	
4.1 Análisis de sulfatos	83
4.2 Análisis de cloruros	85
4.3 Polvos atmosféricos	87
CAPITULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	93
CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES	114
APENDICE A. Curvas de calibración del Espectronic 20	115
APENDICE B. Cálculos típicos	120
APENDICE C. Corrosión por celdas de aireación diferencial	132



Contenido	Pág.
APENDICE D. Anexos	135
APENDICE E. Normas ISO 9223-9225, ASTM D-512, D-516	140
BIBLIOGRAFÍA	181
GLOSARIO DE TÉRMINOS	182



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1 Períodos de monitoreo de captadores de muestras.	51
Tabla 3.2 Soluciones patrón a diferentes concentraciones de sulfato para la curva de calibración del spectronic 20	60
Tabla 3.3 Categorización de la contaminación por sustancias sulfurosas representadas por el nivel de SO ₂ (ISO 9223:1992).	77
Tabla 3.4 Categorización de la contaminación por aerosoles salinos representados por nacl. (ISO 9223:1992).	78
Tabla 3.5 Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas que se corroen.	80
Tabla 3.6 Estimación de la corrosividad atmosférica por categorías (ISO 9223:1992).	81
Tabla 3.7 Categorías de la corrosividad atmosférica.	82
Tabla 4. 1 Presión y temperatura ambiente para los períodos de monitoreo.	83
Tabla 4. 2 Área de exposición de los captadores de sulfatos para el primer nivel (Mayo 06 – Julio 07).	84
Tabla 4. 3 Área de exposición de los captadores de sulfatos para el segundo nivel (Mayo 06 – Julio 07).	84
Tabla 4.4 Datos para el cálculo de velocidad de deposición del dióxido de azufre (mayo 06 – julio 07).	85
Tabla 4.5 Estandarización de la solución de nitrato de plata con una solución patrón de cloruro de sodio (mayo 06 – julio 07)	86
Tabla 4.6 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros para el primer nivel de exposición (Mayo 06–Julio 07)	86
Tabla 4.7 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros para el segundo nivel de exposición (mayo 06 – julio 07)	87
Tabla 4.8 Datos para el cálculo de sólidos insolubles para el primer nivel (Mayo 06 – Julio 07)	88
Tabla 4.9 Datos para el cálculo de sólidos insolubles para el segundo nivel (Mayo 06 – Julio 07)	88
Tabla 4.10 Datos para el cálculo de sólidos solubles para el primer nivel (Mayo 06 – Julio 07)	89
Tabla 4.11 Datos para el cálculo de sólidos solubles para el segundo nivel (Mayo 06 – Julio 07)	89
Tabla 4.12 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de polvos atmosféricos sedimentables (Mayo 06–Julio 07)	90
Tabla 4.13 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros en el primer nivel (Mayo 06–Julio 07)	91



Trabajo Especial de Grado



Tabla 4.14 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros para el segundo nivel (mayo 06– julio 07)	91
Tabla 4.15 Conductividad de las soluciones problemas (Mayo 06– Julio 07)	92
Tabla 5.1 Velocidades de deposición de los agentes aeroquímicos y polvos atmosféricos sedimentables para el primer nivel	95
Tabla 5.2 Velocidades de deposición de los agentes aeroquímicos y polvos atmosféricos sedimentables para el segundo nivel	95
Tabla 5.3 Tiempo total de humedad relativa ($HR \geq 80\%$) para los períodos de monitoreo	106
Tabla 5.4 Velocidades de deposición promedios de los agentes aeroquímicos, tiempo de humectación y corrosividad.	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema de transmisión troncal EDELCA	5
Figura 1.2 Sistema interconectado nacional	5
Figura 1.3 Diagrama unifilar de la Subestación EDELCA La Arenosa a 765 kV	6
Figura 2.1 Semejanza entre obtención y corrosión de los metales	23
Figura 2.2 Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión	25
Figura 2.3 Influencia del espesor de la capa de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión	34
Figura 2.4. Relación de la velocidad de corrosión del hierro con la contaminación y la humedad atmosférica	34
Figura 2.5. Ciclo atmosférico del azufre	36
Figura 2.6. Posibilidades de protección anticorrosivo	49
Figura 3.1. Ubicación de colectores al nivel 1	52
Figura 3.2. Ubicación de colectores al nivel 2.	52
Figura 3.3. Colector de sulfatos.	52
Figura 3.4. Colector de cloruros	54
Figura 3.5. Colector de polvos atmosféricos nivel I.	55
Figura 3.6. Colector de polvos atmosféricos nivel II.	55
Figura 3.7. Diagrama de flujo para la determinación de la Sulfatación Total de la Atmósfera	56
Figura 3.8. Equipo de titulación utilizado en el análisis de sulfatos.	57
Figura 3.9. Preparación de la solución Acondicionadora (Agregando 75 g de NaCl).	59
Figura 3.10. Balones aforados a 100 ml con soluciones patrón de sulfato	60
Figura 3.11. Equipo de espectrofotometría (Spectronic 20)	60



Contenido	Pág.
Figura 3.12 agitar la mezcla anterior por 1 min.	61
Figura 3.13 Adicionar 0.3 g de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	61
Figura 3.14 Curva calibración Mayo-Julio 2006	61
Figura 3.15 Diagrama de Bloque del Funcionamiento del Espectrofotómetro	62
Figura 3.16 Filtrado de la muestra al vacío	64
Figura 3.17 Diagrama de Flujo para la Determinación de Salinidad Total de la Atmósfera	65
Figura 3.18 Equipo de Valoración Utilizado en el Análisis de cloruros.	66
Figura 3.19 NaCl y Nitrato de Plata (de izquierda a derecha) Secos y pesados.	69
Figura 3.20 Preparación de la solución estándar de Nitrato de Plata.	69
Figura 3.21 Alícuotas de solución patrón de NaCl con cromato de potasio.	69
Figura 3.22 Titulación de la solución patrón de NaCl con solución estándar de Nitrato de Plata	69
Figura 3.23 Detalle de la titulación y donde se nota la proximidad del punto final.	70
Figura 3.24 Punto final de la titulación	70
Figura 3.25 Equipo de filtración al vacío	72
Figura 3.26 Esquema de procedimiento de análisis de los polvos atmosféricos sedimentables	73
Figura 3.27 Equipo de Conductimetría	74
Figura 3.28 Esquema del procedimiento para la clasificación de la corrosividad atmosférica según parámetros aeroquímicos.	78
Figura 3.29 Esquema de procedimiento para la clasificación de la corrosividad atmosférica según parámetros medioambientales.	79
Figura 3.30 Esquema de procedimiento para la caracterización de la corrosividad atmosférica según norma ISO-9223:1992	82
Figura 5.1. Parámetros meteorológicos promedios mensuales en la Subestación La Arenosa a 765 kV en el período (Mayo 2006-Julio 2007)	93



Contenido	Pág.
Figura 5.2. Velocidad de deposición de SO ₂ , precipitaciones y velocidad del viento en el período (Mayo 2006-Julio 2007)	96
Figura 5.3. Velocidad de deposición de Cl, precipitaciones y velocidad del viento en el período (Mayo 2006-Julio 2007).	97
Figura 5.4. Velocidad de deposición de polvos atmosféricos sedimentables, precipitaciones y velocidad del viento en el período (mayo 2006-Julio 2007).	99
Figura 5.5. Velocidades de deposición de SO ₂ y variables meteorológicas (2005- 2007)	101
Figura 5.6. Velocidades de deposición de Cl y variables meteorológicas (2005- 2007)	102
Figura 5.7 Velocidades de deposición de polvos atmosféricos sedimentables y variables meteorológicas (2005- 2007)	103
Figura 5.8. Velocidad de deposición de Cl presentes en los polvos atmosféricos solubles (agosto 2006-julio 2007)	105

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de esta investigación consiste en evaluar los principales agentes aeroquímicos y factores meteorológicos que afectan a los equipos y materiales de la Subestación C.V.G. EDELCA – La Arenosa a 765 kV. Para ello se propuso seleccionar la ubicación de captadores de sulfato, cloruros y polvos atmosféricos a dos alturas, con el fin de cuantificar la concentración y velocidad de deposición de cada uno de estos contaminantes, para luego compararlas entre sí y clasificar la corrosividad de la atmósfera circundante a la subestación. Otro aspecto importante es la identificación y evaluación de los factores meteorológicos que en combinación con los agentes aeroquímicos determinan la corrosividad atmosférica para ciertos materiales. Además se pretende proponer, en función de dicha agresividad, un sistema de protección anticorrosivo.

La corrosividad atmosférica es un fenómeno de suma importancia a nivel industrial que permite establecer bajo cuáles condiciones de confiabilidad, seguridad y calidad se encuentran los materiales expuestos a cierta atmósfera. Dicho fenómeno se ve influenciado por factores meteorológicos tales como la humedad relativa, lluvia, temperatura, condensación y dirección del viento entre otras, así como por agentes aeroquímicos contaminantes como iones cloruro, dióxido de azufre, polvos atmosféricos y otros.

Para la evaluación de dichos agentes se aplican las normas ISO 9225, las cuales permiten preparar captadores de cloruros y sulfatos, así como colectores de polvos atmosféricos. Para el análisis y cuantificación de las velocidades de deposición, la metodología utilizada es la propuesta por las normas ASTM D-516, D-512-67 y D-1739, las cuales están referidas a los métodos turbidimétricos para el sulfato, volumétricos para los cloruros y gravimétricos para la cuantificación de polvos atmosféricos. La clasificación de la corrosividad atmosférica se realiza a través de la norma ISO 9223.



Este trabajo es presentado en cinco capítulos, donde el primero establece la formulación, descripción y planteamiento del problema e incluye la situación actual y deseada, así como la justificación, limitaciones y objetivos de la investigación. El capítulo dos presenta el marco teórico, donde se desarrollan las bases referenciales en las que se fundamenta la investigación. En el tercer capítulo se presenta el marco metodológico donde se expone en forma detallada la metodología empleada para el logro de los objetivos planteados y la descripción de los materiales equipos y reactivos utilizados para tal fin. El cuarto capítulo se encarga de presentar en forma de tablas, los datos experimentales obtenidos a lo largo de la evaluación, y que son necesarios para los cálculos posteriores que permiten desarrollar los objetivos propuestos. Los resultados y discusiones se desarrollan en el capítulo cinco, donde se explican bajo basamentos los fenómenos estudiados y se describen algunos métodos anticorrosivos adecuados para el tipo de corrosividad del medio. La importancia de esta investigación radica en la comprobación de la acción atmosférica dentro del proceso de corrosión de materiales. Además, los resultados permiten predecir las acciones a seguir por parte de la empresa para el control y combate de los ataques corrosivos, propios de la agresividad de la atmósfera.



CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo se presenta una descripción completa del problema, además se describe la situación que actualmente se presenta en el área de estudio y los objetivos que se desea alcanzar al terminar con este trabajo.

1.1 Descripción del Problema

CVG Electrificación del Caroní (CVG EDELCA), es la empresa de generación hidroeléctrica más importante del país, ya que genera cerca del 70% de la energía eléctrica de Venezuela, requerida para el desarrollo de las actividades productivas y que llega a todos los hogares a lo largo y ancho de la nación.

Se encuentra bajo la tutela de la Corporación Venezolana de Guayana, adscrita al Ministerio de Industrias Básicas y Minería, y forma parte del conglomerado industrial de la CVG, ubicado en la región de Guayana, conformado por las empresas básicas del aluminio, hierro, acero, carbón, bauxita y actividades afines.

CVG EDELCA opera las Centrales Hidroeléctricas **Simón Bolívar** con una capacidad instalada de 10.000 megavatios, considerada la segunda en importancia en el mundo, la Central Hidroeléctrica **Mariscal Antonio José de Sucre** con una capacidad instalada de 3.140 megavatios y **Francisco de Miranda**, que tiene una capacidad de 2.280 megavatios.

CVG EDELCA tiene como misión, producir, transportar y comercializar energía eléctrica a precios competitivos, en forma confiable y en condiciones de sustentabilidad, eficiencia y rentabilidad; además de tener una visión de una empresa de servicio eléctrico de clase mundial, líder en desarrollo sustentable, pilar del progreso del país.



CVG EDELCA posee una extensa red de líneas de transmisión que supera los 5.700 Km, cuyo sistema a 800 mil voltios es el quinto sistema instalado en el mundo con líneas de ultra alta tensión en operación.

Las líneas de transmisión y las subestaciones representan los principales componentes de un sistema o red de transmisión. Una red se caracteriza por poseer diferentes niveles de voltaje de operación. La red, que lleva grandes bloques de energía eléctrica desde las plantas de generación hasta el occidente del país es la *Red Troncal*, siendo la más importante el sistema a 765 kV.

Este sistema tiene su origen en la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar a 765 kV y se extiende hacia el centro del país mediante tres líneas que llegan hasta la subestación San Gerónimo pasando por la subestación Malena. A partir de San Gerónimo se presentan enlaces hacia las subestaciones Sur, La Horqueta y La Arenosa ubicadas en la región centro - norte del país.

Estas a su vez, están unidas entre sí formando una configuración de anillo. Adicionalmente, existe una línea a 765 kV que interconecta la subestación La Arenosa con la subestación Yaracuy que permite reforzar la interconexión centro - occidental del país (Ver Figura 1.1).

Las subestaciones están interconectadas a su vez con el Sistema Interconectado Nacional (SIM); El SIM está conformado por los sistemas de Transmisión de las empresas eléctricas Cadafe, Electricidad de Caracas, Enelven y Edelca, que operan a niveles de tensión igual o superior a 230 kV y dada su extensión posee un ámbito de carácter nacional (Ver figura 1.2).

La subestación de CVG EDELCA La Arenosa a 765 kV, se encuentra en la zona de Barrerita Tocuyito Edo. Carabobo, la cual es una de las

más importantes del sistema de transmisión de occidente ya que transforma la energía eléctrica de 765 a 400 kV y 230 kV para luego ser distribuida.

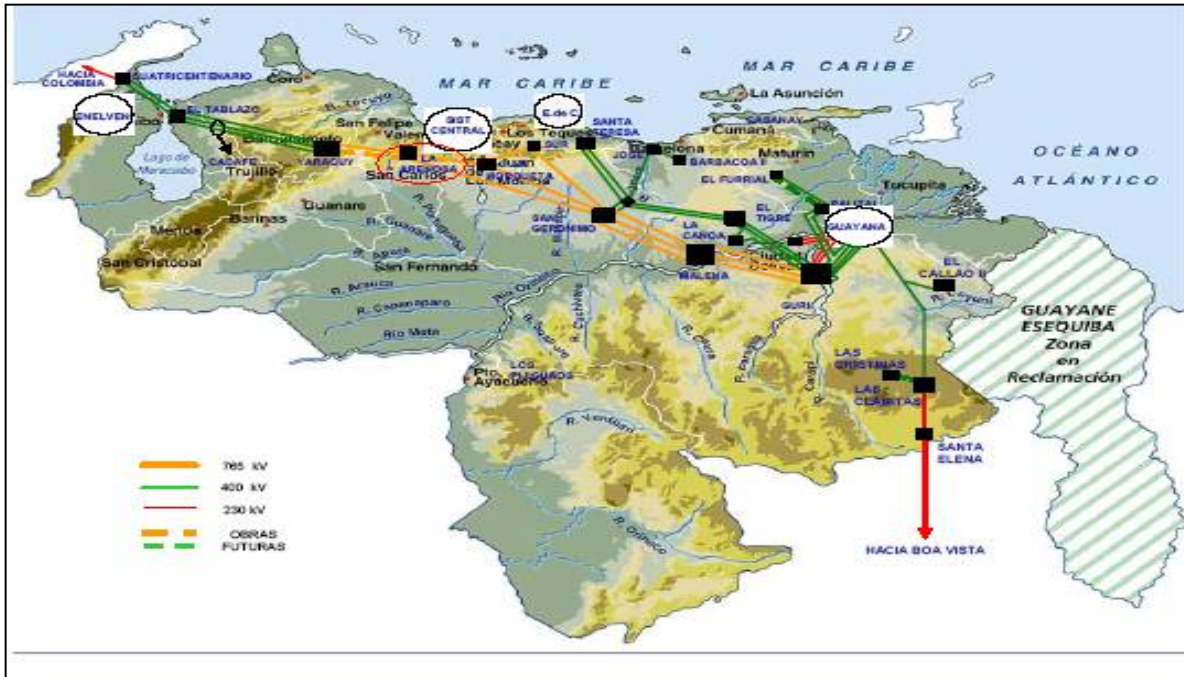


Figura 1.1 Sistema de Transmisión Troncal EDELCA

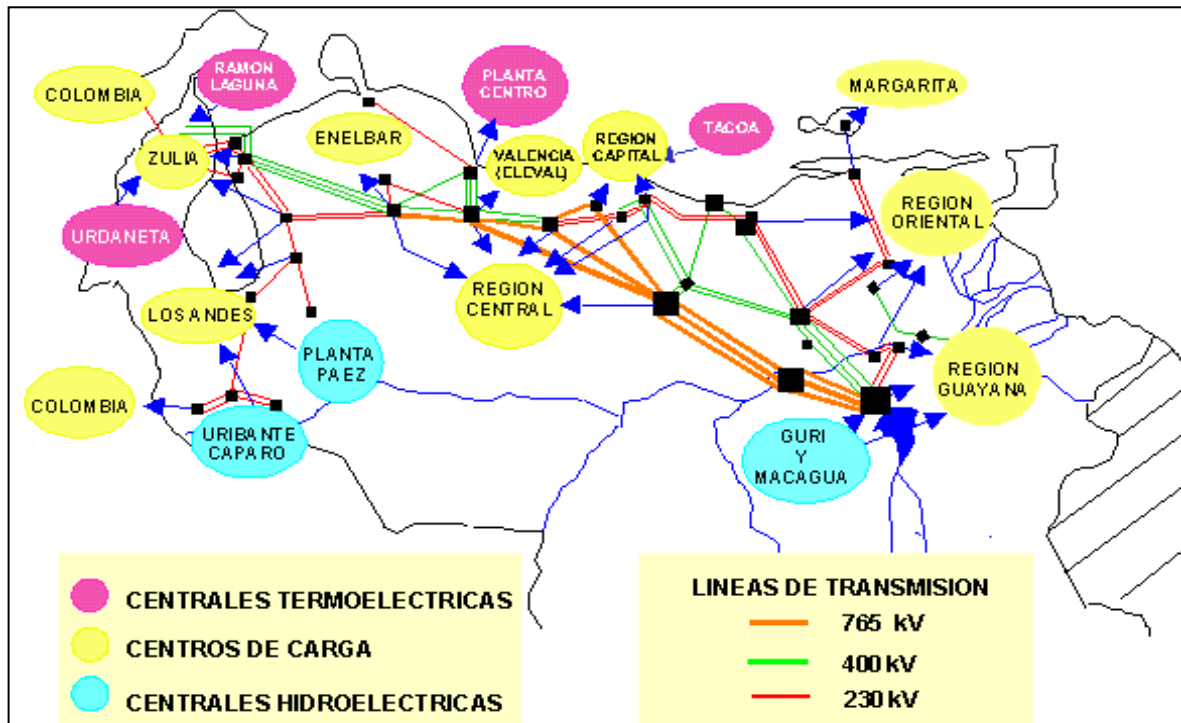


Figura 1.2. Sistema Interconectado Nacional (SIM)

Está interconectada, con la subestación Yaracuy (L.YAR) en Yaritagua, Edo. Yaracuy, con la subestación La Horqueta (L.HQT) ubicada en Villa de Cura, Edo. Aragua y con la subestación San Gerónimo (L.SGM) en Valle de laPascua, Edo. Guárico, a través del sistema de transmisión de energía a 765-800 kV. (Ver Figura 1.3).

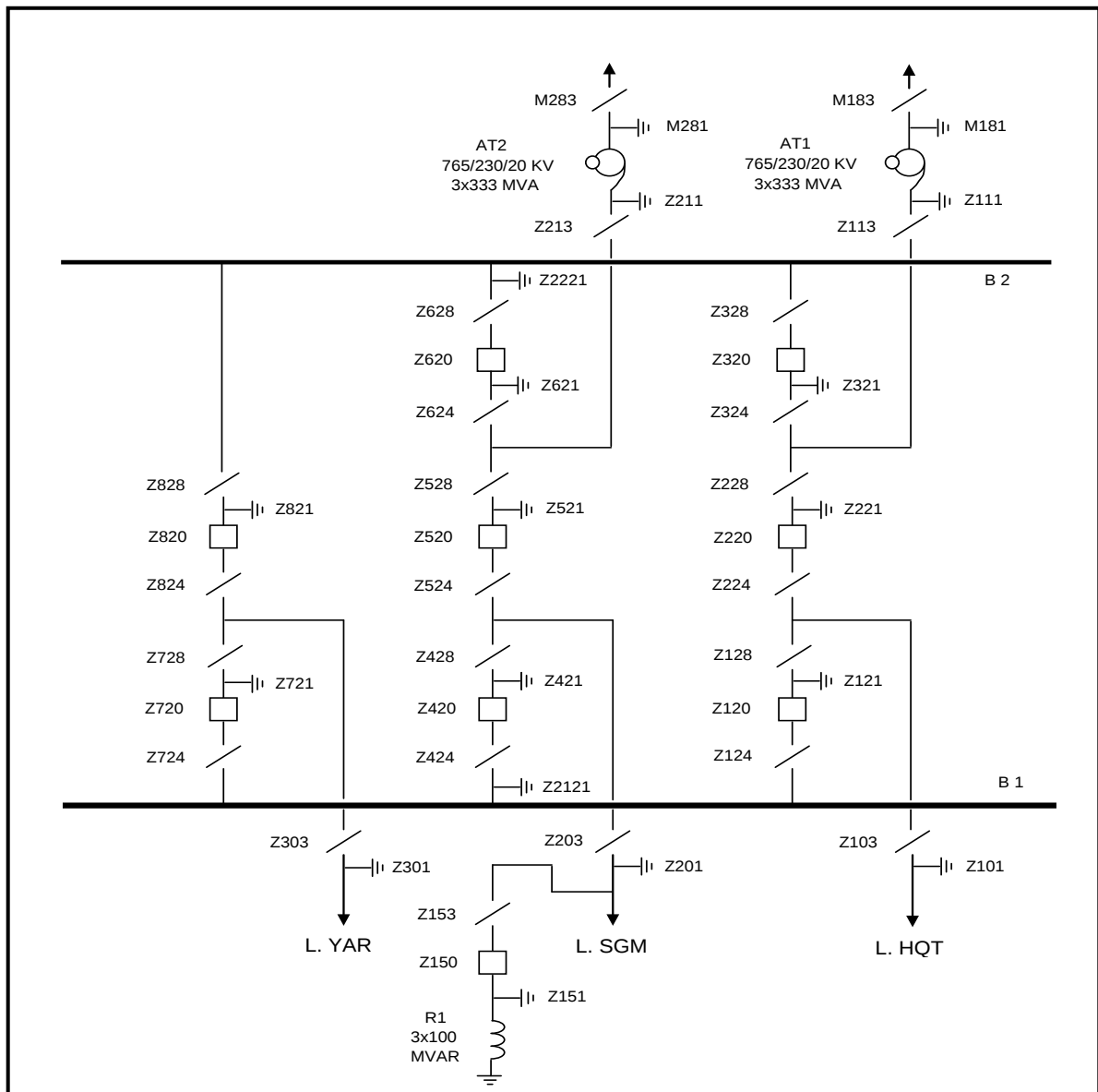


Figura 1.3. Diagrama Unifilar de la subestación CVG EDELCA La Arenosa a 765 kV



Para realizar la transmisión, cuenta con una serie de equipos especiales como auto transformadores, generadores, compresores, entre otros y estructuras metálicas, construidas con acero galvanizado tales como torres de alta tensión, pórticos y bastidores; además de otros implementos como cables, aisladores, pararrayos, conductores, herrajes, abrazaderas y diversos conectores construidos con diferente tipo de materiales.

Estos equipos son claves en el buen desempeño de las actividades por lo cual se necesita un plan de mantenimiento y prevención de la corrosión, así como de la contaminación, luego de conocer la caracterización de la corrosividad del medio ambiente circundante a la subestación.

Los planes de mantenimiento y prevención son dirigidas por el Departamento de Mantenimiento de Transmisión Occidente, cuyo objetivo principal es mantener y operar el sistema eléctrico de Transmisión Troncal en el occidente del país de una forma eficiente, confiable y segura, de acuerdo con los estándares de clase mundial y basado en el desarrollo de competencias, la motivación y el compromiso del personal conservando el medio ambiente y apoyando la gestión social de la empresa. Por eso, son importantes los resultados y conclusiones del presente trabajo, ya que de ello depende de la estructuración por parte del Departamento, de un plan para minimizar y prevenir los efectos de la corrosión sobre los equipos de las subestaciones.

1.2 Formulación del Problema

Algunos de los equipos que actualmente se encuentran en la subestación La Arenosa a 765 kV, recientemente han dado muestras de un incipiente deterioro por oxidación, pérdida de espesor y consumo de la capa de zinc, lo que puede generar a mediano plazo, un deterioro mayor y una



disminución de la eficiencia de dichos equipos, y por lo tanto una deficiencia en el servicio de transmisión de la energía eléctrica.

1.2.1 Situación Actual

De estudios realizados anteriormente (2005), se conoce un estimado de la corrosividad del medio, así como también los parámetros meteorológicos que inciden en la corrosión de los materiales, además de conocer los agentes aeroquímicos involucrados en ese proceso, pero aún no se tiene un resultado preciso y confiable de la velocidad con que se corroen esos materiales, lo cual es indispensable en la determinación de su tiempo de servicio. Por otra parte, no se tiene un conocimiento de la composición química del polvo atmosférico soluble, datos que pueden ser de apoyo a la hora de hacer un plan de mantenimiento y prevención de la corrosión atmosférica presente en la subestación La Arenosa a 765 kV.

1.2.2 Situación Deseada

Actualmente, se desea obtener una mayor cantidad de datos de la concentración salina y de dióxido de azufre, además de los polvos sedimentables que permitan obtener los valores de la velocidad de la corrosión, así como también poder determinar la agresividad de la atmósfera circundante a la subestación La Arenosa a 765 kV. Adicionalmente se desea conocer la composición química del polvo atmosférico soluble, con la finalidad de obtener información acerca de los compuestos que provocan la degradación de los materiales.

La caracterización de la atmósfera circundante a dicha subestación facilitará la concepción de planes estratégicos de prevención y control de la corrosión en ella y en las demás subestaciones de la red de distribución de CVG



EDELCA, así como también, una adecuada selección de materiales para futuras construcciones y reemplazos tanto de estructuras como de equipos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Caracterizar los principales agentes aeroquímicos y factores meteorológicos que afectan a los equipos y materiales de la subestación CVG EDELCA La Arenosa a 765 kV por medio de la aplicación de las normas ISO 9223-9225 y ASTM 2010, con el fin de clasificar la atmósfera corrosiva.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1.3.2.1. Cuantificar la cantidad de sulfatos, cloruros, sólidos solubles e insolubles presentes en la atmósfera, mediante la aplicación de las normas ASTM e ISO 9225.
- 1.3.2.2. Cuantificar las velocidades de deposición de los sulfatos, cloruros, polvos atmosféricos sedimentables en $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{dia})$, según los resultados obtenidos al realizar el análisis de las muestras.
- 1.3.2.3. Comparar las velocidades de deposición de los agentes aeroquímicos con respecto a la altura, con el fin de conocer la zona de mayor riesgo de ataque corrosivo para las estructuras de la subestación.
- 1.3.2.4. Complementar los datos obtenidos, con los datos aportados por el anterior estudio con el fin de llevar a cabo la caracterización de la atmósfera corrosiva.
- 1.3.2.5. Determinar la composición química de los sólidos solubles e insolubles presentes en los polvos atmosféricos.



- 1.3.2.6. Clasificar la corrosividad de la atmósfera, sobre la base de las velocidades de deposición de los sulfatos y cloruros bajo la norma ISO 9223.
- 1.3.2.7. Analizar los factores meteorológicos presentes en la subestación para establecer la corrosividad de la atmósfera.
- 1.3.2.8. Clasificar la corrosividad atmosférica, en función de los parámetros medioambientales según la norma ISO 9223.
- 1.3.2.9. Proponer métodos para el control de la corrosión de los materiales y equipos presentes, en función de la agresividad atmosférica existente.

1.4. Justificación

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones, por lo que el factor que determina primariamente la intensidad del fenómeno corrosivo en la atmósfera es la composición química de la misma. El SO_2 y el NaCl son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera.

El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar. Lejos de éste, la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y núcleos de población, siendo el contaminante principal por su frecuencia de incidencia sobre el proceso corrosivo el dióxido de azufre (SO_2), proveniente del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre.

La acción conjunta de los factores de contaminación y los meteorológicos determinan la intensidad y naturaleza de los procesos corrosivos, y cuando actúan simultáneamente, aumentan sus efectos. También es importante mencionar otros factores como las condiciones de exposición, la composición del metal y las propiedades del óxido formado, que combinados entre sí influyen en los procesos de corrosión.



Las conclusiones de esta investigación serán tomadas en cuenta por el Departamento de Mantenimiento de Transmisión Occidente de la empresa CVG EDELCA. La finalidad es la de obtener mejores resultados tanto a nivel económico como de funcionamiento de los equipos, para el abastecimiento de la energía eléctrica a aquellas zonas donde estas se benefician con dicha transmisión.

Por otra parte se contribuiría a la creación de un Mapa de Corrosividad del sistema troncal de CVG EDELCA el cual ayudaría a establecer las variaciones de la agresividad de la atmósfera en las diferentes zonas geográficas del país, donde se encuentran las subestaciones y líneas de transmisión de CVG EDELCA.

1.5.Limitaciones

Durante el desarrollo del trabajo se debe efectuar análisis en laboratorios especializados que cuenten con los equipos, materiales y reactivos suficientes y necesarios para el desarrollo continuo y efectivo de las pruebas, y en caso de que no existieran en dichos laboratorios, surge la necesidad de que la empresa provea todos aquellos materiales y reactivos que hacen falta, pasando por un sistema administrativo complejo para dichas asignaciones, lo cual influye en el tiempo de la realización de los análisis.

Es importante destacar que el costo de los reactivos a utilizar es moderadamente alto, así como también, se requiere la utilización de una gran cantidad de material de vidrio, reactivos y otros equipos que no se utilizan en laboratorios docentes, debido a que en ellos no se practican las pruebas específicas realizadas en esta investigación.



Se acota también la limitada disponibilidad de tiempo del personal técnico de la subestación, ya que con frecuencia se llevan a cabo actividades de mantenimiento e imprevistos que influyen en el cumplimiento del cronograma a seguir, tal y como es el reemplazo de los captadores y colectores de muestras.

1.6. ANTECEDENTES

Esta sección contiene un resumen de trabajos de investigación relacionados con el tema a desarrollar, los cuales por su metodología y/o contenido, permitirán contar con una base amplia para la realización y desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

1. Bárcenas, J y Gámez O. 2006. **“Evaluación de la corrosividad atmosférica provocada por agentes aeroquímicos y meteorológicos en la subestación eléctrica CVG EDELCA La Arenosa a 765 kV”**. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Trabajo Especial de Grado.

El objetivo principal del estudio, se basó en la evaluación de los principales agentes aeroquímicos y factores meteorológicos que afectan a los materiales y equipos de la subestación CVG EDELCA La Arenosa a 765 kV con la finalidad de estimar la agresividad del medio circundante (Período I: agosto 2005-febrero 2006).

Para ello, se establecieron dos (2) niveles de ubicación de los captadores aeroquímicos a diferentes alturas (nivel 1 ubicado a 1m de altura y nivel 2 a 18 m), con la finalidad de cuantificar la concentración y las velocidades de deposición de los mismos, basados en las normas ISO 9225 y ASTM 2010 para la determinación de los agentes aeroquímicos, mientras que para el análisis químico se emplearon métodos de ensayo recomendados como las normas ASTM D-516, D512-67 y D-1739.



Para la estimación de la corrosividad se empleó la norma ISO 9223, la cual establece patrones bien definidos para su determinación. Entre las conclusiones más resaltantes de la investigación fueron: la velocidad de deposición promedio del SO_2 fue de $4,9 \pm 0,2$ y $4,3 \pm 0,2$ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, por lo que no representó un riesgo de ataque corrosivo, la velocidad de deposición

de Cl^- de 11 ± 3 y 10 ± 3 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, indicando que puede comenzar un proceso de corrosión en baja magnitud, la velocidad de deposición de polvos atmosféricos de $0,34 \pm 0,01$ y $0,30 \pm 0,01$ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, representando una influencia en el deterioro de los materiales debido a que pueden formar celdas de aireación, mientras que el tiempo de humectación estuvo por el orden de 3669,11 h/año, lo cual es un factor preponderante en la corrosividad del medio lo que permitió estimar la agresividad de la zona en “corrosividad media C3”.

2. Escobar, A. y Anaury M (2006). **“Evaluación de la agresividad atmosférica en el complejo académico “El Sabino” de la Universidad Nacional Experimental FRANCISCO DE MIRANDA”** Universidad Nacional Experimental FRANCISCO DE MIRANDA. Trabajo Especial de Grado.

El presente trabajo evaluó la agresividad atmosférica en el Complejo Académico El Sabino de la Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda, mediante la determinación de variables meteorológicas y aeroquímicas tales como: poder sulfatante (SO_2), contenido de cloruros (Cl^-) y tiempo de humectación. Para ello se ubicaron tres estaciones experimentales colocadas en áreas donde se tiene previsto la planificación de futuras construcciones. Cada estación estuvo compuesta por un banco de ensayo captador de salinidad y poder sulfatante. El cloro (Cl^-) se determinó según norma ASTM-D 512A y el poder sulfatante (SO_2) según norma ASTM – D516B expuesta en casetas especiales de acuerdo a las especificaciones de la norma ISO 9225.



Las conclusiones obtenidas en este trabajo son: la clasificación de la categoría corrosiva de la atmósfera bajo la norma ISO-9223 como categoría C4, quedando establecida de la siguiente manera: TDH, categoría T5 (% TDH>60); SO₂, categoría P0 (<10 mgSO₂ / m² x día); Cl⁻, categoría S1 (3-60 mgCl / m² x día). Finalmente se recomienda como prevención y control de la corrosión, proteger la superficie de las estructuras de acero con sistemas de recubrimientos tales como: Zinc Inorgánico, Fondo Epoxi Poliamida y Acabado Poliuretano. En aquellos casos donde los elementos a proteger contengan espesores mínimos se recomienda el uso de recubrimiento: Fondo Epoxi y Acabado Poliuretano.

Este trabajo es similar al presente ya que se hace el mismo estudio bajo las normas ISO-9223, ISO-9225 y ASTM D-2010, además se hace la recomendación de protección anticorrosiva para las estructuras de acero, lo cual es uno de los objetivos del presente trabajo.

3. Rodríguez, C. (2005) **“Estimación de la Corrosividad Atmosférica en Función de los Agentes Aeroquímicos y Meteorológicos en la Subestación Yaracuy de CVG EDELCA** Vice – Rectorado Barquisimeto. Universidad Nacional Experimental Politécnica “ANTONIO JOSE DE SUCRE”. Trabajo Especial de Grado.

El objetivo de esta investigación es categorizar la corrosividad atmosférica donde se encuentra la Subestación Yaracuy 765 kV según los factores medioambientales, bajo la aplicación de las normas ISO 9223 – 9225, estableciéndose dos (2) niveles de monitoreo a diferentes alturas dentro de las instalaciones de la Subestación.

Como resultados mas resaltantes se señala que la subestación Yaracuy de CVG EDELCA a 765 kV se encuentra categorizada como una atmósfera C3



(corrosividad media) debido a que es zona polvorienta y contaminada en baja proporción por compuestos de azufre y cloruros en condiciones de alta humedad mediante la evaluación del tiempo de humectación, lo que promueve un ataque significativo de todos aquellos materiales expuestos al ambiente (acero al carbono, cinc, cobre y aluminio) acelerando las reacciones de corrosión de los mismos.

El presente trabajo es similar al que se está realizando actualmente tanto en metodología como en estructura, pero con la diferencia de sitios de estudio, tiempo de realización y características medioambientales.

4. Rincón, A. De Rincón, O. 2004. Rodríguez, R. Romero N y de Rincón A. **“Mapa de la corrosividad atmosférica en la región Zulía”**. Centro de Estudios de Corrosión, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. *Revista Técnica*, abr. 2004, vol.27, no.1, p.55-64.

En esta investigación se planificó un año de exposición, para dos periodos distintos, en ocho estaciones de la región zuliana, en el cual se determinó la velocidad de corrosión del acero SAE1010 y cobre 99% por el método de pérdida de masa. Además, se cuantificó la velocidad de deposición de los iones cloruros, dióxido de azufre, y el polvo atmosférico, junto con las variables climatológicas de mayor incidencia. A tal efecto, se utilizaron placas, de 10×15cm, expuestas a la intemperie, en la dirección de los vientos preferenciales, en bancos de 45° de inclinación.

Como conclusiones mas importantes se pueden señalar que la localidad del Planetario fue la estación de mayor agresividad para el acero, con 26,10 $\mu\text{m/año}$, y la estación T. Bachaquero para el cobre con 8,96 $\mu\text{m/año}$.



En el estudio de repetición del primer periodo se encontró que para el cobre se produjo un descenso comparativo de C5 a C4, debido a la formación más rápida de la patina protectora como consecuencia del incremento de la deposición de contaminantes.

El orden de agresividad para el acero SAE 1010 en las atmósferas del estado Zulia, nombradas en forma decreciente son: V. Bachaquero, Planetario, Base Aérea, Punta de Palma, Tablazo I, Canalizaciones, Tablazo II y T Bachaquero. La velocidad de corrosión del cobre 99% en el estado Zulia disminuye en el siguiente orden de ubicación: Planetario, T. Bachaquero, V. Bachaquero, Tablazo I, Punta de Palma, Tablazo II, Base Aérea y Canalizaciones.

El nivel de deposición de agentes contaminantes aumenta con el transcurso de los años a causa del crecimiento industrial aledaño a las zonas, contribuyendo de tal forma a la degradación de la atmósfera y a la variabilidad en la clasificación de las atmósferas del estado Zulia. La velocidad de corrosión estimada mediante las variables meteorológicas y aeroquímicas, no necesariamente representa la verdadera velocidad de corrosión del material.

La similitud entre este trabajo y el presente, es la utilización de las normas ISO, entre ellas la 9223 y la 9225, además de la evaluación de los mismos parámetros meteorológicos (tiempo de humectación, humedad relativa, precipitación y temperatura), y aeroquímicos (velocidad de deposición de cloruros, dióxido de azufre y polvos atmosféricos sedimentables). La diferencia entre ambos, radica fundamentalmente en la utilización de cupones o láminas de diferentes metales, haciéndose observaciones y mediciones de espesor a los mismos, así como también la realización del mapa de corrosividad del Estado Zulia.



5. Linares, L., Pérez, O y Taborda, N. 2003. **“Análisis de fallas por corrosión en conductores de potencia de aleaciones de aluminio en ambiente costero – lacustre”**. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Edo. Zulia. Trabajo Especial de Grado

El objetivo principal de este estudio fue categorizar la corrosividad de la atmósfera a través de la aplicación de las normas ISO 9223-9225, sobre los conductores de potencia de aleaciones de aluminio 1350 y 6201, las cuales transmiten la corriente eléctrica al estado Zulia.

Para ello se establecieron 17 estaciones aeroquímicas de ensayo ubicadas en diferentes niveles de las torres, se evaluó los daños por corrosión de los hilos conductores a diferentes tiempos de exposición y zonas de la línea, mediante el análisis con un microscopio estereoscópico y electrónico de barrido mediante los ensayos de polarización lineal y cíclica.

Entre las conclusiones más resaltantes podemos mencionar que el 80% de las estaciones presentan una corrosividad de tipo C4 (alta), acelerando la cinética de corrosión del material, lo que conlleva a un ataque significativo de dichas aleaciones. Se determinó que la velocidad de corrosión de la aleación 6201 es menor a la aleación 1350), presentando picaduras a causa de la acción de los cloruros y sulfatos.

La diferencia con la presente investigación está en que no se realizó el análisis de polvos atmosféricos de acuerdo a la norma ASTM D-2010, así como un estudio mas detallado debido a una cantidad mayor de subestaciones ubicadas en la zona. Además del análisis con el microscopio estereoscópico y electrónico de barrido. La similitud con el presente trabajo y que se utilizará como referencia, es la metodología de las normas ISO 9225-9223.



6. Parada, S., Prato, M. y Reyes, R, 2.000. **“Corrosividad en la atmósfera falconiana: Revisión Documental”**. Centro de Investigaciones Tecnológicas (CITEC). Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Coro. Falcón. Tesis Doctoral.

El objetivo principal fue recopilar, analizar y complementar con nuevos datos los resultados de diversas investigaciones, para así presentar una visión de la situación de Falcón en cuanto a su corrosividad atmosférica para corroborar el nivel de variabilidad de la información obtenida. En diversos momentos se obtuvieron resultados que aunque diferentes, presentaron la misma magnitud.

Las conclusión mas importante es que la corrosión atmosférica es muy variada, pero realmente alarmante en la costa este de la península de Paraguaná, debido a que la actuación conjunta del Cl^- y el SO_2 y la humedad ambiental como tiempo de humectación son quienes definitivamente afectan la calidad de la atmósfera falconiana.

La realización de ésta investigación difiere de la presente en la corroboración de datos ya analizados, mientras que el estudio actual se basa en una recolección y posterior de datos de los agentes aeroquímicos.

7. Romero, K.; Sánchez, L.; Prato, M.; Yegres, F.; Reyes, R.; Flores, Y. 2000. **“Evaluación de las condiciones ambientales que afectan la preservación de las colecciones exhibidas en el Museo Diocesano "Lucas Guillermo Castillo" de Coro.”** Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Trabajo Especial de Grado.



El objetivo de este trabajo es el estudio de la atmósfera del Museo Diocesano “Lucas Guillermo Castillo” ya que muchas de las piezas que allí se exhiben son de material metálico tales como bronce, cobre, hierro y plata, presentan problemas de corrosión y por la importancia cultural y patrimonial de estas piezas se decidió hacer el estudio de la atmósfera bajo las normas ISO, utilizando métodos gravimétricos, electroquímicos y microbiológicos simulando las piezas y su entorno. Se categorizó la atmósfera según la norma ISO 9223 como alta. En general, se detectó una contaminación microbiológica importante en las salas de metales, en especial la sala 1 y 2, y químicamente la sala 3, ambas categorizadas por ISO como atmósfera mixta S_1P_1 . Los resultados de los estudios gravimétricos y electroquímicos indicaron que piezas de cobre están influenciadas por un proceso de corrosión electroquímica, mientras que en el hierro este proceso electroquímico se encuentra influenciado microbiológicamente.

Este estudio al igual que el presente trabajo, se rigen por las normas ISO 9223 y 9225 para caracterizar la atmósfera dentro del museo y conocer la influencia de los parámetros ambientales y químicos en la corrosión de las piezas.

Por otro lado, difiere del presente trabajo en que no se presentan daños por agentes microbiológicos por lo tanto no se hace necesario los análisis de este tipo en este caso.

8. R Nouel G., Prato, M del R. Reyes, R. 2001. **“Influencia de sales solubles presentes en los productos de corrosión, en ensayos de corrosión atmosférica”**. Centro de Investigaciones Tecnológicas (CITEC). Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda. Coro. Falcón. Revista Científica.



En este trabajo se ubicaron materiales metálicos de amplio uso comercial, en estaciones de ensayo pertenecientes al proyecto Mapa Venezolano de Corrosión Atmosférica (MVCA). Los periodos de exposición fueron de 1,3 y 5 años, en atmósferas aparentes del tipo urbano-marino, rural-marino y en clima Bushi.

Se realizó un análisis de regresión múltiple de las pérdidas por corrosión en función de los contenidos de sales hidrosoluble (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ , CO_3^{2-} y HCO_3^-) presentes en los productos de corrosión y las variables meteorológicas de las estaciones de estudio.

Se clasificaron las atmósferas, siguiendo la norma ISO-9223, usando los reportes de contaminantes disueltos en agua de colectores de polvo sedimentable de la atmósfera en las localidades de Puerto Cabello y Puerto Escondido, el nivel de contaminantes atmosféricos presentes en los productos de corrosión y la velocidad de corrosión de los materiales en las estaciones estudiadas. Los análisis de contaminación atmosférica se realizaron por vía húmeda en los productos de corrosión y por captación directa en colectores de polvo.

En conclusión, La presencia de estos contaminantes fue encontrada en las atmósferas estudiadas, a excepción de CO_3^{2-} y HCO_3^- . Los resultados parecen indicar un efecto acelerador del Cl^- y el NO_3^- , por el contrario el SO_4^{2-} y el NH_4^+ producen un efecto retardador sobre el proceso corrosivo, al igual que la temperatura, la evaporación y la radiación.

Similar a ésta investigación, se hace uso de los colectores de polvo sedimentable, analizándose los contaminantes disueltos en agua y por vía húmeda y la clasificación de las distintas atmósferas mediante la norma ISO-9223. Como diferencia entre este trabajo y el presente, está el análisis de los



distintos productos de corrosión en los diferentes metales y sobre todo la exposición de éstos en distintas atmósferas por un tiempo de exposición mucho mayor.

9. M.Díaz, D.Otiniano, D.Cárdenas.(2003) **“Categoría e índices de corrosividad respecto a la distancia del mar par la costa de la provincia de Trujillo, Perú”**. Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.

En este trabajo, se determinó las categorías e índices de corrosividad para la costa de la provincia de Trujillo-Perú, en tres franjas geográficas respecto a la distancia del mar. Para ello se registraron datos de variables atmosféricas: tiempo de humectación (TDH), cloruros (Cl-) y dióxido de azufre (SO₂) y pérdidas de peso en probetas Climat (alambre sobre tornillo). La medición de los contaminantes atmosféricos se realizó según las normas ISO 9225, ASTM D512, ASTM D516. Para la determinación del TDH se usaron valores registrados de humedad relativa y temperatura ambiental. Relacionando estas variables atmosféricas se determinó las categorías de corrosividad según la norma ISO 9223. En base a probetas Climat, se determinó los índices de corrosividad: marina (ICM), industrial (ICI) y atmosférica (ICA), según las normas ISO 8407 y ASTM G116.

La conclusión a la que se llegó al final de éste trabajo fue que, en la franja de 0-5 Km., le corresponde una categoría C5, *muy alta corrosividad*; con Índices de Corrosividad Industrial y Marina *moderadamente severos* y con Índice de Corrosividad Atmosférica *severo*, considerándose por ello, una área urbano-industrial, costera-expuesta y de alta agresividad.

Para la franja entre 5-10 Km., se determinó una categoría de C4, *alta corrosividad*; con Índices de Corrosividad Industrial y Marina *moderados* e Índice de Corrosividad Atmosférica *moderadamente severo*, considerándose



como una zona urbana, costera y de moderada agresividad. Mientras que para la franja de 10-15 Km., le corresponde una categoría C3, es decir *corrosividad media*; con sus Índices de Corrosividad Industrial, Marina y Atmosférica *despreciables*, por lo que esta zona es suburbana, habitable y de muy baja agresividad. Metales-Corrosividad. Por ello la costa de la provincia Trujillo - Perú, se comportó como una zona urbana de alta corrosividad, ello sugiere una conveniente selección de materiales y métodos de protección contra la corrosión, para esta área geográfica.

Entre este trabajo y el presente existen algunas similitudes tales como la clasificación de las atmósferas bajo la norma ISO-9223, así como el uso de captadores de cloruros siguiendo la norma ISO 9225. Además de ello la evaluación de los factores meteorológicos tales como humedad relativa y temperatura ambiente, los cuales son necesarios en la determinación del tiempo de humectación (TDH). Este trabajo fue usado de manera ilustrativa, ya que contiene muchos gráficos y esquemas que facilitan la comprensión y el uso de la norma ISO-9223 y los captadores de cloruros por vela húmeda (norma ISO-9225).

En cambio, se utilizan probetas de alambre enrollado en las diferentes franjas de estudio, las cuales fueron analizadas bajo las normas ISO 8407 y ASTM G116. Además, también se analizan los contaminantes atmosféricos bajo las normas ASTM D512, ASTM D516, al igual que en la presente investigación.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrollan los conceptos y temas que han servido de soporte en la investigación, brindando una mayor comprensión de los procesos que se llevan a cabo en el estudio y de los métodos empleados para la realización del mismo.

2.1 El Fenómeno de la corrosión

La corrosión es un fenómeno espontáneo que se presenta prácticamente en todos los materiales procesados por el hombre. Si bien existen varias definiciones, es común describir la corrosión como una degradación acelerada y continua que desgasta, deteriora y que incluso puede afectar la integridad física de los objetos o estructuras (1).

El metal más utilizado tanto en la industria como en otras áreas es el hierro ya sea como acero o como hierro mismo. Se encuentra como óxido de hierro (FeO_3) conocido comúnmente como hematita lo cual es sometido a grandes cantidades de energía en el proceso que le permitirá el posterior regreso a su estado original a través de un proceso de oxidación (corrosión) como se observa en la Figura 2.1 (1).

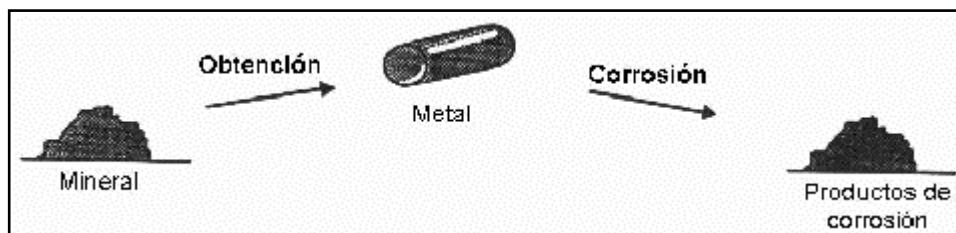


Figura 2.1. Semejanza entre obtención y corrosión de los metales. (2)

De las diversas operaciones que deben realizarse para extraer el metal del mineral, la primordial se puede resumir en una sola palabra: **reducción**, e

inversamente las transformaciones sufridas por el metal que retorna a su estado original, también pueden resumirse en: **oxidación** (1).

Por consiguiente, la corrosión puede describirse como una reacción de oxidación, lo que hace que un metal sólo podrá corroerse, cuando sea inestable con respecto a los productos formados por su corrosión. Este fenómeno puede preverse en términos energéticos mediante la degradación de los materiales, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobrediseños costosos.

Por esta razón, cada día se desarrollan nuevos recubrimientos, se mejoran los diseños de las estructuras, se crean nuevos materiales, se sintetizan mejores inhibidores, se optimizan los sistemas de monitoreo. Todo esto en un esfuerzo permanente por minimizar el impacto negativo de la corrosión.

2.2. Mecanismo de la corrosión

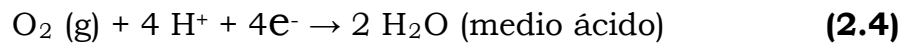
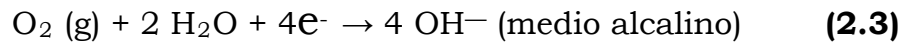
La corrosión es un fenómeno de naturaleza electroquímica que cumple con las características fundamentales de una pila o batería. Para que se forme una celda electroquímica o celda de corrosión, se requiere la presencia de un medio conductor de iones (electrolito), un material que cede electrones (ánodo) donde ocurre el proceso de corrosión como consecuencia del paso del metal en forma de iones al electrolito, en contacto con otro que los acepta (cátodo) (2);

La reacción genérica que sucede en el ánodo, es:



Como los electrones en un conductor metálico se mueven en sentido opuesto al convencional, en el ánodo la corriente eléctrica sale del metal para entrar a la solución (Figura 2.2). Las reacciones que se suceden comúnmente en el cátodo en presencia de agua, son (3):

Reacciones catódicas o de reducción:



La oxidación, a pesar de la etimología de la palabra, no necesariamente involucra al oxígeno; la definición química es una pérdida de electrones.

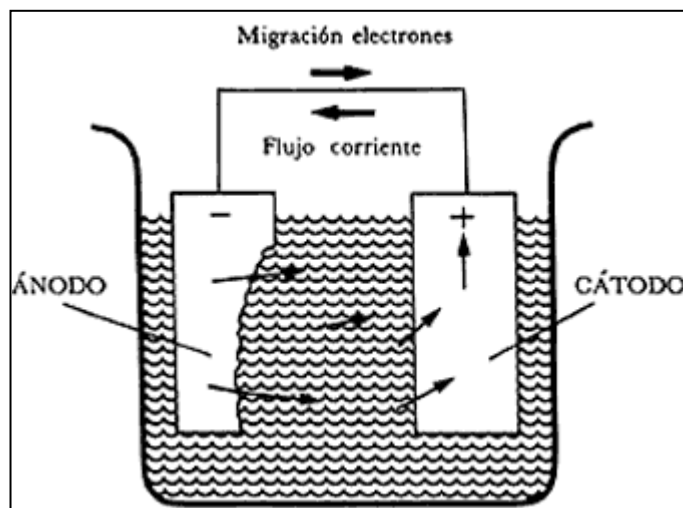


Figura 2.2. Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión (3).

Todos los metales presentan una tendencia a perder electrones mediante su oxidación, cuantificada a través de su potencial de oxidación. Entre más



alto sea este potencial se dice que el metal es más noble, por lo que se oxida con mayor dificultad.

La tabulación de la resistencia de los materiales metálicos a la corrosión se conoce como serie galvánica. Las series galvánicas son particulares al medio corrosivo (por ejemplo, hay series galvánicas en solución salina, en solución ácida, etc.), y son de gran utilidad a la hora de seleccionar un material para una aplicación específica (1).

Podemos resumir lo anterior diciendo que para que exista corrosión deben cumplirse unas ciertas condiciones mínimas, entre las que podemos mencionar:

1. Debe haber un ánodo y un cátodo.
2. Debe existir un potencial eléctrico entre los dos electrodos (ánodo y cátodo).
3. Tanto el ánodo como el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito conductor de la electricidad, el cual está ionizado.

Cuando se cumplen estas condiciones, puede circular una corriente eléctrica dando lugar a un consumo de metal (corrosión) en el ánodo.

2.3. Tipos de corrosión

La corrosión se suele clasificar de acuerdo a la forma en que se manifiesta, es decir, a la apariencia del material corroído, entre las que se mencionan (4):

- **Corrosión atmosférica:** Es la causa más frecuente de la destrucción de los metales y aleaciones, donde su severidad se incrementa cuando los



aerosoles salinos, los compuestos de sulfurados y otros contaminantes atmosféricos están presentes en el ambiente.

- **Corrosión por picaduras:** Es un fenómeno que se produce en zonas de baja corrosión generalizada y la reacción anódica produce unas pequeñas “picaduras” en el cuerpo del material.
- **Corrosión por fricción o fretting:** Es la que se produce por el movimiento relativamente pequeño (como una vibración) de dos sustancias en contacto, de las que una o ambas son metales.
- **Corrosión por cavitación:** Es la producida por la formación y colapso de burbujas en la superficie del metal (en contacto con un líquido). Genera una serie de picaduras en forma de panal.
- **Corrosión selectiva (Desaleante):** Es semejante a la llamada Corrosión por Descincado en donde piezas de zinc se corroen y dejan una capa similar a la aleación primitiva.
- **Corrosión por erosión:** Causa la desaparición local de las capas protectoras dando lugar a procesos de corrosión intensos.
- **Corrosión galvánica:** Es una de las más comunes que se pueden encontrar. Es una forma de corrosión acelerada que puede ocurrir cuando metales distintos (con distinto par redox) se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (por ejemplo, una solución conductiva).
- **Corrosión intergranular:** Ataca los límites de grano precipitando de los aleantes en forma de carburos, causando una pérdida de propiedades mecánicas. Generalmente aparece en aceros inoxidables austeníticos, aleaciones de Ni, Cu o Al. Es provocada entre otras cosas por ataques de álcalis en caliente, sulfuros o mal tratamiento térmico del metal, especialmente del acero inoxidable.
- **Corrosión a altas temperaturas:** Cuando algunos metales son expuestos a gases oxidantes en condiciones de muy altas temperaturas, pueden reaccionar directamente con ellos sin la necesaria presencia de un

electrolito. Este tipo de corrosión es conocida también como empañamiento o escamamiento.

- **Corrosión por fatiga:** Resultado de un esfuerzo mecánico cíclico y un medio corrosivo, cuya consecuencia es la rotura de las capas pasivas lo que favorece la formación y el desarrollo de grietas.
- **Corrosión bajo tensión:** Es la fractura que se produce en un material como consecuencia de la acción conjunta de un medio corrosivo y un esfuerzo mecánico (Tensión).
- **Corrosión por microorganismos:** Deterioro de los metales por acción directa o indirecta de microorganismos tales como las bacterias, hongos y algas.
- **Corrosión uniforme:** Es aquella corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme producto de la pérdida regular del metal superficial.
- **Corrosión fisurante:** Se forman fisuras transgranulares o intergranulares que se propagan hacia el interior del metal. Se producen en metales sometidos a tensiones de tracción en un medio corrosivo.
- **Daño por hidrógeno :** El ataque por hidrógeno es el que se produce por la reacción del hidrógeno con los carburos del acero formando metano y dando lugar a la formación de ampollas, huecos internos, decarburización, etc. El hidrógeno puede migrar desde la superficie hacia las inclusiones interiores donde genera aumento de presión que da lugar a deformaciones y rupturas.

2.4. Corrosión causada por la atmósfera

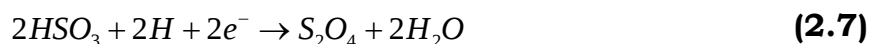
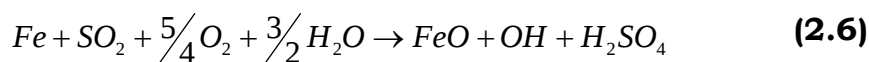
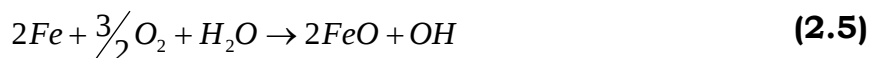
La corrosividad debido a las condiciones atmosféricas puede ser afectada mayormente por ambiente locales tales como la velocidad y dirección del viento, polvo, humedad, condensación y cualquier especie electrolítica, lo que conlleva a determinar el grado de corrosividad de acuerdo a la composición química de



la misma, así como el tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica (3).

La contaminación atmosférica de las industrias y núcleos de la población conlleva la presencia del dióxido de azufre (SO₂) y el cloruro de sodio (NaCl) los cuales son los agentes más comunes en el medio ambiente, y por lo tanto la causa mas frecuente en la destrucción de los metales y aleaciones (3).

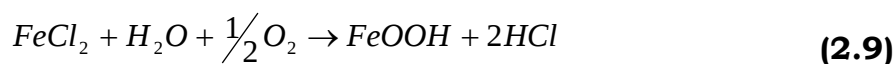
El dióxido de azufre (SO₂) se encuentra en el aire y es originado principalmente por la combustión de combustibles fósiles siendo las áreas de mayor contaminación sulfurosa, las áreas industriales y las grandes ciudades. Este contaminante tiene una importancia especial en los procesos de corrosión atmosférica a causa de su incidencia directa en la velocidad de corrosión de los metales expuestos a la atmósfera, ya que en la oxidación de compuestos ferrosos el producto es el sulfato ferroso que se hidroliza formando óxidos y generando ácido sulfúrico tal y como se muestra a continuación:



La oxidación del SO₂ a ácido sulfúrico sobre el metal provoca el descenso del pH y contribuye a la destrucción de películas pasivantes y por lo tanto a la disolución anódica del metal.

El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar. Sus efectos son muy severos cerca de la orilla, donde el aire transporta grandes cantidades de sal y se produce una continua pulverización del agua. Esta formación de aerosoles de agua marina y su arrastre por los vientos, hace que los cloruros estén presentes a distancias considerables de la costa.

El mecanismo de ataque es similar al del SO₂. En el caso concreto del acero al carbono, el FeCl₂ que se forma en la reacción de corrosión, se hidroliza para formar óxidos, generándose ácido clorhídrico que reacciona con la sosa formada en el proceso de corrosión para dar de nuevo, NaCl. Las reacciones pueden resumirse como sigue (1):



Otra fuente de iones cloruro en la atmósfera se tiene de las emisiones de HCl, gas que al ser muy soluble en agua, acidula fuertemente la fase acuosa. El Cl₂ es emitido en procesos industriales, como pueden ser, el blanqueo de pulpa de papel, la producción de algunos metales, o la fabricación de detergentes (1).

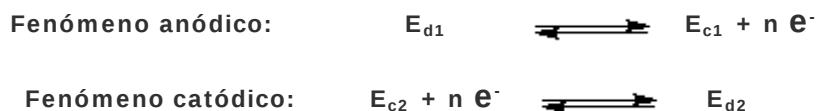
Aunque las concentraciones de estos contaminantes son bajas, frecuentemente representan un riesgo para la vida de plantas y animales, pueden alterar el clima y constituyen una aportación muy importante a los fenómenos de corrosión.

2.4.1 Mecanismos de acción

El mecanismo de corrosión atmosférica es de naturaleza electroquímica, en el cual un metal reacciona con el medio ambiente para formar óxidos u otros compuestos, por lo que requiere de la presencia de un cátodo y un ánodo, así como también de un electrolito (solución conductora de electricidad) de resistencia óhmica determinada.

El electrolito es el medio corrosivo, debido a que es una capa de humedad sobre la superficie del metal, el ánodo es el metal que es corroído, pasando a través del electrolito como iones cargados positivamente, liberando electrones que participan en la reacción catódica (3).

Es por ello que la corriente de corrosión entre el ánodo y el cátodo consiste en electrones fluyendo dentro del metal y de iones fluyendo dentro del electrolito, mientras que el cátodo puede ser la misma superficie metálica u otro metal que se encuentre en contacto con el mismo, lo cual no es consumido en el proceso de la corrosión, las reacciones involucradas se mencionan a continuación (2):



En el proceso anódico, el dador de electrones, E_{d1} , los cede a un potencial galvánico más negativo, y dichos electrones son captados en el proceso catódico por un aceptor de electrones, E_{c2} , con potencial más positivo.

En el proceso catódico bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción de oxígeno, mientras que en el proceso anódico el metal se disuelve en la capa del

electrolito, en la cual la concentración se eleva hasta la precipitación de un compuesto poco soluble (3).

2.4.2. Clasificación de la corrosividad atmosférica

La corrosión atmosférica puede ser clasificada en (4):

- a) **Corrosión seca:** Se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa.
- b) **Corrosión húmeda:** Requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.
- c) **Corrosión por mojado:** Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

2.4.3. Tipos de atmósferas

Se puede dividir la atmósfera según el tipo de ambiente, entre ellas podemos mencionar (4):

- **Industriales:** Son los que contienen compuestos sulfurosos, nitrosos y otros agentes ácidos que pueden promover la corrosión de los metales. En adición, los ambientes industriales contienen una gran cantidad de partículas aerotransportadas, lo que produce un aumento en la corrosión.
- **Marinas:** Esta clase de ambientes se caracterizan por la presencia de iones cloruro, un ión particularmente perjudicial que favorece la corrosión de muchos sistemas metálicos.

- **Urbanas:** Una atmósfera típicamente urbana tiene una contaminación mucho más intensa debido a los productos de combustión doméstica y del transporte, que se manifiesta principalmente por un aumento importante en la concentración de anhídrido sulfuroso (SO₂) y suciedad y un ligero aumento en las de dióxido de carbono (CO₂) y cloruro (Cl⁻).
- **Rurales:** En estos ambientes se produce la menor clase de corrosión atmosférica, caracterizada por bajos niveles de compuestos ácidos y otras especies agresivas.
- **Tropicales:** se caracteriza por las elevadas temperaturas coincidentes con altas humedades relativas.

2.4.4. Factores que ocasionan la corrosividad atmosférica

Entre los factores más importantes podemos mencionar la contaminación atmosférica (partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, entre otros), fenómenos meteorológicos (humedad del medio circundante debido a precipitaciones atmosféricas), condiciones de exposición (tiempo de humectación), composición del metal, así como también las propiedades del óxido formado (3).

Dichos factores influyen en la intensidad de los procesos de corrosión, de acuerdo a la actuación simultánea de los mismos. Cabe destacar que la contaminación atmosférica toma importancia cuando el nivel de humedad se hace significativo debido a la formación de determinadas pilas de corrosión.

En la Figura 2.3 se muestra la relación existente entre la velocidad de corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica.

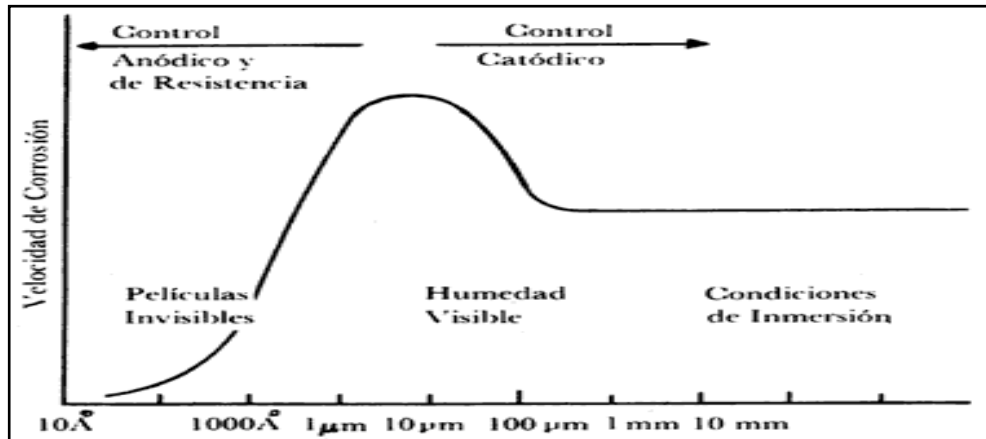


Figura 2.3. Influencia del espesor de la capa de humedad condensada sobre la superficie metálica en la velocidad de corrosión (3).

La correlación entre los niveles de concentración del SO_2 o NaCl y la velocidad de corrosión es alta, como se muestra en la Figura 2.4, tomando en consideración que el SO_2 tiene mayor importancia debido a la reacción producida con los metales presentes, por lo que tiene una incidencia directa en el metal expuesto a la atmósfera. Como el SO_2 es menos soluble que el oxígeno, cuando se producen concentraciones bajas en la atmósfera, se produce una película de humedad sobre la superficie del metal con grandes concentraciones de SO_2 , lo que trae como consecuencia inmediata el deterioro de la misma.

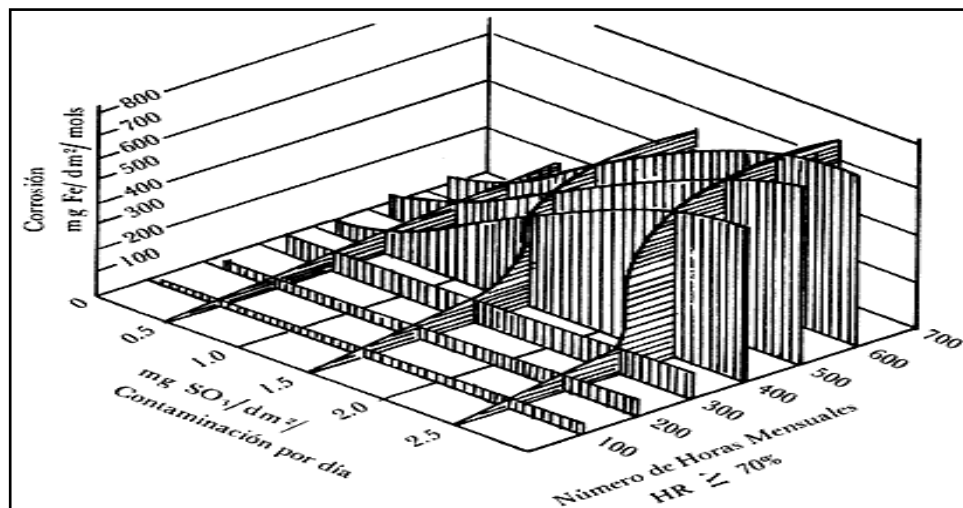
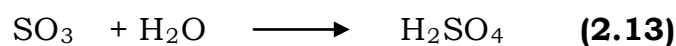
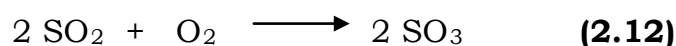


Figura 2.4. Relación de la velocidad de corrosión del hierro con la Contaminación y la humedad atmosférica (3).

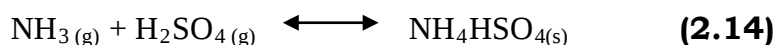
2.4.5. Ciclo Atmosférico del Azufre

La presencia de compuestos que contienen azufres provenientes de combustibles fósiles y zonas costeras en su mayoría (Figura.2.5) reducen la calidad del aire, lo que trae como consecuencia la contaminación del medio ambiente.

El principal compuesto contaminante es el dióxido de azufre (SO_2), (proveniente del H_2S) que al entrar en contacto con iones hidroxilos (OH^-), provenientes del agua produce una reacción de oxidación ocasionando un aumento en la acidez del agua de lluvia debido a la formación de ácido nítrico y ácido sulfúrico, este último condensa como consecuencia de tener una presión de vapor baja, las reacciones involucradas son las siguientes (3):



No obstante, el ácido sulfúrico formado puede dar lugar a una transformación de estado gaseoso a partículas sólidas mediante reacciones, principalmente con el amoníaco (NH_3) presente en la atmósfera mediante las siguientes reacciones:



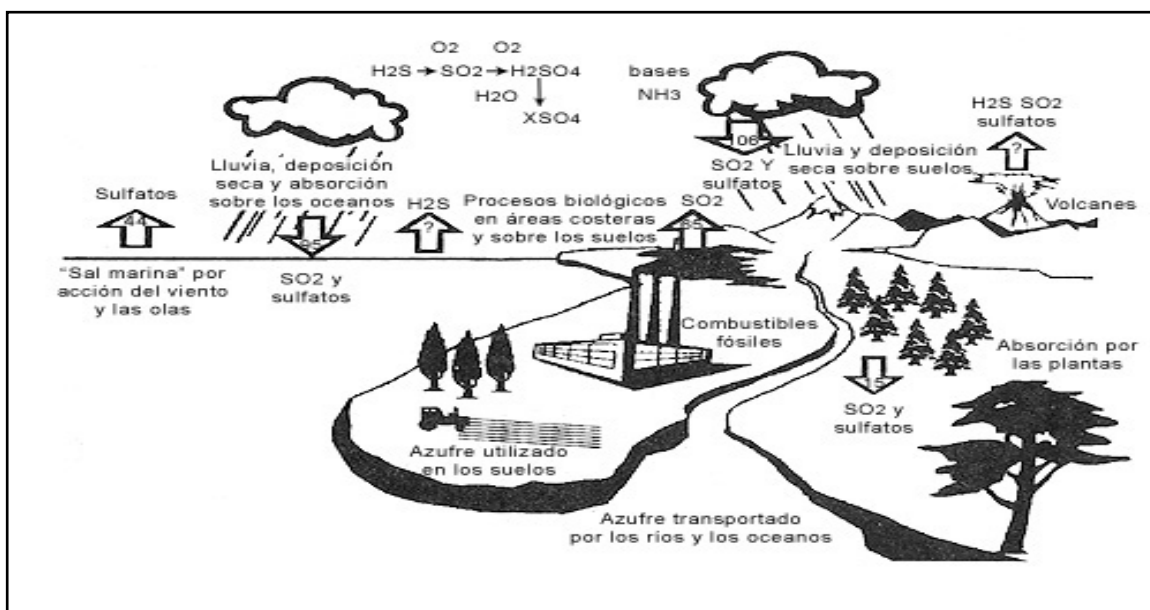


Figura 2.5. Ciclo Atmosférico del Azufre (3).

Las deposiciones atmosféricas sobre la superficie terrestre se pueden producir en forma de gas, partículas y precipitaciones. Sus efectos sobre el ecosistema terrestre son muy importantes, y uno de los más agresivos es el de la corrosión de los metales.

2.4.6. Efectos de las Variables Meteorológicas

Se encuentran relacionados con los cambios climáticos que ocurren en la atmósfera; entre los mas importantes podemos mencionar la humedad y la temperatura, así como también los contaminantes provenientes mayormente de las industrias químicas, entre los que podemos mencionar: el dióxido de azufre, los cloruros, oxido de nitrógeno, anhídrido carbónico entre otros que se explican a continuación:

2.4.6.1. Humedad Relativa

Es uno de los principales factores a considerar, la cual varía en función de las condiciones ambientales de la zona en estudio, ya que es una relación



entre la presión parcial del vapor de agua en el aire (P_{H_2O}) y la presión de saturación del aire en el vapor de agua (P_s) a una temperatura determinada (4).

$$\% HR = \frac{P_{H_2O}}{P_s} * 100 \quad (2.16)$$

Se considera que una humedad relativa menor del 30% es seca, mientras que mayor al 80% se considera húmeda.

Hay que hacer notar que una de las peores combinaciones que se pueden dar es la industria-mar, donde provienen determinadas sustancias contenidas en el aire la cual hace que aumente la velocidad de corrosión del metal, mediante la aparición de películas con un cierto grado de espesor.

En general, para cualquier metal que se pueda corroer en la atmósfera, hay un valor crítico de la humedad relativa, por debajo del cual no se corroe.

Este valor crítico de la humedad está determinado grandemente por la naturaleza higroscópica de algún contaminante sólido que pueda estar presente y por la del producto o productos de corrosión formados. De aquí la gran influencia ejercida por los contaminantes atmosféricos.

2.4.6.2. Temperatura

De acuerdo al incremento de temperatura del medio circundante, se puede afirmar que hay un aumento en la velocidad de corrosión del metal. Es por ello que la conjunción de varios factores con él mismo da lugar a una variedad de condiciones ambientales dando como resultado una menor o mayor agresividad en la zona.



2.5.6.3 Tiempo de Humectación

Es el periodo el cual una superficie metálica está cubierta por una película de electrolito (incluso adsorbida) que estimula significativamente la corrosión atmosférica, donde la humedad relativa sea mayor al 80% y la temperatura superior a 0°C, considerando que la humectación es intrínseca de las características de cada material, entre los tiempos de humectación se pueden mencionar (2):

- **Tiempo de humectación calculado:** Tiempo de humectación estimado a partir de relaciones temperatura-humedad relativa.
- **Tiempo de humectación experimental:** Tiempo de humectación determinado directamente por diferentes sistemas de medida.

2.5. Métodos de Análisis Cuantitativos

Se interesa en la determinación de qué cantidad de una sustancia en particular está presente en una analita (sustancia a analizar).

Por lo general consta principalmente de un muestreo en el cual se selecciona una muestra representativa del material, para su posterior medición, logrando los resultados que son requeridos. Para ello se emplean los instrumentos necesarios para la ejecución de los mismos, basados en análisis tanto químicos mediante estequiometría, leyes y análisis volumétricos mediante un reactivo consumido en la reacción.

2.5.1. Turbidimetría

Se debe a la suspensión de partículas en una sustancia líquida, midiendo la absorbancia mediante la dispersión del haz de luz en un



espectrofotómetro de acuerdo a su concentración. Se rige por la ecuación de la **Ley de Beer** como sigue (1):

$$A = \log_{10} \frac{P_o}{P} = K * b * c \quad (2.17)$$

dónde A es la absorbancia aparente, P_o es la potencia radiante del haz de luz incidente, P es la potencia del haz de luz emergente, K es una constante que se determina experimentalmente por ciertas soluciones de concentración conocida (patrones), b es la longitud del trayecto óptico y c es la concentración del precipitado.

2.5.2. Titulación por Precipitado (Determinación de sulfatos según Norma ASTM D-516)

No genera buenos resultados en comparación con las titulaciones Acido-Base, ya que tomando en consideración que las soluciones son diluidas, la velocidad de reacción es lenta y por consiguiente no es conveniente.

La reacción de adición del Cloruro de Bario (BaCl_2) a la solución de sulfato, genera un precipitado blanco (BaSO_4) mediante la siguiente reacción química:



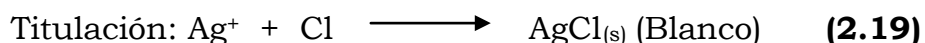
La adición de una solución acondicionadora (glicerol y alcohol) contribuye a que la solución de sulfato se estabilice y el precipitado esté más tiempo en suspensión, lo que conlleva a observar el cambio brusco en la dispersión luminosa a un valor constante, lo indica el punto final o punto de equivalencia en la titulación.



2.5.3. Titulación de Mohr (Determinación de Cloruros según Norma ASTM D-512).

Se basa en la formación de un precipitado rojizo en el punto final de la titulación mediante la adición de iones plata (Ag^+), utilizando como indicador el ión cromato (CrO_4^{-2}).

Como el cromato de plata (Ag_2CrO_4) es más soluble que el cloruro de plata (AgCl), es de suponer que la precipitación ocurra cerca del punto de equivalencia de la titulación, tomando en consideración el control de la concentración del ión cromato, las reacciones serían las siguientes:



La solubilidad de Ag_2CrO_4 es mayor que la de AgCl , lo que asegura que en estas condiciones precipite primero el cloruro de plata. La aparición del precipitado de Ag_2CrO_4 es útil como indicador del punto final, si se da justo cuando se ha llegado al punto de equivalencia.

El método de Mohr puede llevarse a cabo si el pH de la solución a valorar está comprendido entre 7 y 8.3. Por encima de pH 8.3 el ion plata tiende a formar el precipitado de hidróxido de plata, como consecuencia la cantidad efectiva de Ag^+ disminuye, lo que ocasiona que el gasto de solución valorante sea mayor que el esperado. Por debajo de pH 7 el ion cromato interviene en una serie de equilibrios ácido base que llevan a la formación de dicromato, con lo cual la cantidad de cromato disminuye y la aparición del precipitado de cromato de plata se da más allá del punto de equivalencia, introduciendo un error en la determinación.



El método de Mohr, como otros que utilicen Ag^+ como reactivo valorante para la determinación de cloruros, presenta el inconveniente de que pueden existir otras sustancias que precipiten con Ag^+ y por lo tanto interfieran en la exacta determinación de cloruros. Es el caso de la existencia de bromuro, yoduro, sulfuro, sulfito y tiosulfato que forman precipitados insolubles con plata, entonces debe realizarse su remoción para eliminar la interferencia.

En el caso de soluciones fuertemente coloreadas o turbias se debe previamente realizar una clarificación con un agente clarificante (carbón activado), que al colocarlo en la solución es capaz de adsorber las partículas que dan color o turbidez a la solución. Posteriormente por filtración se elimina el agente clarificante.

Cabe destacar que cuando se forme el precipitado de cromato de plata de acuerdo a su punto de equivalencia, es necesaria la estandarización de los iones plata con una solución de cloruro de sodio (NaCl) por éste mismo método.

2.5.4. Método Gravimétrico (Determinación de Polvos Atmosféricos según Norma ASTM D-1739).

Se realiza a través de métodos químicos tales como la medición de la masa, lo que hace que el proceso se realice de manera muy perfecta, mediante técnicas conocidas, como son la precipitación, extracción y separación, tomando en consideración una relación estequiométrica definida.

2.5.5. Conductividad

La conductividad eléctrica es un parámetro acumulativo de la concentración de iones de una solución, depende del grado de disociación de las sales presentes en el agua. Mientras más sales, ácidos o bases se encuentren disociados en una solución, más alta será su conductividad, se mide en $\mu\text{Siemens/cm}$ (1).



2.6. Métodos para el Control de la Corrosión

La resistencia a la corrosión es propia de cada material debido a que sus propiedades son intrínsecas, es por ello que la resistencia a corroerse de acuerdo a la interacción con el medio ambiente es de manera individual, lo que ocasiona llevar a cabo diferentes métodos para prevenir los mismos, entre los que podemos mencionar:

2.6.1. Selección del Material

Se basa en escoger el material más recomendable que satisfaga los requerimientos del proceso, tomando en consideración distintos factores que son primordiales para su desempeño entre los que podemos mencionar; propiedades físicas y mecánicas del material, resistencia a la corrosión, disponibilidad, facilidad de trabajo, tiempo de vida útil, etc., además de los aspectos económicos, antes que pensar en el material en sí mismo. La selección debería realizarse en base al material más económico, pero que reuniera la combinación de propiedades necesarias en una aplicación en particular.

A continuación se enunciarán algunas reglas generales para la selección de materiales:

- Para condiciones no oxidantes o reductoras tales como ácidos y soluciones acuosas libres de aire, se utilizan frecuentemente aleaciones de Ni y Cr.
- Para condiciones oxidantes se usan aleaciones que contengan Cr.
- Para condiciones altamente oxidantes se aconseja la utilización de Ti.
- Los elementos cerámicos poseen buena resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas pero son quebradizos, su utilización se restringe a procesos que no incluyan riesgos.



2.6.2. Inhibidores

Los inhibidores son sustancias químicas que protegen al metal contra el ataque electroquímico de soluciones agresivas. Son usados ampliamente por la industria para modificar el comportamiento de las aguas, a efectos de un mejor control de la corrosión (2).

El principio del funcionamiento de los inhibidores es formar en la superficie misma de los electrodos de la pila causante de la corrosión, sea un compuesto insoluble, sea la fijación de una determinada materia orgánica, con el objeto de polarizar la pila de corrosión.

2.6.3. Modificación del Ambiente

Los métodos de control más efectivos para minimizar la corrosión atmosférica tendrían que ver con la modificación de la atmósfera, eliminando los contaminantes, particularmente el SO_2 . Esto no puede realizarse en áreas expuestas al ambiente por lo que debe recurrirse a la protección de estructuras y equipos, por métodos específicos tales como pinturas, recubrimientos metálicos, entre otros. Entre los métodos utilizados para modificar el ambiente podemos mencionar (4):

- Bajando la temperatura se consigue disminuir la velocidad de reacción, por lo tanto, se disminuye el riesgo de corrosión.
- Disminuyendo la velocidad de un fluido corrosivo se reduce la corrosión por erosión. Sin embargo, para metales y aleaciones que se pasivan, es más importante evitar las disoluciones estancadas.
- Eliminar el oxígeno de las soluciones acuosas reduce la corrosión especialmente en las calderas de agua.

- La reducción de la concentración de iones corrosivos en una solución que esta corroyendo un metal puede hacer que disminuya la velocidad de corrosión, se utiliza principalmente en aceros inoxidables.
- La adición de inhibidores, que son principalmente catalizadores de retardo, disminuye las probabilidades de corrosión. En general, los inhibidores son agentes químicos, añadidos a la solución de electrolito, emigran preferentemente hacia la superficie del ánodo o del cátodo y producen una polarización por concentración o por resistencia.

2.6.4. Protección Catódica

La protección catódica constituye sin duda, el más importante de todos los métodos empleados para prevenir la corrosión de estructuras metálicas en el suelo o sumergidas en medios acuosos.

Tanto el acero, cobre, plomo y bronce son algunos de los metales que pueden ser protegidos de la corrosión por este método. La protección se logra aplicando una corriente externa a partir de un rectificador que suministra corriente continua de bajo voltaje. El terminal positivo de la fuente de corriente se conecta a un ánodo auxiliar (grafito por ejemplo) localizado a una determinada distancia de la estructura a proteger y el terminal negativo se conecta a la estructura metálica (2).

Una estructura también puede protegerse contra la corrosión mediante un ánodo galvánico o de sacrificio. Si el electrodo auxiliar es de un metal más activo que el metal que se quiere proteger, actuará de ánodo en la celda de corrosión. En este caso, la estructura actuará como cátodo y quedará protegida por el sacrificio del ánodo que se corroerá (2).

Este otro método de proteger catódicamente una estructura se utiliza cuando resulta inconveniente una fuente externa de corriente. Esencialmente,



el ánodo de sacrificio (de magnesio, aleaciones base de magnesio, cinc y aluminio) suministra la energía eléctrica necesaria para la protección de la estructura.

2.6.5. Recubrimientos

Para proteger los metales expuestos a la atmósfera, se recurre a menudo a las aplicaciones de recubrimientos, que pueden ser de distinta naturaleza: de pintura, metálicos, de conversión, orgánicos, etc. La capacidad protectora de estos recubrimientos disminuye con el tiempo en función de una serie de variables, entre las que ejerce un papel principal la contaminación atmosférica. Por lo tanto, para un sistema de protección es de gran utilidad disponer de datos cuantitativos sobre el efecto de la contaminación atmosférica en la vida del recubrimiento protector (2).

Así como el efecto de los contaminantes en la corrosión de metales descubiertos ha sido extensamente experimentado, son muy reducidos los trabajos en que se plantee el establecimiento de relaciones cuantitativas entre variables de contaminación y el comportamiento del recubrimiento protector. Los recubrimientos más seguros son los que se adhieren directamente al sustrato mediante múltiples capas hasta llegar a un espesor aproximado de 2,5 mm, tal es el caso de recubrimientos de vidrio, fibras, resinas reforzadas y cerámicos, este último a temperaturas mayores a las soportadas por el metal.

2.6.5.1. Pinturas

Los recubrimientos de pintura expuestos a la atmósfera depende del tiempo de humectación de la superficie pintada y de la contaminación ambiental. No obstante, a diferencia del metal descubierto, la estabilidad de los sistemas de pintura puede verse afectada en grado importante por otros



factores, como la acción de la luz solar (en particular la radiación ultravioleta), el ozono, la acción microbiológica, el desgaste por erosión, etc (2).

Este tipo de recubrimiento se realiza en fase líquida, debido a que sus componentes poseen la característica de soportar la corrosión del medio, cuando se tiene una velocidad de corrosión no mayor de aproximadamente 20 mpy (0,5 mm/año). Cabe destacar que en ambientes más severos se deben considerar otros métodos de recubrimiento tales como (6):

- Metálicos.
- De goma.
- Capas de plástico reforzadas con fibra de vidrio.
- Aleaciones más resistentes.

2.6.5.2. Recubrimientos Inorgánicos

En algunos casos es necesario hacer recubrimientos con material inorgánico, los más usados son el vidrio y los cerámicos, estos recubrimientos proporcionan acabados tersos y duraderos. Aunque si se expone un pequeño lugar anódico se experimenta una corrosión rápida pero fácil de localizar (2).

2.6.5.3. Recubrimientos orgánicos

El uso de pinturas, lacas, barnices y muchos materiales orgánicos poliméricos han dado muy buen resultado como protección contra la corrosión. Estos materiales proveen barreras finas tenaces y duraderas para proteger el sustrato metálico de medios corrosivos (2).

El uso de capas orgánicas protege más el metal de la corrosión que muchos otros métodos. Aunque debe escogerse muy bien, ya que hay procesos



que incluyen tratamientos con alcoholes que en algún momento pueden disolver los materiales orgánicos.

Este quizá el método más efectivo para el control de la corrosión, ya que si hacemos un buen diseño y una buena planeación podemos evitar dicho fenómeno, a continuación se enumeraran algunas reglas generales que se deben seguir:

- Se debe tener en cuenta la acción penetrante de la corrosión junto con los requerimientos de la fuerza mecánica cuando se considere el espesor del metal utilizado. Esto se utiliza para tuberías y tanques que contengan líquidos.
- Son preferibles los recipientes soldados que los remachados para reducir la corrosión por grieta
- Se deben usar preferiblemente metales galvánicamente similares para prevenir la corrosión galvánica. Si se atornillan metales no similares galvánicamente se deben usar arandelas no metálicas para eliminar contactos eléctricos entre los materiales.
- Es preciso evitar tensión excesiva y concentraciones de tensión en entornos corrosivos, para prevenir la ruptura por corrosión por esfuerzos, especialmente en aceros inoxidables, latones y otros materiales susceptibles a este tipo de corrosión.
- Se deben evitar recodos agudos en sistemas de tuberías por donde circulan fluidos. En estas áreas donde cambia la dirección del fluido bruscamente se potencia la corrosión por erosión.
- Se deben diseñar los tanques y recipientes de una manera que sean fáciles de limpiar y desaguar, ya que el estancamiento de sustancias corrosivas provoca la aparición de celdas por concentración.
- Se debe hacer un diseño eficiente de aquellas piezas que se espera queden inservibles en poco tiempo, para que sean fáciles de reemplazar.

- Es importante también diseñar sistemas de calefacción que no den lugar a zonas puntuales calientes, los cambios de calor ocasionan corrosión.

2.6.5.4. Recubrimientos metálicos

Los recubrimientos se aplican mediante capas finas que separan el ambiente corrosivo del metal, es decir que puedan servir como ánodos sacrificables que puedan ser corroídos en lugar del metal subyacente. Los galvanizados son un buen ejemplo de este caso. Un recubrimiento continuo de zinc y estaño aísla el acero respecto al electrolito. A veces se presentan fallas con estos metales, cuando el riesgo de corrosión es muy elevado se recomienda hacer un recubrimiento con Alclad (2).

El Alclad es un producto forjado, compuesto formado por un núcleo de una aleación de aluminio y que tiene en una o dos superficies un recubrimiento de aluminio o aleación de aluminio que es anódico al núcleo y por lo tanto protege electroquímicamente al núcleo contra la corrosión.

En conclusión, podemos decir que la selección del material es decisiva para la protección anticorrosiva, ya que los materiales activos y los pasivos se pueden utilizar cuando las medidas técnicas y constructivas no puedan garantizar una durabilidad técnica o de rentabilidad.

La activa ocurre cuando existe un ataque en la cadena de reacciones corrosivas, disminuyendo la velocidad de corrosión del metal, tal es el caso de evitar la difusión de un componente, preparación del corrosivo mediante aditivos e inhibidores, fraguado de los producción de reacción, aplicación de corriente continuo y reducción de esfuerzos mecánicos o de vibraciones.

La pasiva al contrario significa la separación del material metálico y el medio de ataque por una capa intermedia, tales como recubrimientos orgánicos

y/o revestimientos. Cuando ocurren simultáneamente la activa y pasiva se pueden realizar capas superficiales, mediante inhibidores o pasivadores, ya que son más efectivos a pesar del desgaste, fricción y protección térmica (2).

En la Figura 2.6 se muestra un resumen de lo antes mencionado:

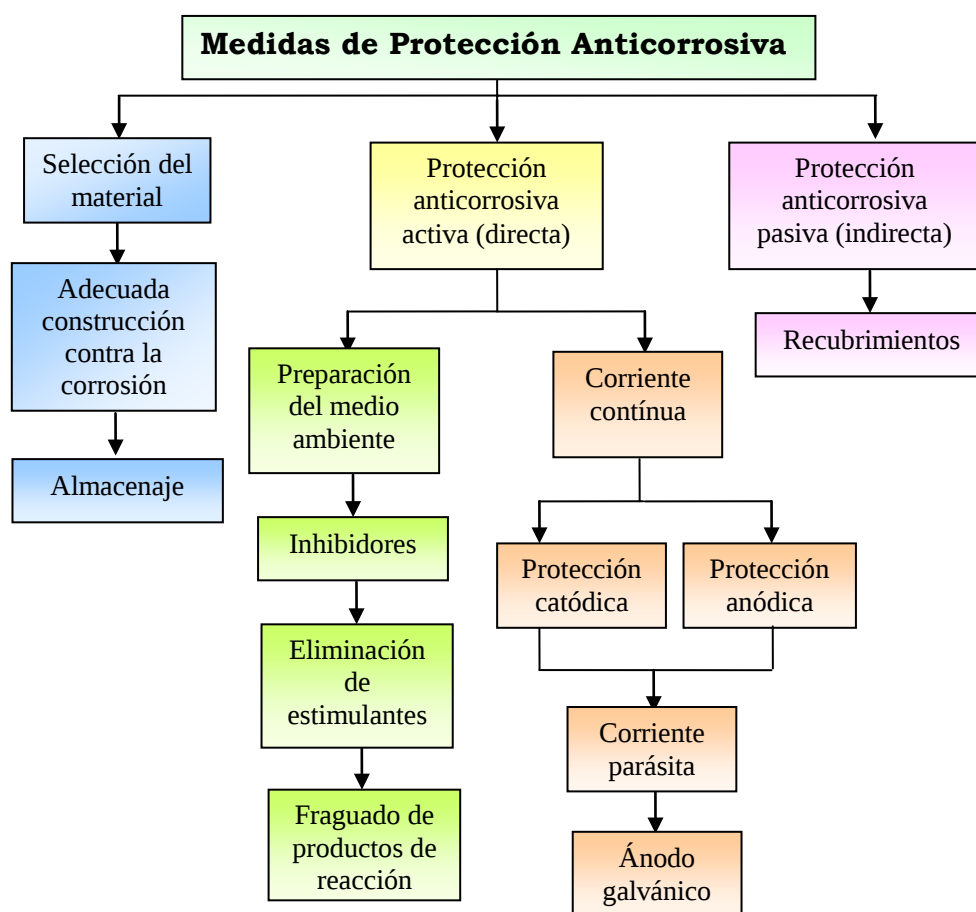


Figura 2.6. Posibilidades de protección anticorrosiva. Fuente: Propia



CAPITULO 3. MARCO METODOLOGICO

En el presente capitulo se presenta una descripción detallada de la zona donde se realizó el monitoreo, los materiales y equipos utilizados en la elaboración de los captadores aeroquímicos, así como también la metodología de los análisis cuantitativos bajo las normas estándares establecidas.

3.1 Área de Monitoreo

La subestación CVG Edelca La Arenosa a 765 kV, se encuentra en una zona rural donde se desarrolla las actividades de agricultura y ganadería, y en la actualidad se encuentra en las adyacencias de ésta la empresa productora de asfalto La Arenosa; cuenta para su transmisión de energía un espacio físico donde se encuentran equipos tales como: autotransformadores, generadores, seccionadores, compresores y estructuras metálicas construidas en su mayoría por hierro galvanizado.

La selección del lugar de monitoreo se basó fundamentalmente en evaluar y estimar la deposición de los principales agentes aeroquímicos en la subestación CVG Edelca La Arenosa a 765 kV con el propósito de caracterizar la agresividad de la atmósfera del medio que inciden en los diferentes equipos y materiales a través de normas establecidas.

El área de monitoreo debe ser seleccionada en función de la dirección de los vientos preferenciales, donde las muestras se encuentren en un área abierta, de tal manera que incidan de forma directa sobre los captadores aeroquímicos permitiendo la mayor deposición de los contaminantes.



3.2. Duración del muestreo

La recolección de muestras en el lugar de monitoreo se llevó a cabo mediante la aplicación de las normas ISO 9225, con la finalidad de caracterizar la atmósfera circundante presentes en la subestación CVG Edelca La Arenosa a 765 kV.

La captación de muestras se realizó para un período comprendido de doce (12) meses durante las 24 horas del día, comenzando el 31 de Mayo de 2006 hasta el 26 de Julio de 2007, según la tabla 3.1 que se especifica a continuación:

TABLA 3.1
PERÍODOS DE MONITOREO DE CAPTADORES DE MUESTRAS

Período	Fecha de Inicio	Fecha de reemplazo
1	31 de Mayo de 2006	25 de Julio de 2006
2	25 de Julio de 2006	19 de Septiembre de 2006
3	19 de Septiembre de 2006	25 de Octubre de 2006
4	25 de Octubre de 2006	24 de Noviembre de 2006
5	24 de Noviembre de 2006	23 de Diciembre de 2006
6	23 de Diciembre de 2006	08 de Febrero de 2007
7	08 de Febrero de 2007	23 de Abril de 2007
8	23 de Abril de 2007	21 de Mayo de 2007
9	21 de Mayo de 2007	27 de Junio de 2007
10	27 de Junio de 2007	26 de Julio de 2007

3.2.1 Niveles Muestreados

La ubicación de las muestras a monitorear se colocaron a dos (2) niveles de altura, el primer nivel a un (1) metro de la superficie del suelo y el segundo nivel ubicado a 18 metros de altura de dicha superficie como se observa en las Figuras 3.1 y 3.2, con la finalidad de recolectar y cuantificar los diferentes contaminantes presentes en la atmósfera en estudio.



Figura 3.1. Ubicación de Colectores al Nivel 1



Figura 3.2. Ubicación de Colectores al Nivel 2.

3.3 Equipos y Materiales para el monitoreo aeroquímico

Tomando en consideración las casetas elaboradas por Bárcenas y Gámez ⁽⁶⁾ para la captación de sulfatos, cloruros y polvos atmosféricos, solo se tomarán en cuenta la elaboración de las muestras problemas en el área de monitoreo.

3.3.1 Captador de Sulfatos

Los captadores de sulfatos son elaborados en un cilindro de PVC, siguiendo las normas ISO 9225, el cual es cubierto con una tela de popelina que posee una pasta a base de óxido de plomo (IV), cubriendo toda el área del mismo (Figura 3.3), manteniéndola en envases plásticos herméticamente cerrados hasta su uso, para evitar así la contaminación de la muestra.



Figura 3.3. Captador de sulfatos

Este captador, llamado también “vela de plomo” se coloca en las casetas destinadas para tal fin, protegiéndola de agentes externos tales como la lluvia, animales, insectos, manipulaciones de personas, etc., logrando de esta manera captar la cantidad de sulfato presente en la atmósfera en el tiempo de exposición indicado.

Para la elaboración de este tipo de captadores se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Tela popelina blanca.
- Tubo PVC (1” diámetro, 18 cm de longitud)
- Cinta plástica.
- Goma tragacanto.
- Balanza analítica.
- Vidrio de reloj.
- Guantes de goma.
- Oxido de plomo (IV).
- Etanol al 95% v/v.
- Agua destilada.
- Plancha calentadora.
- Mascarilla.
- Tijeras.

- Beacker de 250 mL.
- Espátula.
- Campana extractora.
- Cilindro graduado de 100 mL.

3.3.2 Captador de Cloruros

El captador de cloruros se elaboró siguiendo las normas ISO 9225 y ASTM D-512, conocido como método de la “vela húmeda”, el cual consta de una gasa clínica envuelta en un tubo de PVC, en el que uno de los extremos de la gasa se encuentra en contacto con una solución de 200 ml de glicerina y agua destilada en proporciones establecidas (20% p/p), en un erlenmeyer de vidrio previstos para tal fin, dicho montaje puede verse a continuación, mediante la Figura 3.4.



Figura 3.4. Colector de Cloruros.

Para la elaboración de los captadores se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

- Gasa clínica.
- Tubo PVC (1" de diámetro y 18 cm de longitud).

- Tapón horadado.
- Erlenmeyer de 1L.
- Glicerina.
- Agua destilada.
- Tijeras.
- Cilindro graduado de 100 mL.

3.3.3 Colector de Polvos Atmosféricos

Los captadores de polvo se elaboraron siguiendo las normas ISO 9225, mediante un tubo de PVC, con el fin de realizar el análisis de sólidos solubles e insolubles, mediante el método de filtrado por diferencia de pesada de acuerdo a la norma ASTM D-1739.

Dichos colectores fueron tapados con mallas de plástico para evitar la entrada de agentes externos tales como insectos y/o cualquier otro objeto que altere la muestra, ubicadas en los dos (2) niveles indicados anteriormente según las Figuras 3.5 y 3.6.



Figura 3.5. Colector de Polvos Atmosféricos

Nivel I.



Figura 3.6. Colector de Polvos Atmosféricos

Nivel II.



Los materiales y equipos utilizados en la elaboración de los mismos fueron los siguientes:

- Tubo PVC (6" de diámetro y 55 cm de longitud)
- Malla plástica.
- Precintos plásticos.
- Cilindro graduado de 500 mL.
- Balanza.
- Agua destilada.
- Sulfato de cobre.
- Acido octanoico (opcional).

3.4. Procesamiento de las muestras

Para el análisis cuantitativo de las muestras problemas bajo las normas ASTM y ISO 9225, se tomaron en consideración métodos volumétricos, turbidimétricos y gravimétricos, por medio de la utilización de diferentes instrumentos de laboratorio (material de vidrio y equipos eléctricos), así como también de reactivos químicos que permiten el desarrollo progresivo de los análisis que a continuación se mencionan:

3.4.1 Análisis de Sulfatos. Determinación de la sulfatación de la atmósfera.

El grado de contaminación por compuestos de azufre se determina por el método de óxido de plomo IV (Vela de plomo) bajo la norma ISO/DP 9225 y la determinación de la concentración de sulfato se realiza por el método turbidimétrico de la norma ASTM D516.

En la Figura 3.7 se muestra un diagrama de flujo donde se muestran los pasos metodológicos para la determinación de la sulfatación total de la atmósfera.

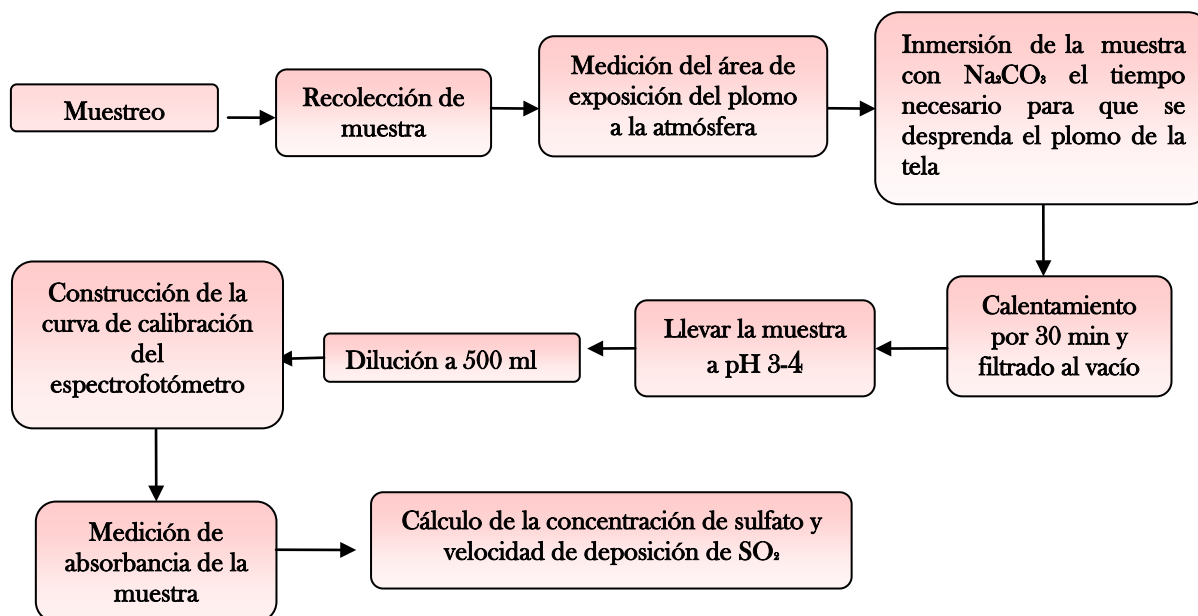


Figura 3.7. Diagrama de flujo para la determinación de la Sulfatación Total de la Atmósfera

3.4.1.1 Fundamento del método de análisis

Inicialmente se filtra la muestra y luego se neutraliza con ácido clorhídrico (HCl) como titulante para acondicionar la muestra problema a pH entre 3-4 (figura 3.8), para posteriormente realizar un análisis espectrofotométrico con el fin de determinar la concentración de sulfatos presentes en la analita por medio de un método turbidimétrico.

Luego la muestra, se trata con solución acondicionadora (que se compone de glicerina y etanol) para modificar su viscosidad y luego se le agrega cloruro de bario, que en medio ácido forma un precipitado blanquecino de sulfato de bario (BaSO_4), quedando en suspensión por efecto de la solución acondicionadora, lo que produce valores de turbidez estables. Luego estos

valores de turbidez son medidos por el espectrofotómetro o colorímetro calibrado en una longitud de onda de 420 nm, y luego se compara con la curva de calibración del mismo para obtener los ppm presentes en la muestra.

Las principales interferencias para este método son los sólidos en suspensión, sílice y materia orgánica, las cuales pueden ser retiradas por filtración antes del análisis. El rango de medición para este método es de 0 a 25 ppm.



Figura 3.8. Equipo de titulación utilizado en el análisis de sulfatos.

3.4.1.2. Materiales, reactivos y equipos

Los materiales y soluciones utilizados para analizar la vela de plomo son los siguientes:

- Spectronic 20
- Celdas para Spectronic 20
- Cloruro de Bario ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- HCl 4 N
- Indicador de Naranja de Metilo
- Solución estándar de Sulfato
- Solución Acondicionadora
- 2 Balones Aforados de 1L

- 8 Balones Aforados de 100 ml
- Matraces Erlenmeyer de 125 ml
- Pipetas volumétricas de 5 y 10 ml
- Beakers de 250 ml
- Bureta 100 ml
- Plancha calentadora con agitador magnético
- pH- metro digital (portátil o de mesa)
- Vidrios de Reloj
- Filtro Kitasato (fitro al vacío)
- Papel de filtro Whattman

❖ Preparación de soluciones

- **Solución Estándar de Sulfatos:** Disolver 0.1479 g de Sulfato de sodio anhidro (Na_2SO_4) en agua destilada y diluir hasta 1 L. Esta solución contiene 0.100 mg $\text{SO}_4^{=}$ / ml.
- **Solución Acondicionadora:** Mezclar 30 ml de HCl concentrado, 300 ml de agua destilada, 100 ml de etanol al 95% y 75 g de NaCl en un frasco, y luego adicionar 50 ml de glicerina y agitar suavemente (Figura 3.9)



Figura 3.9 Preparación de la solución Acondicionadora (Agregando 75 g de NaCl).

3.4.1.3. Elaboración de la curva de calibración

1. Preparar ocho balones con soluciones patrón en balones aforados de 100 ml según tabla 3.2 y figura 3.10.
2. Calibrar el Spectronic 20 a 420 nm, llenar la celda con la solución 0 ml de sulfato e introducir en el porta celda. Llevar a cero absorbancia con la perilla. Sacar la celda y llevar a 100% absorbancia.(figura 3.11).
3. Adicionar 0.3 g de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y agitar suavemente por 1 minuto. Reposar 4 minutos y agitar de nuevo durante 15 minutos más.(figura 3.12 y 3.13).
4. Leer la absorbancia de cada patrón en el Spectronic 20 y tomar nota.
5. Graficar los valores obtenidos de absorbancia de cada patrón con respecto a los valores de concentración de sulfato respectivos. (Figura 3.14 y Apéndice A).

TABLA 3.2
SOLUCIONES PATRÓN A DIFERENTES CONCENTRACIONES DE
SULFATO PARA LA CURVA DE CALIBRACIÓN DEL SPECTRONIC 20

Patrón	Volumen de solución estándar (ml)	Volumen de solución Acondicionadora (ml)	Volumen H_2O (ml)
1	0	5	95
2	2	5	93
3	5	5	90
4	10	5	85
5	15	5	80
6	20	5	75
7	30	5	65
8	40	5	55

Fuente: propia



Figura 3.10. Balones aforados a 100 ml con soluciones patrón de sulfato



Figura 3.11. Equipo de espectrofotometría (Spectronic 20)



Figura 3.13. Adicionar 0.3 g de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



Figura 3.12. Agitar la mezcla anterior por 1 min

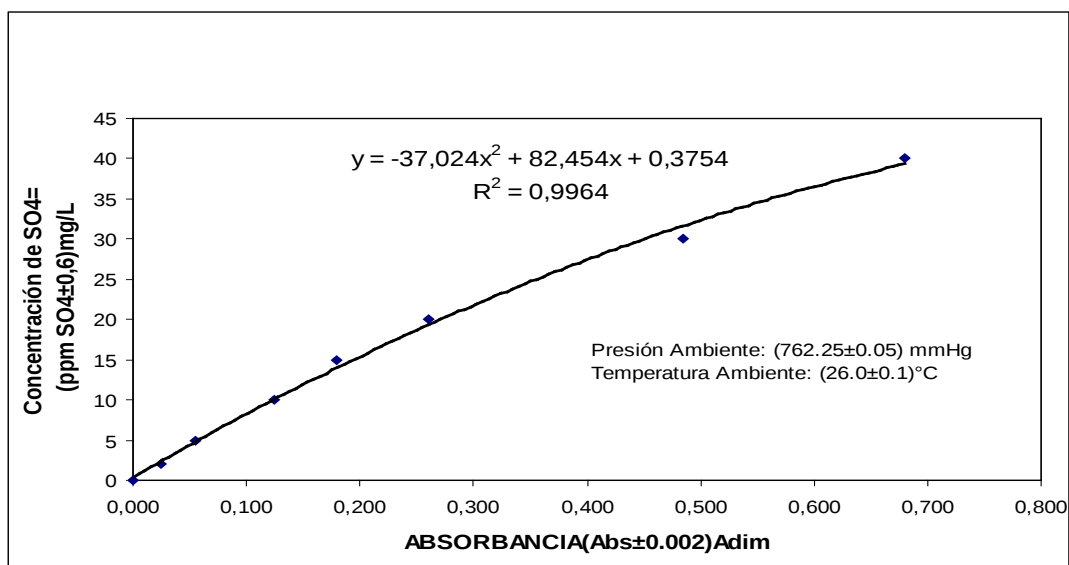


Figura 3.14. Curva de calibración Mayo- Julio 2006.

Equipo de espectrofotometría

El equipo utilizado fue el Espectronic 20, instrumento que sirve para medir absorbancia o transmitancia de una muestra problema en función de una longitud de onda determinada, midiendo la cantidad de luz absorbida por medio de un haz de luz monocromático (Figura 3.11).

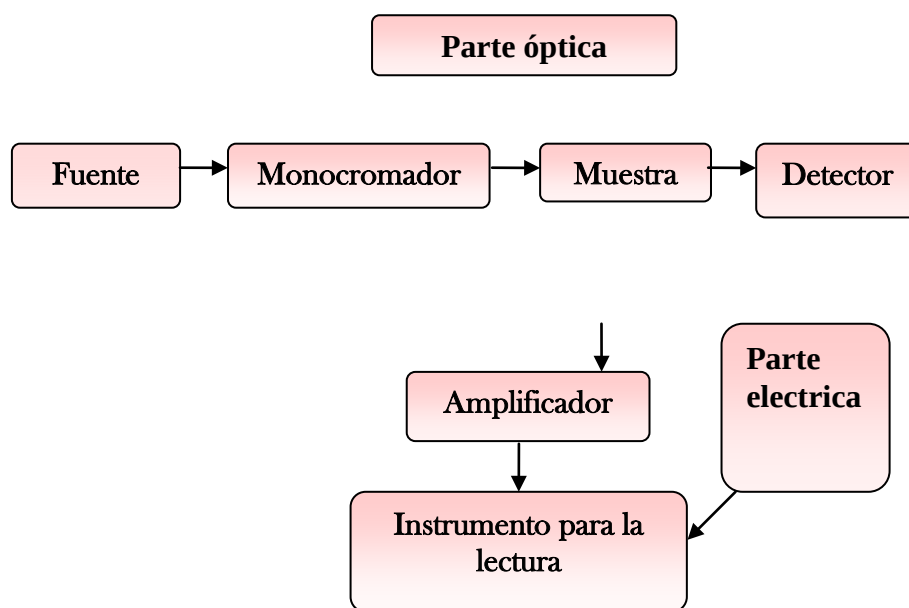


Figura 3.15. Diagrama de Bloque del Funcionamiento del Espectrofotómetro.

Según la Ley de Beer-Lambert, la concentración de la muestra es proporcional a su absorbancia, de modo que se puede expresar mediante:

$$A = a * b * c \quad (3.1)$$

Donde:

A: Absorbancia de la muestra (adim).

a: Coeficiente de absorción (L/g*cm).



- b: Longitud de trayectoria del haz de radiación a través del medio absorbente (cm).
- c: Concentración del soluto absorbente (g/L).

También se puede expresar como el inverso de la transmitancia (T) (fracción de energía incidente que es transmitida por la muestra), por lo que la absorbancia se puede enunciar como sigue:

$$\%T = -\log A \quad (3.2)$$

3.4.1.4. Metodología para determinar la sulfatación de la atmósfera.

1. Separar la tela que contiene plomo del tubo de PVC, y medir el área de la superficie (por triplicado) expuesta a la atmósfera.
2. Cortar en trozos la tela y colocarlos en un Beacker con 5 g de NaCO_3 disueltos en 60 ml de agua destilada, reposar por 48 horas o hasta que el plomo se haya desprendido de la tela.
3. Hervir la mezcla en una plancha calentadora por espacio de 30 minutos, con un mínimo de evaporación y tapar el Beacker con un vidrio de reloj. Realizar esto dentro de la campana extractora.
4. Filtrar el contenido del Beacker al vacío, lavando con suficiente agua destilada (figura 3.16).
5. Acidificar con HCl 4N hasta un pH 3-4 utilizando el pH-metro y agitación constante, o a falta de éste titular con naranja de metilo como indicador hasta el punto de equivalencia (Color Rosado fuerte). Evitar la pérdida de muestra por espuma, si esto ocurre, bajar la velocidad del agitador y del paso de ácido.
6. Llevar la solución filtrada a un balón aforado de 500 ml, aforar e identificar la muestra.
7. Realizar la curva de calibración.

8. Colocar en un Erlenmeyer de 250 ml, 100 ml de la muestra y adicionar 5 ml de solución acondicionadora.
9. Llenar la celda del espectrofotómetro con agua destilada, limpiar con un paño limpio y seco, introducirla en el porta celda y calibrar a cero absorbancia, para compensar cualquier interferencia que haya en la muestra.
10. Agregar 0.3 g de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, agitando constantemente hasta un minuto. Dejar reposar por 4 minutos y agitar de nuevo por espacio de 15 segundos más, colocar la muestra en el espectrofotómetro y medir.
11. Tomar nota de la medición.



Figura 3.16. Filtrado de la muestra al vacío

3.4.1.5 Determinación de la concentración de sulfatos y velocidad de deposición de dióxido de azufre.

La velocidad de deposición del dióxido de azufre en función de la concentración de iones sulfato presentes en la atmósfera se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_{\text{SO}_2} = \frac{C_m * V_m * 10000 * PM_{\text{SO}_2}}{A_{\text{exp}} * t * 1000 * PM_{\text{SO}_4}} \quad (3.1)$$

Donde:



V_{SO_2} : Velocidad de deposición de dióxido de azufre, (mg/m²*día).

C_m : concentración de la muestra problema, (ppm $SO_4^{=}$).

V_m : Volumen de la alícuota de muestra analizada, (ml).

A_{exp} : Área de exposición a la atmósfera, (cm²).

t : tiempo de exposición a la atmósfera, (días).

PM_{SO_2} : Peso molecular del SO_2 (64,065), (g/gmol).

PM_{SO_4} : Peso molecular del $SO_4^{=}$ (96,065), (g/gmol).

$$C_m = ppmSO_4^{=} * F_D \quad (3.2)$$

Donde:

$ppmSO_4^{=}$: ppm leídos en la curva de calibración, (mg/L).

F_D : Factor de dilución, (Adim).

$$F_D = \frac{V_M}{V_m} \quad (3.3)$$

Donde:

V_M : Volumen total de la muestra luego de la dilución, (ml).

$$A_{exp} = \bar{L} * \bar{A} \quad (3.4)$$

Donde:

$\bar{L}$: Largo promedio de la tela, (cm)

$\bar{A}$: Ancho promedio de la tela, (cm)

3.4.2. Determinación de la salinidad de la atmósfera. Análisis de Cloruros.

El análisis y determinación se basa en su totalidad en la norma ASTM D512-67. En la Figura 3.17, se muestra el procedimiento a seguir para la determinación de cloruros presentes en la atmósfera.

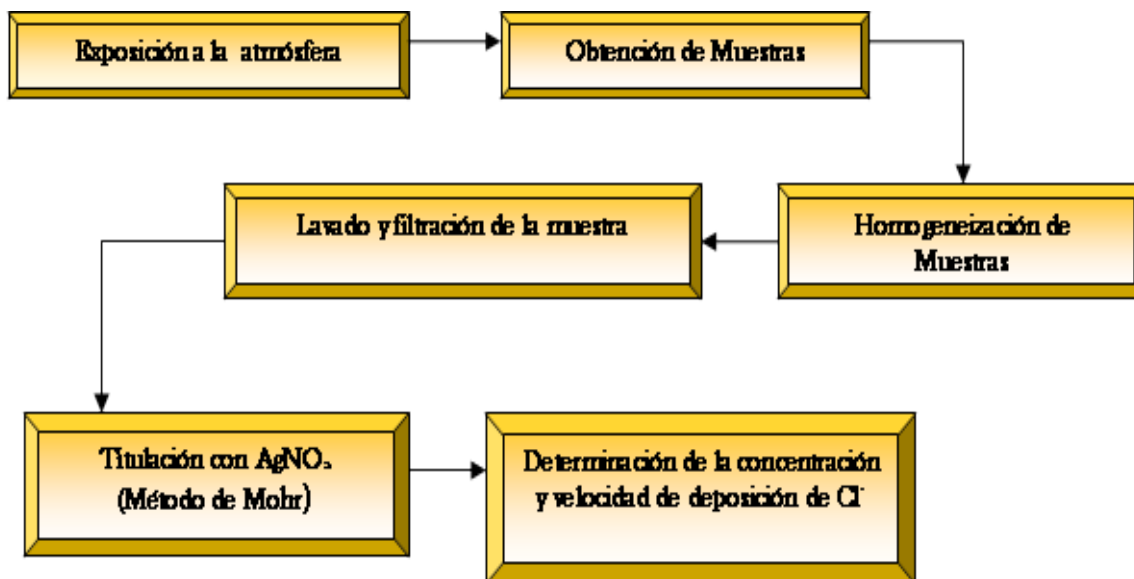


Figura 3.17. Diagrama de Flujo para la Determinación de Salinidad Total de la Atmósfera

3.4.2.1 Fundamento del método de análisis

Para determinar los cloruros presentes en la atmósfera estudiada, primeramente se prepara la muestra mediante lavado y filtrado simultáneamente para luego analizarla por el método volumétrico de Mohr.

Consiste en valorar con una solución de nitrato de plata, una solución de la muestra que contiene cloruros.

Dicha titulación se realiza utilizando los equipos e instrumentos necesarios para tal fin según las normas ASTM D-512 entre las que podemos mencionar: una microbureta ambar de 10 ml en el cual las adiciones de nitrato pueden ser mas controladas, una plancha con agitador magnético de manera de garantizar la mezcla del titulante con la solución problema y esperar la

coloración del precipitado que se desea obtener, un pH-metro que aporta los resultados obtenidos, así como un beacker para realizar dicha titulación, como se muestra en la Figura 3.18.



Figura 3.18 Equipo de valoración utilizado en el análisis de Cloruros.

La técnica volumétrica mediante el método de Mohr llamada también titulación “Argentométrica” permite conocer la concentración de iones cloruros (Cl^-) en una solución o muestra problema, utilizando el nitrato de plata (AgNO_3) como titulante (solución patrón) y el cromato de potasio (K_2CrO_4) como indicador.

Para ello se hace indispensable una solución de cloruro de sodio (NaCl) de concentración conocida con la finalidad de estandarizar la solución de nitrato utilizando el indicador antes mencionado, ya que el nitrato es muy sensible a la luz ultravioleta lo que hace que su concentración varíe, por consiguiente es recomendable estandarizar dicho nitrato para la realización de los análisis respectivos.

El pH de la muestra a titular debe estar entre 7 y 8,3, ya que a mayor pH el ión plata (Ag^+) precipita como hidróxido de plata (AgOH), mientras que a pH menor el cromato se oxida a dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) lo que afecta el viraje del indicador.



Para regular el pH deseado se utilizaron soluciones de hidróxido de sodio (NaOH) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) de concentraciones sugeridas en la norma ISO 9225, al cual se añadieron pequeñas cantidades con jeringas

desechables, con la finalidad de no provocar cambios bruscos en el pH de la solución problema.

3.4.2.2. Materiales, reactivos y equipos.

- Microbureta 10 ml color ambar.
- Bureta de 50 ml.
- NaOH 10% v/v.
- Indicador Cromato de Potasio.
- Solución patrón de NaCl 0.025 N.
- Solución $AgNO_3$ 0.025 N.
- 2 Balones aforados de 1 L.
- Pipetas volumétricas de 25 ml.
- 2 Beacker de 100 ml.
- 2 Beacker de 50 ml.
- Soporte Universal.
- Medidor de pH digital (pH-metro).
- Vidrios de reloj.
- 2 Embudos para filtrado y 2 kitasatos.
- Suficiente papel de filtro Wattman.

❖ Preparación de soluciones.

- 1. Solución de Hidróxido de Sodio (10% v/v):** Disolver 10 g de hidróxido de sodio NaOH en agua y diluir a 1 L en un balón volumétrico.

- 2. Acido Sulfúrico (1:19):** Adicionar con cuidado 1 volumen de ácido sulfúrico concentrado (sgr. 1.84) en 19 volúmenes de agua, agitando suavemente en forma continua.
- 3. Solución indicadora de cromato de potasio (K_2CrO_4):** Disolver 50 g de cromato de potasio en 100 ml de agua, adicionar solución de nitrato de plata ($AgNO_3$) en gotas hasta producir un ligero precipitado rojo. Dejar reposar por espacio de 24 horas. Luego filtrar la solución para remover el precipitado y finalmente diluir a 1L.
- 4. Solución patrón de cloruro de sodio (0.025 N):** Secar 5 g de cloruro de Sodio por 2 horas a $105^\circ C$. Disolver 1.4613 g de sal seca en agua y diluir a 1L a $20^\circ C$ en un balón aforado (Figura 3.19).
- 5. Solución estándar de Nitrato de Plata (0.025 N):** Pesar aproximadamente 5 g de cristales de nitrato de plata y secar a $40^\circ C$ por media hora. Disolver 4.2473 g de los cristales secos en agua destilada y diluir a 1 L (Figura 3.20).



Figura 3.19. NaCl y Nitrato de Plata (de izquierda a derecha) Secos y pesados



Figura 3.20. Preparación de la solución estándar de Nitrato de Plata.

❖ **Estandarización del nitrato de plata**

Tomar dos alícuotas de 25 y 50 ml de solución patrón de cloruro de sodio 0.025 N en Beakers de 50 y 100 ml respectivamente. Agregar 1ml (10 gotas) de indicador cromato de potasio tornándose cada una a color amarillento, luego con la bureta de 50 ml, añadir gota a gota (una alícuota por

vez) solución estándar de Nitrato de Plata hasta obtener un color rojo ladrillo persistente en toda la solución (Figuras 3.21 a la 3.24).



Figura 3.21. Alícuotas de solución patrón de NaCl con cromato de potasio.



Figura 3.22 Titulación de la solución patrón de NaCl con solución estándar de Nitrato de Plata



Figura 3.23 Detalle de la titulación y donde se nota la proximidad del punto final.



Figura 3.24. Punto final de la titulación

Luego se toma nota del volumen de solución estándar de nitrato de plata gastado para cada alícuota y se procede a calcular la normalidad por volumetría:



$$V_1 * N_1 = V_2 * N_2 \quad (3.5)$$

Donde:

V₁: Volumen de la solución de NaCl, (ml).

N₁: Normalidad de la solución de NaCl, (N).

V₂: Volumen de la solución de AgNO₃ gastado en la titulación, (ml).

N₂: Normalidad de AgNO₃, (N).

Después de obtenida la normalidad de la solución estándar para cada alícuota, se procede a promediar ambas, y el resultado es la concentración de dicha solución.

3.4.2.3 Determinación de la concentración y velocidad de deposición de los cloruros.

Para calcular la concentración y velocidad de deposición de los cloruros presentes en la atmósfera estudiada, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$V_{CL^-} = \frac{C_{CL^-} * V_d * 10000}{Ae * t} \quad (3.6)$$

V_{CL⁻} : Velocidad de deposición de cloruros (mg/m² * día)

C_{CL⁻} : concentración de cloruros (mg/L)

V_d: Volumen total de dilución de la muestra. (L)

Ae: Area de exposición a la atmósfera (cm²)

t: tiempo de exposición a la atmósfera (días)

$$C_{cl-} = \frac{(V_{G1} - V_{G2}) * N_2 * 1000 * PM_{CL_2}}{V_{1A}} \quad (3.7)$$

Donde:

V_{G1}: Volumen gastado de nitrato de plata en la alícuota 1 (ml)

V_{G2}: Volumen gastado de nitrato de plata en la alícuota 2 (ml)

V_{1A} : volumen de la alícuota titulada (ml)

3.4.3. Análisis de polvos atmosféricos sedimentables

Este tipo de análisis se basa en determinar la cantidad de polvos solubles e insolubles presentes en la muestra según la norma ASTM 1739 con los equipos e instrumentos recomendables según la norma ISO 9225, entre los que podemos mencionar: cápsulas de porcelana y papel de filtro, indispensables para la cuantificación respectiva (Figura 3.26).

Para el caso de los polvos sedimentables se requiere un análisis preciso del mismo, para ello se hace uso de un erlenmeyer de vacío, un embudo de porcelana, mangueras de goma, filtros de papel (previamente secados en la estufa y en el desecador para eliminar la humedad presente en la misma para posteriormente pesarlos en la balanza electrónica) y bombas de vacío, como se muestra en la Figura 3.27.

Luego de ser filtrada toda la muestra, cada filtro debe ser secado de la forma descrita anteriormente con la finalidad de conocer la cantidad de polvos insolubles a través de una diferencia en peso antes y después del filtrado.





Figura 3.25. Equipo de filtración al vacío

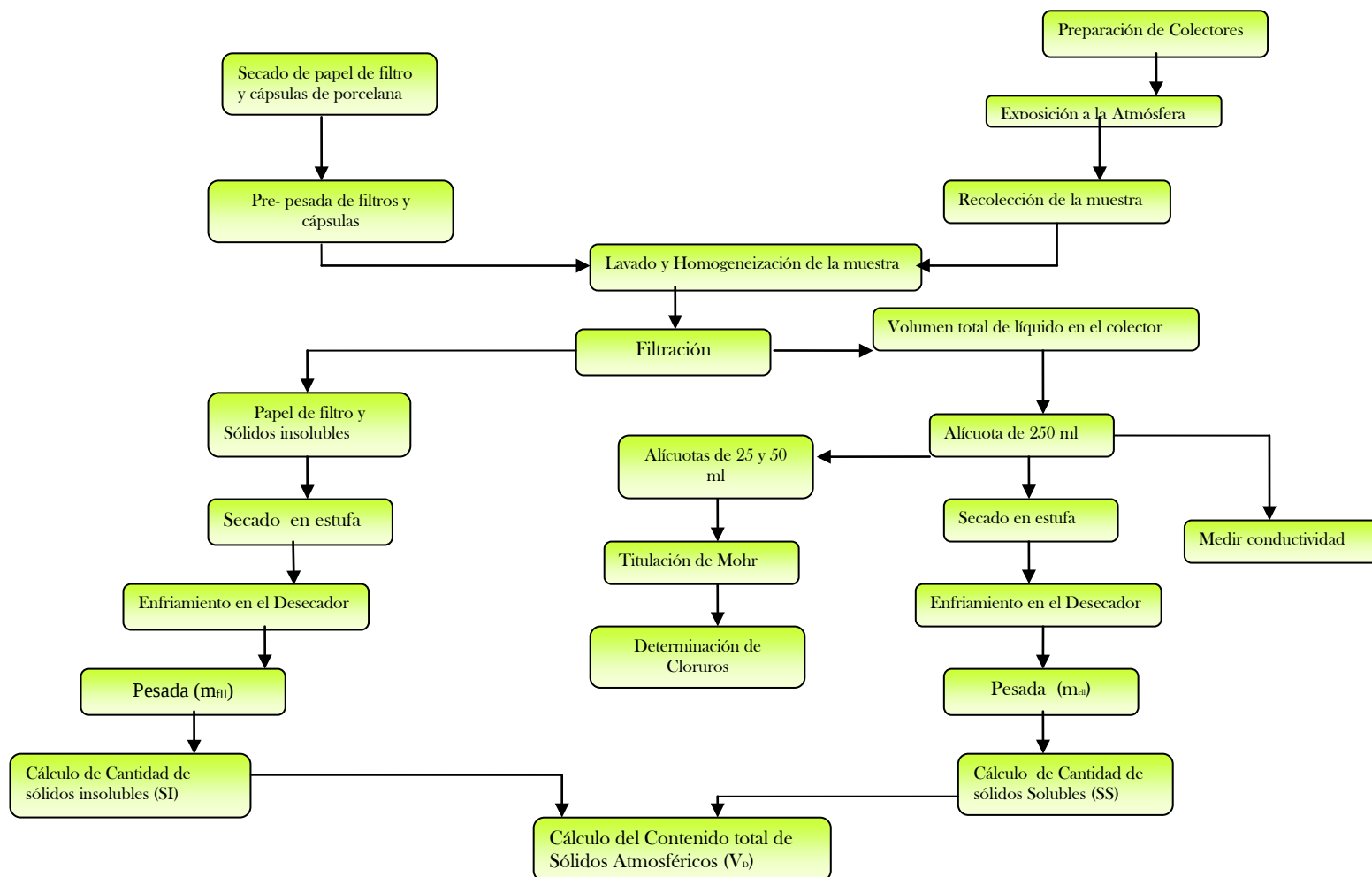


Figura 3.26. Esquema de procedimiento de análisis de los polvos atmosféricos sedimentables

En cuanto a la cuantificación de polvos solubles, se realizó tomando alícuota de la muestra problema (50 ml) para cada uno de los niveles seleccionados en una cápsula de porcelana previamente secada de la forma descrita anteriormente para el análisis de polvos insolubles y pesada.

En la segunda fase del análisis, se coloca la cápsula en una plancha calentadora hasta sequedad con la finalidad de obtener por diferencia de masa, a través de una balanza electrónica la cantidad de polvos solubles recolectados en el lugar de monitoreo.

El análisis de cloruros para las muestras recolectadas de polvos atmosféricos se desarrolló de manera similar al de la vela húmeda (método de Mohr), así como también la medición de conductividad mediante una muestra representativa (alícuota de 50 ml) de cada uno de los niveles antes descritos, como se observa en la Figura 3.28.



Figura 3.27. Equipo de Conductimetría.

3.4.3.1 Metodología para la cuantificación de los polvos atmosféricos sedimentables.

❖ Recolección de muestras

- Añadir agua destilada en el colector de P.V.C para polvos atmosféricos.
- Añadir 0.1 gramos de Sulfato Cúprico penta –hidratado al agua destilada.
- Tapar el colector con la malla plástica protectora y asegurarla con un precinto plástico.
- Colocar el colector en el sitio de monitoreo durante el tiempo de exposición.
- Después de pasado el tiempo de exposición, recoger el colector y taparlo muy bien para evitar posibles contaminaciones posteriores.

❖ Pre- Pesada de los papeles de filtro y cápsulas de porcelana.

- Identificar los filtros y cápsulas de Porcelana
- Secar en la Estufa a 105°C por tres horas.
- Enfriar en el desecador por media hora.
- Pesar en la balanza analítica con no menos de cuatro cifras significativas.
- Tomar nota de las masas de papeles y cápsulas.

❖ Análisis de las muestras

- Montar el equipo de filtración al vacío similar a la Figura 3.27 utilizando los papeles de filtro pesados previamente.
- Filtrar el todo el contenido del colector y tomar nota del volumen filtrado antes de descartarlo.
- Lavar el interior del colector con agua destilada para recoger el material particulado residual. Filtrar el lavado.
- Apartar una alícuota de aproximadamente 250 ml.
- De la Alícuota, tomar 50 ml y calentar en la plancha hasta secar.

- Luego tomar los papeles de filtro y las cápsulas de porcelana secas y llevar a la estufa por tres horas a 105°C.
- Enfriar las cápsulas y los papeles por media hora en el desecador.
- Pesar las cápsulas y los filtros contentivos de los polvos solubles e insolubles.
- De la alícuota tomar a su vez dos alícuotas de 25 y 50 ml. Realizar Titulación de Mohr para determinar los cloruros presentes en la muestra.
- Tomar otra alícuota de cualquier volumen para medir conductividad y pH de la muestra. Tomar nota.

3.4.3.2 Cálculo de la velocidad de deposición

- *Cuantificar los sólidos insolubles utilizando la ecuación:*

$$SI = m_{fl} - m_{fv} \quad (3.8)$$

donde:

SI: contenido de los sólidos insolubles, (g).

m_{fl} : masa del papel de filtro después del filtrado y del secado, (g).

m_{fv} : masa del papel de filtro antes del filtrado, (g).

- *Cuantificar los sólidos solubles con el uso de la siguiente ecuación:*

$$SS = \frac{(m_{cl} - m_{cv}) * Vf}{Alí} \quad (3.9)$$

donde:

SS: contenido total de sólidos solubles, (g).

m_{cl} : masa de la cápsula de porcelana después del secado, (g).

m_{cv} : masa de la cápsula de porcelana antes del filtrado. (g).

V_f : Volumen total de líquido contenido en el colector durante el tiempo de exposición, (ml).

Alí: alícuota de 50 ml.

- *Cálculo la velocidad de deposición de polvos atmosféricos sedimentables utilizando la ecuación:*

$$V_D = \frac{(SI + SS)}{(A * t)} * 10000 \quad (3.10)$$

donde:

V_D : velocidad de deposición de polvos atmosféricos totales, (g/mg*día).

A: área de sección transversal del colector de polvos atmosféricos, (cm²).

t: tiempo de exposición de las muestras, (días).

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (3.11)$$

donde:

D: diámetro interno del colector, cm.

3.5. Categorización de la corrosividad atmosférica.

3.5.1. Según los parámetros aeroquímicos.

Esta clasificación se realiza según la norma ISO 9223, donde las tablas respectivas de sulfatación y salinidad de la atmósfera (tablas 3.3 y 3.4 respectivamente), presentan las categorías de corrosividad atmosférica según las concentraciones de dióxido de azufre y cloruros, así como también sus respectivas velocidades de deposición durante el período de monitoreo.

Tabla 3.3 Categorización de la contaminación por sustancias sulfurosas representadas por el nivel de SO₂ (ISO 9223:1992).

Velocidad de deposición de SO ₂ (mg/m ² día)	Concentración del SO ₂		CATEGORÍA
	mg/m ³	ppm	
<10	<0.012	-	P ₀
>10-35	0.012	0.04	P ₁
>35-80	0.04	0.09	P ₂
>80-200	0.09	0.25	P ₃

Fuente: Norma ISO 9223: 1992

Tabla 3.4 Categorización de la contaminación por aerosoles salinos representados por NaCl. (ISO 9223:1992).

Velocidad de deposición de Cloruros (mg/m ² *día)	CATEGORÍA
< 3	S ₀
> 3-60	S ₁
> 60-300	S ₂
> 300-1500	S ₃

Fuente: Norma ISO 9223:1992

❖ **Esquema de procedimiento para la categorización**

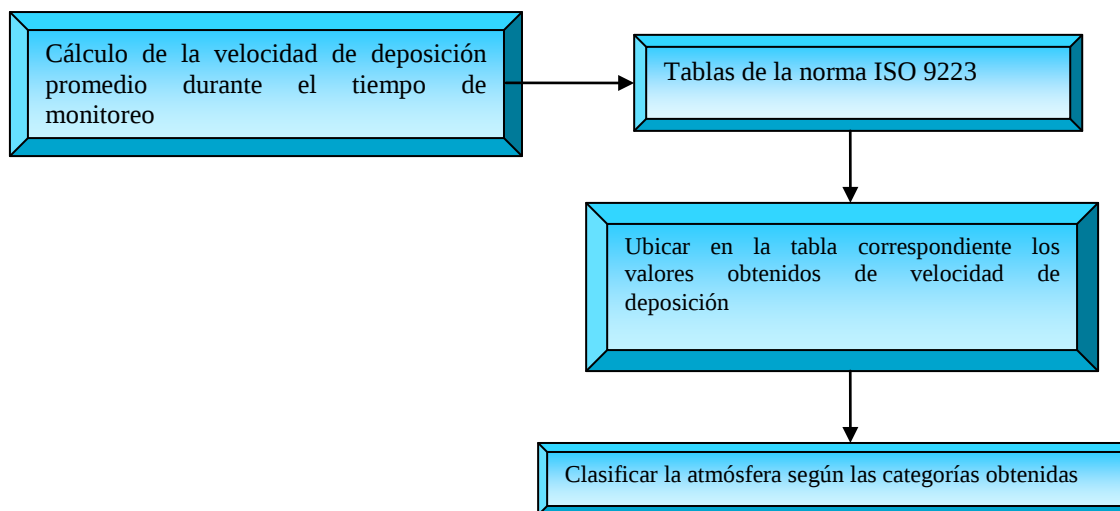


Figura 3.28. Esquema del procedimiento para la clasificación de la corrosividad atmosférica según parámetros aeroquímicos.

❖ Procedimiento para la categorización

- Una vez obtenidas la velocidad promedio de deposición de sulfatos, ubicar en la tabla de la norma ISO-9223 para la contaminación por sustancias sulfurosas (tabla 3.3) éste valor y obtener la categoría correspondiente.
- De igual manera se procede para los valores de velocidad de deposición de cloruros, luego de calcular el valor promedio de éstos se ubica éste último valor en la tabla 3.4

3.5.2 Según los parámetros medioambientales

En ésta clasificación se toma en cuenta no sólo las categorías obtenidas por los parámetros aeroquímicos sino las variables meteorológicas tales como, temperatura y humedad relativa (ambas usadas para la obtención del tiempo de humectación), las cuales influyen significativamente sobre la corrosividad de la atmósfera.

❖ **Esquema de procedimiento para la categorización**

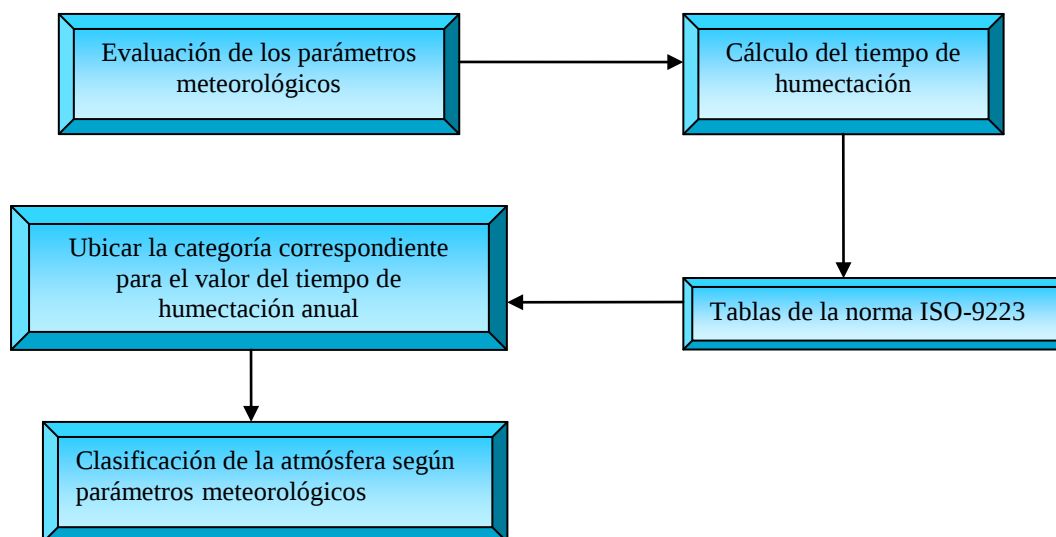


Figura 3.29. Esquema de procedimiento para la clasificación de la corrosividad atmosférica según parámetros medioambientales.

3.5.3 Procedimiento para la clasificación

- Obtener el tiempo de humectación anual (horas/año), mediante la evaluación de la humedad relativa y cuantificando las horas donde ésta es igual o mayor a 80%, y luego dividir este resultado por el tiempo de exposición total (1 año).
- Ubicar ésta cantidad en la tabla ISO-9223 de clasificación del tiempo de humectación para superficies metálicas que se corroen (tabla 3.5) y obtener la categoría correspondiente.

Tabla 3.5 Clasificación del tiempo de humectación de superficies metálicas que se corroen

CATEGORÍA	Tiempo de humectación (Horas/Año)	Ejemplo
τ_1	< 10	Atmósfera interior climatizada
τ_2	10 – 250	Atmósfera interna excepto espacios interiores no aireados
τ_3	250 – 2500	Atmósfera exterior en regiones secas o muy frías
τ_4	2500 – 5500	Atmósferas exteriores en todas las zonas, excepto la tropical seca y zonas frías
τ_5	> 5500	Lugares no ventilados en regiones muy húmedas

Fuente: Normas ISO-9223

3.6 Caracterización de la corrosividad atmosférica

La caracterización de atmósfera se lleva a cabo luego de los pasos anteriormente descritos en las normas ISO - 9223, para los cuales se contempla según el tipo de superficie metálica que se corroe a la atmósfera (tabla 3.6).

De acuerdo a la estimación se ubican los datos respectivos para cada uno de los metales descritos para finalmente obtener la categoría de corrosividad atmosférica (Tabla 3.7) de los equipos y materiales ubicados en la subestación la Arenosa a 765 kV.

TABLA 3.6 Estimación de la corrosividad atmosférica por categorías ISO 9223:1992

	ACERO AL CARBONO														
	τ_1			τ_2			τ_3			τ_4			τ_5		
	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3
P_0 - P_1	1	1	1 ó 2	1	2	3 ó 4	2 ó 3	3 ó 4	4	3	4	5	3 ó 4	5	5
P_2	1	1	1 ó 2	1 ó 2	2 ó 3	3 ó 4	3 ó 4	3 ó 4	4 ó 5	4	4	5	4 ó 5	5	5
P_3	1 ó 2	1 ó 2	2	2	3	4	4	4 ó 5	5	5	5	5	5	5	5
	ZINC Y COBRE														
	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3
	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3
P_0 - P_1	1	1	1	1	1 ó 2	3	3	3	3 ó 4	3	4	5	3 ó 4	5	5
P_2	1	1	1 ó 2	1 ó 2	2	3	3	3 ó 4	3 ó 4	3 ó 4	4	5	4 ó 5	5	5
P_3	1	1 ó 2	2	2	3	3 ó 4	3	3 ó 4	4	4 ó 5	5	5	5	5	5
	ALUMINIO														
	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3
	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3	S_0 - S_1	S_2	S_3
P_0 - P_1	1	2	2	1	2 ó 3	4	3	3 ó 4	4	3	3 ó 4	5	4	5	5
P_2	1	2	2 ó 3	1 ó 2	3 ó 4	4	3	4	4 ó 5	3 ó 4	4	5	4 ó 5	5	5
P_3	1	2 ó 3	3	3 ó 4	4	4	3 ó 4	4 ó 5	5	4 ó 5	5	5	5	5	5

Fuente: Normas ISO 9223:1992

Tabla 3.7 Categorías de la corrosividad atmosférica

CATEGORIA	CORROSIVIDAD
1	MUY BAJA
2	BAJA
3	MEDIA
4	ALTA
5	MUY ALTA

Fuente: Normas ISO 9223:1992

❖ **Esquema de procedimiento para la caracterización**

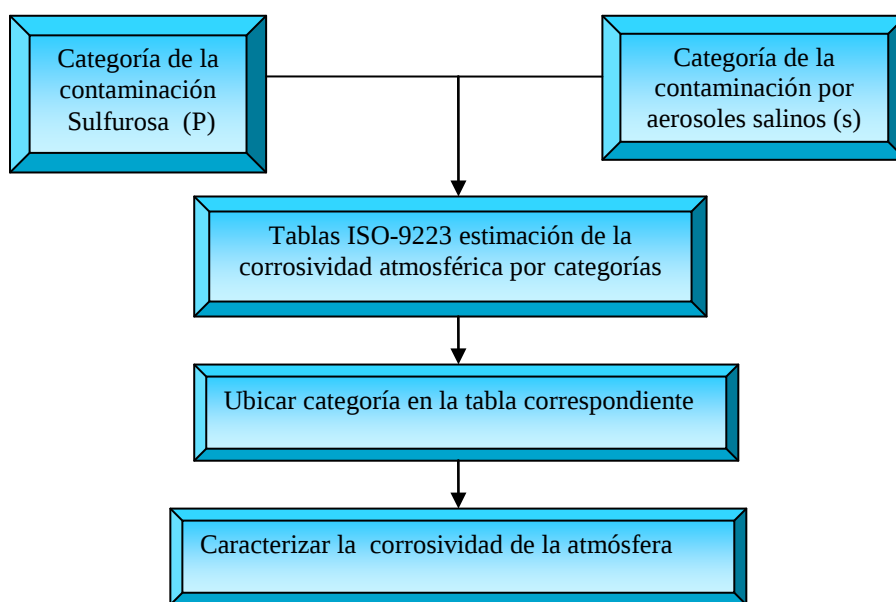


Figura 3.30. Esquema de procedimiento para la caracterización de la corrosividad atmosférica según norma ISO-9223:1992

3.7 Procedimiento para la clasificación.



- Obtenido la categoría de contaminación sulfurosa (P), la de contaminación por aerosoles salinos (S), y la del tiempo de humectación, se procede a ubicar éstas en la tabla 3.6 según el tipo de superficie metálica en estudio.
- De la tabla 3.6, se obtiene una numeración o categoría que luego se ubica en la tabla 3.7 donde finalmente se tiene la caracterización correspondiente a la atmósfera en estudio.

CAPITULO 4. DATOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan los datos experimentales obtenidos en el lugar de muestreo para el período estudiado (Mayo 06 – Julio 07), necesarias para la caracterización de la corrosividad de la atmósfera circundante.

Cabe destacar que la presión y temperatura ambiente para cada uno de los períodos monitoreados fueron:

Tabla 4.1 Presión y temperatura ambiente para los períodos de monitoreo

Período	Presión atmosférica (Pa±0.05)mmHg	Temperatura Ambiente (Ta±0.1) °C
May.06-Jul. 06	762.25	26.0
Ag.06-Sept.06	760.73	25.0
Oct. 06	756.67	28.0
Nov. 06	757.43	26.0
Dic. 06	758.95	28.0
En.07	759.97	29.0
Feb. 07-Ab. 07	756.25	27.0
May 07	748.15	28.0
Jun. 07	754.05	28.0
Jul. 07	752.10	27.8

4.1 ANÁLISIS DE SULFATOS

Las tablas que se presentan a continuación son necesarias para el cálculo de la velocidad de deposición del dióxido de azufre a diferentes niveles de exposición.

Tabla 4. 2 Área de exposición de los captadores de sulfatos para el primer nivel (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Ancho (Ai ± 0,05)cm			Ancho promedio (Ap±0,05)cm	Largo (Li ± 0,05)cm			Largo promedio (Lp±0,05)cm	Área de exposición (Aexp±1)cm ²
May.06- Jul. 06	8,80	8,90	8,70	8,80	13,50	13,30	13,30	13,37	118
Ag.06- Sept.06	8,50	8,70	8,50	8,57	12,80	12,90	12,90	12,87	110
Oct. 06	8,90	8,50	8,40	8,60	13,60	13,80	14,00	13,80	119
Nov. 06	8,50	8,80	8,40	8,57	13,90	14,00	14,00	13,97	120
Dic. 06	8,40	8,80	8,60	8,60	14,10	14,30	14,20	14,20	122
En.07	//////////			//////////	//////////			//////////	//////////
Feb. 07- Ab. 07	8,60	8,70	8,60	8,63	13,80	13,50	13,40	13,57	117
May 07	9,90	8,50	8,70	9,03	13,70	13,70	13,80	13,73	124
Jun. 07	8,40	8,60	8,00	8,33	14,10	14,40	14,20	14,23	119
Jul. 07	8,60	8,70	8,80	8,70	13,90	13,90	13,90	13,90	121

Tabla 4. 3 Área de exposición de los captadores de sulfatos para el segundo nivel (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Ancho (Ai ± 0,05)cm			Ancho promedio (Ap±0,05)cm	Largo (Li ± 0,05)cm			Largo promedio (Lp±0,05)cm	Área de exposición (Aexp±1)cm ²
May.06- Jul. 06	9,00	9,00	8,90	8,97	13,50	13,50	12,00	13,00	117
Ag.06- Sept.06	8,40	8,60	8,60	8,53	14,00	13,80	13,90	13,90	119
Oct. 06	8,60	8,80	8,60	8,67	13,50	13,70	13,60	13,60	118
Nov. 06	8,30	8,50	8,50	8,43	14,20	14,10	14,00	14,10	119
Dic. 06	8,30	8,90	8,50	8,57	14,20	13,80	14,20	14,07	121
En.07	//////////			//////////	//////////			//////////	//////////
Feb. 07- Ab.07	8,70	8,40	8,50	8,53	13,60	13,80	13,60	13,67	117
May 07	8,50	8,80	8,70	8,67	12,90	13,00	12,90	12,93	112
Jun. 07	8,50	8,70	8,80	8,67	12,20	12,30	12,20	12,23	106
Jul. 07	8,50	8,50	8,60	8,53	14,20	14,20	14,00	14,13	121

TABLA 4.4 Datos para el cálculo de velocidad de deposición de dióxido de azufre (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Absorbancia (Abs ± 0.005)adim	Concentración de Sulfato (ppm _{SO₄⁻²} ± 0.6)ppm	Tiempo de exposición (días)
May.06-	0.068	0.8	55
Jul. 06	0.070	1.0	55
Ag.06-Sept.06	0.057	1.2	56
	0.070	2.6	56
Oct. 06	0.060	3.6	38
	0.090	6.6	38
Nov. 06	0.080	1.9	30
	0.059	0.3	30
Dic. 06	0.091	0.2	29
	0.097	0.5	29
En.07	////////	////////	////
Feb.07-Ab. 07	0.069	5.6	74
	0.055	3.7	74
May 07	0.060	3.7	28
	0.055	3.1	28
Jun. 07	0.062	1.2	37
	0.060	1.0	37
Jul. 07	0.055	4.1	29
	0.060	4.7	29

Factor de dilución: (5.000 $\pm$ 0.004) adim

4.2 ANÁLISIS DE CLORUROS

Las tablas a continuación representan los datos necesarios para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros a diferentes niveles de exposición.

TABLA 4.5 Estandarización de la solución de nitrato de plata con una solución patrón de cloruro de sodio (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Volumen de NaCl ($V_{NaCl} \pm 0.03$) mL	Volumen gastado de $AgNO_3$ ($V \pm 0.075$) mL	Concentración de $AgNO_3$ ($C \pm 0.00007$) N
May.06	25.00	25.800	0.02520
Jul.06	50.00	47.500	
Ag.06- Sept.06	25.00	25.800	0.02520
	50.00	47.500	
Oct. 06	25.00	25.200	0.02480
	50.00	50.500	
Nov. 06	25.00	25.200	0.02480
	50.00	50.500	
Dic. 06	25.00	25.400	0.02460
	50.00	51.000	
En.07	25.00	25.500	0.02460
	50.00	50.800	
Feb.07- Ab. 07	25.00	25.300	0.02470
	50.00	50.800	
May 07	25.00	25.300	0.02461
	50.00	51.000	
Jun. 07	25.00	25.400	0.02451
	50.00	51.200	
Jul. 07	25.00	25.400	0.02458
	50.00	50.900	

Concentración de NaCl: (0.02500 ± 0.00001)N

TABLA 4.6 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros para el primer nivel de exposición (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Volumen alícuota ($V_a \pm 0.03$) mL	Volumen gastado de $AgNO_3$ ($V \pm 0.03$) mL	Tiempo de exposición (días)	Concentración de cloruro (ppm $Cl \pm 9$)ppm
May.06	25.00	0.25	55	5
Jul. 06	50.00	0.40		
Ag.06- Sept.06	25.00	0.25	56	7
	50.00	0.50		
Oct. 06	25.00	0.30	38	9
	50.00	0.60		
Nov. 06	25.00	0.30	30	11
	50.00	0.75		
Dic. 06	25.00	0.65	29	11
	50.00	1.10		
En.07	25.00	0.85	47	14
	50.00	1.50		
Feb.07- Ab. 07	25.00	0.55	74	16
	50.00	1.10		
May 07	25.00	0.50	28	18
	50.00	1.10		
Jun. 07	25.00	0.80	37	16
	50.00	1.40		
Jul. 07	25.00	0.65	29	17
	50.00	1.30		

Volumen dilución: (1000.0 ± 0.4)ml

TABLA 4.7 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros para el segundo nivel de exposición (mayo 06 – julio 07)

Periodo	Volumen alícuota ($V_a \pm 0.03$) ml	Volumen gastado de AgNO_3 ($V \pm 0.03$) mL	Tiempo de exposición (días)	Concentración de cloruro (ppm $\text{Cl}^- \pm 9$)ppm
May.06	25.00	0.20	55	7
-	50.00	0.40	55	
Jul. 06				
Ag.06-	25.00	0.30	56	9
Sept.06	50.00	0.60	56	
Oct. 06	25.00	0.30	38	11
	50.00	0.70	38	
Nov. 06	25.00	0.40	30	11
	50.00	0.90	30	
Dic. 06	25.00	0.45	29	14
	50.00	0.95	29	
En.07	25.00	0.50	47	16
	50.00	1.20	47	
Feb.07-	25.00	0.60	74	18
Ab. 07	50.00	1.30	74	
May 07	25.00	0.85	28	16
	50.00	1.50	28	
Jun. 07	25.00	0.65	37	17
	50.00	1.3	37	
Jul. 07	25.00	0.60	29	23
	50.00	1.15	29	

Volumen dilución: (1000.0 $\pm$ 0.4)ml

4.3 POLVOS ATMOSFÉRICOS

Las tablas que a continuación se presentan son necesarias para el cálculo de la velocidad de deposición de polvos atmosféricos a diferentes niveles de exposición.

Tabla 4.8 Datos para el cálculo de sólidos Insolubles para el primer nivel (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Masa del papel de filtro antes del filtrado ($m_{fv} \pm 0.0001$) g	Masa del papel de filtro después del filtrado ($m_{ml} \pm 0.0001$) g
May.06-Jul. 06	0.6726	0.7058
Ag.06-Sept.06	0.6770	0.6898
Oct. 06	0.6657	0.6746
Nov. 06	0.6705	0.7208
Dic. 06	0.6726	0.6945
En.07	0.6696	0.7044
Feb. 07-Ab. 07	0.6666	0.7475
May 07	0.6777	0.7356
Jun. 07	0.7189	0.7495
Jul. 07	1.4664	1.4860

Tabla 4.9 Datos para el cálculo de sólidos insolubles para el segundo nivel (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Masa del papel de filtro antes del filtrado ($m_{fv} \pm 0.0001$) g	Masa del papel de filtro después del filtrado ($m_{ml} \pm 0.0001$) g
May.06-Jul. 06	0.6750	0.7123
Ag.06-Sept.06	0.6696	0.6796
Oct. 06	0.6765	0.6856
Nov. 06	0.6860	0.7428
Dic. 06	0.6742	0.6936
En.07	0.6834	0.7069
Feb. 07-Ab. 07	0.06875	0.7889
May 07	0.6786	0.7475
Jun. 07	0.7056	0.7415
Jul. 07	1.4689	1.4950

Tabla 4.10 Datos para el cálculo de sólidos solubles para el primer nivel (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Masa de la cápsula antes del secado ($m_{cv} \pm 0.0001$) g	Masa de la cápsula después del secado ($m_{cll} \pm 0.0001$) g	Volumen recolectado del colector ($V_r \pm 0.1$) mL
May.06-Jul. 06	51.6287	51.6430	6000.0
Ag.06-Sept.06	52.2715	52.3063	5700.0
Oct. 06	51.6342	51.6596	5200.0
Nov. 06	51.6218	51.6268	5900.0
Dic. 06	53.7454	53.7506	3450.0
En.07	53.9150	53.9358	1500.0
Feb. 07-Ab.07	52.8725	52.9924	1659.0
May 07	52.9765	52.9815	3660.0
Jun. 07	52.9825	52.9932	3275.0
Jul. 07	52.6710	52.6778	5151.0

Tabla 4.11 Datos para el cálculo de sólidos solubles para el segundo nivel (Mayo 06 – Julio 07)

Período	Masa de la cápsula antes del secado ($m_{cv} \pm 0.0001$) g	Masa de la cápsula después del secado ($m_{cll} \pm 0.0001$) g	Volumen recolectado del colector ($V_r \pm 0.1$) mL
May.06-Jul. 06	53.8170	53.8335	6950.0
Ag.06-Sept.06	53.7346	53.7711	5550.0
Oct. 06	53.6328	53.6539	5760.0
Nov. 06	53.7255	53.7349	5975.0
Dic. 06	51.6530	51.6623	4200.0
En.07	51.4530	51.4604	1800.0
Feb. 07-Ab. 07	51.4590	51.5452	1659.0
May 07	51.5263	51.5340	3318.0
Jun. 07	51.5403	51.5488	4727.0
Jul. 07	51.2283	51.2347	5086.0

Alícuota (50.00 $\pm$ 0.05) ml



Tabla 4.12 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de polvos atmosféricos sedimentables (Mayo 06–Julio 07)

Período	Nivel	Masa de sólidos Insolubles (SI $\pm$ 0.0002) g	Masa de sólidos Solubles (SS $\pm$ 0.04) g	Tiempo de exposición (días)
May.06-Jul. 06	1	0.0330	1.72	55
	2	0.0370	2.29	
Ag.06-Sept.06	1	0.0128	3.97	56
	2	0.0100	4.05	
Oct. 06	1	0.0089	2.64	38
	2	0.0091	2.43	
Nov. 06	1	0.0060	0.59	30
	2	0.0100	1.12	
Dic. 06	1	0.0219	0.36	29
	2	0.0194	0.78	
En.07	1	0.0348	0.62	47
	2	0.0235	0.27	
Feb. 07-Ab. 07	1	0.0820	3.98	74
	2	0.1010	2.86	
May 07	1	0.0579	0.3660	28
	2	0.0689	0.5110	
Jun. 07	1	0.0306	0.701	38
	2	0.0359	0.804	
Jul. 07	1	0.0196	0.6181	29
	2	0.0261	0.6510	

Área transversal del Colector: (201 ± 1) cm²

Tabla 4.13 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros en el primer nivel (Mayo 06–Julio 07)

Período	Volumen alícuota ($V_a \pm 0.03$)mL	Volumen gastado de AgNO_3 ($V \pm 0.03$)mL	Tiempo de exposición (días)
May.06-Jul. 06	25.00 50.00	////////	////////
Ag.06-Sept.06	25.00 50.00	0.25 0.50	56
Oct. 06	25.00 50.00	1.70 2.15	38
Nov. 06	25.00 50.00	0.50 0.80	30
Dic. 06	25.00 50.00	0.50 1.05	29
En.07	25.00 50.00	1.00 1.80	47
Feb. 07–Ab. 07	25.00 50.00	0.75 1.05	74
May 07	25.00 50.00	0.55 1.00	28
Jun. 07	25.00 50.00	0.45 0.90	38
Jul. 07	25.00 50.00	1.15 0.60	29

Tabla 4.14 Datos para el cálculo de la velocidad de deposición de cloruros para el segundo nivel (mayo 06– julio 07)

Período	Volumen alícuota ($V_a \pm 0.03$)mL	Volumen gastado de AgNO_3 ($V \pm 0.03$)mL	Tiempo de exposición (días)
May.06 Jul. 06	25.00 50.00	//////////	////////
Ag.06-Sept.06	25.00 50.00	0.45 0.80	56
Oct. 06	25.00 50.00	0.95 1.65	38
Nov. 06	25.00 50.00	0.45 0.90	30
Dic. 06	25.00 50.00	0.55 1.15	29
En.07	25.00 50.00	1.00 2.00	47
Feb.07–Ab. 07	25.00 50.00	0.65 1.40	74
May 07	25.00 50.00	0.70 1.35	28
Jun. 07	25.00 50.00	0.60 1.10	38
Jul. 07	25.00 50.00	0.65 1.20	29

Área de exposición: $(201 \pm 1) \text{ cm}^2$

**Tabla 4.15 Conductividad de las soluciones problemas
(Mayo 06 – Julio 07)**

Período	Nivel	Conductividad (Cond $\pm$ 0.1) μS
May.06-Jul. 06	1	//////////
	2	
Ag.06-Sept.06	1	30.0
	2	32.4
Oct. 06	1	24.3
	2	25.5
Nov. 06	1	62.1
	2	62.9
Dic. 06	1	75.4
	2	78.6
En.07	1	146.8
	2	148.5
Feb. 07-Ab. 07	1	159.9
	2	164.8
May 07	1	84.6
	2	86.8
Jun. 07	1	71.1
	2	64.9
Jul. 07	1	57.9
	2	61.1

CAPITULO 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo, se discutirán los resultados obtenidos en los meses de estudio de la atmósfera circundante a la subestación La Arenosa a 765 kV basados, soportados en la bibliografía consultada, física o electrónica.

5.1. Cuantificación de los parámetros meteorológicos

En la Figura 5.1, podemos observar la información suministrada por la tabla D.8 (Apéndice D) que entre los meses de diciembre 2006 y febrero 2007 corresponde al período de sequía, mientras que el período de lluvias está comprendido entre los meses de mayo-noviembre de 2006 y marzo-julio de 2007.

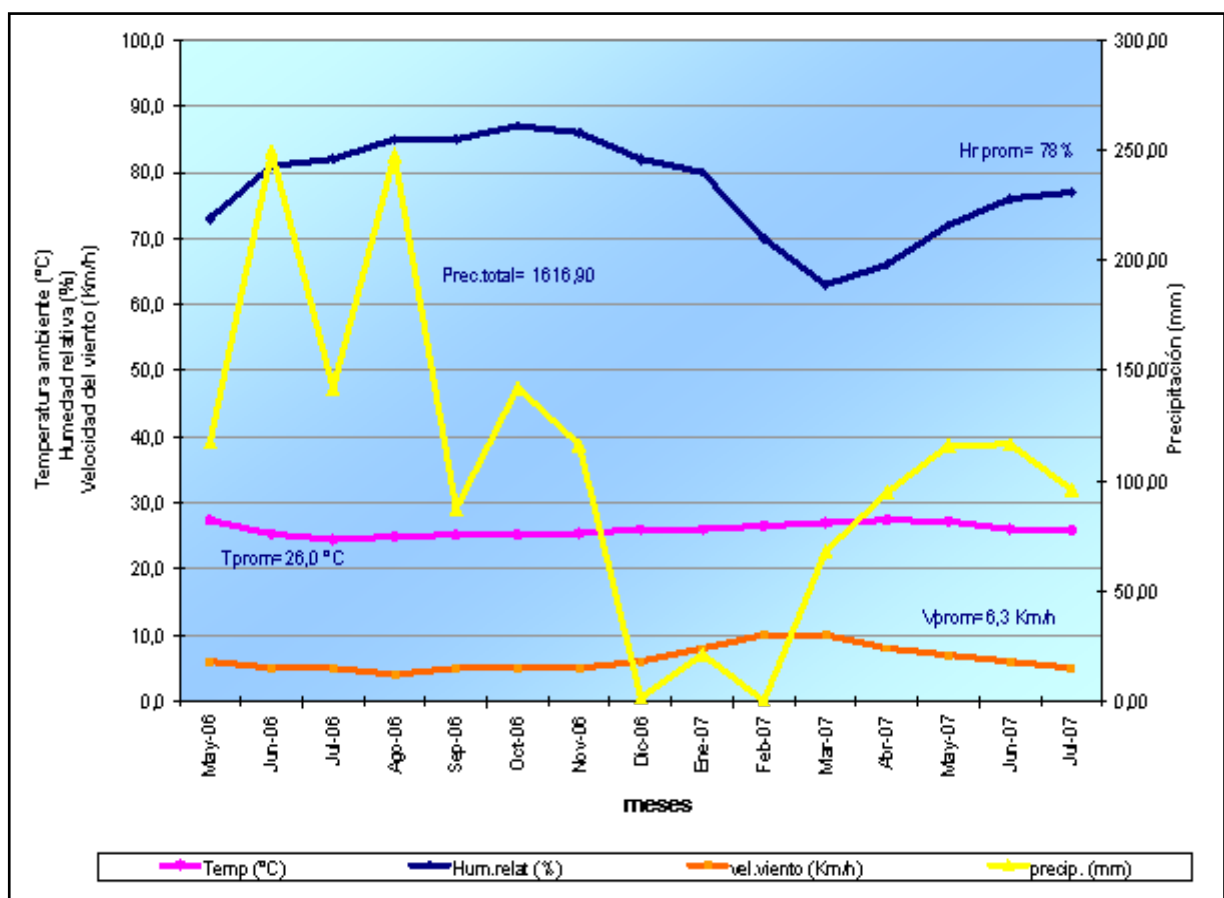


Figura 5.1. Parámetros meteorológicos promedio mensual en la Subestación La Arenosa a 765 kV en el periodo (Mayo 2006-Julio 2007)

Los datos reportados en la Figura 5.1 muestran que el valor promedio de la temperatura es de 26°C, la humedad relativa es de 78%, las precipitaciones totales fueron de 1616.90 mm, así como también la velocidad del viento promedio estuvo en el orden de 6.3 Km/h a lo largo del período de estudio. Por otra parte, la temperatura y velocidad del viento se mantienen relativamente constantes, observando un leve aumento de éste último en el período de sequía.

Los períodos de sequía son etapas en la cual predomina la velocidad y dirección del viento con una mayor magnitud, con humedades relativamente bajas y temperaturas ambientales con valores altos con respecto a los períodos de lluvia, en el cual se observan mayores humedades relativas y precipitaciones (ver Figura 5.1) y por consiguiente temperaturas ambientales menores.

5.2. Cuantificación de la velocidad de deposición de los agentes aeroquímicos

Entre los agentes aeroquímicos mas comunes presentes en la atmósfera se encuentran el cloruro de sodio y el dióxido de azufre por lo que se determinó la velocidad de deposición de los mismos en la subestación La Arenosa a 765 kV.

5.2.1 Sulfatos

En la Tabla 5.1 y 5.2, así como en la Figura 5.2, se muestra la velocidad de deposición del dióxido de azufre para cada uno de los niveles de monitoreo entre los períodos comprendidos entre Mayo 06 y Julio 07 donde la mayor concentración se observó en el mes de Julio 07 con un valor de 3.873 mg/m².d para el nivel I y 4.928 mg/m².d para el nivel II correspondiente al mes de Octubre 06, mientras que las mínimas son de 0.191 mg/m².d para el mes de Diciembre 06 en el nivel I y de 0.235 mg/m².d para el mes de noviembre 06 en el nivel II.

Tabla 5.1
Velocidades de deposición de los agentes aeroquímicos y polvos atmosféricos para en primer nivel

PERÍODO	(V _{SO2} ±0,001) (mg/m ² *día)	(V _{Cl} ±8) (mg/ m ² *día)	(V _D ±0,1) (g/ m ² *día)
Mayo-Julio 06	0.417	8	1.9
Agosto-Septiembre 06	0.666	14	4.30
Octubre 06	2.681	24	4.2
Noviembre 06	1.721	46	1.2
Diciembre 06	0.191	47	0.8
Enero 07		42	0.8
Febrero-Abril 07	2.136	22	3.3
Mayo 07	3.545	64	0.9
Junio 07	0.903	49	1.2
Julio 07	3.873	67	1.3
Promedio	1.793	38	2.0

Tabla 5.2
Velocidades de deposición de los agentes aeroquímicos y polvos atmosféricos sedimentables para el segundo nivel

PERÍODO	(V _{SO2} ±0,001) (mg/m ² *día)	(V _{Cl} ±8) (mg/ m ² *día)	(V _D ±0,1) (g/ m ² *día)
Mayo-Julio 06	0,502	11	2,6
Agosto-Septiembre 06	1,281	17	4,4
Octubre 06	4,928	32	3,9
Noviembre 06	0,235	51	2,3
Diciembre 06	0,458	52	1,7
Enero 07		45	0,4
Febrero-Abril 07	1,432	28	2,4
Mayo 07	3,236	70	1,3
Junio 07	0,870	53	1,4
Julio 07	4,489	57	1,4
Promedio	1,937	42	2.2

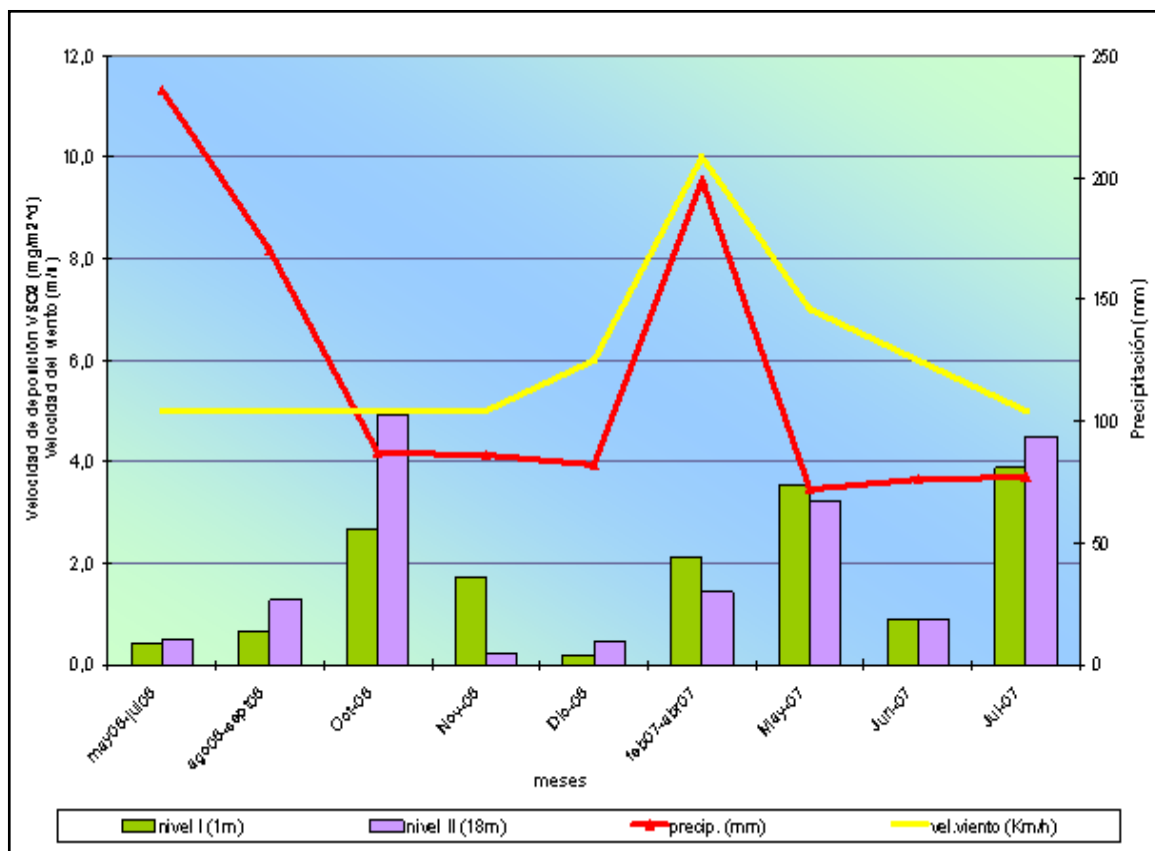


Figura 5.2. Velocidad de deposición de SO_2 , precipitaciones y velocidad del viento en el periodo (mayo 2006-Julio 2007)

La velocidad de deposición promedio corresponde a $1.793 \text{ mg/m}^2.\text{d}$ para el nivel I y $1.937 \text{ mg/m}^2.\text{d}$ para el nivel II (ver tabla 5.1 y 5.2) con valores muy similares. Es importante destacar, que la velocidad de deposición en el nivel II es ligeramente mayor para casi todos los periodos de exposición debido a que el dióxido de azufre se encuentra en la atmósfera, mayormente en estado gaseoso y es arrastrado de acuerdo a la velocidad y dirección del viento, por lo que a esa altura (18m) se favorece su la captación.

Sin embargo, éstos son inferiores a $5 \text{ mg/m}^2.\text{d}$, según la norma ISO 9223, no representan una contaminación por SO_2 por lo tanto, no hay riesgo de un ataque corrosivo de este contaminante a los materiales y equipos de la subestación La Arenosa a 765 kV.

De lo anterior se puede deducir que estas bajas concentraciones de SO_2 , se deben a lo apartado de la subestación del mayor centro poblado más cercano (Valencia) y su Zona Industrial y debido a que las mayores concentraciones de SO_2 se registran a un radio menor de 20 Km de la fuente de emisión.

Es importante resaltar que la velocidad de deposición de SO_2 no se ve mayormente influenciada por las precipitaciones ni por la velocidad del viento, aunque se puede observar en la Figura 5.2 para los meses de Octubre 06, Mayo y Julio 07 se registro una baja en las precipitaciones coincidiendo con las mayores velocidades de deposición de todo el monitoreo.

5.2.2. Cloruros

De acuerdo a los datos aportados en la tabla 5.1 y 5.2 se aprecian las velocidades de deposición de los cloruros tomando en consideración los parámetros meteorológicos (ver figura 5.3)

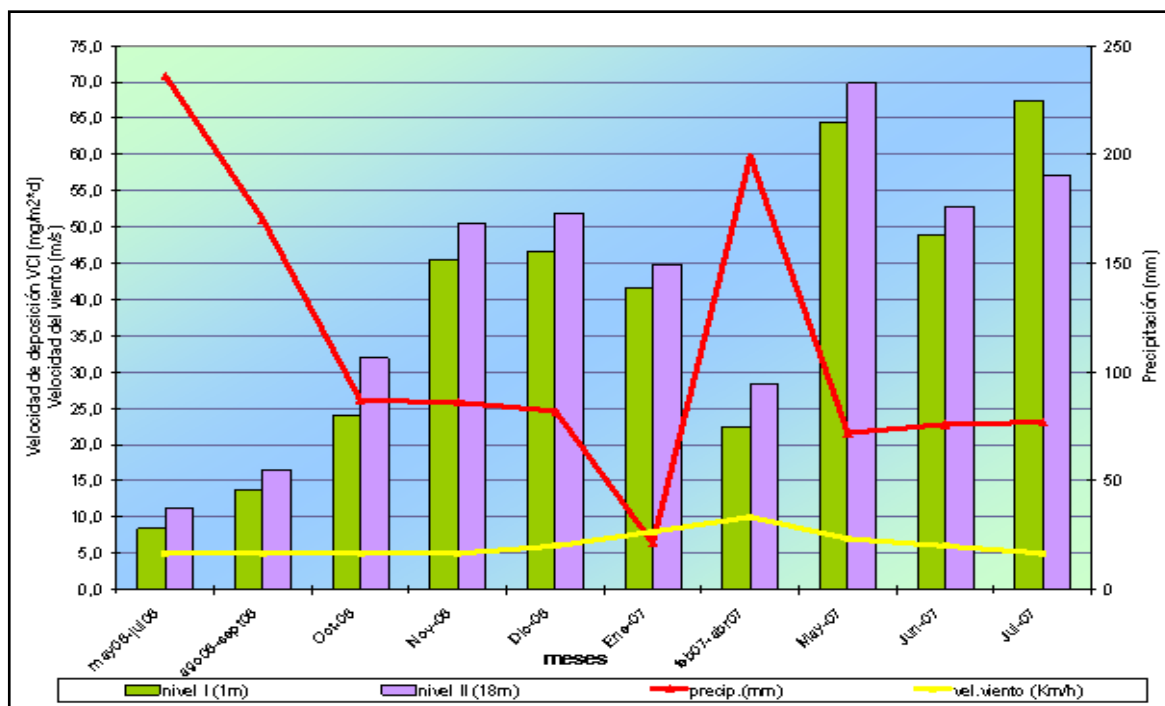


Figura 5.3. Velocidad de deposición de Cl, precipitaciones y velocidad del viento en el período (mayo 2006-Julio 2007).

La mayor velocidad de deposición se observó en julio 07, con un valor de 67 mg/m².d para el nivel I, mientras que para el nivel II se encontró en el mes de mayo 07 con un valor de 70 mg/m².d, cantidades categorizadas como atmósferas marinas según la norma ISO 9223.

Las velocidades de deposición menores se registraron en los meses de Mayo-Julio 06 para los dos niveles de exposición, con un valor de 8 mg/m².d para el nivel I y 11 mg/m².d para el nivel II, estando ambos valores en un rango intermedio que según la norma ISO 9223, comienza a tomar parte en el ataque corrosivo de las superficies metálicas. Los valores promedios se encontraron por el orden de 38 mg/m².d para el nivel I mientras que para el nivel II se registró un valor de 42 mg/m².d.

Se puede observar en la Figura 5.3, que la velocidad de deposición de Cl⁻ es menor cuando las precipitaciones aumentan, como es el caso de los meses de Mayo-Julio 06 y Febrero-abril 07 donde están los más altos valores de precipitación. Esto se debe a que las precipitaciones sobre todo si son abundantes y continuadas, limpian la atmósfera de contaminantes que a su vez se precipitan a la superficie terrestre. En resumen, a medida que disminuye la cantidad de precipitación, aumenta la concentración de cloruros en la atmósfera y por lo tanto su velocidad de deposición.

En cuanto a la velocidad del viento, se observó que tiene poca influencia en la velocidad de deposición del cloruro para el período entre los meses de Mayo 06 hasta Julio 07, ya que sus valores han sido más o menos constantes en el tiempo, siendo más bien las precipitaciones de la zona las que han tenido la mayor influencia en la deposición de este contaminante.

5.2.3. Polvos atmosféricos sedimentables

En las Tablas 5.1 y 5.2 se reportan las velocidades de deposición de los polvos sedimentables y en la Figura 5.4 se consideran también los parámetros meteorológicos en los meses de monitoreo (mayo 06 y julio 07).

Se puede observar tanto en las Tablas 5.1 y 5.2 como en la Figura 5.4, que los mayores valores de velocidad de deposición se encuentran en los meses de Agosto-October 06, siendo de 4.3 g/m²*d en el nivel I para los meses de Agosto –Septiembre 06 y 4.4 g/m²*d en nivel II para este mismo período. Los menores valores son de 0.8 g/m²*d para el nivel I, ubicados entre los meses de Diciembre 06- Enero 07 y 0.4 g/m²*d para el nivel II en el mes de Enero 07.

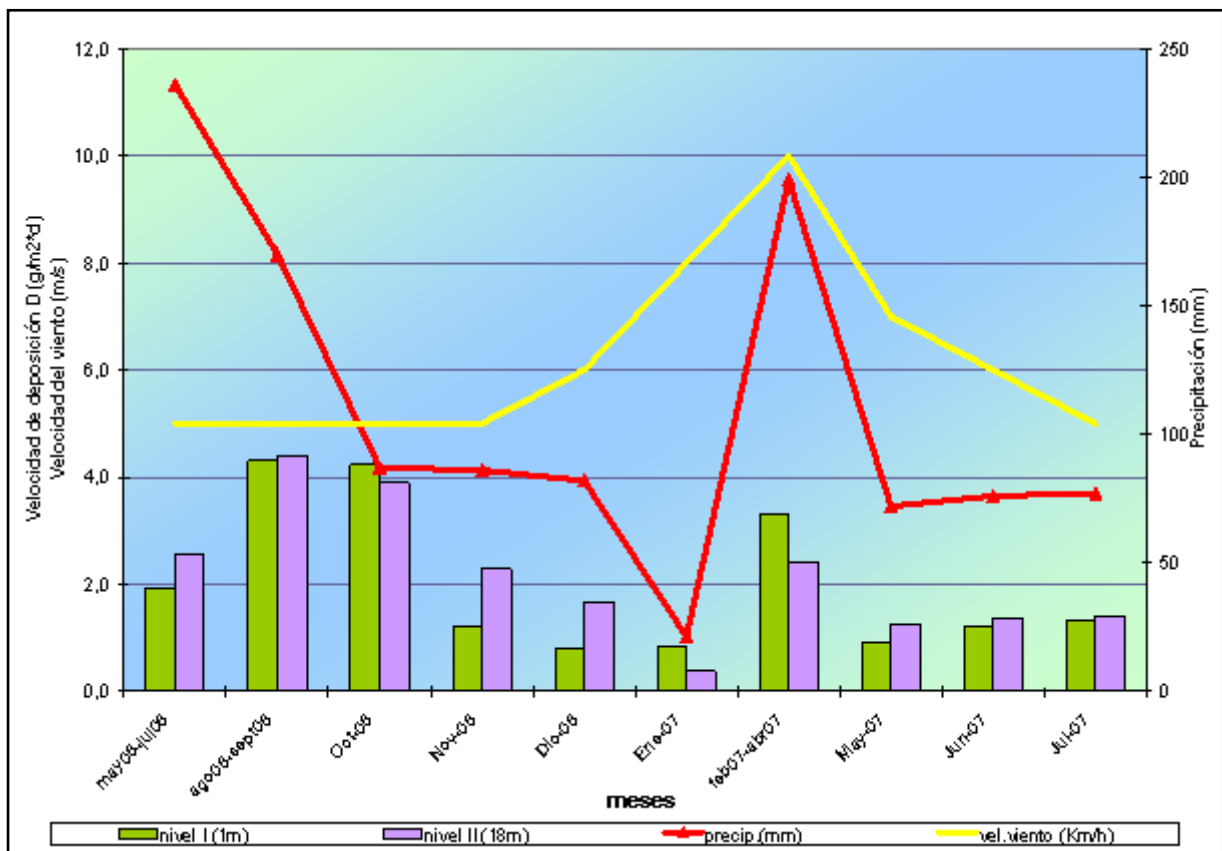


Figura 5.4. Velocidad de deposición de polvos atmosféricos sedimentables, precipitaciones y velocidad del viento en el periodo (mayo 2006-Julio 2007).

Los polvos atmosféricos sedimentables se favorecen con los períodos de lluvia y se depositan en las distintas superficies de los equipos y materiales ubicados en la subestación. Entre los meses de Mayo 06 hasta Octubre 06, ocurre un aumento en la deposición de los polvos a medida que disminuyen las precipitaciones, pero se puede apreciar que éstas exceden los 80 mm favoreciendo la deposición del polvo atmosférico y adicionalmente al

polvo que proviene probablemente de la arena utilizada en los trabajos de asfaltado realizados cerca de la subestación La Arenosa a 765 kV.

Por otra parte, el incremento de la velocidad de deposición de los polvos ocurrido entre los meses de Febrero-Abril de 2007 se debe mayormente a las precipitaciones caídas en éste período, disminuyendo luego la deposición de los mismos a medida que disminuye la cantidad de precipitación.

Las velocidades de deposición promedio se ubicaron en 2 g/m².d para el nivel I mientras que para el nivel II en 2.2 g/m².d, este último mayor debido a la cantidad de partículas suspendidas en el ambiente, las cuales colisionan y se adhieren a los equipos de la subestación. Estos polvos atmosféricos provienen de las montañas arenosas alrededor de la subestación, que son atraídos por la velocidad y dirección del viento hasta ésta área.

El grado de corrosividad dependerá en gran parte del nivel de humedad (tiempo de humectación) a la cual estarán expuestos los equipos y materiales de la subestación de acuerdo a los períodos de precipitaciones ocurridas en el muestreo, en conjunto con los contaminantes y polvos atmosféricos presentes en el ambiente se ponen en contacto con la superficie de los metales o aleaciones pudiendo originar así el proceso de corrosión de los mismos y por consiguiente una menor eficiencia en la transmisión de la energía eléctrica de la red de transmisión occidente.

5.3. Comparación de la velocidad de deposición de los agentes aeroquímicos entre los periodos 2005 a 2007.

Uno de los objetivos de este trabajo, es hacer una comparación entre las velocidades de deposición obtenidas durante el monitoreo efectuado en el período entre Agosto 2005 - Febrero 2006 ⁽⁶⁾ y los períodos correspondientes

al actual trabajo. Esta comparación fue hecha tomando en consideración los meses en común que tienen ambos estudios, ya que algunos períodos de éste trabajo difieren del anterior, en el tiempo de exposición.

La comparación entre las velocidades de deposición de SO_2 para ambos estudios y para ambos niveles de acuerdo a los parámetros medioambientales se puede observar en la Figura 5.5.

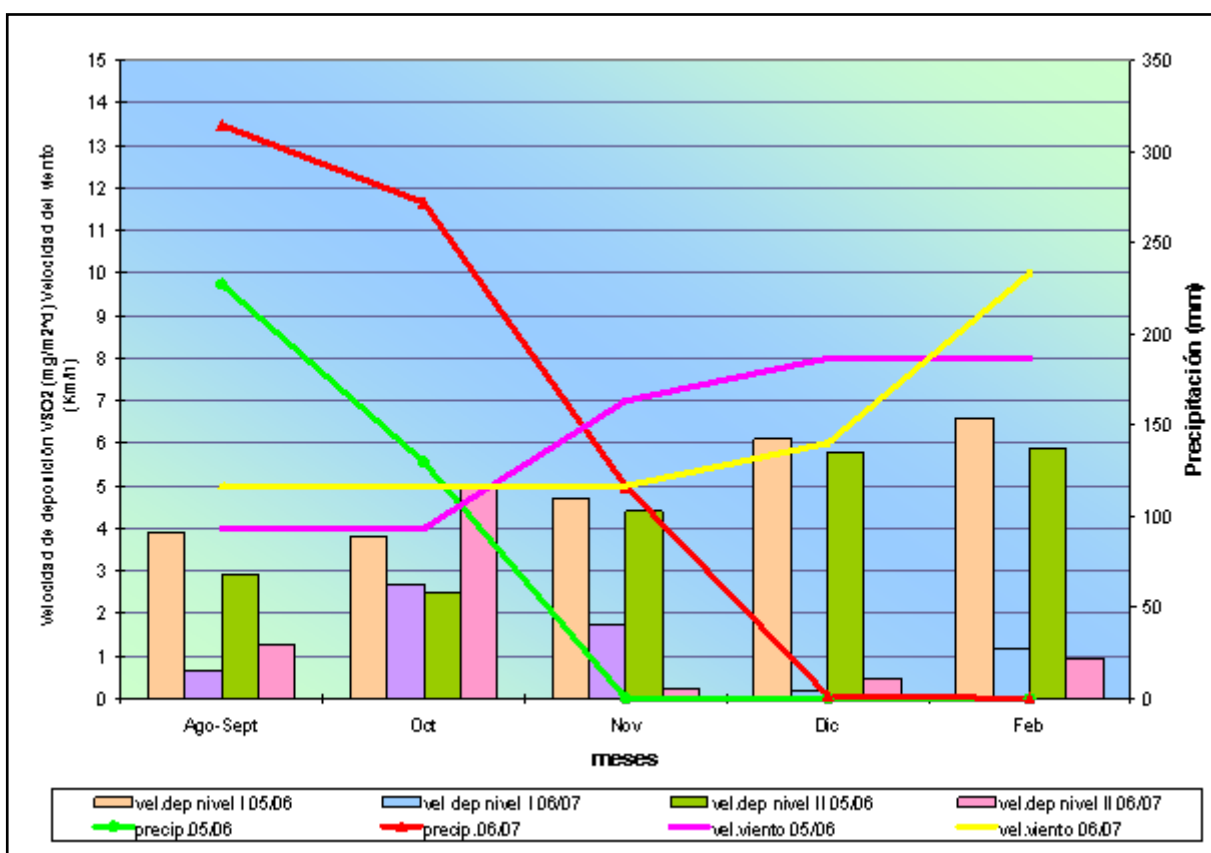


Figura 5.5. Velocidades de deposición de SO_2 y variables meteorológicas (2005- 2007)

Para ambos niveles, se tiene una marcada diferencia entre los valores de velocidad de deposición de los períodos 2005-2006 y el 2006-2007, ya que para el primero, son mayores debido que el período de precipitaciones fue de corta duración y de menor intensidad que el del actual monitoreo y como se mencionó en el apartado 5.2.1, la velocidad de deposición de SO_2 se favorece al no haber precipitación.

En el período (2006-2007), la velocidad de deposición se ve ligeramente influenciada por las precipitaciones, ya que hubo un leve aumento en la velocidad de deposición al disminuir las mismas en el mes de Octubre. Contrariamente, el período 2005-2006, los valores de la deposición son significativos con respecto a la norma y por lo tanto registran un comportamiento acorde con los parámetros meteorológicos: A menor precipitación, mayor deposición.

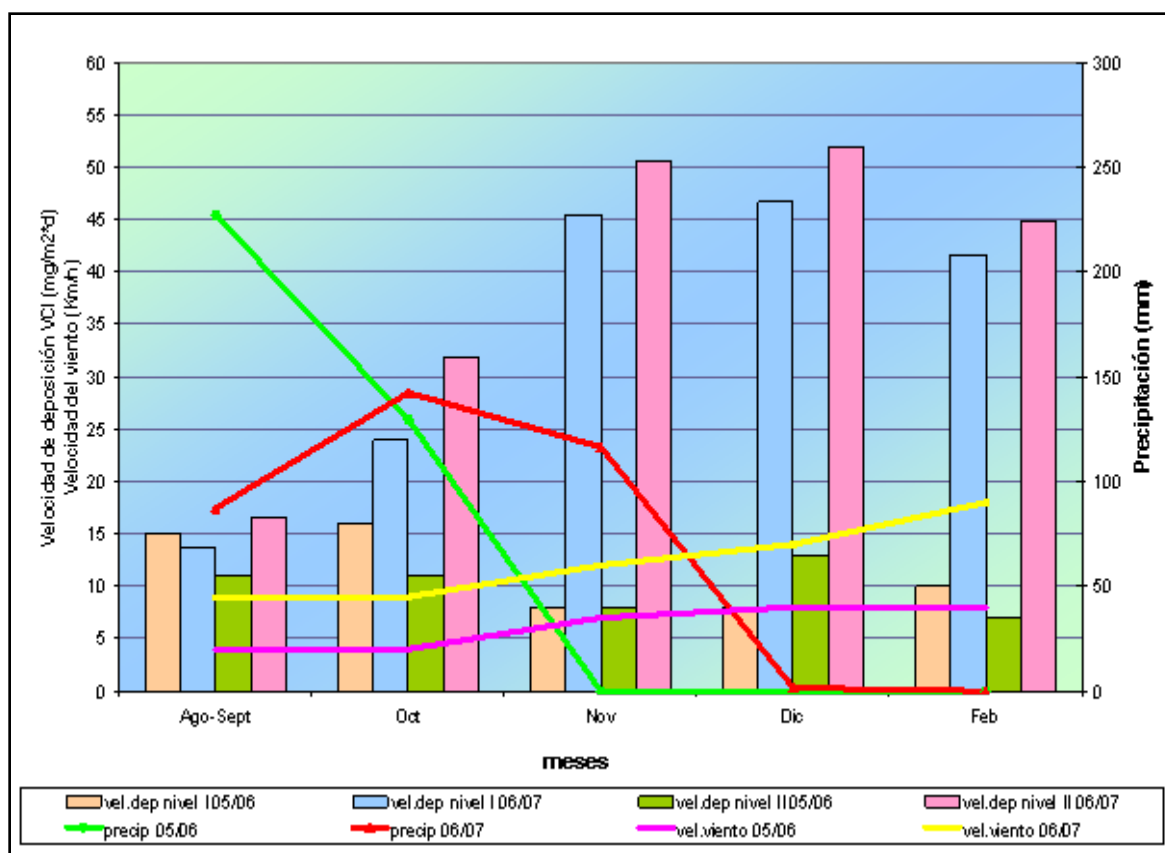


Figura 5.6. Velocidades de deposición de Cl y variables meteorológicas (2005- 2007).

En la Figura 5.6, se observa el comportamiento de las velocidades de deposición de iones cloruros, para los períodos (2005-2006) y (2006-2007). Para el primer período en general, los valores de deposición son menores a los del segundo período ya que su mayor valor apenas supera los 15 mg/m²*d, pero aún se encuentra en un rango medio donde la salinidad de la atmósfera comienza a ser significativa según la norma ISO 9223.

También se puede observar, que los parámetros meteorológicos no son de mayor influencia en éste período.

La diferencia entre los valores de velocidad de deposición de los periodos 05-06 y 06-07, puede ser atribuida a los trabajos de asfaltado y construcción en los alrededores de la subestación La Arenosa a 765 kV ya que hubo una gran cantidad de tierra removida y traída de otras partes para utilizarla como relleno, además de movimientos de tierra y construcciones dentro de la subestación. Estos eventos comenzaron a ocurrir aproximadamente en el mes de Octubre 06 y aún se llevan a cabo, principalmente los trabajos de ampliación y mejoramiento dentro de la subestación.

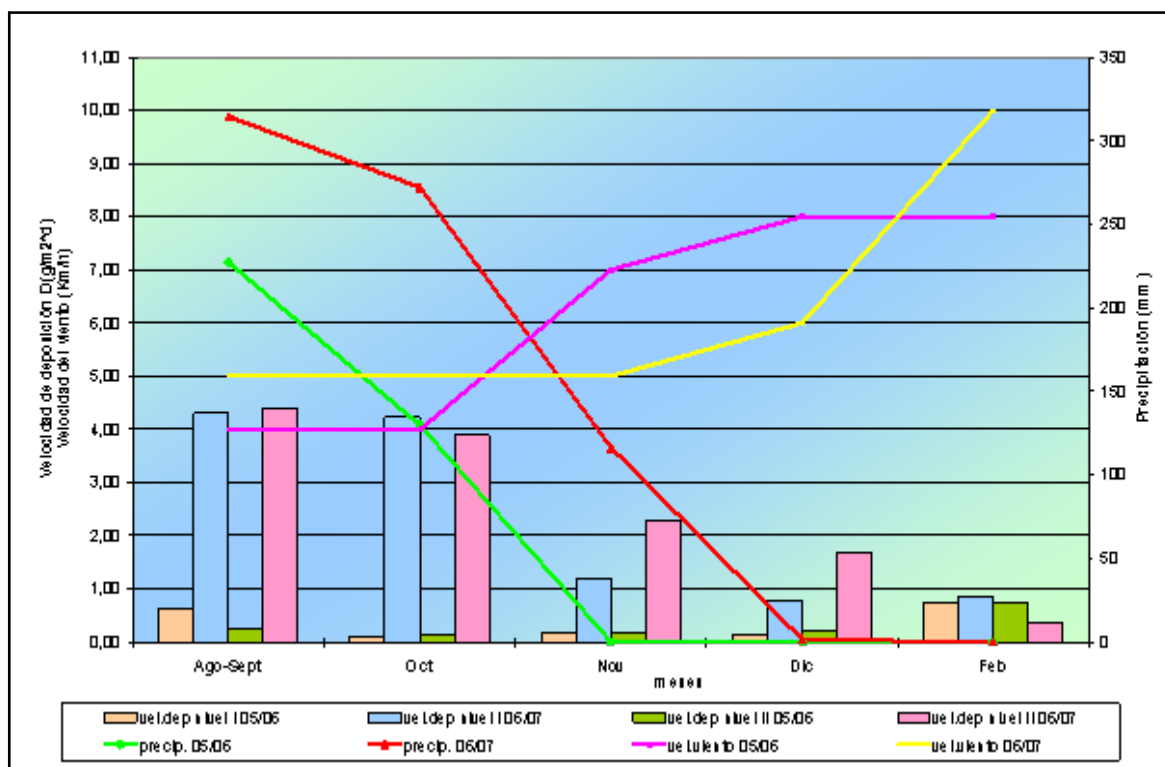


Figura 5.7. Velocidades de deposición de polvos atmosféricos sedimentables y variables meteorológicas (2005- 2007)

En la Figura 5.7 se observa la velocidad de polvos atmosféricos sedimentables, tomando en consideración las principales variables meteorológicas en los periodos mencionados anteriormente, donde se

evidencia una mayor velocidad de deposición en el período 06-07 debido a que la temporada lluviosa fue más larga y de mayor intensidad que la del período 05-06. Además a esto se le suma, los eventos ocurridos y que fueron descritos en párrafos anteriores.

5.4. Análisis de los resultados de las pruebas realizadas al agua de los polvos atmosféricos sedimentables

En las tablas (4.14) se pueden observar que los valores de conductividad registrados en los meses de abril y junio de 2007, corroboran los resultados de los análisis de composición química del agua de los polvos atmosféricos solubles realizado por Hidrolab Toro Consultores, C.A (ver Tabla D.3 del Apéndice D) ya que la conductividad es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución, debido a que mientras más iones tenga un electrolito, más conductivo será.

Aquí se evidencia una mayor concentración de iones en las muestras bajadas en el mes de abril 2007, considerando que los sulfatos y el cobre se encuentran en mayor proporción siendo la cantidad de CuSO_4 agregado al colector de polvo, muy baja para influir en el resultado.

Cabe destacar que la presencia de sulfatos, cloruros, potasio, nitratos y amonio, posiblemente se deba al empleo de fertilizantes, ya que como se mencionó anteriormente, la subestación se encuentra en una zona rural donde predomina la actividad agrícola.

Los demás iones presentes, posiblemente provienen de la tierra removida en los alrededores de la subestación, y que hay que acotar que, a pocos kilómetros de la subestación antiguamente se ubicaba una ciénaga y cuyo lecho de tierra es utilizado actualmente para actividades agrícolas, por lo que no se descarta que ésta tierra removida sea de esa procedencia y que

el proceso de remoción de tierra y asfaltado haya ocasionado un incremento en la concentración de cloruros (Figura 5.8) en la atmósfera para el período 2006-2007 y por consiguiente un aumento en la velocidad de deposición.

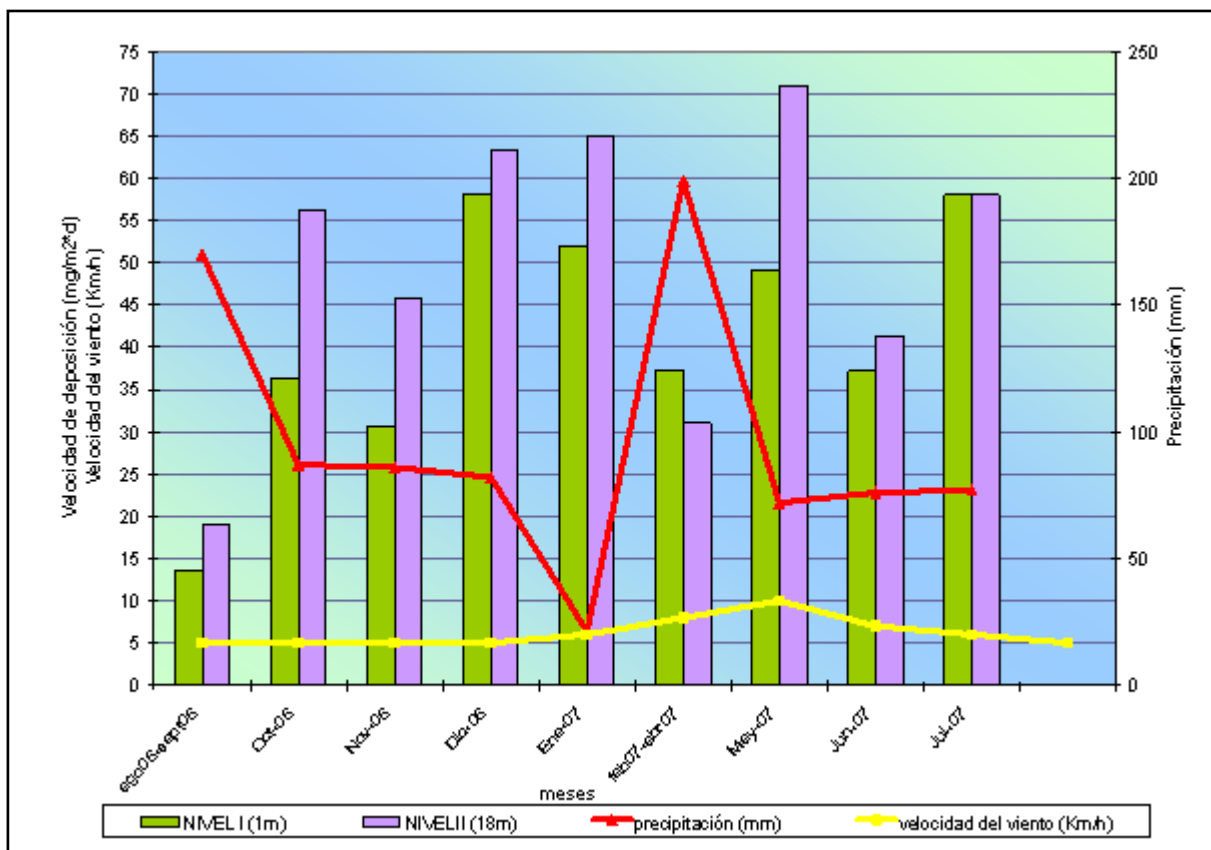


Figura 5.8. Velocidad de deposición de Cl presentes en los polvos atmosféricos solubles (agosto 2006-julio 2007)

5.5. Clasificación de la corrosividad atmosférica

La clasificación de la corrosividad atmosférica depende principalmente de las velocidades de deposición de agentes contaminantes tales como el dióxido de azufre e iones cloruros, de acuerdo al tipo de ambiente predominante en la zona monitoreada, estableciendo un (1) año de estudio de la misma, las cuales comprenden períodos tanto de sequía como de lluvias, para ello se hace uso de normas establecidas como la ISO 9223.

La finalidad de esta investigación, está en caracterizar la atmósfera circundante a la subestación La Arenosa a 765 kV lo cual se lleva a cabo

mediante la clasificación de agentes aeroquímicos y por factores meteorológicos.

Tabla 5.3
Tiempo total de humedad relativa (HR ≥80%)
para el periodo de muestreo

Período	Humedad Rel >80% (t ± 1) h
May-06	224
Jun-06	420
Jul-06	480
Ago-06	504
Sep-06	477
Oct-06	554
Nov-06	524
Dic-06	467
Ene-07	435
Feb-07	125
Mar-07	66
Abr-07	91
May-07	243

Tabla 5.4
Velocidades de deposición promedios de los agentes
aeroquímicos, tiempo de humectación y corrosividad.

Nivel	Altura (m)	Promedio Total SO₂ (mg/m²*d)	Categoría	Promedio Total Cl (mg/m²*d)	Categoría	TDH (h/a)	Categoría	Categoría de corrosividad
I	1	1.793	P ₀	38	S ₁	4610	τ ₄	C3
II	18	1.937	P ₀	42	S ₁		τ ₄	

La clasificación de la contaminación atmosférica debido al SO₂ se presenta en la Tabla 3.3 (capítulo 3). De acuerdo a las Tablas 5.1 y 5.2, donde se señalan las velocidades promedio del dióxido de azufre para los niveles monitoreados, la atmósfera circundante en la subestación La Arenosa a 765 kV se encuentra dentro de la categoría **P₀**, lo que indica que



no es significativa ante ataques corrosivos para los equipos y materiales presentes

en la subestación, tomando en consideración que es a partir de una categoría **P₂** que estos equipos sufren ataques corrosivos mas severos de parte de este contaminante.

La clasificación de la contaminación atmosférica debido a los iones cloruros se presenta en la tabla 3.4. De acuerdo a la Tabla 5.1 y 5.2, donde se señalan las velocidades de deposición de iones cloruros promedios, corresponden a una categoría S₁, que comienza a ser significativos en el ataque corrosivo a los equipos que conforman el tendido de eléctrico de la subestación según la norma ISO 9223.

La concentración de contaminantes a nivel del suelo varía como consecuencia del desequilibrio entre los índices de producción de contaminantes y desaparición de los mismos, proceso que depende de factores climatológicos como la velocidad del viento, humedad relativa, la temperatura, el movimiento de sistemas de altas y bajas presiones y la interacción de éstos con la topografía en la zona de estudio como por ejemplo las montañas cercanas a la subestación.

Es importante destacar que la humedad relativa de acuerdo a la temperatura en el sitio de muestreo se produjo mayormente en horas de la noche como era de esperarse, razón por la cual el proceso de corrosión de los metales presentes se produce mas fácilmente en dichas horas.

Según la norma ISO 9223, el parámetro necesario para hacer la clasificación de la atmósfera es la humedad relativa, y a su vez el tiempo de humectación. De acuerdo con la tabla 5.3 se observa el total de horas en cada período en las que la humedad relativa fue igual o mayor a 80% y temperatura mayor a 0°C dando un total de tiempo de humectación de **4610 Horas/Año**, que corresponde a la categoría **τ₄** (Tabla 5.4).

Este tiempo de humectación se le llama calculado, ya que es estimado a partir de mediciones generales de las condiciones meteorológicas para todo el estado. El tiempo de humectación calculado de esta manera no corresponde necesariamente al tiempo de humectación real, ya que la humectación depende del tipo de metal, de la forma, peso y orientación del objeto, de la cantidad de productos de corrosión y de su naturaleza, así como del tipo de contaminantes, entre otros factores (12).

Estas consideraciones pueden aumentar o disminuir el tiempo de humectación real. Sin embargo, el criterio propuesto es, por lo general, suficientemente preciso para la caracterización de la atmósfera circundante a la subestación La Arenosa a 765 kV.

Según la norma ISO 9223, la categoría de tiempo de humectación τ_4 esta dentro del rango ($\tau_3 - \tau_5$) lo cual incluye períodos de condensación y de precipitación, coincidiendo así con las características del microclima de la subestación. Esta clasificación propuesta por la norma para la atmósfera está basada en características de larga duración de zonas macroclimáticas, en condiciones típicas de las categorías o tipos de localización.

La corrosividad obtenida para este estudio es C3 (media) lo cual es indicativo de que la atmósfera circundante a la subestación ejerce una importante influencia sobre la corrosión de los materiales sin ser altamente agresiva. Por lo tanto se puede deducir que la velocidad de corrosión es moderada pero podría cambiar a alta según el comportamiento de los contaminantes atmosféricos, por lo cual se deben tomar acciones preventivas y correctivas que permitan proteger los equipos y líneas de transmisión.

Estos resultados concuerdan con lo que se observa en la subestación ya que muchos de los equipos en general, ya sean en intemperie o bajo techo, han tenido una larga vida útil y muchos de ellos pueden seguir siendo utilizados previo tratamiento anticorrosivo, salvo algunas pequeñas piezas cuyo deterioro significa reemplazo seguro, pero que su vez no requiere de grandes inversiones monetarias.

Luego de conocer el grado de corrosividad de la atmósfera y consultar medios trabajos de investigación impresos y electrónicos, además de fabricantes de pinturas y recubrimientos, se tiene que los tratamientos anticorrosivos más recomendables para éste tipo de ambiente son:

- ***Recubrimientos de Zinc 100% inorgánicos:***

Estos recubrimientos son de cierta forma un “galvanizado en frío” en el cual la película protectora está formada por la aplicación de una mezcla homogénea de polvo de zinc y una matriz acuosa de silicato o cromato obteniendo una película de zinc de alta conductividad eléctrica capaz de sacrificarse anódicamente para proteger el acero o el metal que va a ser recubierto.

Para su aplicación es necesario un tratamiento de la superficie, como la limpieza con arena o manualmente con cepillos, lijas, etc. La finalidad de esto es la eliminación de grasas, humedad, partículas sueltas, producto de corrosión y otras impurezas, para que el recubrimiento tenga una eficiencia máxima. Su rendimiento teórico depende de la casa fabricante y oscila entre unos 50 -70 m²/galón.



En el caso de atmósferas como la estudiada, puede ser usada sin necesidad de un acabado final (pintura), y puede ser aplicado con pistola o brocha.

- **Fondos anticorrosivos a base de Zinc:**

En teoría, funcionan igual que los recubrimientos y tiene los mismos procedimientos para su aplicación, con la diferencia que después de aplicar éste fondo, es necesario aplicar una pintura de acabado que sea compatible para evitar ampollas, grietas u otras imperfecciones, ya que el espesor del fondo es relativamente pequeño y la misma funciona como una capa impermeable y le da un mayor espesor a la capa protectora del metal, retardando el desgaste del zinc. A este conjunto se le llama, sistema anticorrosivo.

- **Recubrimientos epoxidícos:**

En términos generales el nivel de adherencia, dureza, flexibilidad y resistencia a los medios corrosivos de los recubrimientos epóxicos no han sido superados por recubrimiento alguno actualmente. Puede aplicarse sobre superficies de concreto, metálicas, galvanizadas o inorgánico de zinc.

Presenta una excepcional resistencia a medios alcalinos y buena resistencia a los medios ácidos. Además un alto grado de impermeabilidad, permaneciendo inalterable ante la exposición o inmersión en agua dulce, salada y vapor de agua. Estas características, las adquiere mediante un medio de polimerización denominado catalizador, constituido por una solución de resinas amínicas o poliamídicas.

- Por último, están los **recubrimientos fenólicos** :



Que se utilizan en los casos que no se pueda hacer una preparación de la superficie con chorro de arena, utilizándose procedimientos de limpieza y preparación, manuales mecánicos.

Es recomendado como fondo anticorrosivo para pinturas de acabado alquídicas y acrílicas. Se puede usar como recubrimiento de barrera cuando se quiere aplicar como acabado sobre pinturas alquídicas viejas.

En cuanto a sus características, es un recubrimiento duro, brillante y muy adherente, especialmente para aceros estructurales que han de permanecer sumergidos en agua, zonas de alta humedad en las que se prevén condensaciones y para exposición a los ambientes químicos de corrosión moderada.

En resumen, para obtener una excelente protección anticorrosivo se debe de tener en cuenta los diferentes sistemas que pueden haber en el conjunto de equipos, tuberías, ductos de aire acondicionado y ventilación, tanques, etc ya que son diferentes recubrimientos y por lo tanto diferentes acabados, optimizando así el funcionamiento en las líneas de transmisión occidente.

Para superficies de acero galvanizado y aluminio, es recomendable un sistema compuesto de un recubrimiento de zinc inorgánico o fondo anticorrosivo a base de zinc, pintura intermedia (en caso de ser necesario) y un acabado mate gris.

Para tanques, tuberías y sus accesorios, bastidores, etc, lo recomendable es un fondo anticorrosivo epoxídico o fenólico, seguido del acabado de poliuretano del color acorde con el fluido almacenado y transportado si fuese el caso, teniendo en consideración la temperatura de trabajo.

CONCLUSIONES

1. Las concentraciones promedios de los agentes aeroquímicos son: 2.5 ± 0.5 ppm de SO_4 , 17 ± 9 ppm de Cl^- y 20.19 ± 0.08 ppm de Cl^- en los polvos atmosféricos solubles.
2. Las velocidades de deposición promedio del SO_2 para el nivel I y II, durante el monitoreo aeroquímico fueron $1.793 \pm 0,001$ y $1,937 \pm 0,001$ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ respectivamente.
3. Los valores promedio de deposición del SO_2 no superan el mínimo valor establecido en la norma ISO 9223 para la contaminación sulfurosa de la atmósfera.
4. No existe contaminación sulfurosa en la atmósfera circundante a la CVG EDELCA S/E La Arenosa a 765 kV.
5. Las velocidades de deposición promedio del Cl^- fueron de 38 ± 8 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ y 42 ± 8 $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$, para el nivel I y II respectivamente.
6. La velocidad de deposición promedio de polvos atmosféricos para el nivel I de $2.0 \pm 0,1$ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ y $2.2 \pm 0,1$ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ para el nivel II.
7. La muestra de polvo atmosférico soluble recolectada en abril de 2007, tuvo la mayor conductividad registrada en todo el monitoreo.
8. Las velocidades de deposición de SO_2 reportados para el período (2005-2006) fueron mayores que la del período (2006-2007).
9. Las velocidades de deposición de cloruro y polvos atmosféricos sedimentables, reportados para el período (2006-2007) fueron mayores que las del período (2005-2006).
10. Según análisis de agua de los polvos atmosféricos solubles realizados, los metales e iones presentes mayormente son: sulfato, calcio, sodio, cloruro, potasio, nitrato, amonio y zinc para las muestras de abril y junio de 2007.
11. La velocidades de deposición de los agentes aeroquímicos son mayores para el nivel II.
12. En los niveles I y II evaluados, el agente aeroquímico con mayor velocidad de deposición resultó ser el cloruro.



13. La velocidad de deposición del dióxido de azufre se ubica en la categoría P_0 según la Norma ISO 9223:1992.
14. La zona muestreada según la Norma ISO 9223:1992 la velocidad de deposición de cloruros se ubica en la categoría S_1 .
15. El valor promedio anual de la temperatura ambiente es 26°C , para la humedad relativa es 78%, velocidad del viento 6.3 Km/h y la precipitación total fue de 1616.90 mm.
16. Los períodos de sequía se registraron entre los meses de diciembre de 2006 hasta febrero de 2007.
17. Los períodos de precipitaciones se corresponde entre los meses de mayo hasta noviembre 2006 y marzo a julio de 2007.
18. El tiempo de humectación calculado corresponde a 4610 horas/año, en la caracterización de la corrosividad atmosférica debido a factores meteorológicos.
19. El tiempo de humectación se clasifica en la categoría T_4 , de acuerdo a las horas por año, según la Norma ISO 9223:1992.
20. La corrosividad de la atmósfera circundante a CVG EDELCA S/E La Arenosa, según la Norma ISO 9223:1992 se clasifica en la categoría C3, correspondiente a una corrosividad media.

RECOMENDACIONES

1. Continuar el monitoreo a fin de determinar posibles cambios en la velocidad de deposición de los agentes aeroquímicos presentes con la finalidad de obtener una mayor precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos.
2. Colocar una estación meteorológica en la subestación con el fin de monitorear los parámetros meteorológicos localmente, obteniendo así esta información cada vez que se requiera y más ajustada a el área de estudio.
3. Para superficies de acero galvanizado (torres de transmisión, tanques, accesorios, bastidores, tuberías, torres de alumbrado, partes de equipos de transmisión, etc.) y/o cobre (seccionadores), se recomienda un recubrimiento de zinc inorgánico o fondo anticorrosivo a base de zinc.
4. Para tanques, tuberías, accesorios, bastidores, etc, lo recomendable es un fondo anticorrosivo epoxídico o fenólico, seguido del acabado de poliuretano del color acorde con el fluido almacenado.
5. El material recomendado en la mayoría de los equipos de transmisión, según las condiciones meteorológicas y agentes aeroquímicos es el utilizado actualmente (acero galvanizado) debido a su resistencia a la formación de herrumbre sin necesidad de pintar.
6. Realizar un análisis de polvos atmosféricos sedimentables por un método en el cuál suministre una mayor cantidad de iones y metales (cromatografía de columna de líquido).
7. Se recomienda evaluar el método de la torina para la captación y análisis de SO₂ como alternativo del ISO 9225, ya que también se basa en el método espectrométrico y no utiliza dióxido de plomo como agente captador siendo éste último muy costoso y de difícil disponibilidad.



Trabajo Especial de Grado



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Agresividad de la atmósfera: es el potencial de la atmósfera para provocar corrosión en metales o aleaciones. Se puede medir con base en los siguientes parámetros ambientales: humedad, temperatura y contaminación (12).

Ambiente rural: Se considera ambiente rural aquel en el que, según ISO 9223:

- el nivel de polución por SO₂ corresponde a las categorías P0 ó P1
- el nivel de polución por Cl⁻ corresponde a las categorías S0 ó S1

Esta situación se puede considerar en aquellas zonas en las que dentro de un radio de 5 km no existan fábricas, industrias pesadas, grandes zonas urbanas y no estén próximas a la línea del litoral.

Ambiente industrial: Se considera ambiente industrial aquel en el que, según ISO 9223:

- el nivel de polución por SO₂ corresponde a las categorías P2 ó P3
- el nivel de polución por Cl⁻ corresponde a las categorías S1, S2 ó S3

Esta situación puede considerarse cuando dentro de un radio < 5 km existan fábricas, industrias pesadas o se encuentren grandes núcleos urbanos.

Ambiente marino: Este ambiente está caracterizado por la presencia del ión Cl⁻ de forma que, según ISO 9223:

- el nivel de polución por Cl⁻ corresponde a las categorías S2 ó S3

Ambiente húmedo: Se considera ambiente húmedo aquel en el que, según ISO 9223:

- el tiempo de humectación es tal que le corresponde las categorías τ_4 ó τ_5



Ambiente seco: Se considera ambiente seco aquel en el que, según ISO 9223:

- el tiempo de humectación es tal que le corresponde las categorías τ_2 ó τ_3

Ambientes especiales

Cuando existan en la atmósfera otros elementos corrosivos no contemplados en la norma ISO 9223 se considerará que se trata de ambientes especiales.

Ánodo: porción de una superficie metálica en la que tiene lugar la corrosión (disolución) y en la cual se liberan electrones como consecuencia del paso del metal en forma de iones, al electrolito.

Argentometría: permite conocer la concentración de iones cloruros (Cl^-) en una solución o muestra problema, utilizando el nitrato de plata (AgNO_3) como titulante (solución patrón) y el cromato de potasio (K_2CrO_4) como indicador. Se la llama también, método de Mohr.

Balanza analítica: es un instrumento de pesada cuya carga máxima esta comprendida por lo general entre 160 a 200 g con desviaciones estándar de +/- 0,1mg.

Categoría de la contaminación: característica cualitativa o cuantitativa determinada convencionalmente, que señala la cantidad de sustancias químicas activas, gases corrosivos o partículas suspendidas en los aires, tanto naturales como producidos por el hombre, diferentes de los compuestos ordinarios del aire.

Categoría de localización: Se define por convención como las condiciones típicas de exposición de un componente o una estructura, por ejemplo, al aire libre, bajo techado, en un espacio cerrado, etc..

Cátodo: porción de una superficie metálica en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito.

Conductividad: parámetro acumulativo de la concentración de iones en una solución. La conductividad eléctrica del agua depende del grado de disociación de las sales presentes en el agua. Se mide en unidades: Siemens/cm.

Contaminación atmosférica: presencia en el aire de sustancias extrañas, sean éstas gaseosas, sólidas o la combinación de ambas, en cantidad y durante un tiempo de permanencia que puede provocar efectos nocivos para la salud humana y un deterioro de los bienes de uso y del paisaje.

Complejo temperatura humedad: efecto conjunto de la temperatura y de la humedad relativa, que influye en la corrosividad de la atmósfera.

Corrosión: proceso mediante el cual el metal vuelve a su estado natural y que corresponde a una oxidación, y representa la conversión paulatina del metal en sus formas combinadas. Los metales se encuentran en la naturaleza de forma combinada (formando óxidos, carbonatos, etc.).

Corrosión seca: Se produce en los metales que tienen una energía libre de formación de óxidos negativa.

Corrosión húmeda: Requiere de la humedad atmosférica, y aumenta cuando la humedad excede de un valor crítico, frecuentemente por encima del 70%.

Corrosión por mojado: Se origina cuando se expone el metal a la lluvia o a otras fuentes de agua.

Corrosividad de las atmósferas: se define como la capacidad de la atmósfera para producir corrosión en un sistema corrosivo determinado.

Metales nobles: son metales que se encuentran usualmente como metales libres en la tierra y no como compuestos. Ejemplo de ellos son el oro y el platino.

Metales activos o base: son aquellos los cuales, jamás se podrán encontrar como metales libres en nuestra atmósfera terrestre, sino como compuestos tales como el sodio, aluminio y magnesio.

Polarización: proceso donde se altera el potencial a circuito abierto de un electrodo mediante el paso de corriente.

Potencial a circuito abierto: potencial eléctrico que se establece entre un electrodo y un electrolito en estado de equilibrio.

Proceso anódico: proceso en el cuál tiene lugar una oxidación donde un átomo metálico cede electrones y pasa a estado iónico.

Proceso catódico: proceso en el cuál tiene lugar una reacción de reducción donde una especie química capta electrones.

Resistencia de polarización: técnica electroquímica que permite determinar la velocidad de corrosión de un metal o sistema determinado.



Sentido de una corriente eléctrica: se define como el sentido del movimiento de las cargas libres.

Siemens: Unidad de medición de conductividad. 1 Siemens/cm equivale a 1000 milisiemens/cm (mS/cm) y a 1000000 microsiemens/cm (uS/cm).

Sistema de transmisión de energía eléctrica: es el medio de conexión entre los consumidores y los centros de generación, el cual permite el intercambio de energía entre ellos a todo lo largo de la geografía nacional.

Tiempo de humectación: periodo durante el cual una superficie metálica está cubierta por una película de electrolito (incluso adsorbida) que estimula significativamente la corrosión atmosférica.

Tiempo de humectación calculado: tiempo de humectación estimado a partir de relaciones temperatura-humedad relativa.

Tiempo de humectación experimental: tiempo de humectación determinado directamente por diferentes sistemas de medida.

Tipo de atmósfera: Caracterización de la atmósfera basada en criterios apropiados de clasificación distintos a la corrosividad (industrial, marina, etc.) o a factores operacionales complementarios (química, etc.).



REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- (11) Bárcenas, J y Gámez O. 2006. **“Evaluación de la corrosividad atmosférica provocada por agentes aeroquímicos y meteorológicos en la subestación eléctrica CVG EDELCA La Arenosa a 765 kV”**. Facultad de ingeniería. Universidad de Carabobo. Trabajo Especial de Grado.
- (7) Díaz Rodríguez, Francisco Miguel. **“Estudio de la corrosión atmosférica del cinc y el acero galvanizado”**. Universidad de la Laguna, departamento de química física. 2001. Tesis Doctoral
- (8) Díaz T., Coavoy D. **“Estudio de los efectos de los contaminantes atmosféricos en los monumentos líticos y patrimonio cultural pictórico de la ciudad del cuzco”**. Contrato de prestación de servicios profesionales 2006. Informe final.
- (5) Genescá J., Mendoza J. **“Más allá de la Herrumbre I, II y III”**
www.omegailce.com
- (2) Gorman A., Koch G. **“Cost of corrosion studies”**
www.corrosioncost.com
- (6) H. H. Uhlig. **Uhlig’s Corrosion Handbook** 2da ed. (ed. R. W. Revie) John Wiley & Sons, Londres, 2000.
- (10) M. G. Fontana & N. D. Greene. **“Corrosion Engineering”** McGraw-Hill, Nueva York, 1967.
- (12) Norma Iberdrola. **“Clasificación de ambientes de intemperie para protección anticorrosivo”**. 1º Edición. Noviembre 1994.
- (1) Ortiz P., Cortéz M. “Corrosión”
<http://ciencias.uniandes.edu.co/pdf/corrosion.pdf>
- (9) Standard methods for the examination of water and waste water publicado por la APHA. **Medición de Cloruros por Argentometría, Método 4500 Cl⁻ B** - 1995
- (3) www.textoscientificos.com/quimica/corrosion



Trabajo Especial de Grado



APÉNDICE A. CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL ESPECTRONIC 20 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SULFATO EN SOLUCIÓN.

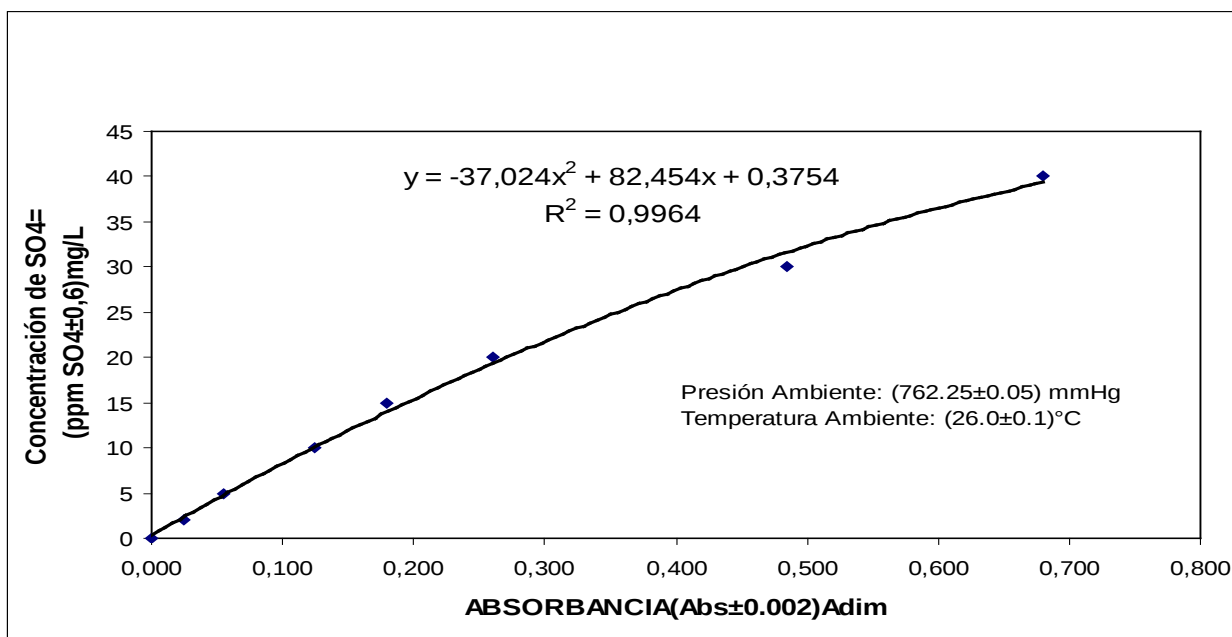


Figura A1. Curva de calibración del Spectronic 20 para el período de monitoreo Mayo- Julio 2006

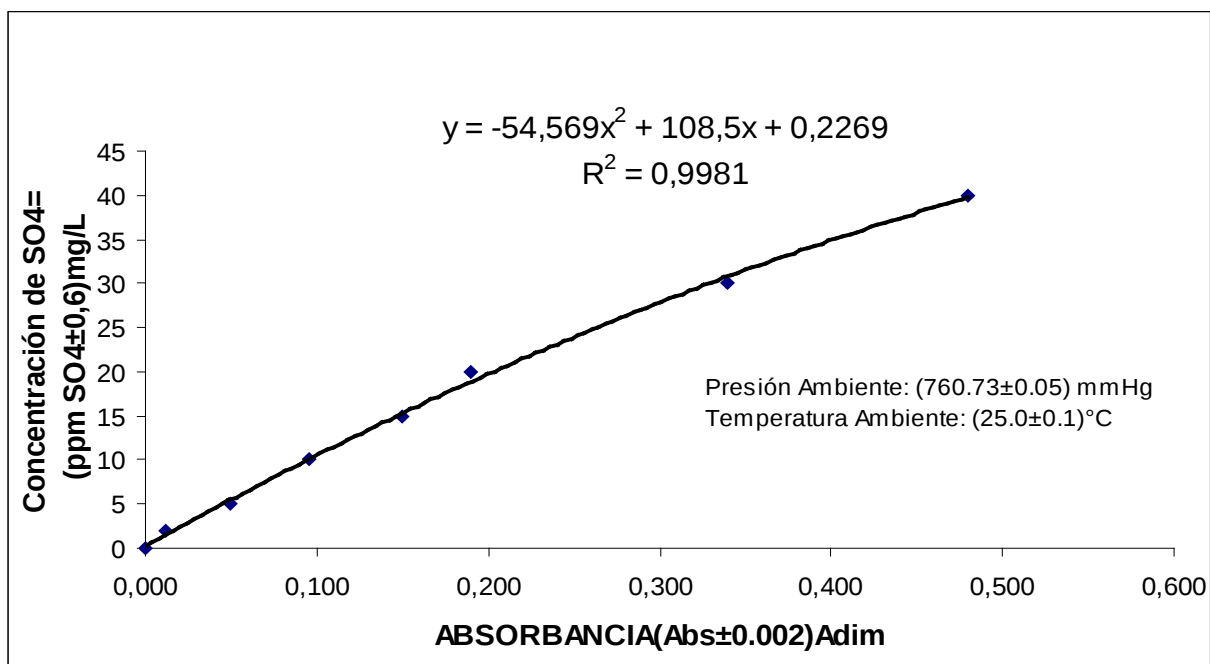


Figura A.2. Curva de calibración del Spectronic 20 para el período de monitoreo Julio-Septiembre 2006

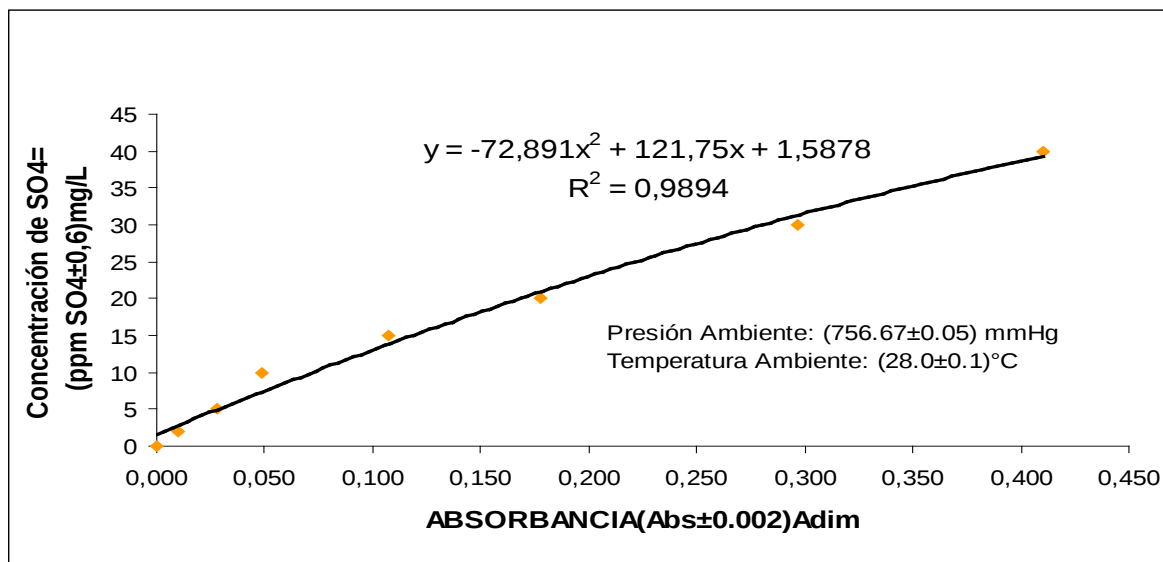


Figura A.3. Curva de calibración del Spectronic 20 para el período de monitoreo Septiembre-Octubre 2006

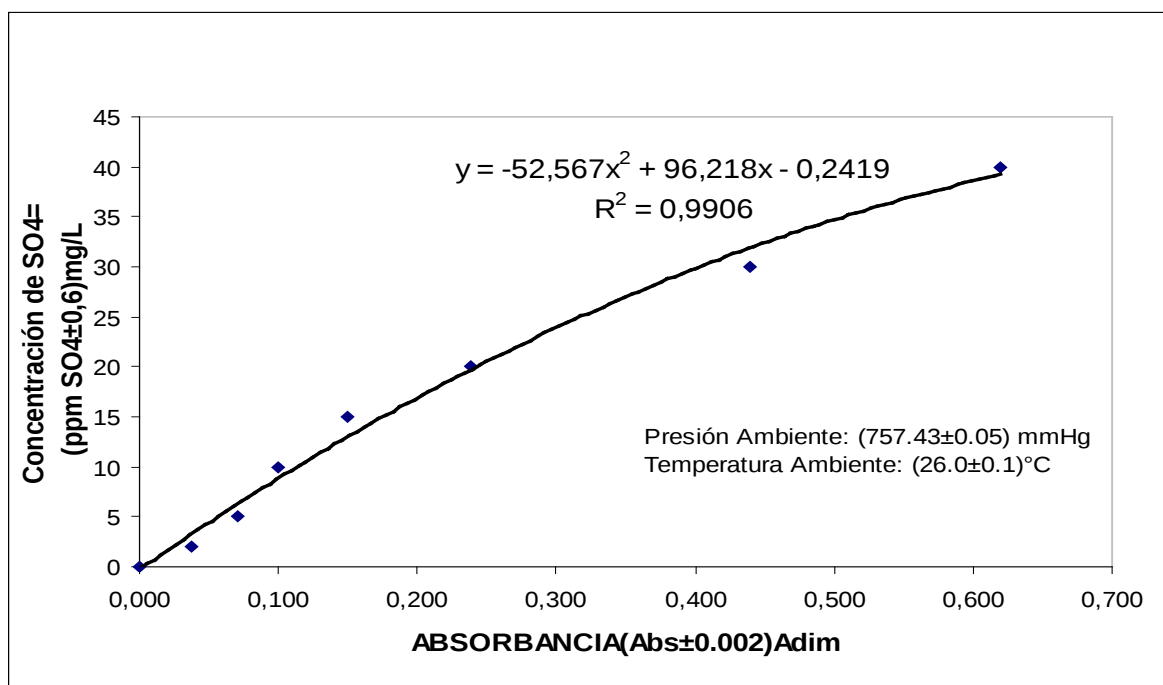


Figura A.4. Curva de calibración del Spectronic 20 para el período de monitoreo Octubre- Noviembre 2006

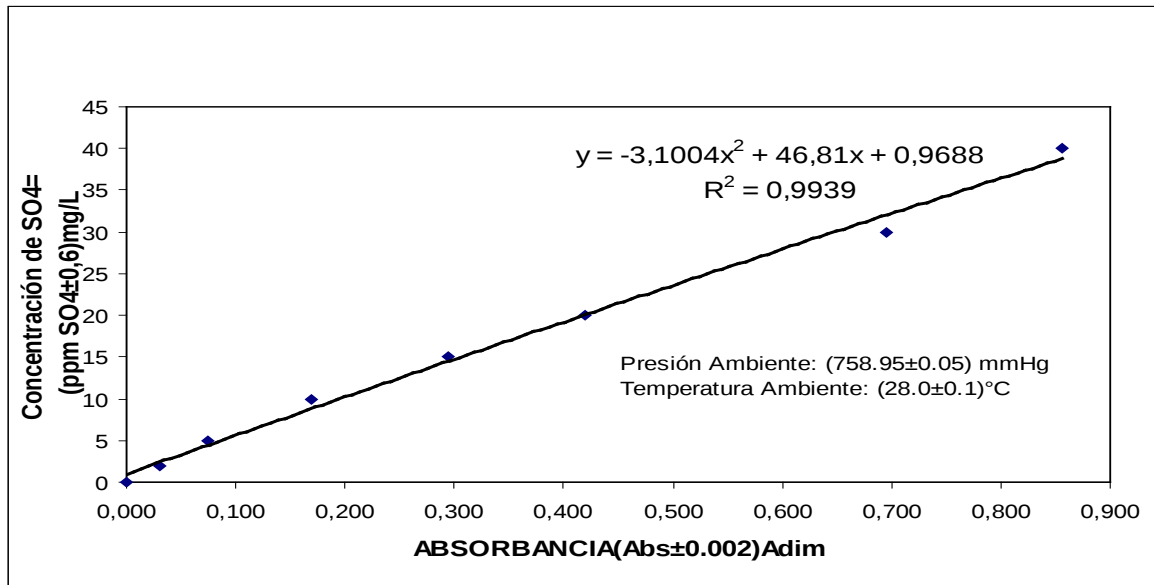


Figura A.5. Curva de calibración del Spectronic 20 para el período de monitoreo Noviembre-Diciembre 2006

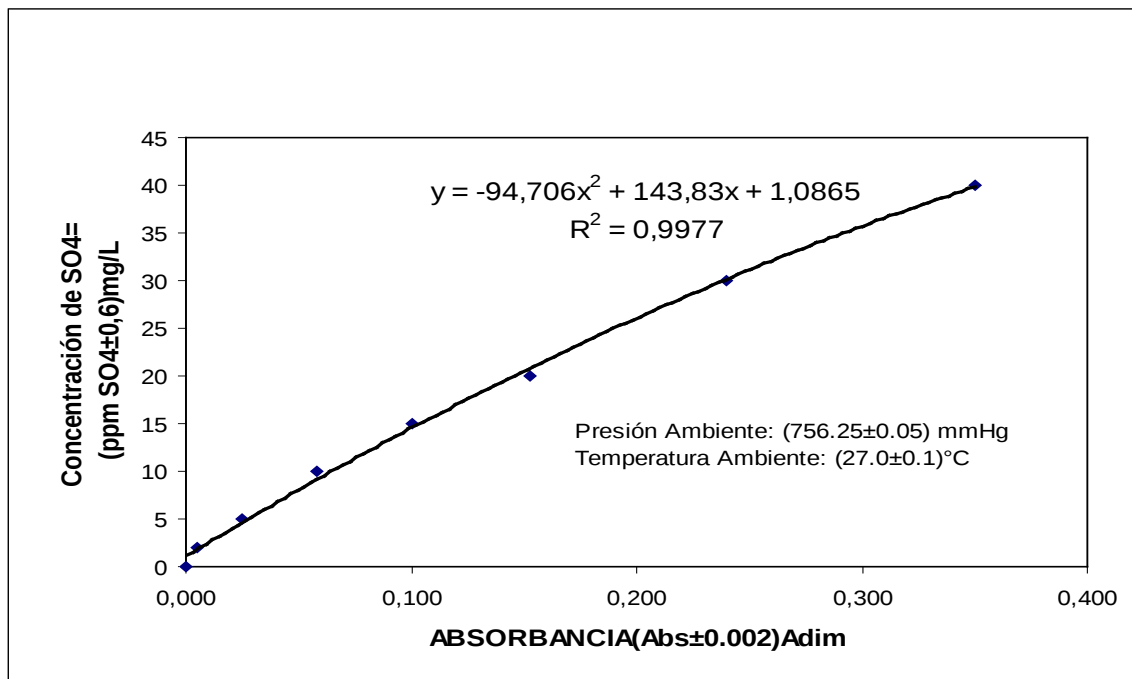


Figura A.6. Curva de calibración del Spectronic20 para el período de monitoreo Diciembre 2006- Febrero 2007

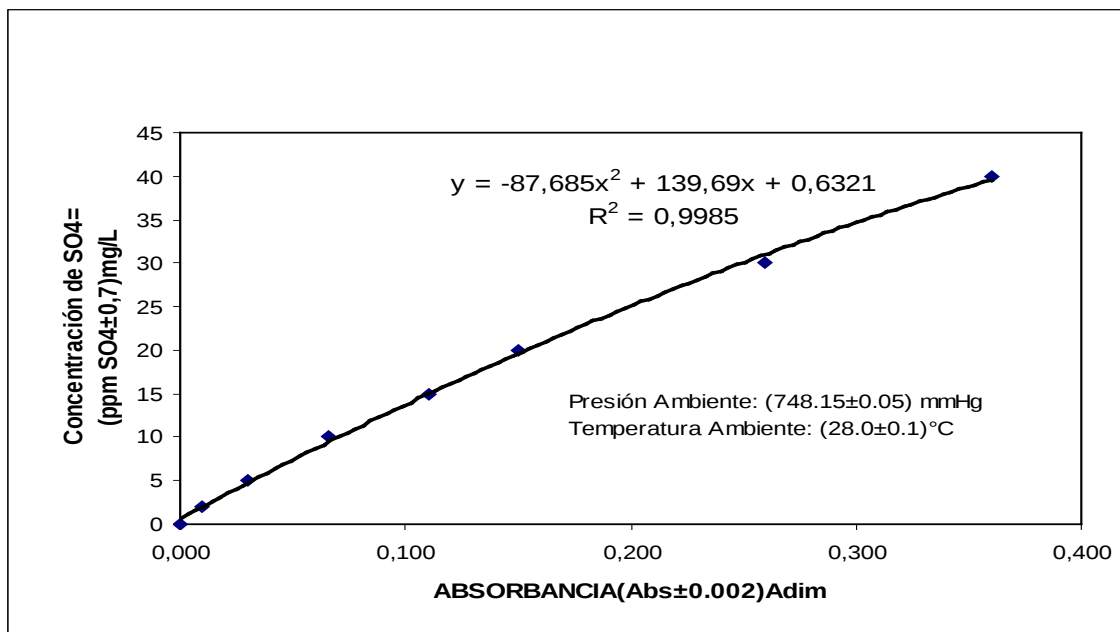


Figura A.7. Curva de calibración del Spectronic 20 para el periodo de monitoreo Febrero- Abril 2007

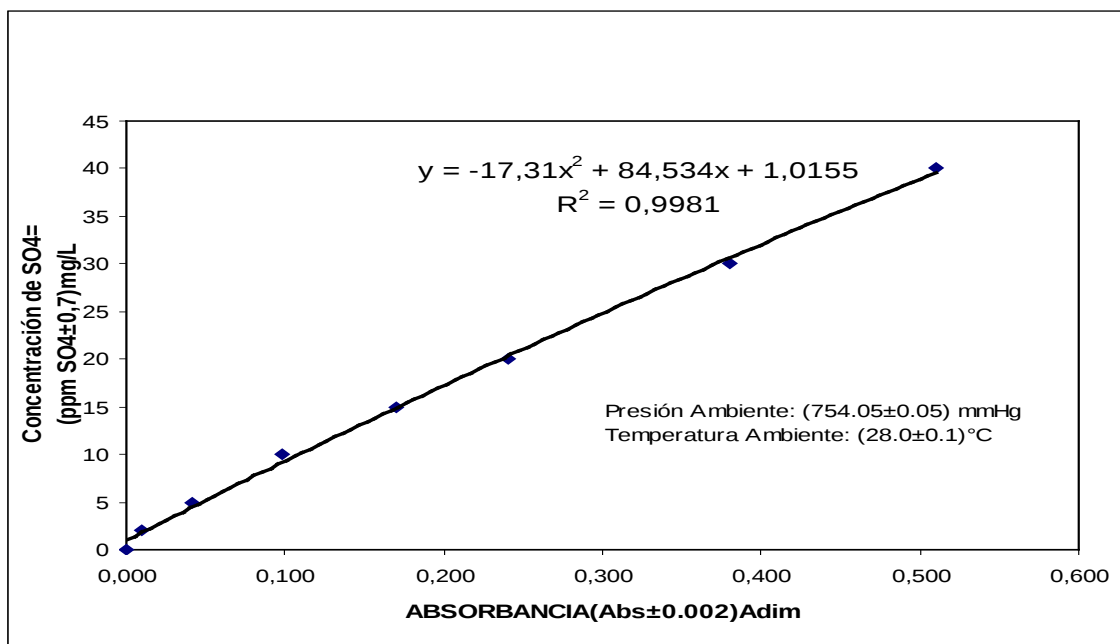


Figura A.8. Curva de calibración del Spectronic 20 para el periodo de monitoreo Abril- Mayo 2007

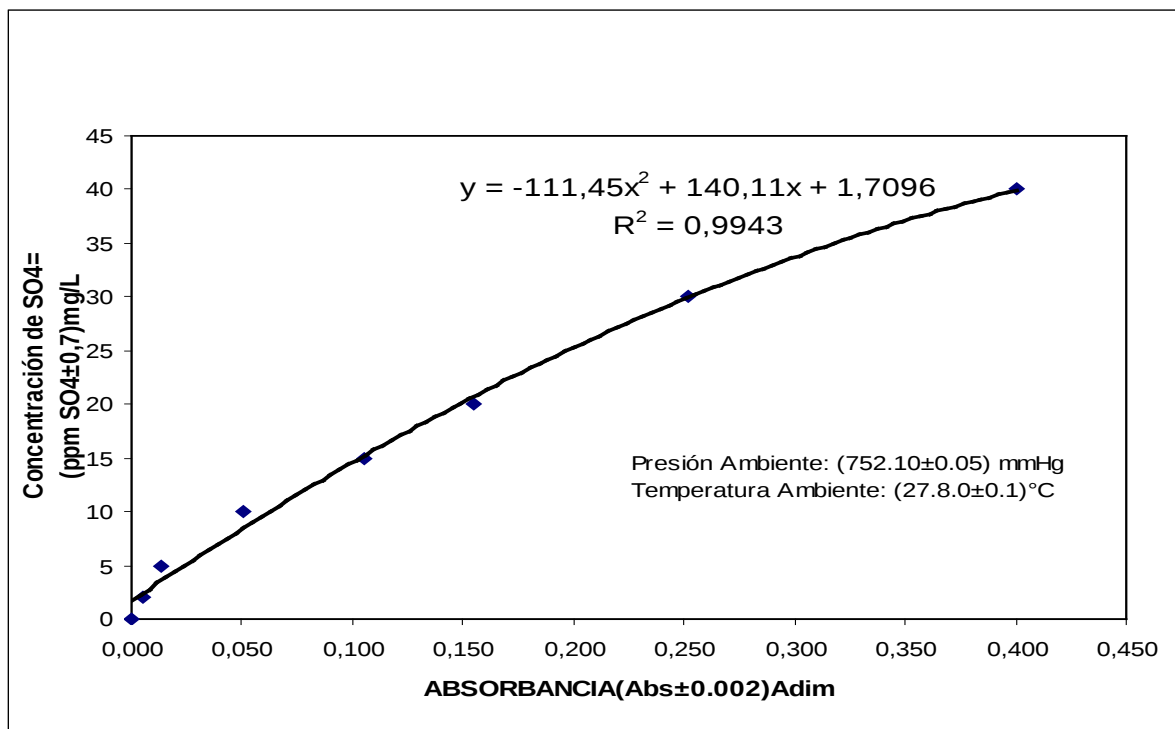


Figura A.9. Curva de calibración del Spectronic 20 para el período de monitoreo Mayo-Junio 2007

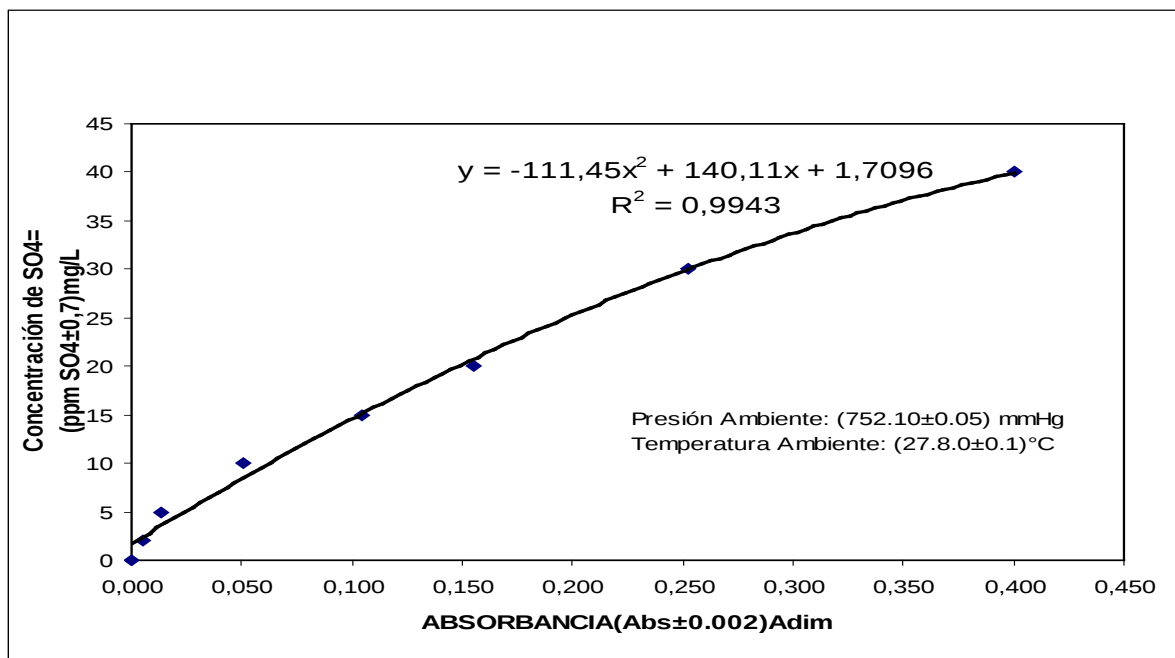


Figura A.10. Curva de calibración del Spectronic 20 para el período de monitoreo junio-julio 2007.

APÉNDICE B. CÁLCULOS TÍPICOS

En esta sección se muestran los cálculos realizados a manera de ejemplo de acuerdo a los objetivos planteados en la investigación, mediante un tipo de cálculo para cada variable involucrada así como su respectivo error experimental.

A.1. Determinación de la sulfatación de la atmósfera

Todos los cálculos presentados a continuación se realizarán para el quinto período de monitoreo y nivel I.

A.1.1. Cálculo del factor de dilución y su error asociado

De la ecuación (4.3) se tiene que:

$$F_D = \frac{V_M}{V_m}$$

Sustituyendo por los valores respectivos:

$$F_D = \frac{500\text{mL}}{100\text{mL}} \quad \boxed{F_D = 5a \text{ dim}}$$

$$\Delta F_D = \left| \frac{\partial F_D}{\partial V_M} \right| * \Delta V_M + \left| \frac{\partial F_D}{\partial V_m} \right| * \Delta V_m \quad \Delta F_D = \left| \frac{1}{V_m} \right| * \Delta V_M + \left| \frac{V_M}{V_m^2} \right| * \Delta V_m$$

$$\Delta F_D = \frac{1}{100\text{mL}} * 0,15\text{mL} + \frac{500\text{mL}}{(100\text{mL})^2} * 0,05\text{mL} \quad \boxed{\Delta F_D = 0,004a \text{ dim}}$$

El factor de dilución será:

$$\boxed{F_D = (5,000 \pm 0,004)a \text{ dim}}$$

A.1.2. Cálculo de la curva de calibración y su error asociado

Considerando los valores de la **tabla 5.20**, se construye la curva de calibración realizando una regresión aritmética para así obtener una ecuación representativa con los puntos de la gráfica, como la que se expresa:

$$ppmSO_4^{-2} = [(-52.567Abs^2 + 96,218Abs - 0,2419)-5]$$

$$\text{con un } R^2 = 0,9906$$

$$\Delta ppmSO_4^{-2} = \left| \frac{\partial ppmSO_4^{-2}}{\partial Abs} \right| * \Delta Abs$$

$$\Delta ppmSO_4^{-2} = \left| -52,567 \frac{mg}{L} * 2a \dim * Abs + 96,218 \frac{mg}{L} \right| * 0,005a \dim$$

$$\Delta ppmSO_4^{-2} = \left| -52.567 \frac{mg}{L} * 2 * 0.077 + 96.218 \frac{mg}{L} \right| * 0.005a \dim$$

$$\Delta ppmSO_4^{-2} = 0,45061341 \frac{mg}{L} \cong 0,5 \frac{mg}{L}$$

$$ppmSO_4^{-2} = (1.8 \pm 0.5) \frac{mg}{L}$$

A.1.5. Cálculo del largo y ancho promedio del área de exposición:

Para una mayor precisión de los resultados se midió en tres sitios diferentes el largo y ancho de la tela de la vela de plomo, con el objetivo de obtener un promedio, mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{L} = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad \bar{L} = \frac{13.9cm + 14,00cm + 14,00cm}{3} \quad \boxed{\bar{L} = 13.97cm}$$

$$\Delta \bar{L} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3}{3} \quad \Delta \bar{L} = \frac{0,05cm + 0,05cm + 0,05cm}{3} \quad \boxed{\Delta \bar{L} = 0,05cm}$$

$$\boxed{\bar{L} = (13.97 \pm 0.05)}$$

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3}$$

$$\bar{A} = \frac{8,50cm + 8,80cm + 8,40cm}{3}$$

$$\boxed{\bar{A} = 8,60cm}$$

$$\Delta\bar{A} = \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + \Delta A_3}{3}$$

$$\Delta\bar{A} = \frac{0,05cm + 0,05cm + 0,05cm}{3}$$

$$\boxed{\Delta\bar{A} = 0,05cm}$$

$$\boxed{\bar{A} = (8,60 \pm 0,05)cm}$$

A.1.6. Cálculo del área de exposición y su error asociado

De acuerdo a la ecuación (4.4) se tiene que:

$$A_{exp} = \bar{L} * \bar{A}$$

$$A_{exp} = 13,97cm * 8,60cm$$

$$\boxed{A_{exp} = 120.142cm^2}$$

$$\Delta A_{exp} = \left| \frac{\partial A_{exp}}{\partial \bar{L}} \right| * \Delta \bar{L} + \left| \frac{\partial A_{exp}}{\partial \bar{A}} \right| * \Delta \bar{A}$$

$$\Delta A_{exp} = |\bar{A}| * \Delta \bar{L} + |\bar{L}| * \Delta \bar{A}$$

$$\Delta A_{exp} = (8,60cm * 0,05cm) + (13,97cm * 0,05cm)$$

$$\boxed{\Delta A_{exp} = 1,1285cm^2}$$

Finalmente:

$$\boxed{A_{exp} = (120 \pm 1)cm^2}$$

A.1.7. Cálculo de la concentración de sulfatos

Tomando en consideración la ecuación (4.2) tenemos:

$$Cm = 1.8552463 * 5,000a \text{ dim}$$

$$\boxed{Cm = 9.2762315 \frac{mg}{L}}$$

$$\Delta Cm = \left| \frac{\partial Cm}{\partial ppmSO_4^{-2}} \right| * \Delta ppmSO_4^{-2} + \left| \frac{\partial Cm}{\partial F_D} \right| * \Delta F_D$$

$$\Delta Cm = |F_D| * \Delta ppmSO_4^{-2} + |ppmSO_4^{-2}| * \Delta F_D$$

$$\Delta Cm = \left(5,000a \text{ dim} * 0,5 \frac{mg}{L} \right) + \left(1.8552163 \frac{mg}{L} * 0,004a \text{ dim} \right)$$

$$\Delta Cm = 2,500742 \frac{mg}{L} \cong 3 \frac{mg}{L}$$

Finalmente:

$$Cm = (9 \pm 3)a \text{ dim}$$

A.1.8. Cálculo de la velocidad de deposición del SO₂

De acuerdo a la ecuación (4.1) se tiene que:

$$V_{SO_2} = \frac{9.2762315 \frac{mg}{L} * 100mL * 10000 \frac{cm^2}{m^2} * 64,065 \frac{g}{eq}}{120.142cm^2 * 30días * 1000 * 96,065 \frac{g}{eq}}$$

$$V_{SO_2} = 1.7163430154 \frac{mg}{m^2 * día}$$

$$\Delta V_{SO_2} = \left| \frac{\partial V_{SO_2}}{\partial Cm} \right| * \Delta Cm + \left| \frac{\partial V_{SO_2}}{\partial A_{exp}} \right| * \Delta A_{exp} + \left| \frac{\partial V_{SO_2}}{\partial Vm} \right| * \Delta Vm$$

$$\Delta V_{SO_2} = \left| \frac{10 * Vm * PM_{SO_2}}{A_{exp} * t_{exp} * PM_{SO_4}} \right| * \Delta Cm + \left| \frac{-10 * Cm * Vm * PM_{SO_2}}{A^2_{exp} * PM_{SO_4} * t} \right| * \Delta A_{exp} + \left| \frac{10 * PM_{SO_2} * Cm}{A_{exp} * t * PM_{SO_4}} \right| * \Delta Vm$$

$$\Delta V_{SO_2} = \left(\frac{10 * 100mL * 64,065 \frac{g}{gmol}}{120.142cm^2 * 30días * 96,065 \frac{g}{gmol}} \right) * 3 \frac{mg}{L} + \left(\frac{10 * 9.2762315 * 100mL * 64,065 \frac{g}{gmol}}{(120.142)^2 cm^4 * 96,065 \frac{g}{gmol} * 30días} \right) * 1cm^2 + \dots$$

$$\left(\frac{10 * 64,065 \frac{g}{gmol} * 9.2762315}{120.142cm^2 * 30días * 96,065 \frac{g}{gmol}} \right) * 0,05mL$$

Finalmente:

$$\Delta V_{SO_2} = 0.566010914019 \frac{mg}{m^2 * día} \cong 0.6 \frac{mg}{m^2 * dia}$$

$$\Delta V_{SO_2} = (1.7 \pm 0.6) \frac{mg}{m^2 * dia}$$

A.2. Determinación de la salinidad de la atmósfera

A.2.1. Cálculo de la normalidad del NaCl y su error asociado

$$M_1 = \frac{m_1}{PM_1 * Vol_{sol}} \quad M_1 = \frac{1,4614g}{58,4428 \frac{g}{gmol} * 1L} \quad M_1 = 0,025 \frac{gmol}{L}$$

Debido a que el número de electrones compartidos es igual a uno entre ambos iones, podemos afirmar que la molaridad es igual a la normalidad, por consiguiente:

$$N_1 = 0,025 \frac{eq}{L}$$

$$\Delta N_1 = \left| \frac{\partial N_1}{\partial m_1} \right| * \Delta m_1 + \left| \frac{\partial N_1}{\partial Vol} \right| * \Delta Vol_{sol}$$



$$\Delta N_1 = \left| \frac{1}{PM_1 * Vol_{sol}} \right| * \Delta m_1 + \left| \frac{m_1}{PM_1 * Vol_{sol}^2} \right| * \Delta Vol_{sol}$$

$$\Delta N_1 = \left[\left(\frac{1}{58,4428 \frac{g}{eq} * 1000mL} \right) * 0,0001g + \left(\frac{1,4614g}{58,4428 \frac{g}{eq} * (1000mL)^2} \right) * 0,4mL \right] * \frac{1000mL}{1L}$$

$$\Delta N_1 = 0,00001171333 \frac{eq}{L}$$

$$N_1 : (0,02500 \pm 0,00001) \frac{eq}{L}$$

A.2.2. Cálculo de la normalidad del $AgNO_3$ y su error asociado

Utilizando la ecuación (4.5) tenemos:

$$V_1 * N_1 = V_2 * N_2$$

Despejando N_2 nos quedaría:

$$N_2 = \frac{V_1 * N_1}{V_2} \quad N_2 = \frac{25mL * 0,02500 \frac{eq}{L}}{25,21mL} \quad N_2 = 0,0247917 \frac{eq}{L}$$

$$\Delta N_2 = \left| \frac{\partial N_2}{\partial V_1} \right| * \Delta V_1 + \left| \frac{\partial N_2}{\partial N_1} \right| * \Delta N_1 + \left| \frac{\partial N_2}{\partial V_2} \right| * \Delta V_2$$

$$\Delta N_2 = \left| \frac{N_1}{V_2} \right| * \Delta V_1 + \left| \frac{V_1}{V_2} \right| * \Delta N_1 + \left| \frac{-V_1 * N_1}{V_2^2} \right| * \Delta V_2$$



$$\Delta N_2 = \left(\frac{0,02500 \frac{eq}{L}}{25,200mL} \right) * 0,03mL + \left(\frac{25mL}{25,200mL} \right) * 0,00001 \frac{eq}{L} + \left(\frac{25mL * 0,02500 \frac{eq}{L}}{(25,200mL)^2} \right) * 0,03mL$$

$$\Delta N_2 = 0,000069208238 \frac{eq}{L} \cong 0,00007 \frac{eq}{L}$$

Por consiguiente:

$$N_2 : (0,02480 \pm 0,00007) \frac{eq}{L}$$

A.2.3. Cálculo del área de exposición y su error asociado

Tomando en consideración que el área de exposición es cilíndrica se tiene lo siguiente:

$$A_{exp} = 2 * \pi * r * l \quad A_{exp} = 2 * \pi * 1,3cm * 14,2cm \quad A_{exp} = 115,9288cm^2$$

$$\Delta A_{exp} = \left| \frac{\partial A_{exp}}{\partial L} \right| * \Delta L + \left| \frac{\partial A_{exp}}{\partial r} \right| * \Delta r \quad \Delta A_{exp} = |2 * \pi * r| * \Delta L + |2 * \pi * L| * \Delta r$$

$$\Delta A_{exp} = (2 * \pi * 1,3cm) * 0,05cm + (2 * \pi * 14,2cm) * 0,05cm \quad \Delta A_{exp} = 4,869468613cm^2$$

Finalmente:

$$A_{exp} = (116 \pm 5)cm^2$$

A.2.4. Cálculo de la concentración de cloruros y su error asociado

Utilizando la ecuación (4.7) nos queda:

$$C_{Cl^-} = \frac{(0,750 - 0,300)mL * 0,0248 \frac{eq}{L} * 1000 * 70,906 \frac{g}{eq}}{50mL}$$

$$C_{Cl^-} = 15,8262192 \frac{mg}{L}$$

$$\Delta C_{Cl^-} = \left| \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial V_{G1}} \right| * \Delta V_{G1} + \left| \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial V_{G2}} \right| * \Delta V_{G2} + \left| \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial N_2} \right| * \Delta N_2 + \left| \frac{\partial C_{Cl^-}}{\partial V_{1A}} \right| * \Delta V_{1A}$$

$$\Delta C_{Cl^-} = \left| \frac{1000 * PM_{Cl_2} * N_2}{V_{1A}} \right| * \Delta V_{G1} + \left| \frac{-1000 * PM_{Cl_2} * N_2}{V_{1A}} \right| * \Delta V_{G2} + \left| \frac{1000 * PM_{Cl_2} * (V_{G1} - V_{G2})}{V_{1A}} \right| * \Delta N_2 + \dots$$

$$\left| \frac{1000 * PM_{Cl_2} * (V_{G1} - V_{G2}) * N_2}{V_{1A}^2} \right| * \Delta V_{1A}$$

$$\Delta C_{Cl^-} = \left(\frac{1000 \frac{mg}{g} * 70,906 \frac{g}{eq} * 0,028 \frac{eq}{L}}{50mL} \right) * 0,03mL + \left(\frac{1000 \frac{mg}{g} * 70,906 \frac{g}{eq} * 0,0248 \frac{eq}{L}}{50mL} \right) * 0,03mL + \dots$$

$$+ \left(\frac{1000 \frac{mg}{g} * 70,906 \frac{g}{eq} * (0,75 - 0,30)mL}{50mL} \right) * 0,0001 \frac{eq}{L} + \dots$$

$$\left(\frac{1000 \frac{mg}{g} * 70,906 \frac{g}{eq} * (0,75 - 0,30)mL * 0,0248 \frac{eq}{L}}{(50mL)^2} \right) * 0,05mL$$

$$\Delta C_{CL^-} = 2.16484496 \frac{mg}{L} \approx 2 \frac{mg}{L}$$

A.2.5 Cálculo de la Velocidad de Deposición de Cloruros y su error asociado.

Tomando la ecuación (4.6) se tiene que:

$$V_{Cl^-} = \frac{C_{Cl^-} * Vd * 10000}{Ae * t \exp} \quad V_{Cl^-} = \frac{15.826 \frac{mg}{L} * 1L * 10000 \frac{cm^2}{cm^3}}{116cm^2 * 30días}$$

$$V_{Cl^-} = 45.488505747 \frac{mg}{m^2 * d}$$

$$\Delta V_{Cl^-} = \left| \frac{\partial V_{Cl^-}}{\partial C_{Cl^-}} \right| * \Delta C_{Cl^-} + \left| \frac{\partial V_{Cl^-}}{\partial Vd} \right| * \Delta Vd + \left| \frac{\partial V_{Cl^-}}{\partial Aexp} \right| * \Delta Aexp$$

$$\Delta V_{Cl^-} = \left| \frac{10000 * Vd}{Aexp * t \exp} \right| * \Delta C_{Cl^-} + \left| \frac{10000 * C_{Cl^-}}{Aexp * t \exp} \right| * \Delta Vd + \left| \frac{-10000 * C_{Cl^-} * Vd}{Aexp^2 * t \exp} \right| * \Delta Aexp$$

$$\Delta V_{Cl^-} = \left(\frac{10000 \frac{cm^2}{m^2} * 1L}{116cm^2 * 30días} \right) * 2 \frac{mg}{L} + \left(\frac{10000 \frac{cm^2}{m^2} * 16 \frac{mg}{L}}{116cm^2 * 30días} \right) * 0.4 \frac{mL}{L} + \left(\frac{10000 \frac{cm^2}{m^2} * 16 \frac{mg}{L} * 1L}{(116cm^2)^2 * 30días} \right) * 5cm^2$$

Finalmente:

$$\Delta V_{Cl^-} = 7.91279 \frac{mg}{m^2 * dia} \cong 8 \frac{mg}{m^2 * dia}$$

$$V_{Cl^-} = (46 \pm 8) \frac{mg}{m^2 * dia}$$

A.3. Determinación de polvos atmosféricos.

A.3.1. Cálculo del área de la sección transversal del colector y su error asociado.

De la ecuación (4.7) se obtiene que:

$$Ac = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$Ac = \frac{\pi * (16cm)^2}{4} = 200.96cm^2$$

$$\Delta A = \left| \frac{\partial Ac}{\partial D} \right| * \Delta D$$

$$\Delta Ac = \left| \frac{\pi * D}{2} \right| * \Delta D$$



$$\Delta A_c = \left(\frac{\pi * 16cm}{2} \right) * 0.05cm = 1.25663706cm^2$$

Entonces: $A_c = (201 \pm 1)cm^2$

A.3.2. Cálculo del contenido de los sólidos insolubles y su error asociado.

Usando la ecuación (4.8) se tiene que:

$$SI = m_{fll} - m_{fv}$$

$$SI = (0.7208 - 0.6705) \text{ g} \quad \boxed{SI = 0.0315 \text{ g}}$$

$$\Delta SI = \left| \frac{\partial SI}{\partial m_{fll}} \right| * \Delta m_{fll} + \left| \frac{\partial SI}{\partial m_{fv}} \right| * \Delta m_{fv} \quad \Delta SI = \Delta m_{fll} + \Delta m_{fv}$$

$$\Delta SI = 0.0001 + 0.0001 \quad \boxed{\Delta SI = 0.0002g} \quad \boxed{SI = (0.0315 \pm 0.0002)g}$$

A.3.3 Cálculo del contenido de sólidos solubles y su error asociado.

De la ecuación (4.9) se obtiene:

$$SS = \frac{(m_{cll} - m_{cv}) * Vf}{Ali}$$

$$SS = \frac{(51.6268 - 51.6218) * 5900}{50} \quad \boxed{SS = 0.59 \text{ g}}$$

$$\Delta SS = \left| \frac{\partial SS}{\partial m_{cll}} \right| * \Delta m_{cll} + \left| \frac{\partial SS}{\partial m_{cv}} \right| * \Delta m_{cv} + \left| \frac{\partial SS}{\partial Vf} \right| * \Delta Vf + \left| \frac{\partial SS}{\partial Ali} \right| * \Delta Ali$$

$$\Delta SS = \left| \frac{Vf}{Ali} \right| * \Delta m_{cll} + \left| \frac{-Vf}{Ali} \right| * \Delta m_{cv} + \left| \frac{m_{cll} - m_{cv}}{Ali} \right| * \Delta Vf + \left| \frac{(m_{cll} - m_{cv}) * Vf}{Ali^2} \right| * \Delta Ali$$

$$\Delta SS = \left(\frac{5900ml}{50ml} \right) * 0.0001g + \left(\frac{5900ml}{50ml} \right) * 0.0001g + \left(\frac{51.6268g - 51.6218g}{50} \right) * 5ml + \left(\frac{(51.6268 - 51.6218) * 5900}{(50ml)^2} \right) * 1ml$$

$$\Delta SS = 0.0359 \cong 0.04g$$

Entonces: $\boxed{SS = (0.59 \pm 0.04)g}$

A.3.4. Cálculo de la velocidad de deposición de polvos atmosféricos y su error asociado

De la ecuación (4.10) se obtiene:

$$V_D = \frac{(SI + SS)}{(A_{exp} * t_{exp})} * 10000$$

$$V_D = \frac{(0.006 + 0.590)g}{201cm^2 * 30días} * 10000$$

$$\boxed{V_D = 0.98839137645 \frac{g}{m^2 * días}}$$

$$\Delta V_D = \left| \frac{\partial V_D}{\partial SI} \right| * \Delta SI + \left| \frac{\partial V_D}{\partial SS} \right| * \Delta SS + \left| \frac{\partial V_D}{\partial A_{exp}} \right| * \Delta A_{exp}$$

$$\Delta V_D = \left| \frac{10000}{A_{exp} * t_{exp}} \right| * \Delta SI + \left| \frac{10000}{A_{exp} * t_{exp}} \right| * \Delta SS + \left| \frac{-(SI + SS) * 10000}{A_{exp}^2 * t_{exp}} \right| * \Delta A_{exp}$$

$$\Delta V_D = \left(\frac{10000 \frac{cm^2}{m^2}}{201cm^2 * 30días} \right) * 0.0002g + \left(\frac{10000 \frac{cm^2}{m^2}}{201cm^2 * 30días} \right) * 0.04g +$$

$$+ \left(\frac{10000 \frac{cm^2}{m^2} * (0.006 + 0.590)g}{(201cm^2)^2 * 30días} \right) * 1cm^2$$



$$\Delta V_D = 0.07158 \cong 0.07 \frac{g}{m^2 * dias}$$

Finalmente: $V_D = (0.99 \pm 0.07) \frac{g}{m^2 * dias}$

APÉNDICE C. CORROSIÓN POR CELDAS DE AIREACIÓN DIFERENCIAL.

Uno de las formas de corrosión más comunes pero a la que no se hace mucha mención es la corrosión por aireación diferencial, ya que se ve muy a menudo en ambientes donde hay metales a la intemperie y/o en atmósferas húmedas.

El mecanismo de la corrosión por aireación diferencial es simple:

La diferencia de potencial electroquímico se produce entre dos piezas del mismo metal, cuando una de ellas se encuentra permanentemente húmeda y la otra permanentemente seca. La zona húmeda se establece como ánodo y la seca como cátodo, produciéndose una corriente de electrones desde la parte húmeda a la seca y produciendo la corrosión de la primera.

Según el caso que nos ocupa, la humedad del ambiente y las precipitaciones con cierta concentración de cloruros hacen un electrolito equivalente al agua salada. En la figura C.1 se ve el efecto producido por una gota de agua salada. Esta experiencia es debida a Evans, uno de los investigadores que más han contribuido al conocimiento de la corrosión.

Evans demostró que en el caso de una gota de agua salada, las diferencias en la cantidad de oxígeno disuelto en el líquido en contacto con la superficie metálica, crean pilas de corrosión en las que el ataque del metal ocurre en las áreas menos oxigenadas, provocando una corrosión rápida e intensa. Si se deposita una gota de agua salada (agua y cloruro de sodio) sobre la superficie horizontal de una lámina de acero perfectamente limpia y desgrasada, como en la Figura C.1, se puede observar, por ejemplo después de unos 30 minutos, un precipitado en el medio de la gota.

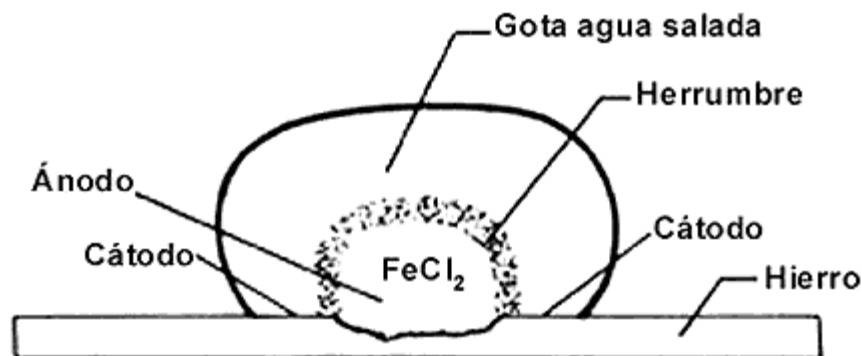
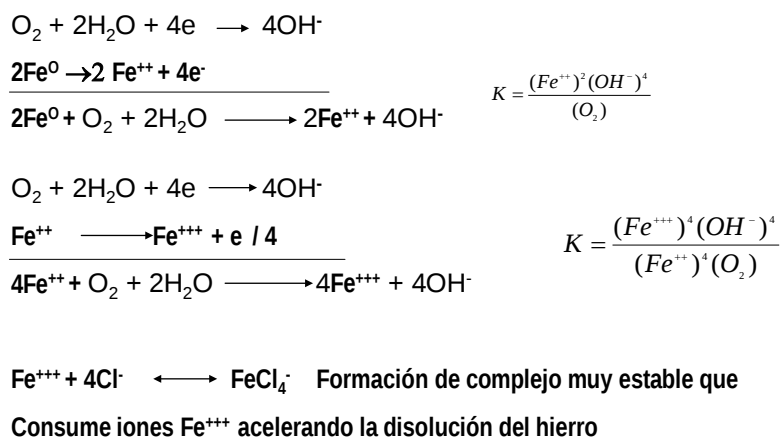


Figura C.1 Ataque producido por una gota de agua salada.

La parte periférica o más exterior de la gota, más aireada (con un más fácil acceso para el oxígeno) que el centro, juega el papel de lo que hemos llamado cátodo, con relación al centro, que a su vez se convierte en ánodo. Entre estas dos zonas se forma una membrana de hidróxido de hierro (herrumbre). (<http://omega.ilce.edu.mx>).

Este proceso de corrosión se puede representar químicamente como sigue:



Fuente: (www.ing.ulp.edu.ar).

Otro ejemplo de la corrosión por aireación diferencial es la producida por polvo o suciedad en la superficie del metal por lo que provoca también una obstaculización de la circulación del oxígeno y por lo tanto la formación de un ánodo y un cátodo de forma semejante a la anteriormente descrita. **(Figura C.2).**

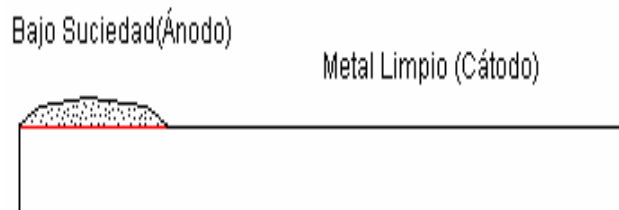


Figura C.2. Corrosión de un metal por aireación diferencial debido a la acumulación de polvo o suciedad (www.ing.ulp.edu.ar).

APÉNDICE D. ANEXOS

TABLA D.1
POTENCIALES ESTÁNDAR OXIDACIÓN REDUCCIÓN PARA
REACCIONES DE CORROSIÓN

	Reacción de corrosión		Potencial voltios vs. electrodo normal de hidrógeno
Más catódico ↑	Au	→ $\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1.498
	$2\text{H}_2\text{O}$	→ $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	+1.229
	Pt	→ $\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+1.200
	Pd	→ $\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0.987
	Ag	→ $\text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0.799
	2Hg	→ $\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^-$	+0.788
	Fe^{2+}	→ $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$	+0.771
	$4(\text{OH})^-$	→ $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	+0.401
	Cu	→ $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0.337
	Sn^{2+}	→ $\text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^-$	+0.150
	H_2	→ $2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0.000
↓ Más anódico	Pb	→ $\text{Pb}_{2+} + 2\text{e}^-$	-0.126
	Sn	→ $\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.136
	Ni	→ $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.250
	Co	→ $\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.277
	Cd	→ $\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.403
	Fe	→ $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.440
	Cr	→ $\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0.744
	Zn	→ $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0.763
	Al	→ $\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1.662
	Mg	→ $\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2.363
	Na	→ $\text{Na}^+ + \text{e}^-$	-2.714
	K	→ $\text{K}^+ + \text{e}^-$	-2.925

TABLA D.2
ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO TOTALES PRACTICADOS A
LOS POLVOS ATMOSFÉRICOS SOLUBLES

PARÁMETROS	UNIDADES	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MÉTODO(1)
Aluminio total	mg/ml	0,27	0,26	3111 D
Bario total	mg/ml	<0,01	<0,01	3111 D
Sulfatos	mg/ml	60	24	4110 C
Sulfuros	mg/ml	0,03	0,02	4500 S ⁻² D
Cobre total	mg/ml	24,9	0,22	3111 B
Fluoruros	mg/ml	0,25	0,26	4110 C
Fosfato	mg/ml	0,03	0,03	4500 PO ₄
Calcio	mg/ml	5,68	1,07	3111 B
Magnesio	mg/ml	0,78	0,27	3500 Mg E
Sodio	mg/ml	1,19	0,51	3111 B
Hierro total	mg/ml	0,13	0,03	3111 B
Cloruros	mg/ml	8	2	4500 Cl
Potasio	mg/ml	1,22	0,46	3111 B
Nitratos	mg/ml	4	0,43	4500 NO ₃
Amonio	mg/ml	2	<0,1	4500 N
Sulfitos	mg/ml	<0,10	<0,1	4500 SO ₃ ⁻² B
Manganeso total	mg/ml	0,01	<0,01	3111 B
Zinc total	mg/ml	0,93	0,11	3111 B

Fuente: Hidrolab Toro Consultores, C.A

(1) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th. Edición de 2005.

Muestra 1: bajada el 23/04/2007

Muestra 2: bajada el 27/06/2007

TABLA D.3
PARÁMETROS METEOROLÓGICOS EVALUADOS EN LA ESTACIÓN DE
MONITOREO DURANTE SEIS MESES (2005-2006)

Período	Fechas de Inicio y Reemplazo	Parámetros meteorológicos		
		Temperatura T (°C)	Humedad relativa HR%	Precipitación P (mm)
1	17 Ago- 21 Sep	25.8	77.9	149.2
2	21 Sep- 19 Oct	25.7	77.6	78.0
3	19 Oct- 25 Nov	26.0	76.8	129.7
4	25 Nov-23 Dic	26.1	71.6	0.0
5	23 Dic-24 Ene	26.5	70.6	0.0
6	24 Ene- 24 Feb	25.6	73.2	0.0

Fuente (12)

TABLA D.4
DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE HUMECTACIÓN PARA EL
PERÍODO DE MONITOREO

Período	Fechas de Inicio y Reemplazo	Horas totales de exposición	Horas a HR≥80%	Tiempo de humectación τ (h/a)
1	17 Ago- 21 Sep	840	462	3669.11
2	21 Sep- 19 Oct	672	374	
3	19 Oct- 25 Nov	888	434	
4	25 Nov-23 Dic	672	175	
5	23 Dic-24 Ene	768	208	
6	24 Ene- 24 Feb	744	267	

Fuente (12)

TABLA D.5
VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE A DOS
ALTURAS PARA CADA PERIODO DE MONITOREO

Periodo	Fechas de Inicio y Reemplazo	Velocidad de deposición ($V_{SO_2} \pm 0.2$)mg/m ² *d	
		Nivel	
		I (1m)	II (18m)
1	17 Ago- 21 Sep	3.9	2.9
2	21 Sep- 19 Oct	3.85	2.5
3	19 Oct- 25 Nov	4.74	4.4
4	25 Nov-23 Dic	6.1	5.8
5	23 Dic-24 Ene	4.6	4.3
6	24 Ene- 24 Feb	6.6	5.9
Promedio		4.9	4.3

Fuente (12)

TABLA D.6
VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DE CLORUROS A DOS ALTURAS
PARA CADA PERIODO DE MONITOREO

Periodo	Fechas de Inicio y Reemplazo	Velocidad de deposición ($V_{Cl} \pm 3$)mg/m ² *d	
		Nivel	
		I (1m)	II (18m)
1	17 Ago-21 Sep	15	11
2	21 Sep- 19 Oct	16	11
3	19 Oct- 25 Nov	8	8
4	25 Nov-23 Dic	8	13
5	23 Dic-24 Ene	7	9
6	24 Ene- 24 Feb	10	7
Promedio		11	10

TABLA D.7
VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN DE POLVOS ATMOSFÉRICOS A
DOS ALTURAS PARA CADA PERIODO DE MONITOREO

Periodo	Fechas de Inicio y Reemplazo	Velocidad de deposición (VD± 0.01) g/m ² *d	
		Nivel	
		I (1m)	II (18m)
1	17 Ago- 21 Sep	0.64	0.24
2	21 Sep- 19 Oct	0.11	0.13
3	19 Oct- 25 Nov	0.17	0.17
4	25 Nov-23 Dic	0.12	0.20
5	23 Dic-24 Ene	0.30	0.32
6	24 Ene- 24 Feb	0.73	0.73
Promedio		0.34	0.30

Fuente (12)

Tabla D.8
Variables meteorológicas promedio necesarias para la
caracterización de la corrosividad de la atmósfera

Período	Temp (°C)	Hr (%)	Precipitación (mm)	Vel. Viento (Km/h)
May-06	27,4	73	117,50	6
Jun-06	25,3	81	249,50	5
Jul-06	24,4	82	142,00	5
Ago-06	24,9	85	247,70	4
Sep-06	25,2	85	87,30	5
Oct-06	25,2	87	142,40	5
Nov-06	25,4	86	116,40	5
Dic-06	26,0	82	1,50	6
Ene-07	26,0	80	21,30	8
Feb-07	26,5	70	0,00	10
Mar-07	26,9	63	67,90	10
Abr-07	27,4	66	94,70	8
May-07	27,2	72	116,10	7
Jun-07	26,0	76	116,60	6
Jul-07	25,9	77	96,00	5
Promedio	26,0	78	1616,90	6,3





APÉNDICE E. NORMAS ISO 9223,9225, ASTM D-512 Y D-516