

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA**

### **DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORROSIÓN METÁLICA EN LAS ZONAS DE MAYOR CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE QUITO**

#### **PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA**

**GABRIELA ELENA VIZUETE FIALLOS**

[gabichu159@yahoo.com](mailto:gabichu159@yahoo.com)

**DIRECTOR: DR. LUIS RODRIGO LASCANO LASCANO**

[luis.lascano@epn.edu.ec](mailto:luis.lascano@epn.edu.ec)

**Quito, DM, enero de 2012**

© Escuela Politécnica Nacional 2012  
Reservados todos los derechos de reproducción

## DECLARACIÓN

Yo, Gabriela Elena Vizúete Fiallos, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Gabriela Elena Vizúete Fiallos

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Gabriela Elena Vizuite Fiallos, bajo mi supervisión.

---

Dr. Luis Rodrigo Lascano Lascano  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero de la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (CORPAIRE) y del Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros (CIAP), en donde se ejecutó el proyecto.

## DEDICATORIA

A mis padres Gonzalo y Martha por su gran amor, comprensión y apoyo, por ser mi guía y mi ejemplo, por estar a mi lado en las buenas y en las malas, por sus palabras de apoyo y cariño.

A mi hermano Gonza por su forma tan linda de ser, por estar siempre a mi lado, por su gran cariño hacia mí, y por ser una de las personas que más admiro.

A mis abuelitos Gonzalo y Esmeralda por ser mis segundos padres, por su ayuda y apoyo incondicional, por su preocupación y amor, y por darme hermosos recuerdos de mi niñez.

A Santy por todo su amor, paciencia y apoyo, por su sonrisa, bondad y ternura que han cambiado mi vida, por su inmensa alegría contagiante y por ser una de las personas más importantes en mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser la luz de mi vida, por darme la paciencia y la fuerza para recorrer este arduo camino y por todas sus bendiciones a lo largo de mi vida.

A mi familia y a Santy por su apoyo incondicional e inmenso amor.

Al Dr. Francisco Cadena por guiar este proyecto y al CIAP por permitirme ocupar sus instalaciones y por el apoyo brindado.

Al Dr. Luis Lascano por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A la Ing. Valeria Díaz por permitirme ejecutar este proyecto con el auspicio de CORPAIRE y por su valiosa ayuda en el desarrollo del mismo.

Al Departamento de Textiles por su colaboración y apoyo.

Al Ing. Ernesto De La Torre y al Departamento de Metalurgia Extractiva por su ayuda y colaboración en el presente proyecto.

A Richard por su ayuda y colaboración en el trabajo realizado, además de su amistad sincera.

A mis viejas amigas Mayrita, Pauly y Criss por estar conmigo a lo largo de esta aventura, por su amistad y por los momentos vividos.

A mis nuevos amigos Lois, Andre, Joha y Mayrita por brindarme su amistad y apoyo.

A Sole por su preocupación, su ayuda desinteresada y su amistad sincera.

A mis tías Charito, Yopo, Moni y Do por ser simplemente cómo son, unas personas maravillosas y por todo su cariño hacia mí.

A mis primos, primas y tíos por estar a mi lado y por su gran cariño.

A todas aquellas personas que han estado en mi vida y me han ayudado a ser una mejor persona cada día.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XVIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XXI</b>
<b>1. PARTE TEÓRICA</b>	<b>1</b>
1.1 Corrosión	1
1.1.1 Tipos de corrosión	1
1.1.1.1 Clasificación según la naturaleza del medio corrosivo	1
1.1.1.2 Clasificación según el mecanismo de ataque corrosivo	2
1.1.1.3 Clasificación por efectos combinados	3
1.1.2 Corrosión de metales	4
1.1.2.1 Corrosión del acero	6
1.1.2.2 Corrosión del cinc	9
1.1.2.3 Corrosión del aluminio	11
1.1.2.4 Corrosión del cobre	12
1.2 Corrosión atmosférica	14
1.2.1 Factores que afectan los procesos de corrosión atmosférica	14
1.2.1.1 Factores meteorológicos	15
1.2.1.2 Factores de contaminación	16
1.2.2 Clasificación de la atmósfera según su agresividad	19
1.2.2.1 De acuerdo con los contaminantes	19
1.2.2.2 De acuerdo a la norma ISO 9223	20
1.3 Métodos para determinar la corrosión atmosférica	21
1.3.1 Método gravimétrico	22
1.3.2 Método macroscópico	23
1.3.3 Método por microscopía óptica	23
1.3.4 Método por microscopía electrónica - EDS	23
1.3.5 Método por difracción de rayos X	24
1.3.6 Ley bilogarítmica	24
1.4 Métodos de protección anticorrosiva	25
1.4.1 Clasificación de los métodos de protección anticorrosiva	25
1.4.1.1 Protección con sustancias inhibidoras	26
1.4.1.2 Protección catódica	26
1.4.1.3 Protección anódica	26
1.4.1.4 Protección con recubrimientos metálicos	27
1.4.1.5 Protección con recubrimientos de conversión	27
1.4.1.6 Protección con recubrimientos no metálicos inorgánicos	28

1.4.1.7	Protección con recubrimientos no metálicos orgánicos	28
1.4.2	Pinturas	30
1.4.2.1	Durabilidad de las pinturas	31
<b>2.</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b>	<b>34</b>
2.1	Consideraciones previas	34
2.2	Objetivos	34
2.2.1	Objetivo general	34
2.2.2	Objetivos específicos	35
2.3	Materiales	35
2.3.1	Estructuras portaprobetas	35
2.3.2	Probetas metálicas	36
2.3.3	Recubrimientos anticorrosivos	37
2.3.3.1	Recubrimiento de cinc	37
2.3.3.2	Recubrimientos con pinturas	38
2.3.3.3	Preparación de las placas y aplicación de las pinturas	39
2.4	Montaje y ubicación de estructuras y probetas	40
2.4.1	Montaje de estructuras y probetas	40
2.4.2	Selección de las estaciones de ensayo para la ubicación de estructuras y probetas	41
2.5	Cuantificación del grado de corrosión	44
2.6	Caracterización de los productos de corrosión	45
2.6.1	Evaluación de los productos de corrosión mediante microscopía electrónica por EDS	46
2.6.2	Evaluación de los productos de corrosión mediante difracción de rayos X	46
2.7	Determinación de los factores meteorológicos y de contaminación	47
2.7.1	Factores meteorológicos	47
2.7.2	Factores de contaminación atmosférica	47
2.8	Evaluación del método de protección anticorrosiva	48
2.8.1	Norma ASTM D 610 “Evaluación del grado de corrosión en superficies de acero pintadas”	49
2.8.2	Norma ASTM D 660 “Evaluación del grado de cuarteamiento en pinturas expuestas al exterior”	49
2.8.3	Norma ASTM D 661 “Evaluación del grado de agrietamiento en pinturas expuestas al exterior”	50

2.8.4	Norma ASTM D 714 “Evaluación del grado de ampollamiento en pinturas expuestas al exterior”	50
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>52</b>
3.1	Factores meteorológicos	52
3.1.1	Precipitaciones	53
3.1.2	Temperatura	55
3.1.3	Humedad relativa	56
3.1.4	Tiempo de humectación	57
3.2	Factores de contaminación	58
3.2.1	Dióxido de azufre	59
3.2.2	Dióxido de nitrógeno	60
3.2.3	Ozono	61
3.2.4	Material particulado	62
3.3	Corrosión metálica	63
3.3.1	Análisis mensual	64
3.3.1.1	Estación Carcelén	64
3.3.1.2	Estación Kennedy	71
3.3.1.3	Estación Cruz Loma	79
3.3.1.4	Estación Mariscal	86
3.3.1.5	Estación Necochea	93
3.3.1.6	Estación La Marín	100
3.3.1.7	Estación Quitumbe	107
3.3.2	Análisis después del año de exposición	114
3.3.2.1	Corrosión del acero al carbono	114
3.3.2.2	Corrosión del aluminio	122
3.3.2.3	Corrosión del cobre	127
3.3.2.4	Corrosión del acero galvanizado	131
3.4	Análisis comparativo con valores de corrosión de estudios anteriores	137
3.4.1	Comparación del acero al carbono	138
3.4.2	Comparación del acero galvanizado	139
3.4.3	Comparación del cobre y del aluminio	140
3.5	Corrosión de placas con recubrimientos	141
3.5.1	Placas de acero al carbono con recubrimiento	141
3.5.2	Placas de acero galvanizado con recubrimiento	143
3.5.3	Placas de aluminio con recubrimiento	146
3.5.4	Placas de cobre con recubrimiento	148

<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>151</b>
4.1	Conclusiones	151
4.2	Recomendaciones	154
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>155</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>162</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>PÁGINA</b>
<b>Tabla 1.</b>	Potenciales estándar de óxido – reducción para reacciones de corrosión a 25°C	6
<b>Tabla 2.</b>	Categorías de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223, 1992	20
<b>Tabla 3.</b>	Categorías de agresividad atmosférica a partir de datos de velocidad de corrosión del primer año de exposición, según la norma ISO 9223	21
<b>Tabla 4.</b>	Composición de pintura Antiox Aonvertidor 901 M de “Pinturas Cóndor”	38
<b>Tabla 5.</b>	Escala y descripción del grado de corrosión según la norma ASTM D 610	49
<b>Tabla 6.</b>	Escala y especificación del cuarteamiento y agrietamiento de una pintura, según las normas ASTM D 660 y D 661	50
<b>Tabla 7.</b>	Frecuencia de ampollaje en pinturas según la norma ASTM D 714	51
<b>Tabla 8.</b>	Estaciones de monitorización atmosférica empleadas para las estaciones de ensayo	52
<b>Tabla 9.</b>	Resumen de datos meteorológicos para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	53
<b>Tabla 10.</b>	Promedio de las concentraciones de los contaminantes presentes en cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	58
<b>Tabla 11.</b>	Valores de corrosión de acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Carcelén” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	68
<b>Tabla 12.</b>	Valores de corrosión de acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Kennedy” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	74
<b>Tabla 13.</b>	Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Cruz Loma” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	82

<b>Tabla 14.</b> Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Mariscal” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	89
<b>Tabla 15.</b> Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Necochea” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	97
<b>Tabla 16.</b> Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “La Marín” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	104
<b>Tabla 17.</b> Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Quitumbe” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	110
<b>Tabla 18.</b> Valores de penetración de la corrosión atmosférica calculados para las placas de acero al carbono expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223.	116
<b>Tabla 19.</b> Porcentajes de elementos obtenidos mediante análisis químico con microscopía electrónica de barrido - EDS para cada una de las estaciones de ensayo	118
<b>Tabla 20.</b> Valores de corrosión atmosférica calculados para las placas de aluminio expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223	124
<b>Tabla 21.</b> Valores de penetración de la corrosión atmosférica calculados para las placas de cobre expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223	129
<b>Tabla 22.</b> Valores de penetración de la corrosión atmosférica calculados para las placas de acero galvanizado expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223	133
<b>Tabla 23.</b> Datos de corrosión anual del acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio correspondientes a estudios anteriores	137

<b>Tabla 24.</b> Datos de corrosión anual del acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio correspondientes al presente proyecto	138
<b>Tabla 25.</b> Análisis visual según las normas ASTM D 610, D 660, D 661 y D 714, de las placas de acero al carbono recubiertas con pintura “Antiox 901 M”	142
<b>Tabla 26.</b> Determinación de la cantidad de cinc depositado en las placas de acero galvanizado	144
<b>Tabla 27.</b> Análisis visual según las normas ASTM D 660, D 661 y D 714, de las placas de acero galvanizado recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”	145
<b>Tabla 28.</b> Análisis visual según las normas ASTM D 660, D 661 y D 714, de las placas de aluminio recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”	147
<b>Tabla 29.</b> Análisis visual según las normas ASTM D 660, D 661 y D 714, de las placas de cobre recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”	149

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>PÁGINA</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-H <sub>2</sub> O a 25°C	8
<b>Figura 2.</b> Diagrama de Pourbaix para el sistema Zn-CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O a 25°C	10
<b>Figura 3.</b> Diagrama de Pourbaix para el sistema Al-H <sub>2</sub> O a 25°C	11
<b>Figura 4.</b> Diagrama de Pourbaix para el sistema Cu-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> – H <sub>2</sub> O a 25°C	13
<b>Figura 5.</b> Dimensiones del pupitre portaprobetas (en mm)	36
<b>Figura 6.</b> Placas rectangulares de 40x100 mm de acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono	37
<b>Figura 7.</b> Placas rectangulares de 40x100 mm de acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio con recubrimientos de pintura	39
<b>Figura 8.</b> Distribución de las probetas metálicas en el portaprobetas de la estación “Mariscal”	40
<b>Figura 9.</b> Ubicación general de las estaciones de ensayo en la ciudad de Quito (a: Cruz Loma, b: Carcelén, c: Kennedy, d: Mariscal, e: La Marín, f: Necochea y g: Quitumbe)	42
<b>Figura 10.</b> Sensor de monitorización pasiva, estación Quitumbe	48
<b>Figura 11.</b> Precipitación mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	54
<b>Figura 12.</b> Temperatura mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	55
<b>Figura 13.</b> % humedad relativa mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	56
<b>Figura 14.</b> Tiempo de humectación mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	57
<b>Figura 15.</b> Concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	59

<b>Figura 16.</b> Concentración de dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	60
<b>Figura 17.</b> Concentración de ozono (O <sub>3</sub> ) mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	62
<b>Figura 18.</b> Concentración de material particulado (PM <sub>10</sub> ) promedio para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010	63
<b>Figura 19.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Carcelén, correspondiente al mes de julio del 2010	65
<b>Figura 20.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Carcelén, correspondiente al mes de julio del 2010	65
<b>Figura 21.</b> Resultados mensuales de la estación “Carcelén”	70
<b>Figura 22.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Kennedy, correspondiente al mes de julio del 2010	71
<b>Figura 23.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Kennedy, correspondiente al mes de julio del 2010	72
<b>Figura 24.</b> Resultados mensuales de la estación “Kennedy”	78
<b>Figura 25.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Cruz Loma, correspondiente al mes de agosto del 2010	79
<b>Figura 26.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Cruz Loma, correspondiente al mes de agosto del 2010	80
<b>Figura 27.</b> Resultados mensuales de la estación “Cruz Loma”	85

<b>Figura 28.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Mariscal, correspondiente al mes de agosto del 2010	86
<b>Figura 29.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Mariscal, correspondiente al mes de agosto del 2010	87
<b>Figura 30.</b> Resultados mensuales de la estación “Mariscal”	92
<b>Figura 31.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Necochea, correspondiente al mes de mayo del 2010	93
<b>Figura 32.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Necochea, correspondiente al mes de mayo del 2010	94
<b>Figura 33.</b> Resultados mensuales de la estación “Necochea”	99
<b>Figura 34.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación La Marín, correspondiente al mes de septiembre del 2010	100
<b>Figura 35.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación La Marín, correspondiente al mes de septiembre del 2010	101
<b>Figura 36.</b> Resultados mensuales de la estación “La Marín”	106
<b>Figura 37.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Quitumbe, correspondiente al mes de agosto del 2010	107
<b>Figura 38.</b> Apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Quitumbe, correspondiente al mes de agosto del 2010	108
<b>Figura 39.</b> Resultados mensuales de la estación “Quitumbe”	113
<b>Figura 40.</b> Cara anterior y cara posterior de la placa de acero al carbono correspondiente al año de exposición para la estación Quitumbe	115

<b>Figura 41.</b> Cara posterior de la placa de acero al carbono de la estación Quitumbe después de la limpieza química, correspondiente al año de exposición	116
<b>Figura 42.</b> Espectro de análisis meb-eds de la muestra de herrumbre obtenida de la placa de acero al carbono expuesta durante un año en la estación Carcelén	118
<b>Figura 43.</b> Difractograma de los óxidos de hierro de la estación “Mariscal”	120
<b>Figura 44.</b> Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del acero al carbono en la estación Carcelén	121
<b>Figura 45.</b> Cara anterior y cara posterior de la placa de aluminio correspondiente al año de exposición para la estación Quitumbe	123
<b>Figura 46.</b> Observación en microscopio óptico de la placa de aluminio de la estación Quitumbe después de la limpieza química, correspondiente al año de exposición. a) Cara anterior; b) Cara posterior	123
<b>Figura 47.</b> Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del aluminio en la estación Carcelén	126
<b>Figura 48.</b> Cara anterior y cara posterior de la placa de cobre correspondiente al año de exposición para la estación Necochea	127
<b>Figura 49.</b> Observación en microscopio óptico de la placa de cobre de la estación Necochea, después de la limpieza química, correspondiente al año de exposición. a) Cara anterior; b) Cara posterior	128
<b>Figura 50.</b> Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del cobre en la estación Carcelén	130
<b>Figura 51.</b> Cara anterior y cara posterior de la placa de acero galvanizado correspondiente al año de exposición para la estación Necochea	131
<b>Figura 52.</b> Observación en microscopio óptico de la placa de acero galvanizado de la estación Necochea después de la limpieza química, correspondiente al año de exposición.	132
<b>Figura 53.</b> Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del acero galvanizado en la estación Carcelén	134
<b>Figura 54.</b> Resultados un año de exposición	136

- Figura 55.** Cara anterior de las placas de acero al carbono con recubrimiento de pintura “Antiox 901 M”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe y La Marín 142
- Figura 56.** Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero galvanizado con recubrimiento de pintura primaria “Vari-Primer 615 SM”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe, Necochea y Cruz Loma 146
- Figura 57.** Cara anterior de las placas de aluminio con recubrimiento de pintura primaria “Vari-Primer 615 SM”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe y La Marín 148
- Figura 58.** Cara anterior de las placas de cobre con recubrimiento de pintura primaria “Vari-Primer 615 SM”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe y Necochea 149

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>PÁGINA</b>
<b>ANEXO I</b>	
Ubicación geográfica de las estaciones de ensayo en la ciudad de Quito	163
<b>ANEXO II</b>	
Datos meteorológicos por estación	166
<b>ANEXO III</b>	
Datos de concentración de contaminantes por estación	169
<b>ANEXO IV</b>	
Datos experimentales para cada metal y en cada estación de ensayo	173
<b>ANEXO V</b>	
Datos Promedios de corrosión de cada metal	174
<b>ANEXO VI</b>	
Espectros del análisis MEB-EDS	175
<b>ANEXO VII</b>	
Análisis por difracción de rayos X	178
<b>ANEXO VIII</b>	
Resultados visuales de los proyectos “Determinación de la corrosión atmosférica en la ciudad de Quito, parte I y parte II” para las placas con recubrimientos	180
<b>ANEXO IX</b>	
Ecuaciones de la cinética de corrosión	181
<b>ANEXO X</b>	
Norma ASTM G1 “Standard practice for preparing, cleaning and evaluating corrosion test specimens”	183
<b>ANEXO XI</b>	
Norma ASTM D 610 “Standard practice for evaluating degree of rusting on painted steel surfaces”	184
<b>ANEXO XII</b>	
Normas ASTM D 660 “Standard test method for evaluating degree of checking	

of exterior paints” y ASTM D 661 “Standard test method for evaluating degree of cracking of exterior paints” 185

### **ANEXO XIII**

Norma ASTM D 714 “Standard test method for evaluating degree of blistering of paints” 186

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó la acción de los contaminantes atmosféricos  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , material particulado, y de factores ambientales como temperatura, porcentaje de humedad relativa, tiempo de humectación y precipitaciones pluviales, sobre el proceso corrosivo del acero al carbono, acero galvanizado, aluminio y cobre, en siete zonas de la ciudad de Quito durante un año de exposición. Para esto, se utilizaron gravimetría y microscopía óptica, con lo cual se determinó el grado de corrosión para cada metal en cada lugar de ensayo. También se realizó análisis por microscopía electrónica de barrido mediante EDS y difracción de rayos X de los productos de corrosión del acero al carbono con la finalidad de obtener información de los contaminantes atmosféricos depositados en el metal y de los óxidos formados a causa del proceso corrosivo del mismo.

Para complementar el estudio realizado, se aplicaron dos sistemas de pintura: uno para las placas de acero al carbono y el otro para las placas de acero galvanizado, aluminio y cobre, y se evaluó su degradación a los seis meses de exposición mediante el uso de normas ASTM con estándares visuales. Con ello se determinó que el sistema de pintura utilizado para el acero al carbono no presentó fallas de herrumbre, agrietamiento, rompimiento ni ampollamiento en su superficie, lo cual si se observa en el sistema de pintura aplicado sobre las placas de acero galvanizado y cobre en las cuales se observaron pequeñas fallas en la superficie del recubrimiento, las mismas que se encuentran en la cara expuesta al sol, por lo que se determinó que la radiación ultravioleta afecta de manera más influyente sobre el recubrimiento que la humedad del mismo.

El proceso corrosivo depende principalmente de las concentraciones de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , material particulado y del tiempo de humectación, por lo que las estaciones Necochea y Quitumbe presentan la mayor pérdida de material a causa de las altas concentraciones de contaminantes atmosféricos y a la combinación de los mismos.

## INTRODUCCIÓN

La corrosión constituye un tema de gran importancia a nivel mundial, ya que, en términos económicos, aproximadamente el 5% del Producto Interno Bruto (PIB) de un país es utilizado en la prevención y corrección de problemas relacionados con la corrosión metálica (Gómez, 2004).

Se ha estimado que más del 50% de las pérdidas ocasionadas por la corrosión se deben a la acción de la atmósfera sobre los materiales metálicos, esto se debe a que la mayoría de los equipos y estructuras metálicas están expuestas al ambiente. Es por ello, que se ha visto la necesidad de realizar un estudio acerca de la corrosión metálica en la ciudad de Quito, ya que por su ubicación geográfica presenta condiciones climáticas muy particulares, que difieren de un lugar a otro en la misma ciudad; además, se han considerado las zonas de la ciudad con alta contaminación atmosférica, debido a que en ellas se presenta mayor concentración de contaminantes que influyen en el proceso corrosivo (Morcillo *et al.*, 1998).

Cabe mencionar también, que muchos de los problemas ocasionados por la corrosión pueden ser evitados mediante la selección adecuada de los materiales de acuerdo con el ambiente en el que van a ser expuestos, correcta utilización de los métodos de protección, diseño, mantenimiento y almacenamiento apropiado de las piezas y estructuras a utilizar.

Por lo mencionado anteriormente, el presente proyecto realiza también la evaluación de métodos de protección ante el fenómeno corrosivo, con el fin de proporcionar mecanismos preventivos para cada uno de los metales de estudio, y así evitar grandes pérdidas y gastos (directos, indirectos, de prevención y de protección) a causa de la corrosión.

# 1. PARTE TEÓRICA

## 1.1 CORROSIÓN

La corrosión se define como el deterioro que sufre un material tanto en sus propiedades físicas y químicas debido a una interacción con el medio que lo rodea. En el caso de los metales, se habla de corrosión metálica (Gómez, 2004).

### 1.1.1 TIPOS DE CORROSIÓN

Los procesos de corrosión se clasifican de acuerdo con la naturaleza del medio corrosivo, al mecanismo de ataque y a los efectos combinados (Cazco y Recalde, 2002; Hernández, 2007).

#### 1.1.1.1 Clasificación según la naturaleza del medio corrosivo

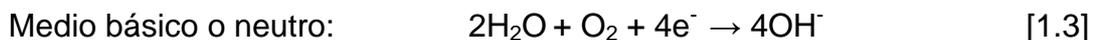
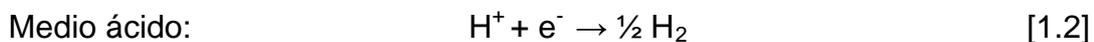
**a) Corrosión electroquímica:** Se denomina corrosión húmeda ya que tiene lugar cuando el material se encuentra en un medio acuoso. Se produce generalmente a temperatura ambiente por reacciones de óxido-reducción, en las que el metal sufre un proceso de oxidación (se degrada), el hidrógeno presente en la solución electrolítica se reduce y el oxígeno se desprende corroyendo adicionalmente al metal (Gómez, 2004).

Para que se produzca este tipo de corrosión es necesaria la existencia de:

- Dos zonas con distinto potencial electrolítico:  
La zona llamada ánodo, la cual cede electrones y se corroe, según la ecuación 1.1.



La zona llamada cátodo, en la cual los electrones cedidos por el ánodo se combinan con iones de electrolito (medio ácido o básico) que permiten la absorción de oxígeno como se muestra en las ecuaciones 1.2 y 1.3.



- Un medio electrolito el cual conduce la electricidad y contiene los elementos característicos del medio corrosivo.
- Una buena unión eléctrica entre el ánodo y el cátodo (Gómez, 2004)

Los electrolitos más comunes son: aire húmedo, soluciones ácidas, soluciones salinas y aguas que contengan sales.

#### 1.1.1.2 Clasificación según el mecanismo de ataque corrosivo

**a) Corrosión uniforme:** Es el tipo de corrosión más común y se presenta de forma homogénea sobre la superficie de un metal, lo que ocasiona que la penetración y pérdida de propiedades de éste sean aproximadamente las mismas en toda la superficie (Perry y Chilton, 1982).

**b) Corrosión por picadura:** Es un tipo de corrosión localizada, en donde el ataque se produce a diferente velocidad en distintos puntos de la superficie metálica, por lo que se origina la formación de agujeros de varios tamaños y profundidades, los cuales en ocasiones son imperceptibles y pueden llegar a provocar serios accidentes por fallos inesperados (Perry y Chilton, 1982).

**c) Corrosión intergranular:** Se trata de un tipo de corrosión localizada que se produce en los bordes de grano de un metal o aleación, y está asociado principalmente a la acumulación de impurezas en dichos bordes (Perry y Chilton, 1982).

**d) Corrosión galvánica:** Se produce cuando existe la unión de dos metales que presentan diferentes potenciales eléctricos en presencia de un electrolito.

Todo metal o aleación posee un potencial eléctrico cuando se sumerge en un electrolito. El electrolito suministra el medio que hace posible la migración de iones desde el ánodo (metal menos noble y con potencial eléctrico más negativo) hacia el cátodo (metal más noble y con potencial eléctrico menos negativo). Mientras más negativo sea el potencial eléctrico, el metal o aleación va a ser atacado con mayor facilidad por este tipo de corrosión; y mientras menor sea la diferencia de potencial entre los dos metales, menor será la velocidad de corrosión (Ávila y Genescá, 1995; Cortés y Ortiz, 2004; Perry y Chilton, 1982).

**e) Corrosión por hendidura:** Se produce en aquellos espacios o ranuras entre dos piezas metálicas o entre una pieza metálica y una no metálica, en donde exista una deficiencia de oxígeno, la acumulación de sustancias corrosivas, entre otras causas (Perry y Chilton, 1982).

**f) Corrosión selectiva:** Se produce mediante la remoción preferencial de uno o más metales de una aleación en un medio corrosivo. El caso más frecuente de este tipo de corrosión es la descincificación (Gómez, 2004).

**g) Corrosión por aireación diferencial:** Se produce cuando una zona de la pieza metálica se encuentra en contacto con una concentración de oxígeno mayor que la existente en otra zona de la misma, es decir, que en la zona donde se tiene mayor concentración de oxígeno se produce la reducción del gas; mientras que en la zona donde se tiene menor concentración de oxígeno se produce la oxidación del metal (Callister, 2007).

#### 1.1.1.3 Clasificación por efectos combinados

**a) Corrosión por esfuerzos o tensión:** Se produce cuando un metal está sometido simultáneamente a un ambiente corrosivo y a tensiones intensas que actúan sobre él, provocando fisuras que se propagan a lo largo del metal y en la dirección en que actúa la fuerza (Perry y Chilton, 1982).

**b) Corrosión por fricción:** Se produce por el rozamiento o desgaste en la interfaz entre materiales en contacto, que hacen que la capa de óxido formada se

desprenda, lo cual origina que las partículas de óxido disgregadas se depositen sobre ciertos puntos de la superficie metálica, y actúen como abrasivo y ocasiones la corrosión del metal mediante la formación de agujeros (Gómez, 2004).

**c) Corrosión por erosión:** El deterioro del metal se produce por la abrasión o fricción causada por el flujo considerablemente rápido de un líquido o un gas sobre la superficie metálica, el cual remueve capas adheridas y depósitos de protección de la superficie. Este tipo de corrosión se caracteriza por la aparición de ondas o surcos que presentan un patrón de dirección (Perry y Chilton, 1982).

**d) Corrosión por cavitación:** Se produce cuando la presión local desciende hasta la presión de vapor del líquido, originando la formación de burbujas de vapor que explotan sobre la superficie metálica formando agujeros o picaduras (Cazco y Recalde, 2002; Molera, 1990).

## 1.1.2 CORROSIÓN DE METALES

La mayoría de los metales a excepción de los metales nobles forman un sistema termodinámicamente inestable al estar en contacto con la atmósfera, es decir que reaccionan y originan la formación de óxido como se indica en la ecuación 1.4.



Termodinámicamente, las reacciones que se dan en el proceso corrosivo pueden ser estudiadas a través de diagramas denominados “Diagramas de Pourbaix”, los cuales presentan las regiones en donde una especie química es termodinámicamente estable bajo ciertas condiciones de pH y potencial electroquímico, a esta zona se la denomina “zona de inmunidad a la corrosión”. Existen zonas en las que las fases estables son especies disueltas por lo que el metal tiende a transformarse en estas especies, a estas zonas se las denomina “zonas de corrosión”. Finalmente se tiene una zona en la que, bajo ciertas condiciones se forman productos sólidos, es decir, que se forma una película protectora evitando el avance de la corrosión, a esta zona se la denomina “zona

de pasivación”. Estos diagramas se los construye a partir de la ecuación de Nernst que se muestra en la ecuación 1.5 (Morcillo *et al.*, 1998).

$$E = E^{\circ} + \frac{R.T}{n.F} * \ln(Me^{n+}) \quad [1.5]$$

Donde:

$E$ : potencial del electrodo (V)

$E^{\circ}$ : potencial estándar del electrodo (V)

$R$ : constante universal de los gases (8,314 J/°K.mol )

$T$ : temperatura absoluta (°K)

$n$ : número de equivalentes electroquímicos presentes (eq/mol)

$F$ : constante de Faraday (96 500 C/eq)

Para que se formen iones metálicos, los cuales van a dar lugar a la formación de óxidos e hidróxidos, es importante que el valor del potencial de electrodo esté por encima de un valor dado para cada metal.

En la Tabla 1 se muestran los valores de potencial estándar de oxidación – reducción para varias reacciones de corrosión en base al hidrógeno como electrodo de referencia, y sirve para determinar cuál de los metales utilizados actuará como ánodo, es decir, si más negativo es el potencial, más fácilmente se corroerá el metal (Morcillo *et al.*, 1998).

**Tabla 1.** Potenciales estándar de óxido – reducción para reacciones de corrosión a 25°C

Reacción de corrosión	Potencial estándar E° (V)
$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	+1,498
$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	+ 1,229
$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	+1,200
$\text{Pd} \rightarrow \text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,987
$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0,799
$2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,788
$\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$	+0,771
$4(\text{OH})^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	+0,401
$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,337
$\text{Sn}^{2+} \rightarrow \text{Sn}^{4+} + 2\text{e}^-$	+0,150
$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0,000
$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,126
$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,136
$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,250
$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,280
$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,403
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,440
$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,744
$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,763
$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,662
$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,363
$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$	-2,714
$\text{K} \rightarrow \text{K}^+ + \text{e}^-$	-2,925

(Flinn y Trojan, 1979)

**Nota:** En la Tabla 1. las reacciones se escriben como semiceldas anódicas.

### 1.1.2.1 Corrosión del acero

El acero es el metal más comúnmente utilizado en la fabricación de estructuras debido a su variedad y propiedades de acuerdo con la composición que presente, como por ejemplo acero al carbono, acero inoxidable, acero al silicio, entre otros.

El acero al carbono está constituido principalmente por hierro y carbono, éste último en una cantidad menor que 2%; pero posee también otros elementos como: manganeso, silicio, fósforo y azufre en cantidades menores al 1% que se utilizan para mejorar sus características y propiedades (Brizuela y Garay, 2011).

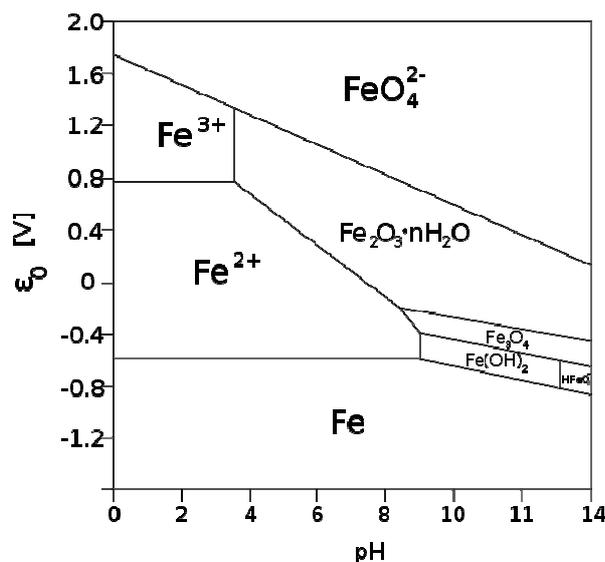
El proceso corrosivo del acero se lleva a cabo cuando existe la presencia de una capa de electrolito (humedad) sobre su superficie, y se inicia en ciertas zonas donde se presenta irregularidad de la superficie o debajo de una partícula depositada para posteriormente extenderse hasta cubrir la totalidad de la superficie con óxido (Morcillo *et al.*, 1998).

Los productos de corrosión que se forman sobre la superficie metálica dependen del tipo de atmósfera, del potencial electroquímico y del pH al cual está sometido el material y los principales son (Morcillo *et al.*, 1998).

- Óxidos: magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )
- Hidróxidos: hidróxido ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) e hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )
- Oxihidróxidos: goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), akaganeita ( $\beta\text{-FeOOH}$ ), lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ) y productos amorfos ( $\delta\text{-FeOOH}$ )

Las capas de productos de corrosión formados sobre la superficie del acero son porosas y permiten la penetración de iones de la atmósfera, además de oxígeno y agua, lo cual impide que sirvan como capas de protección. En el acero se tienen dos capas de productos de corrosión: una interna de mayor densidad formada principalmente por productos amorfos y magnetita; y otra externa y porosa formada generalmente por goethita y lepidocrocita (Morcillo *et al.*, 1998).

En el diagrama de Pourbaix que se muestra en la Figura 1 se observa la zona de inmunidad a la corrosión que corresponde a un potencial menor a -0,6 V aproximadamente, así como también la zona de pasivación en donde se encuentran los productos de corrosión mencionados anteriormente.



**Figura 1.** Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-H<sub>2</sub>O a 25°C (Früh, 2006)

### Productos de corrosión del acero

**a) Magnetita:** Es el mineral con mayor contenido de hierro igual al 72%, está constituido por óxido ferroso-férrico y una de sus principales características es el magnetismo que presenta. Se encuentra principalmente en regiones con concentraciones altas de cloruros, es decir, cerca del mar o cuando el hierro se encuentra rodeado por agua como por ejemplo en tuberías de agua (Morcillo *et al.*, 1998).

**b) Goethita:** Es un oxihidróxido de hierro con un contenido de 63% de hierro y hasta un 5% de manganeso. Se encuentra en pantanos o fuentes y se forma también como precipitado inorgánico en aguas sedimentables. Como óxido se presenta en color pardo amarillento o pardo oscuro (Hurlbut y Klein, 1997; Morcillo *et al.*, 1998).

**c) Akaganeita:** Es un oxihidróxido férrico de color naranja que se forma por la corrosión en ambientes marítimos, debido a la presencia de iones cloruro en medios con pH ácido (Morcillo *et al.*, 1998).

**d) Lepidocrocita:** Es un óxido de hierro que se obtiene en forma de láminas y su formación está favorecida con el aumento de temperatura en la atmósfera.

Presenta un color rojo rubí a rojo amarillento con una raya rojiza (Morcillo *et al.*, 1998).

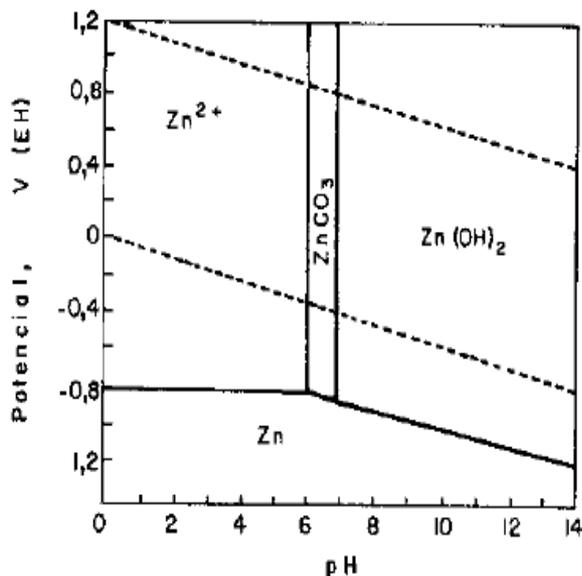
### 1.1.2.2 Corrosión del cinc

El cinc es un metal de gran importancia debido a que su principal aplicación, cerca del 50%, es el uso que se le da como revestimiento anticorrosivo para el acero (galvanizado). Esto se debe a que el cinc al estar en atmósferas que no presentan contaminantes y en contacto con la humedad forma óxido de cinc (ZnO) o hidróxido de cinc (Zn(OH)<sub>2</sub>), los cuales reaccionan con el anhídrido carbónico de la atmósfera y forman una capa de un compuesto blanquecino denominado hidrocincita que tiene características protectoras (Morcillo *et al.*, 1998; Salinas, 2004).

Los principales productos de corrosión atmosférica del cinc son (Morcillo *et al.*, 1998).

- Cincita (ZnO) e hidrocincita (Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>6</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)
- Carbonato de cinc (ZnCO<sub>3</sub>)
- Hidróxido de cinc (Zn(OH)<sub>2</sub>)
- Hidroxi sales de cinc: sulfato de cinc (Zn(SO<sub>4</sub>).H<sub>2</sub>O), sulfato básico de cinc (Zn<sub>4</sub>SO<sub>4</sub>(OH)<sub>6</sub>.4H<sub>2</sub>O) y cloruro básico de cinc (Zn<sub>5</sub>(OH)<sub>8</sub>(Cl)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O).

En la Figura 2 se muestra el diagrama de Pourbaix para el sistema Zn-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O a 25°C y se observa la zona de inmunidad a la corrosión, que corresponde a la zona inferior del diagrama, en donde se tiene potencial menor que -0.8 V hasta pH de 6 y a pH más alcalino el potencial va disminuyendo. Se observa también la zona de pasividad en donde se tiene la formación de carbonato de cinc (Morcillo *et al.*, 1998).



**Figura 2.** Diagrama de Pourbaix para el sistema Zn-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O a 25°C  
(Morcillo *et al.*, 1998)

### Productos de corrosión del cinc

**a) Óxido de cinc:** Está presente en la naturaleza como un mineral conocido como cincita, pero también se lo obtiene como producto inicial de la corrosión del cinc. Se presenta como un polvo blanco que es insoluble en agua pero soluble en ácidos y se forma instantáneamente en aire seco y a temperatura ambiente (Bot, 2010; Morcillo *et al.*, 1998).

**b) Hidrocincita:** Se obtiene cuando el óxido de cinc es convertido a carbonato básico de cinc, debido a la presencia de agua y de dióxido de carbono en la atmósfera. Contiene alrededor del 80% de cinc y se presenta en colores rojo o amarillo anaranjado (Hurlbut y Klein, 1997; Morcillo *et al.*, 1998).

**c) Carbonato de cinc:** Es uno de los principales productos de la corrosión del cinc, y se obtiene cuando éste ha sido expuesto a una atmósfera urbana por un período largo de tiempo (Morcillo *et al.*, 1998).

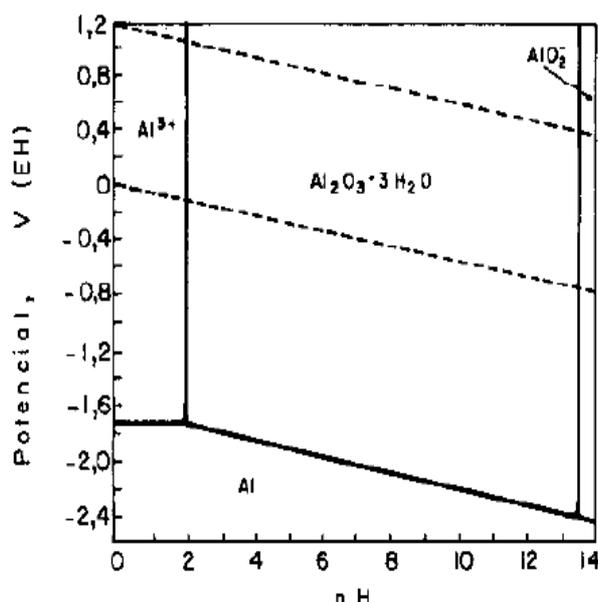
**d) Hidróxido de cinc:** Se forma en atmósferas con alta humedad, y al estar en contacto con contaminantes atmosféricos como el SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup> da lugar a sales básicas de cinc si el pH del electrolito es alcalino, y sulfatos y cloruros de cinc si el pH es ácido (Morcillo *et al.*, 1998).

### 1.1.2.3 Corrosión del aluminio

El aluminio es el metal no ferroso más utilizado en la industria debido a su baja densidad y a su resistencia a la corrosión. Esta resistencia se debe a la formación de una capa de alúmina amorfa la cual es insoluble en agua, y se adhiere a la superficie del aluminio formando así una barrera contra la corrosión atmosférica.

El aluminio puede corroerse de manera uniforme debido a la disolución de la capa de óxido que se forma en su superficie, esto a causa del contacto con ácidos u otros iones reactivos. Pero el mecanismo de corrosión que generalmente se presenta en el aluminio es el ataque por picaduras provocado por la presencia en la atmósfera de iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ , en ese orden, lo cual origina la formación de complejos solubles que producen el adelgazamiento de la capa de óxido. En atmósferas que presentan contaminación por óxidos de azufre, el aluminio presenta mayor resistencia que el cinc (Morcillo *et al.*, 1998).

Los principales productos de corrosión atmosférica del aluminio son: alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), bayerita ( $\alpha\text{-Al}(\text{OH})_3$ ) y sulfato básico de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ). En el diagrama de Pourbaix que se muestra en la Figura 3, se observa que la alúmina es el producto más estable del sistema.



**Figura 3.** Diagrama de Pourbaix para el sistema Al-H<sub>2</sub>O a 25°C (Morcillo *et al.*, 1998)

## Productos de corrosión del aluminio

**a) Alúmina:** Es una película delgada de óxido de aluminio que se forma cuando la superficie metálica ha sido expuesta al aire o a procesos de anodizado. Es insoluble en agua y proporciona resistencia a la corrosión atmosférica al aluminio y a sus aleaciones (Morcillo *et al.*, 1998).

**b) Sulfato básico de aluminio:** Se forma cuando el aluminio entra en contacto con dióxido de azufre en presencia de humedad, es característico de atmósferas industriales. Es de color blanco y soluble en agua fría (Morcillo *et al.*, 1998).

### 1.1.2.4 Corrosión del cobre

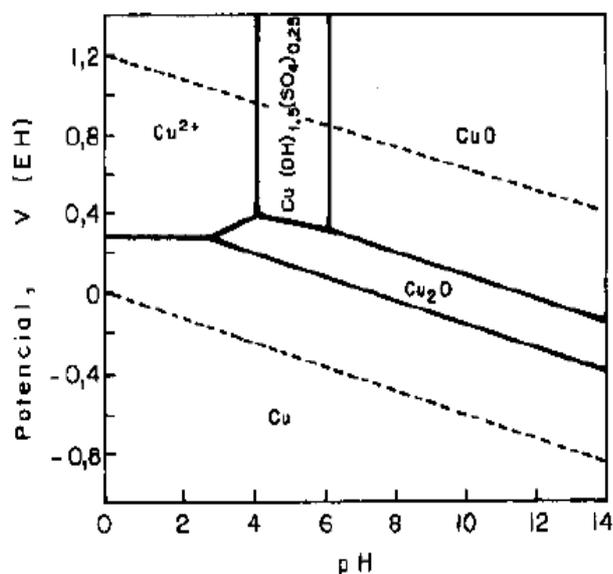
El cobre es un metal no ferroso de gran importancia debido a sus propiedades físicas, mecánicas y eléctricas, así como también a la resistencia que presenta a la corrosión, por lo que se lo utiliza principalmente en la fabricación de tuberías y cables eléctricos.

Cuando el cobre empieza su proceso corrosivo se forma sobre su superficie una capa de corrosión de color café-verde, o verde-azul, llamada pátina. En condiciones de pH neutro o cercano, la pátina está formada por óxidos o hidróxidos de cobre los cuales proveen un efecto protector a la superficie del cobre. Este comportamiento varía de acuerdo con la presencia de contaminantes y al pH del electrolito (Gómez *et al.*, 2009 y Morcillo *et al.*, 1998).

Los principales productos de corrosión atmosférica del cobre son: tenorita ( $\text{CuO}$ ), cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), brocantita ( $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ ), azurita  $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ , posnjakita ( $\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), atacamita ( $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ ) y calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ); estos productos de corrosión son insolubles en agua pero solubles en ácidos (Morcillo *et al.*, 1998).

En el diagrama de Pourbaix que se muestra en la Figura 4 se puede observar la zona de estabilidad del cobre metálico que cubre un amplio rango; así como

también la zona de estabilidad de las especies de cobre, la cual se encuentra entre las líneas punteadas (Morcillo *et al.*, 1998).



**Figura 4.** Diagrama de Pourbaix para el sistema  $\text{Cu-SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$  a  $25^\circ\text{C}$  (Morcillo *et al.*, 1998)

### Productos de corrosión del cobre

**a) Cuprita:** Es el primer óxido que se forma en la superficie del cobre y posee aproximadamente el 89% de cobre. Generalmente es de color rojo oscuro, insoluble en agua y ligeramente soluble en ácidos. Presenta mayor estabilidad en condiciones de baja hidratación (Gómez *et al.*, 2009; Hurlbut y Klein, 1997; Morcillo *et al.*, 1998).

**b) Tenorita:** Es un óxido básico, presenta un color marrón oscuro o negro y es insoluble en agua pero soluble en ácidos (Morcillo *et al.*, 1998).

**c) Azurita:** Es un carbonato de cobre básico que presenta un color azul intenso característico, y se forma en depósitos de cobre expuestos al ambiente e incrustada en rocas de cuarzo (Harding, 2007).

**d) Brocantita:** Es una mezcla de sales sulfato e hidróxidos de cobre, normalmente se forma en atmósferas urbanas e industriales y presenta un color verde. Es soluble en ácidos e insoluble en agua (Morcillo *et al.*, 1998).

**g) Calcocita:** Es un sulfuro de cobre que se encuentra en la pátina formada en la superficie del cobre que ha sido expuesto a atmósferas urbanas. Es insoluble en agua pero es soluble en ácidos (Morcillo *et al.*, 1998).

## **1.2 CORROSIÓN ATMOSFÉRICA**

Es un proceso electroquímico que implica el paso de una corriente eléctrica entre determinadas zonas de la superficie metálica a las cuales se las denomina zona anódica y zona catódica, a través de una solución electrolítica (Genescá, 1995).

En este caso el electrolito es una capa de humedad que se forma sobre la superficie metálica, y cuyo espesor varía desde capas muy delgadas (imperceptibles) hasta capas que mojan visiblemente la superficie del metal (centenares de micrómetros).

En el proceso anódico, el metal se disuelve en la capa del electrolito; mientras que en el proceso catódico, los metales expuestos se corroen debido a la reducción de oxígeno (Genescá, 1995).

### **1.2.1 FACTORES QUE AFECTAN LOS PROCESOS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA**

Los factores que afectan el proceso de corrosión de materiales metálicos expuestos a la atmósfera son: factores meteorológicos y de contaminación ambiental, los cuales determinan la intensidad y naturaleza del proceso corrosivo (Genescá, 1995).

Otros factores que influyen en el proceso de corrosión atmosférica al estar combinados entre sí son: las condiciones de exposición, composición del metal y propiedades del óxido formado (Genescá, 1995).

### 1.2.1.1 Factores meteorológicos

A continuación se describen los principales factores meteorológicos que se utilizan para evaluar su acción sobre el proceso corrosivo de los metales. Es importante mencionar que estos factores se comportan de manera no homogénea con relación a la altura (Páez, 2008).

**a) Humedad relativa:** Es uno de los factores más importantes en la corrosión atmosférica, ya que es el medio electrolítico en donde se va a producir el fenómeno corrosivo y se refiere a la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la cantidad necesaria para que el aire se sature a una misma presión y temperatura. Su importancia radica en el nivel de humedad relativa que contenga el material expuesto, ya que, bajo ciertos niveles como en el caso del hierro (por debajo de 60-80%) la corrosión es despreciable. Adicionalmente para que este parámetro influya en la velocidad de corrosión es necesario tener una atmósfera contaminada (Almeida, 2011; Morcillo *et al.*, 1998).

**b) Tiempo de humectación:** Es el factor más importante de la corrosión atmosférica ya que determina la duración del proceso corrosivo. Se define como el tiempo durante el cual la superficie metálica permanece cubierta por una película de electrolito (humedad relativa mayor o igual a 80%), a una temperatura mayor o igual a 0°C.

El tiempo de humectación incluye factores climáticos importantes tales como: temperatura ambiente, nubosidad, precipitación pluvial, viento, humedad relativa, entre otros que lo establecen y modifican.

**c) Temperatura:** A mayor temperatura de la superficie metálica, la velocidad de corrosión se incrementa hasta llegar a la temperatura de evaporación del electrolito, en donde, la velocidad de corrosión va a disminuir debido a la disminución de la concentración de gases corrosivos presentes en el mismo. Por otro lado, si la temperatura desciende hasta alcanzar el punto de congelación del electrolito, el proceso corrosivo se detiene. Es por ello que la mayor oxidación se produce entre 0°C y 25°C (Rodríguez *et al.*, 1999).

Es importante mencionar que la temperatura desciende con la altura en 6,5°C por kilómetro, en promedio (Páez, 2008).

**d) Presión atmosférica:** Es un factor a ser tomado en cuenta, ya que, a medida que aumenta la presión atmosférica, la concentración de oxígeno también aumenta, lo cual favorece la reacción catódica e incrementa la velocidad de corrosión. Al igual que con la temperatura; la presión desciende mientras la altura aumenta (Páez, 2008).

### 1.2.1.2 Factores de contaminación

Los contaminantes más comunes de la atmósfera son: el SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) que proviene de vehículos e industrias que utilizan combustibles derivados del petróleo, los NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) generados también por la quema de combustibles fósiles a altas temperaturas, el NaCl (cloruro de sodio) que se encuentra presente en atmósferas marinas y su efecto más pronunciado se produce cerca de la orilla, y el material particulado que se genera debido a procesos naturales o antropogénicos (Páez, 2008).

Cada contaminante atmosférico tiene un tiempo de exposición específico y su concentración puede ser medida en partes por millón (mg/L) o en microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>) (Genescá, 1995).

**a) Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):** Es un gas incoloro que presenta olor picante e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm; puede provenir de fuentes naturales como la actividad volcánica y de fuentes artificiales como la quema de combustibles, principalmente derivados del petróleo.

Se caracteriza por ser más soluble que el oxígeno, por lo que, a bajas concentraciones de O<sub>2</sub> en la atmósfera se obtienen películas de humedad con altas concentraciones de SO<sub>2</sub> sobre la superficie metálica, lo cual causa mayor deterioro de la misma (Rodríguez *et al.*, 1999).

El SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera puede depositarse seco sobre estructuras, edificios o vegetación; así como también puede ser convertido en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico) mediante el proceso de oxidación como se muestra en las reacciones 1.6 y 1.7.



El H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> producido, retorna a la superficie de la tierra por acción de la lluvia, dando lugar a lo que se conoce como “lluvia ácida” (Morcillo *et al.*, 1998).

**b) Cloruros (Cl<sup>-</sup>):** Proviene principalmente del agua de mar, de donde, el aire arrastra los iones cloruro disueltos o partículas de sal hacia sectores cercanos a la orilla y provoca el depósito de los mismos sobre todo tipo de superficies.

En el caso de los metales, los cloruros son altamente perjudiciales, ya que se disuelven en la película de humedad aumentando la conductividad del electrolito sobre la superficie metálica y provocan la destrucción de películas protectoras, lo cual aumenta la velocidad de corrosión en el metal (Morcillo *et al.*, 1998).

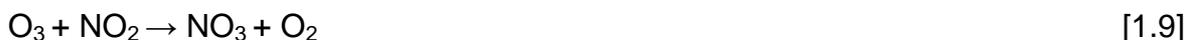
**c) Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):** Se originan de diferentes fuentes como: procesos de combustión a altas temperaturas, uso de fertilizantes que contengan amoníaco, actividad biológica del suelo, procesos industriales, entre otros. El NO es el que se produce en mayor cantidad pero se oxida con facilidad y forma el NO<sub>2</sub> que es el que predomina en la atmósfera. Sin embargo, ninguno de ellos causan directamente corrosión en superficies metálicas, sino que, al estar en presencia de oxígeno y humedad reaccionan dando lugar a la formación de HNO<sub>3</sub> (ácido nítrico), el cual es altamente corrosivo y forma parte de la lluvia ácida (Salinas, 2004).

La transformación del NO en NO<sub>2</sub> se da rápidamente como se observa en la ecuación 1.8.



Como se mencionó anteriormente, a pesar que el NO<sub>2</sub> no afecta directamente al proceso corrosivo, éste interviene en la formación de HNO<sub>3</sub> el cual causa un

deterioro considerable en las superficies metálicas. Las reacciones 1.9, 1.10, 1.11 y 1.12 indican la formación del ácido nítrico.



**d) Ozono (O<sub>3</sub>):** Se lo denomina contaminante secundario, debido a que no es generado por una fuente sino que se forma a partir de precursores. Es muy nocivo para los seres humanos porque forma parte del efecto invernadero y se forma a partir de reacciones químicas ocurridas en la atmósfera (hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno reaccionan bajo la luz solar). Debido a que los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógenos son producidos en mayor cantidad por los vehículos, se tiene mayor concentración de ozono en las zonas urbanas en donde hay mayor circulación de vehículos pesados; sin embargo, se tienen ciertas zonas suburbanas en donde la acción del viento juega un papel más importante que el de los compuestos precursores, lo cual hace que en estas zonas se registren mayores concentraciones de ozono (Morales, 2006; Páez, 2008).

Es considerado un fuerte oxidante por ser triatómico y, al estar en el ambiente, puede disolverse en gotas de agua que se forman en la superficie expuesta, haciendo que ésta se corroa, lo cual se observa principalmente en el hierro como se muestra en las reacciones 1.13 y 1.14.



**e) Partículas atmosféricas:** En la atmósfera se puede distinguir varios tipos de materiales suspendidos, los cuales varían en tamaño y composición, y son emitidos por fuentes naturales tales como: volcanes, océanos, descomposición de materia prima, incendios forestales, entre otros; o fuentes artificiales como son las reacciones químicas (Páez, 2008).

Las partículas de mayor tamaño (20  $\mu\text{m}$  o más) se las denomina polvo y pueden ser de origen industrial o de origen volcánico.

Las partículas de menor tamaño son denominadas aerosoles y se las obtiene de procesos de combustión y conversión de gases en partículas, especialmente del  $\text{SO}_2$  y de los  $\text{NO}_x$ .

El transporte atmosférico de las partículas es una de las mayores fuentes de dispersión de contaminantes, los mismos que son arrastrados por el viento y suelen depositarse sobre las superficies causando grandes daños. Entre ellos y el más importante es el efecto corrosivo (aireación diferencial) que causan sobre las superficies metálicas. También se puede originar un efecto erosivo si los metales poseen algún revestimiento polimérico o están cubiertos por una capa de herrumbre (Cazco y Recalde, 2002).

## **1.2.2 CLASIFICACIÓN DE LA ATMÓSFERA SEGÚN SU AGRESIVIDAD**

Es importante tener una clasificación atmosférica según su agresividad, ya que de acuerdo con ello se puede seleccionar materiales adecuados y recubrimientos óptimos para los diferentes materiales expuestos a distintas condiciones atmosféricas.

### **1.2.2.1 De acuerdo con los contaminantes**

De acuerdo al tipo de contaminantes presentes y su concentración, las atmósferas se clasifican en: rural, urbana, industrial y marina.

**a) Atmósfera rural:** Se presenta en ciudades poco pobladas o en lugares que se encuentran lejos de industrias, en donde la concentración de contaminantes es prácticamente nula, por lo que el proceso corrosivo se debe principalmente a la influencia de los factores meteorológicos.

En el presente estudio, se considera también como atmósfera rural al sector denominado “páramo”, ya que en éste se ubica una de las estaciones de ensayo. En este sector los factores meteorológicos varían de acuerdo con la altura y se encuentra entre los 3 400 y 4 800 m.s.n.m. (De Humboldt *et al.*, 2007).

- b) Atmósfera urbana – industrial:** Se presenta en ciudades con un alto número de habitantes; así como también en lugares en donde exista presencia de procesos industriales de mediana y gran escala. Este tipo de atmósferas se caracterizan por tener una mayor concentración de contaminantes que la atmósfera rural, principalmente SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, los cuales combinados con factores meteorológicos causan grandes efectos corrosivos en las superficies metálicas expuestas (Morcillo *et al.*, 1998).
- c) Atmósfera marina:** El proceso corrosivo se debe principalmente a la presencia de cloruros, los cuales afectan de manera significativa a las superficies metálicas y se las encuentra en ciudades cercanas a la zona costera (Padilla, 1999).

#### 1.2.2.2 De acuerdo a la norma ISO 9223

De acuerdo con la norma ISO 9223 “Corrosion of metal and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification”, las atmósferas se clasifican en cinco categorías de agresividad como se muestra en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Categorías de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223, 1992

<b>Categoría</b>	<b>Agresividad</b>
C1	Muy baja
C2	Baja
C3	Media
C4	Alta
C5	Muy alta

(ISO 9223, 1992)

Esta norma se aplica a cuatro tipos de metales, que son: aluminio, cobre, acero al carbono y cinc. (ISO 9223, 1992).

En la Tabla 3 se presenta la clasificación de las atmósferas en categorías de acuerdo con datos de velocidad de corrosión para el primer año de exposición del acero al carbono, cinc, cobre y aluminio según la norma ISO 9223.

**Tabla 3.** Categorías de agresividad atmosférica a partir de datos de velocidad de corrosión del primer año de exposición, según la norma ISO 9223

Categoría	Unidad	Velocidad de corrosión			
		Acero	Cinc	Cobre	Aluminio
C1	g/m <sup>2</sup>	<10,0	<0,7	<0,9	Despreciable
	µm	<1,3	<0,1	<0,1	-
C2	g/m <sup>2</sup>	10,0 – 200,0	0,7 – 5,0	0,9 – 5,0	<0,6
	µm	1,3 – 25,0	0,1 – 0,7	0,1 – 0,6	-
C3	g/m <sup>2</sup>	200,0 – 400,0	5,0 – 15,0	5,0 – 12,0	0,6 – 2,0
	µm	25,0 – 50,0	0,7 – 2,1	0,6 – 1,3	-
C4	g/m <sup>2</sup>	400,0 – 650,0	15,0 – 30,0	12,0 – 25,0	2,0 – 5,0
	µm	50,0 – 80,0	2,1 – 4,2	1,3 – 2,8	-
C5	g/m <sup>2</sup>	650,0 – 1500,0	30,0 – 60,0	25,0 – 50,0	5,0 – 10,0
	µm	80,0 – 200,0	4,2 – 8,4	2,8- 5,6	-

(ISO 9223, 1992)

### 1.3 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

Entre los métodos utilizados se tienen aquellos que sirven para valorar los efectos que tiene la corrosión sobre la superficie metálica, ya que con ello se puede determinar si el medio ambiente al cual ha sido expuesta la pieza actúa de manera significativa o no sobre la corrosión de la misma.

### 1.3.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

Consiste en exponer la pieza a un medio ambiente por determinado período de tiempo, luego de lo cual se evalúa la cantidad de material que pierde la pieza a causa de la corrosión.

Los parámetros que intervienen en la determinación de la velocidad de corrosión son: tiempo de exposición de la pieza, pérdida de peso, área de la pieza, y densidad del material como se muestra en la ecuación 1.15 (ASTM G1, 2003).

$$\text{Velocidad de Corrosión} = \frac{(K \times W)}{(A \times T \times D)} \quad [1.15]$$

Donde:

*K*: constante (Anexo X)

*T*: tiempo de exposición de la pieza, en horas

*A*: área de la pieza en cm<sup>2</sup>

*W*: pérdida de masa de la pieza en gramos

*D*: densidad del material en g/cm<sup>3</sup> (2,71 g/cm<sup>3</sup> para el aluminio; 7,85 g/cm<sup>3</sup> para el acero al carbono; 7,13 g/cm<sup>3</sup> para el acero galvanizado y 8,94 g/cm<sup>3</sup> para el cobre).

La cantidad de material que pierde la pieza metálica se la obtiene restando el peso de la pieza después de realizar la limpieza de los productos de corrosión formados sobre su superficie, del peso inicial antes de la exposición al medio ambiente.

La velocidad de corrosión puede ser expresada en μm/año para lo cual *K* tiene un valor de  $8.76 \times 10^7$ . La penetración de la corrosión en el material se obtiene multiplicando la velocidad de corrosión por el tiempo de exposición (en años), que da como resultado el espesor (en μm) de material que se ha perdido como producto de la corrosión uniforme, y éste es el dato necesario para clasificar la agresividad de la corrosión atmosférica sobre el acero al carbono, acero

galvanizado y cobre. Para el aluminio no se considera una corrosión uniforme sobre su superficie, por lo que, para este material se requiere que la velocidad de corrosión esté en  $\text{g/m}^2$  (ISO 9223, 1992 y Morcillo *et al.*, 1998).

### **1.3.2 MÉTODO MACROSCÓPICO**

Este método se basa en la apreciación visual de la apariencia de la superficie metálica. Para ello se observa tanto su color, textura, pérdida de brillo, presencia de óxido o herrumbre, desgaste, presencia de material particulado, entre otros, con lo cual es posible realizar una comparación entre los metales expuestos y así determinar qué tipo de corrosión se produce en cada uno de ellos y en cuál de los casos se tiene mayor daño superficial.

### **1.3.3 MÉTODO POR MICROSCOPIA ÓPTICA**

Conjuntamente con el método macroscópico, se realiza la observación con microscopio óptico lo cual permite visualizar detalladamente el aspecto de la superficie metálica; así como también las fallas (picadura, erosión, cavitación, etc.) o modificaciones provocadas por el tipo de corrosión que se presenta en cada una de las muestras estudiadas.

### **1.3.4 MÉTODO POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA - EDS**

Este método de análisis permite identificar cualitativa y cuantitativamente los elementos químicos presentes en una muestra de cualquier tipo de material ya sea biológico o inerte. La evaluación de estos elementos químicos se la hace mediante gráficas de distribución denominadas “espectros”, las cuales son comparadas automáticamente con espectros de referencia o histogramas de cada

elemento químico permitiendo así obtener la información mencionada (Adabache *et al.*, 2009).

### 1.3.5 MÉTODO POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Permite identificar mediante la interacción de un haz de rayos X, de una longitud de onda determinada, con una muestra cristalina, la estructura molecular de compuestos cristalinos que se encuentren en mayor abundancia en la muestra.

Los resultados se presentan a través de registros gráficos denominados “difractogramas”, los mismos que se comparan con difractogramas base, únicos para cada compuesto. La importancia de este método radica en la identificación cualitativa y cuantitativa de la estructura molecular de compuestos químicamente iguales pero con diferente estructura molecular. Tal es el caso de los oxihidróxidos de hierro ( $\alpha$ -FeOOH,  $\beta$ -FeOOH,  $\gamma$ -FeOOH y  $\delta$ -FeOOH) (Jiménez *et al.*, 2006; Morcillo *et al.*, 1998)

### 1.3.6 LEY BILOGARÍTMICA

Esta ley permite determinar la corrosión de los metales en función del tiempo, mediante la aplicación de la ecuación 1.16 y se utiliza para predecir el progreso de la corrosión después de largo tiempo de exposición para diferentes metales (Morcillo *et al.*, 1998).

$$C = a \cdot t^n \quad [1.16]$$

Donde:

C: corrosión ( $\mu\text{m}$ )

t: tiempo de exposición (años)

a: corrosión del metal durante el primer año de exposición ( $\mu\text{m}$ )

$n$ : exponente que depende del tipo de atmósfera y de la composición del metal

Para obtener los valores de  $a$  y  $n$  con mayor facilidad, se presenta la ecuación 1.17.

$$\log C = n \cdot \log t + \log a \quad [1.17]$$

A esta ley se la denomina ley bilogarítmica, ya que representada en un gráfico logaritmo de  $C$  vs. logaritmo de  $t$ , se obtiene una línea recta cuya pendiente corresponde al valor de “ $n$ ”.

## **1.4 MÉTODOS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA**

Debido a las grandes pérdidas económicas generadas a nivel mundial a causa de la corrosión que se presenta en los metales, es importante determinar métodos que permitan protegerlos de la misma. Para ello, se debe realizar una selección adecuada del método, ya que no siempre es necesaria dicha protección.

Para determinar el método de protección a utilizar se debe tomar en cuenta el material de la pieza, su uso, ubicación, el medio ambiente al cual va a estar expuesta y la agresividad del mismo. Además, en el caso de equipos, es importante tener un diseño adecuado que evite zonas de estancamiento de líquidos o humedad que sirvan como focos de corrosión (Morcillo *et al.*, 2002).

### **1.4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA**

Los métodos de protección anticorrosiva más utilizados son los siguientes (Morcillo *et al.*, 2002).

- Protección con sustancias inhibidoras
- Protección catódica

- Protección anódica
- Protección con recubrimientos metálicos
- Protección con recubrimientos de conversión
- Protección con recubrimientos no metálicos inorgánicos
- Protección con recubrimientos no metálico orgánicos

#### **1.4.1.1 Protección con sustancias inhibidoras**

Los inhibidores son sustancias que se adicionan en bajas concentraciones (menores que 0,1% en peso) al medio corrosivo para disminuir su agresividad. Estas sustancias se utilizan especialmente en sistemas cerrados o con recirculación, y actúan sobre las reacciones que se dan en las zonas anódicas o catódicas del metal. Los cromatos, fosfatos y silicatos son ejemplos de inhibidores que se utilizan para disminuir el efecto corrosivo en el hierro y en el acero (Perry y Chilton, 1982).

#### **1.4.1.2 Protección catódica**

Es un método electroquímico que se basa en convertir el metal a proteger en el cátodo del medio electrolítico; para ello se utiliza una corriente impresa (fuente externa) u otro metal de mayor actividad denominado “ánodo de sacrificio”, el cual al corroerse genera una corriente que se envía a través del electrolito hacia la superficie del metal a proteger y disminuye así el efecto corrosivo. Como ejemplos de ánodos de sacrificio se tiene el cinc, magnesio y aluminio, que se utilizan para proteger superficies de acero o hierro (Bedón, 2009; Perry y Chilton, 1982).

#### **1.4.1.3 Protección anódica**

Este es un método de pasivación de metales o aleaciones que consiste en aplicar una corriente externa haciendo que la superficie metálica se vuelva más anódica,

es decir, que se forme una capa de óxidos metálicos que impermeabilizan al metal del medio agresivo en el que se encuentra (Perry y Chilton, 1982).

#### **1.4.1.4 Protección con recubrimientos metálicos**

Este tipo de recubrimientos se los puede utilizar como mecanismos de barrera, de sacrificio o inhibición, y sus principales características son: mejorar la resistencia anticorrosiva del metal a proteger, proveer resistencia a la oxidación a alta temperatura, y suministrar una base para la aplicación de recubrimientos no metálicos orgánicos (pinturas) (Morcillo *et al.*, 2002).

Uno de los métodos más utilizados para mejorar la resistencia anticorrosiva del acero es el galvanizado, esto debido a que su aplicación es fácil y su costo es relativamente bajo, además que el cinc es un material que forma óxidos protectores en su superficie proporcionando una especie de barrera ante la corrosión.

El galvanizado consiste en introducir el acero limpio en un baño de cinc fundido a una temperatura entre 440 y 470°C, en donde se produce una reacción química entre el hierro y el cinc, que da lugar a la formación de aleaciones entre estos dos metales sobre la superficie del acero. El espesor total del recubrimiento puede llegar a ser máximo de 200 µm (Morcillo *et al.*, 2002; Salinas, 2004).

Los metales más utilizados como recubrimientos metálicos son el cinc, cadmio, estaño, aluminio, níquel, cobre, magnesio y plata (Morcillo *et al.*, 2002; Perry y Chilton, 1982).

#### **1.4.1.5 Protección con recubrimientos de conversión**

Este método de protección se refiere a aquellos metales que son capaces de formar óxidos protectores sobre su superficie, es decir, que son capaces de formar capas pasivas. La pasividad se refiere a la adsorción química de

inhibidores (oxígeno, óxidos metálicos, productos de corrosión, etc), los cuales reducen la velocidad de corrosión del metal mediante la estabilización de las sustancias adsorbidas y el mantenimiento de la película protectora durante un tiempo determinado (Morcillo *et al.*, 2002; Salinas, 2004).

De acuerdo con el metal que se utiliza, estos recubrimientos se clasifican en:

- Anodizado
- Fosfatado
- Cromatado

El anodizado es uno de los métodos más utilizados debido a su bajo costo y a la gran utilidad que se le da al aluminio a nivel mundial, y consiste en formar artificialmente una capa protectora de óxidos sobre el metal (generalmente aluminio) mediante procesos electroquímicos. El proceso más común es el de colocar el aluminio en un baño de ácido sulfúrico, en el cual se hace pasar una corriente eléctrica de aproximadamente 6 000 amperios a 20 voltios entre el ánodo (aluminio) y el cátodo. La capa formada es propia del metal y hace que la superficie del mismo sea más dura y resistente a la abrasión y a la corrosión (Barros, 2003).

#### **1.4.1.6 Protección con recubrimientos no metálicos inorgánicos**

Se utilizan para aislar el metal del medio ambiente corrosivo. Estos recubrimientos son materiales estables e inertes por lo que proporcionan aislamiento eléctrico y resistencia al calor. Entre los más utilizados se tiene: esmaltes vítreos, porcelanas, cementos y cerámicas refractarias (Cazco y Recalde, 2002; Orozco *et al.*, 2007).

#### **1.4.1.7 Protección con recubrimientos no metálicos orgánicos**

Al igual que los recubrimientos inorgánicos se los utiliza para aislar el metal del medio ambiente corrosivo y evitar la difusión de los agentes corrosivos sobre su superficie, pero se diferencian por tener una base orgánica. Estos recubrimientos forman una película protectora que impide el paso de la humedad y del oxígeno hacia el metal sobre el cual son aplicados. Entre los principales recubrimientos orgánicos se tienen las pinturas, barnices, lacas, esmalte, resinas, etc (Morcillo *et al.*, 2002; Salinas, 2004; Sinche, 2009).

- a) **Laca:** Sustancia líquida que se convierte en una película protectora luego de haber sido aplicada sobre la superficie de interés. Está formada a base de un termoplástico sintético, el cual está disuelto en un solvente, mismo que se evapora después de la aplicación de la laca (Sinche, 2009).
  
- b) **Barniz:** Es una disolución (de resinas en un solvente) que no posee pigmentos ni cargas en su composición y, al ser aplicada sobre una superficie que se encuentra en contacto con aire, se solidifica formando una capa transparente protectora o decorativa. (Cazco y Recalde, 2002; Sherwin y Williams, 2005).
  
- c) **Esmalte:** Es un recubrimiento formado a base de dispersiones de pigmentos en resinas alquídicas, su propiedad es la de formar un recubrimiento opaco y liso. (Sherwin y Williams, 2005; Sinche, 2009).
  
- d) **Resina:** Sustancia que sufre un proceso de polimerización, o secado, del cual se obtiene un producto sólido que se utiliza para recubrir la superficie sobre la cual se aplica. Se tienen dos tipos de resina: natural y sintética.
  - Las resinas naturales son aquellas que provienen de secreciones de algunas plantas o insectos y presentan ciertas propiedades tales como: termoplaticidad, insolubilidad en agua, no conductoras de electricidad e inflamabilidad.
  - Las resinas sintéticas se obtienen mediante procedimientos químicos y poseen propiedades similares a las resinas naturales (Sinche, 2009).

- e) **Pintura:** Es un producto líquido que contiene pigmentos en su composición y es capaz de transformarse en una película sólida y opaca después de haber sido aplicada sobre la superficie a la cual se adhiere, proporcionando características decorativas o de protección (González, 2007; ISO 4618-1, 1998; Salinas, 2004).

#### 1.4.2 PINTURAS

El método de protección anticorrosiva más empleado, debido al costo relativamente bajo, a sus diferentes características, a su sencilla aplicación y facilidad de combinación con recubrimientos metálicos es la utilización de pinturas, es por ello que a continuación se profundiza sobre este tema.

Las pinturas están formadas por una fase continua denominada matriz o vehículo, y una fase discontinua formada por un conjunto de partículas (pigmentos, cargas, extendedores, etc.) dispersas en la matriz (Morcillo *et al.*, 2002).

- a) **Fase continua:** Es la fase líquida de la pintura y está formada por un solvente y un agente aglutinante.

- **Ligante:** Sustancia macromolecular que constituye la base para la formación de la película de pintura y su función es adherir la pintura a la superficie sobre la cual se la aplica. Como material ligante se utilizan resinas cuya composición química depende del uso que se le vaya a dar (Salinas, 2004; Sinche, 2009).
- **Solvente:** Es el medio que permite la aplicación de la pintura, ya que regula su viscosidad y se evapora durante el proceso de secado (Sherwin y Williams, 2005; Sinche, 2009).

- b) **Fase discontinua:** Está formada por:

- **Pigmentos:** Son partículas sólidas de naturaleza orgánica o inorgánica que se encuentran dispersas en la matriz y cuyo fin es de proporcionar

color, durabilidad y protección a la pintura. Como ejemplos se tiene en dióxido de titanio, óxido de hierro, etc (Morcillo *et al.*, 2002).

- **Extendedores:** Son partículas irregulares de material inorgánico que se encuentran dispersas en la matriz. Sus funciones son brindar mayor consistencia y resistencia a la pintura, así como también regular el brillo. Como ejemplo se tiene el carbonato de calcio (Salinas, 2004; Sherwin y Williams, 2005; Sinche, 2009).
- **Aditivos:** Son elementos o componentes que regulan propiedades específicas de las pinturas. Pueden actuar como secantes, catalizadores, viscoreductores, etc. (Salinas, 2004).

#### **1.4.2.1 Durabilidad de las pinturas**

El tiempo durante el cual un revestimiento cumple de manera satisfactoria con sus funciones, permite determinar su calidad y su adecuada acción sobre un determinado material.

Los factores que determinan la durabilidad de las pinturas son los siguientes: (Morcillo *et al.*, 2002; Salinas, 2004)

- **Naturaleza y composición del recubrimiento:** Se refiere al tipo de resina, solvente y aditivos utilizados, cuya selección depende del uso que se vaya a dar al recubrimiento.  
La degradación ambiental del recubrimiento se debe a la acción de factores como: radiación solar, oxígeno, agua y contaminantes atmosféricos.
- **Naturaleza y preparación del sustrato:** La naturaleza de la intercara metal/pintura y la adecuada preparación del sustrato (eliminación de impurezas de la superficie y homogeneidad de la misma) determinan el comportamiento del metal pintado y el rendimiento del recubrimiento aplicado.

- Método de aplicación: La película de recubrimiento aplicada debe tener un espesor adecuado y ser homogénea para evitar defectos que disminuyan el rendimiento y durabilidad del recubrimiento.
- Característica del medio donde será expuesto el recubrimiento: Se debe tener en cuenta los valores de pH del medio de exposición para determinar el tipo de recubrimiento a utilizar; así como también las condiciones atmosféricas presentes como luz solar, precipitaciones, temperatura ambiental, entre otros (Schweigger, 2005).
- Espesor del recubrimiento: Influye sobre la característica de la barrera físico-química que protege al sustrato y también en la adherencia del mismo; es por ello que el espesor no debe ser tan delgado para que presente buena protección, ni tan grueso para evitar problemas de adherencia (Morcillo *et al.*, 2002).

A continuación se describen las principales fallas que presenta una pintura cuando empieza a deteriorarse (Morcillo *et al.*, 2002; Sinche, 2009).

- Disminución del brillo: Es una de las principales fallas que presenta cuando se inicia el proceso de deterioro de la pintura, esto se debe a la formación de grietas en la superficie de la misma.
- Pulverización o “chalking”: se refiere a la pérdida de pigmento, lo cual en niveles altos de deterioro provocan el cambio de tonalidad del color de la pintura (tonalidad más clara).
- Cuarteamiento y agrietamiento: se refiere a fenómenos denominados “checking y cracking”, los cuales se manifiestan por medio de cuarteamiento o rompimiento de la película de pintura, esto a causa de la expansión o contracción brusca de la película o por cambios de temperatura.

- Ampollamiento: se refiere a la formación de ampollas en la película de pintura debido a la pérdida de adherencia de la misma, a causa del ingreso de humedad.

Para evaluar el grado de deterioro de la pintura se utilizan las siguientes normas:

- ASTM D 610: Determinación del grado de corrosión
- ASTM D 660: Determinación del grado de cuarteamiento o “checking”
- ASTM D 661: Determinación del grado de agrietamiento o “cracking”
- ASTM D 714: Determinación del grado de ampollamiento

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1 CONSIDERACIONES PREVIAS**

El presente estudio se realizó con el apoyo de la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (CORPAIRE) y del Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros de la Escuela Politécnica Nacional (CIAP), y consistió en seleccionar 7 zonas de la ciudad de Quito que presentan condiciones atmosféricas características y alta carga de contaminantes, en las cuales se expusieron durante un año, cuatro de los materiales metálicos más utilizados (acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio). Esto permitió obtener información de la influencia que presentan los contaminantes y condiciones atmosféricas sobre la corrosión de los metales de estudio. También fue posible realizar una comparación entre las estaciones de estudio que tiene CORPAIRE desde hace 6 años aproximadamente, con las nuevas estaciones instaladas para el presente trabajo, a fin de determinar si las zonas seleccionadas son de igual importancia para continuar su monitorización.

De acuerdo con los valores de corrosión obtenidos para cada uno de los metales estudiados, se realizó la evaluación de dos tipos de recubrimientos anticorrosivos, con lo cual se determinó su comportamiento de protección sobre cada uno de los metales (acero al carbono, acero galvanizado, aluminio y cobre) y en cada una de las estaciones de ensayo.

### **2.2 OBJETIVOS**

#### **2.2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Determinar el grado de corrosión de: acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado, provocado por las condiciones atmosféricas de la ciudad de Quito, en las zonas de mayor contaminación atmosférica.

## 2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los datos de contaminación atmosférica proporcionados por la Red de Monitorización de CORPAIRE, y determinar los sitios de ensayo para esta investigación.
- Cuantificar el deterioro de los metales utilizados, mediante el uso de las normas ASTM e ISO.
- Caracterizar los productos de corrosión obtenidos para cada material metálico, mediante difracción de rayos X, microscopía óptica y microscopía electrónica.
- Relacionar el grado de corrosión de los metales con los niveles de contaminación atmosférica y con los factores meteorológicos.
- Establecer propuestas de protección anticorrosiva para cada metal en cada sitio de ensayo y evaluar las mismas.

## 2.3 MATERIALES

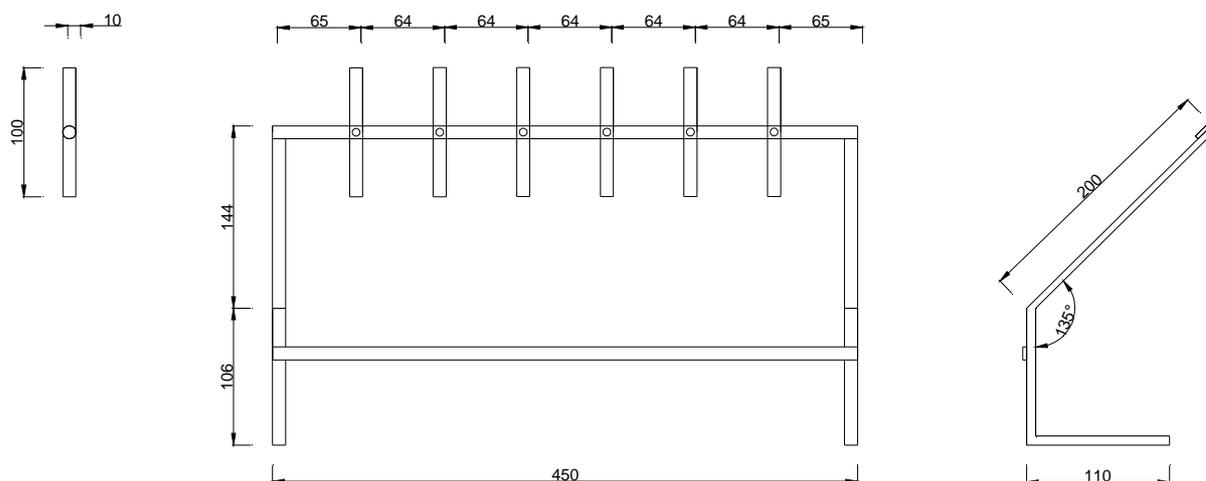
### 2.3.1 ESTRUCTURAS PORTAPROBETAS

Para la realización del presente proyecto se elaboraron siete muebles portaprobetas de acero al carbono, cada uno con capacidad para 12 probetas (3 de cada material).

Cada mueble consiste en una estructura de 450 mm de largo y 250 mm de alto, con 6 brazos laterales (platinas) que sobresalen a cada lado para la colocación de las probetas, y dos brazos de soporte con los que se aseguró el mueble a la base en donde fue colocado. La estructura que se muestra en la Figura 5 posee una inclinación de 45° como dicta la norma ASTM G 07 y fue sometida a un recubrimiento con pintura anticorrosiva para evitar su deterioro.

Las platinas son partes móviles que están sujetas a la estructura mediante pernos M6 de cabeza hexagonal. Cada probeta está sujeta a una de las platinas mediante un perno de acero inoxidable M6 de 30 mm de largo, 6 mm de diámetro

de rosca y 9.9 mm de diámetro de cabeza en el centro del borde superior. De acuerdo con la norma ASTM G 50 se debe evitar la formación de pilas galvánicas que aceleren el proceso de corrosión, para lo cual se utilizó caucho como material aislante entre la probeta y el perno de acero.



**Figura 5.** Dimensiones del pupitre portaprobetas (en mm)

### 2.3.2 PROBETAS METÁLICAS

Las probetas que se utilizaron para el ensayo son de acero al carbono, cobre, acero galvanizado y aluminio, de dimensiones 40 mm de ancho, 100 mm de largo y un espesor de 0,9 mm para el acero al carbono y acero galvanizado, y 1 mm para el cobre y aluminio de acuerdo con la norma ASTM G 92.

Previa la exposición de las probetas metálicas, se realizaron los siguientes pasos:

- a) Se seleccionaron las probetas en mejor estado (sin óxido, sin rayones ni golpes).
- b) Se hizo una perforación de 6 mm de diámetro en el borde superior de cada probeta.
- c) Se realizó un desengrasado superficial de las mismas mediante el uso de thinner.

- d) Se guardó cada una de las probetas en fundas plásticas “zip lock” para evitar cualquier contaminación previa a la exposición de las mismas.

En la Figura 6, se muestra un ejemplo de las placas metálicas utilizadas.



**Figura 6.** Placas rectangulares de 40x100 mm de acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono

### 2.3.3 RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS

#### 2.3.3.1 Recubrimiento de cinc

Para determinar la capa de cinc presente en las placas de acero galvanizado utilizadas en el presente proyecto, se empleó el método descrito en la norma ASTM A-90 “Standard Test Method for Weight of Coating on Iron and Steel Articles with Zinc or Zinc-Alloy Coatings”. A continuación se mencionan los pasos a seguir para la determinación de la capa de cinc sobre la base de acero.

- Se pesaron dos de las placas de acero galvanizado.
- Se las colocó en una solución de HCl (1:1), aproximadamente 40 segundos, donde se observó el desprendimiento de burbujas a causa de la reacción catódica.
- Se retiraron las placas de la solución de HCl (1:1).
- Se lavó las placas con abundante agua fría para retirar el exceso de ácido.
- Se las sumergió en agua caliente.

- Se las secó con toallas de papel para posteriormente registrar su peso. (La masa perdida representa la cantidad de cinc depositado sobre la superficie metálica de acero) (ASTM A-90, 1995; Morcillo *et al.*, 2002).

### 2.3.3.2 Recubrimientos con pinturas

Para el caso del acero al carbono que es el metal más fácilmente corrosible, se aplicó una capa de pintura anticorrosiva denominada “Antiox Convertidor 901 M” por la empresa “Pinturas Cóndor”. La composición se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Composición de pintura Antiox Convertidor 901 M de “Pinturas Cóndor”

<b>Materia prima</b>	<b>% en peso</b>
Resina alquídica media en aceite de soya al 40% de sólidos	36,00
Pigmentos (Carbonato de calcio, silicato de magnesio, sílica y pigmentos de color)	35,08
Pigmentos anticorrosivos (Fosfato de cinc)	0,85

(Almeida, 2011)

**Nota:** la formulación de la pintura la realizó la empresa “Pinturas Cóndor”

Para las probetas de acero galvanizado, aluminio y cobre, se utilizó una pintura primaria (resina vinílica de secado rápido) denominada “Vari-Primer 615 SM”, la cual proporciona una acción protectora y antioxidante al metal, así como también una base para que la película de pintura se adhiera de mejor manera sobre la superficie del metal. A continuación se presenta la composición de la resina, pero no sus porcentajes, debido a que no fueron proporcionados por la empresa “DUPONT”. (Expocolor, 2007; TITAN, 2011).

La resina Vari-Primer 615 SM, está compuesta por:

- Materia prima
- Resina butiral-polivinílica
- Pigmentos de color

- Pigmentos anticorrosivos (tetraoxocromato de cinc)
- Solvente
- Agua

### 2.3.3.3 Preparación de las placas y aplicación de las pinturas

La superficie metálica a la cual se le va a aplicar la película de revestimiento debe estar libre de sustancias que puedan provocar un fallo prematuro. Para ello se debe remover de la superficie las capas de óxido, así como también la grasa o aceite que impiden la adherencia de la pintura y del esmalte.

La limpieza de la superficie consiste en los siguientes pasos:

- a) Eliminación del óxido mediante limpieza mecánica (cepillos de cerdas plásticas).
- b) Lijado de la superficie con lija de agua # 240.
- c) Limpieza y desengrasado con thinner.
- d) La aplicación de los recubrimientos se realizó con pistola de proyección a 40 lb/pulg<sup>2</sup> de presión. El espesor de la pintura es de 1,0 a 2,0 mils y de la resina de 0,8 a 1,0 mils (mils = 25,4  $\mu$ m).

En la Figura 7, se muestra un ejemplo de las placas de acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono recubiertas con las pinturas mencionadas anteriormente.



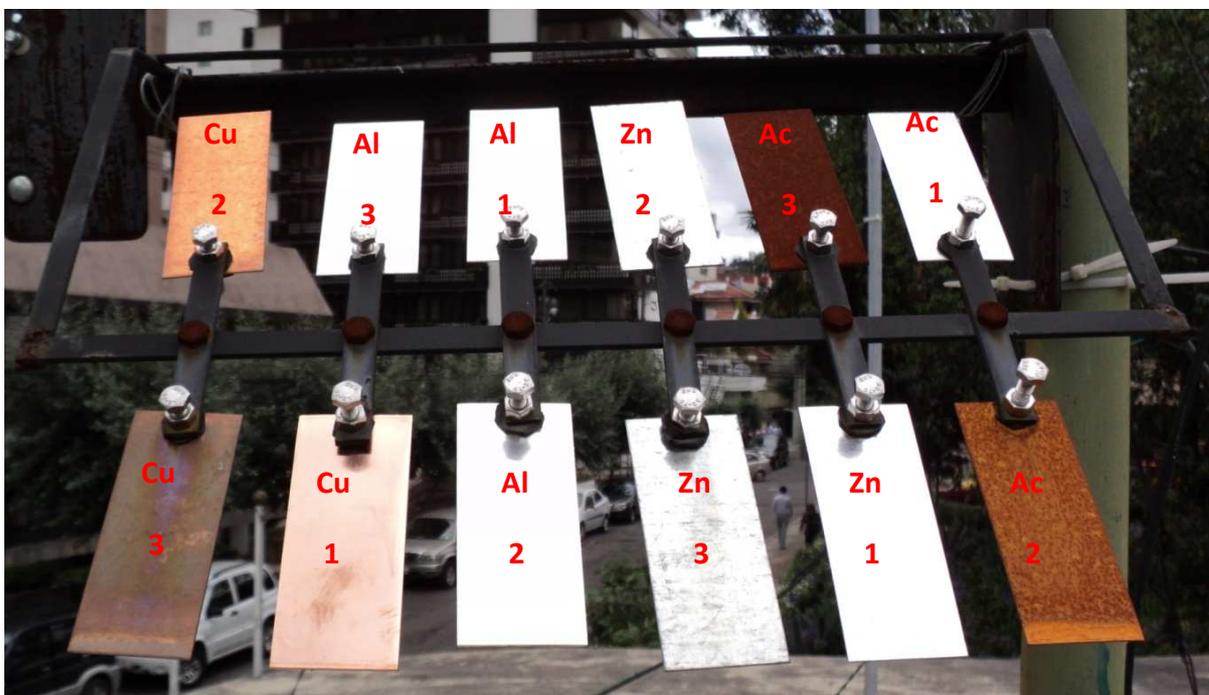
**Figura 7.** Placas rectangulares de 40x100 mm de acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio con recubrimientos de pintura

## 2.4 MONTAJE Y UBICACIÓN DE ESTRUCTURAS Y PROBETAS

### 2.4.1 MONTAJE DE ESTRUCTURAS Y PROBETAS

Las estructuras o pupitres portaprobetas fueron construidos con las especificaciones mencionadas anteriormente en el subcapítulo 2.3.1, y colocados en las estaciones previamente seleccionadas, en lugares en donde CORPAIRE posee estaciones automáticas de monitorización.

La instalación de los pupitres y probetas se realizó el mes de Octubre del año 2009. Las probetas fueron colocadas en los pupitres como se muestra en la Figura 8, donde el número 1 corresponde a aquellas probetas cuyo tiempo de exposición es de aproximadamente 1 mes, el número 2 para las probetas cuyo tiempo de exposición es de 6 meses, y el número 3 para aquellas cuyo tiempo de exposición es de 12 meses.



**Figura 8.** Distribución de las probetas metálicas en el portaprobetas de la estación “Mariscal”

Las probetas cuyo tiempo de exposición es de aproximadamente 1 mes se las denomina probetas flotantes ya que son retiradas y reemplazadas por otras del mismo metal durante un período de 12 meses, para así determinar el grado de corrosión en función del tiempo en cada una de las estaciones y para cada uno de los materiales de ensayo.

#### **2.4.2 SELECCIÓN DE LAS ESTACIONES DE ENSAYO PARA LA UBICACIÓN DE ESTRUCTURAS Y PROBETAS**

Debido a que la ciudad de Quito presenta diferentes condiciones climáticas a lo largo de su extensión, la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (CORPAIRE) ha visto la necesidad de colocar estaciones de monitorización en lugares estratégicos que permitan obtener datos atmosféricos y de contaminación característicos de cada zona. Es por esta razón que mediante los datos obtenidos de las estaciones automáticas de monitorización de CORPAIRE, se han seleccionado los lugares en donde la concentración de contaminantes ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$  y material particulado) se encuentra entre los siguientes valores para el año 2009 (CORPAIRE, 2009).

- Concentración de  $\text{SO}_2$ : Entre 11 y 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Concentración de  $\text{NO}_2$ : Entre 20 y 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Concentración de  $\text{O}_3$ : Entre 20 y 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Concentración de material particulado : Entre 1 y 2  $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot 30$  días

De acuerdo a los valores presentados y a la ubicación de dispositivos de monitorización pasiva que posee CORPAIRE, se seleccionaron siete estaciones de ensayo que son: Carcelén, Kennedy, Cruz Loma, Mariscal, Necochea, La Marín y Quitumbe.

En la Figura 9 se presenta un mapa de la ciudad de Quito con la ubicación de las estaciones de ensayo en forma general. Mientras que en el Anexo I se observa la ubicación específica de cada una de ellas.



**Figura 9.** Ubicación general de las estaciones de ensayo en la ciudad de Quito (A: Cruz Loma, B: Carcelén, C: Kennedy, D: Mariscal, E: La Marín, F: Necochea y G: Quitumbe) (Google maps, 2011)

La descripción de cada una de las estaciones seleccionadas de acuerdo a lo mencionado anteriormente y a los datos de concentración de contaminantes proporcionados por CORPAIRE, se detalla a continuación:

- a) **Estación Carcelén:** Se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Quito; en la ciudadela Carcelén, sobre la terraza de un domicilio ubicado entre las calles Francisco del Campo y Alonso López. Debido a la presencia de industrias cercanas al sector y al tránsito vehicular, se tiene una concentración significativa de  $\text{SO}_2$  ( $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el año 2009), además de la presencia de  $\text{O}_3$  que posiblemente influyen en el proceso corrosivo de los metales expuestos.
- b) **Estación Kennedy:** Se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Quito, en el sector de la Rumiñahui, sobre la terraza de un domicilio ubicado en las calles Capitán Alfonso Yépez y Miguel Zambrano, detrás de la pista del Aeropuerto “Mariscal Sucre”. Este lugar no presenta concentraciones

significativas de contaminantes ( $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) ya que no se tiene presencia de industrias ni gran afluencia vehicular, pero debido a la cercanía a la pista del aeropuerto se tiene una cantidad importante de material particulado ( $0,3 \text{ mg/cm}^2 \cdot 30$  días para el año 2009) que podría influir en el proceso corrosivo de los metales expuestos.

- c) **Estación Cruz Loma:** Se ubica dentro de las instalaciones del Teleférico de Quito al noroccidente de la ciudad; aproximadamente a 4 000 metros sobre el nivel del mar en la colina denominada Cruz Loma. En este lugar se tiene principalmente la presencia de  $\text{O}_3$  ( $42 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  para el año 2009) como contaminante atmosférico.
  
- d) **Estación Mariscal:** Se encuentra en el sector La Mariscal al norte de la ciudad de Quito, sobre la terraza de la estación de policía del lugar, entre las calles Luis Cordero y Baquerizo Moreno. Debido a la gran cantidad de vehículos que circulan por el sector se tiene una concentración significativa de contaminantes atmosféricos ( $23 \text{ } \mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$ ,  $30 \text{ } \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$  y  $23 \text{ } \mu\text{gO}_3/\text{m}^3$  para el año 2009), los cuales actúan sobre los metales expuestos originando el proceso corrosivo en los mismos.
  
- e) **Estación Necochea:** Se encuentra ubicada en el sector centro de la ciudad de Quito, sobre la terraza de un domicilio ubicado en la Avenida Necochea y calle Roberto Posso. Este sector posee una de las vías con mayor tráfico vehicular especialmente de buses, lo cual ocasiona una fuerte contaminación ambiental, es por ello que se presentan concentraciones considerables de contaminantes atmosféricos ( $19 \text{ } \mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$ ,  $50 \text{ } \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$  y  $18 \text{ } \mu\text{gO}_3/\text{m}^3$  para el año 2009) los cuales causan grandes daños y molestias a la salud humana, así como también procesos corrosivos en los metales expuestos.
  
- f) **Estación La Marín:** Se encuentra en el sector del centro histórico de la ciudad de Quito, donde se ha registrado un valor importante de  $\text{NO}_2$  ( $59 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ). Está colocado en el balcón de una vivienda ubicada en la calle

Pichincha por la que circulan gran cantidad de vehículos, además existen varias actividades comerciales.

**g) Estación Quitumbe:** Está ubicada en la Avenida Morán Valverde y calle Rumichaca al sur de la ciudad de Quito, en la parte lateral externa de un aula de la “Escuela Quitumbe”. En este sector se tiene la presencia de fábricas, así como también de edificios residenciales; pero la importancia de la selección de este lugar radica en la afluencia de circulación vehicular, tanto de vehículos livianos como pesados, así como también la emanación de gases provenientes de las industrias aledañas y el reciente crecimiento de la zona urbana en el lugar.

## 2.5 CUANTIFICACIÓN DEL GRADO DE CORROSIÓN

Para poder cuantificar el grado de corrosión que ha sufrido un material se tienen varias técnicas, las cuales dependen de factores como tiempo, inversión económica, tipo de material, entre otros. Algunas de las técnicas utilizadas para este fin se las menciona a continuación:

- Cambio en las dimensiones de la pieza.
- Pérdida de peso en la pieza.
- Cambio en las propiedades mecánicas de la pieza.
- Determinación de las características electroquímicas.

Para el desarrollo de este proyecto la técnica que se utilizó fue la pérdida de peso de los materiales expuestos. Ésta es una de las técnicas más utilizadas debido a su eficacia y sencillez, y consiste en exponer una pieza del material de ensayo al ambiente de prueba durante un período determinado para después de culminado ese tiempo, evaluar la cantidad de material que se pierde por la corrosión.

Antes de pesar las probetas se realizó una evaluación que consistió en observar detalladamente el aspecto de la superficie metálica de cada probeta mediante el uso de un microscopio óptico Thomas Scientific 1230CM con sistema de iluminación Fiber Lite MI-150 Dolan Jenner Industries, así como también la

limpieza de las mismas en base a la norma ASTM G1. Para ello se retiró la herrumbre formada y los productos de corrosión mediante el uso de un cepillo con cerdas de plástico, luego se procedió a realizar la limpieza química (eliminación de materiales en la superficie del metal por disolución con algún agente químico) como se describe a continuación:

- Acero al carbono: Se utilizó una solución preparada con 500 ml de ácido clorhídrico (HCl) de gravedad específica 1,19, y 3,5 g de hexametilén tetramina (inhibidor) aforada a 1 000 ml con agua destilada; el material se sumerge en esta solución durante 10 minutos a 25°C (ASTM G1, 2003).
- Acero galvanizado: Se utilizó una solución de ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) al 5% (V/V), en la cual se introduce el material durante 5 minutos a temperatura ambiente (ASTM G1, 2003).
- Aluminio: Se utilizó una solución de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) de gravedad específica 1,42, en la cual se introduce el material durante 5 minutos a 20 o 25°C (ASTM G1, 2003).
- Cobre: Se utilizó una solución preparada con 100 ml de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) de gravedad específica 1,84, aforada a 1 000 ml con agua destilada. El material se sumerge en esta solución durante 3 minutos a 20 o 25°C (ASTM G1, 2003).

Después de realizada la limpieza de los metales con las soluciones químicas, se los enjuagó con abundante agua corriente y agua destilada, posteriormente se los secó con aire caliente y se pesó.

## **2.6 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN**

Debido a que el acero al carbono es el único de los metales de estudio del que se obtuvieron productos de corrosión en forma de polvo o herrumbre, se realizó una

caracterización de los mismos mediante dos técnicas de evaluación que son: microscopía electrónica de barrido por EDS y difracción de rayos X.

### **2.6.1 EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA POR EDS**

Esta técnica se utilizó para determinar de forma cualitativa y cuantitativa los elementos químicos presentes en la herrumbre obtenida de las probetas de acero al carbono expuestas durante 12 meses a la atmósfera en cada una de las estaciones de ensayo.

Este análisis se realizó en el “Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional”, y consistió en colocar parte de la herrumbre obtenida después de la limpieza mecánica de las placas de acero al carbono en el porta muestras de la cámara de vacío del microscopio electrónico (marca TESCAN, modelo VEGA III LMU); posteriormente se escogió una zona de la muestra para realizar el análisis mediante dispersión de energía por rayos X (EDS) de la cual se obtuvo un espectro, el mismo que presenta la identificación y análisis cualitativo y cuantitativo de los elementos químicos presentes en la muestra (Adabache *et al.*, 2009).

### **2.6.2 EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN MEDIANTE DIFRACCIÓN DE RAYOS X**

Esta técnica se utiliza para la identificación de estructuras cristalinas y debido a su eficacia, rapidez y simplicidad es una de las más utilizadas en varios campos de la ciencia.

El análisis de difracción de rayos X se realizó en el “Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional”, y consistió en colocar una muestra de la herrumbre obtenida de las placas de acero al carbono en el portamuestras del difractómetro D8 ADVANCE, luego de ello, la muestra es irradiada por un haz

monocromático de rayos X que se dispersan a través de los cristales de la muestra obteniéndose información en forma de picos de difracción o difractograma que relaciona el porcentaje de intensidad del rayo incidente en función del ángulo de barrido  $2\theta$ ; para ello se utiliza el programa “Diffrac plus” el cual permite obtener la información cualitativa y cuantitativa de los compuestos presentes. Los difractogramas obtenidos son comparados con difractogramas estándares para determinar la presencia de los compuestos químicos (oxihidróxidos de hierro) presentes como: goethita, akaganeita, magnetita y lepidocrocita.

## **2.7 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES METEOROLÓGICOS Y DE CONTAMINACIÓN**

### **2.7.1 FACTORES METEOROLÓGICOS**

Los factores meteorológicos como temperatura, presión y humedad relativa fueron proporcionados por las redes automáticas de monitorización atmosférica de CORPAIRE, las cuales se ubican en 6 zonas de la ciudad de Quito que son: Cotocollao, Carapungo, Belisario, El Camal, Tumbaco y Los Chillos (CORPAIRE, 2009).

A parte de los factores meteorológicos mencionados, otro factor que recibe especial importancia es el tiempo de humectación, el cual se lo determinó mediante la suma de las horas en que las superficies metálicas permanecieron en condiciones de humedad relativa mayor al 80% y temperatura mayor que 0°C durante el período de exposición.

### **2.7.2 FACTORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

La información de contaminantes atmosféricos ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  y material particulado) se la obtiene mediante estaciones de monitorización automáticas y

manuales que CORPAIRE posee en 9 zonas de la ciudad de Quito que son: Cotocollao, Carapungo, Belisario, Jipijapa, El Camal, Centro, Guamaní, Tumbaco y Los Chillos, en las cuales se tienen analizadores que proporcionan la información requerida (concentración de contaminantes); así como también, muestreadores activos semiautomáticos que permiten determinar la concentración de material particulado  $PM_{10}$  (partículas menores a  $10 \mu m$ ) y sensores de monitorización pasiva que se encuentran instalados sobre el techo de cada una de las estaciones como se muestra en la Figura 10 (CORPAIRE, 2009).



**Figura 10.** Sensor de monitorización pasiva, estación Quitumbe

## **2.8 EVALUACIÓN DEL MÉTODO DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA**

Para las placas de acero al carbono recubiertas con pinturas “Antiox Convertidor 901 M”; así como también para las placas de aluminio, cobre y acero galvanizado, recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”, expuestas durante seis meses en cada una de las estaciones de ensayo, se realizó el análisis mediante el uso de normas ASTM, las cuales permiten evaluar estas superficies con el uso de estándares visuales. A continuación se describen las normas utilizadas.

### 2.8.1 NORMA ASTM D 610 “Evaluación del grado de corrosión en superficies de acero pintadas”

Esta norma evalúa y cuantifica el grado de corrosión de superficies de acero pintadas, mediante la utilización de imágenes estandarizadas. El método consistió en comparar visualmente la superficie de estudio, con estándares fotográficos que se presentan en el Anexo XI, y con ello determinar el porcentaje de área corroída.

En la Tabla 5 se presenta el grado de corrosión y la descripción en base a la norma ASTM D 610.

**Tabla 5.** Escala y descripción del grado de corrosión según la norma ASTM D 610

<b>Grado de Corrosión</b>	<b>Descripción</b>
10	Sin corrosión, o superficie corroída inferior al 0,01%
9	Corrosión mínima, superficie inferior al 0,03%
8	Pequeñas manchas aisladas, superficie corroída menor al 0,1%
7	Superficie corroída inferior al 0,3%
6	Manchas extensas y superficie corroída inferior al 1%
5	Corrosión extendida al 3% del área
4	Corrosión extendida al 10% del área
3	Aproximadamente una sexta parte del área corroída
2	Aproximadamente una tercera parte del área corroída
1	Aproximadamente la mitad del área corroída
0	Aproximadamente 100% del área corroída

(ASTM D 610, 2008)

### 2.8.2 NORMA ASTM D 660 “Evaluación del grado de cuarteamiento en pinturas expuestas al exterior”

Evalúa el grado de “checking” que se refiere al cuarteamiento que presenta una película de pintura sin que su profundidad alcance la superficie metálica.

### 2.8.3 NORMA ASTM D 661 “Evaluación del grado de agrietamiento en pinturas expuestas al exterior”

Esta norma evalúa el grado de “cracking” que se refiere a la ruptura de una película de pintura, la cual atraviesa el film y permite observar la base del metal pintado. El agrietamiento puede, o no, producirse a partir del cuarteamiento.

Las dos últimas normas utilizan estándares fotográficos que se muestran en el Anexo XII, los cuales permiten evaluar las fallas de cuarteamiento y agrietamiento de una pintura mediante el uso de una escala numérica que va de 10 a 0, en donde 10 significa que no hay éstas fallas presentes y 0 significa cuarteamiento o agrietamiento total del film de pintura.

En la Tabla 6 se presenta la escala y la especificación de estas fallas.

**Tabla 6.** Escala y especificación del cuarteamiento y agrietamiento de una pintura, según las normas ASTM D 660 y D 661

Escala	Especificación
2	Muy alto
4	Alto
6	Medio
8	Bajo

(ASTM D 660, 2005; ASTM D 661, 2005)

### 2.8.4 NORMA ASTM D 714 “Evaluación del grado de ampollamiento e pinturas expuestas al exterior”

Esta norma utiliza estándares fotográficos que se muestran en el Anexo XIII para evaluar el grado de formación de ampollas en una película de pintura aplicada sobre una superficie. El ampollamiento se evalúa mediante el tamaño y la frecuencia de las ampollas formadas.

Los tamaños de ampollas se determinan con una escala numérica del 10 al 0, en donde 10 indica que no hay ampollamiento, 8 indica ampollas pequeñas fácilmente detectables por el ojo, 6, 4 y 2 indican tamaños progresivamente mayores de ampollas y 0 indica ampollamiento total; mientras que la frecuencia de ampollamiento se determina mediante 4 niveles, los cuales se codifican según la Tabla 7.

**Tabla 7.** Frecuencia de ampollaje en pinturas según la norma ASTM D 714

<b>Frecuencia</b>	<b>Símbolo</b>
Denso	D
Medio Denso	MD
Medio	M
Poco	F

(ASTM D 714, 2009)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 FACTORES METEOROLÓGICOS

Los datos de temperatura, humedad relativa y precipitación obtenidos de las estaciones de monitorización de CORPAIRE se los empleó como se indica en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Estaciones de monitorización atmosférica empleadas para las estaciones de ensayo

Estación de monitoreo ambiental	Estación de ensayo
Carapungo	Carcelén
Cotocollao	Kennedy
Belisario	Mariscal
El Camal	Necochea La Marín Quitumbe

En el caso de la estación Cruz Loma, no se cuenta con datos meteorológicos debido a que en la zona y en sus alrededores aún no se han colocado estaciones de monitorización de factores meteorológicos sino únicamente de contaminantes atmosféricos. Tampoco es adecuado aproximar los datos meteorológicos registrados en otras estaciones ya que, debido a la ubicación geográfica en donde se encuentra colocada la estación (Teleférico), las condiciones atmosféricas son muy diferentes a las que se presentan en la zona urbana de la ciudad. Sin embargo, a pesar de no poseer datos meteorológicos, se consideran las características de la zona (altitud y ubicación) para aproximar sus condiciones climáticas a las que se presentan en zonas denominadas “páramos”, ya que se encuentran ubicadas entre 3 400 y 4 800 m.s.n.m. (De Humboldt *et al.*, 2007).

Para las estaciones Necochea, La Marín y Quitumbe se consideran los datos meteorológicos obtenidos de la estación de monitorización de El Camal, debido a que es la única que se encuentra ubicada al sur de Quito y su radio de cobertura

se extiende por varios kilómetros abarcando un amplio rango de medición. Además, los factores meteorológicos considerados no presentan variación significativa dentro del sector centro sur de la ciudad de Quito.

La información meteorológica es recopilada por hora y por día en cada una de las estaciones de monitorización ambiental, por lo que se realizó un manejo de datos para obtener los valores acumulados y promedios de estos factores para el período octubre 2009-septiembre 2010 como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Resumen de datos meteorológicos para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

<b>Estación</b>	<b>Temperatura promedio (°C)</b>	<b>Humedad relativa promedio (%)</b>	<b>Precipitación acumulada (mm)</b>	<b>Tiempo de humectación acumulado (h)</b>
Carcelén	13,53	78,22	612,80	3 750
Kennedy	12,72	77,00	658,18	3 428
Mariscal	13,37	74,51	1 063,60	3 068
Necochea	13,52	73,83	1 227,00	3 082
La Marín	13,52	73,83	1 227,00	3 082
Quitumbe	13,52	73,83	1 227,00	2 819

(CORPAIRE, 2010)

En el Anexo II, se presentan los datos mensuales de cada una de las variables meteorológicas para el período octubre 2009 - septiembre 2010.

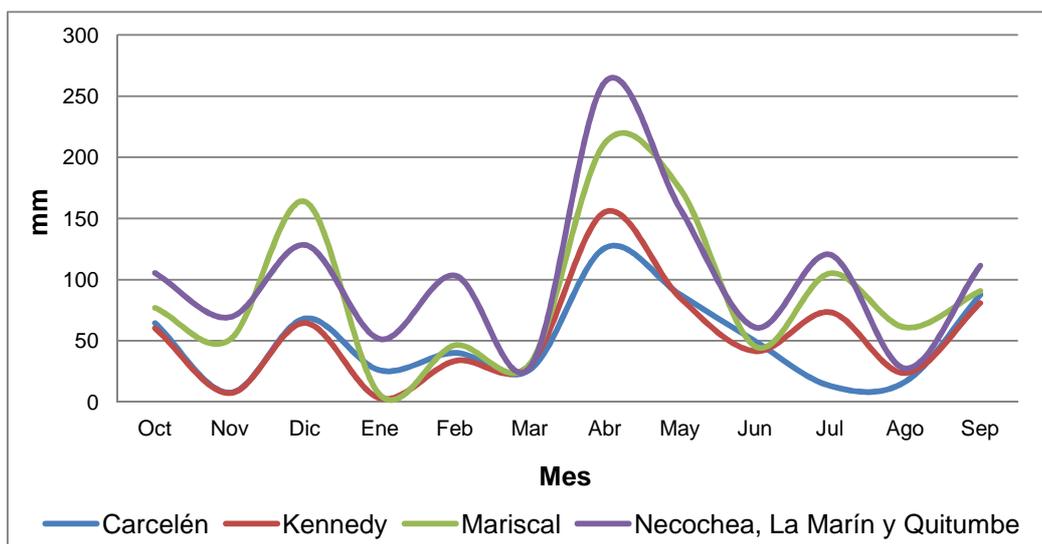
A continuación se realiza un análisis de los datos de factores meteorológicos registrados en cada estación durante el período de ensayo.

### 3.1.1 PRECIPITACIONES

Las precipitaciones es un factor importante en el proceso corrosivo, ya que determinan la cantidad de lluvia que ha caído sobre el material expuesto, la cual

permite un lavado de la superficie del mismo y evita así la adherencia de ciertos contaminantes.

En la Figura 11 se muestra la variación de precipitación en función del tiempo para cada una de las estaciones de ensayo.



**Figura 11.** Precipitación mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

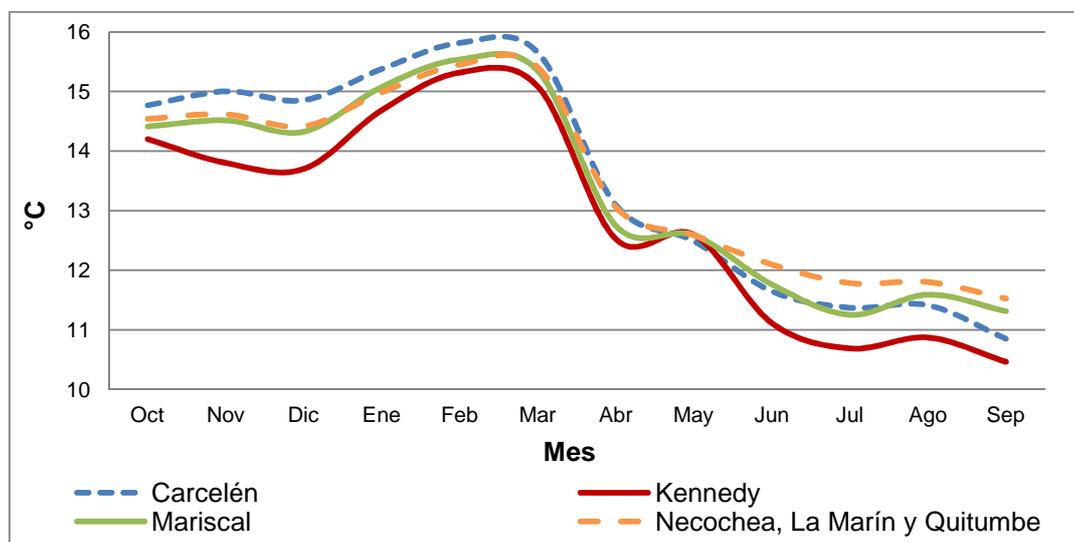
Se observa que la tendencia de las precipitaciones pluviales en todas las estaciones es la misma y que los meses con mayor cantidad precipitación son marzo, abril y mayo del año 2010, que corresponden a los períodos normales de lluvia que se presentan en la región sierra; mientras que en el resto de meses las precipitaciones son moderadas. En el mes de abril, los valores de precipitaciones pluviales registrados son los más altos en todas las estaciones, pues en el año 2010 se presentaron meses de intensa lluvia.

También se observa que las estaciones con mayor cantidad de precipitaciones pluviales durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 son aquellas que se encuentran ubicadas al sur de la ciudad de Quito. Esto debido a que las irregularidades geográficas de la ciudad ubican a este sector en las zonas más altas, denominadas lomas, en donde las precipitaciones así como otros factores meteorológicos (temperatura, humedad, efecto de los vientos y presión atmosférica) varían con respecto a la altura; lo mismo sucede en la estación

Mariscal, la cual se encuentra al centro norte de la ciudad de Quito, en uno de los sectores más altos de esta zona.

### 3.1.2 TEMPERATURA

En la Figura 12 se muestra la variación de la temperatura e función del tiempo para cada una de las estaciones.



**Figura 12.** Temperatura mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

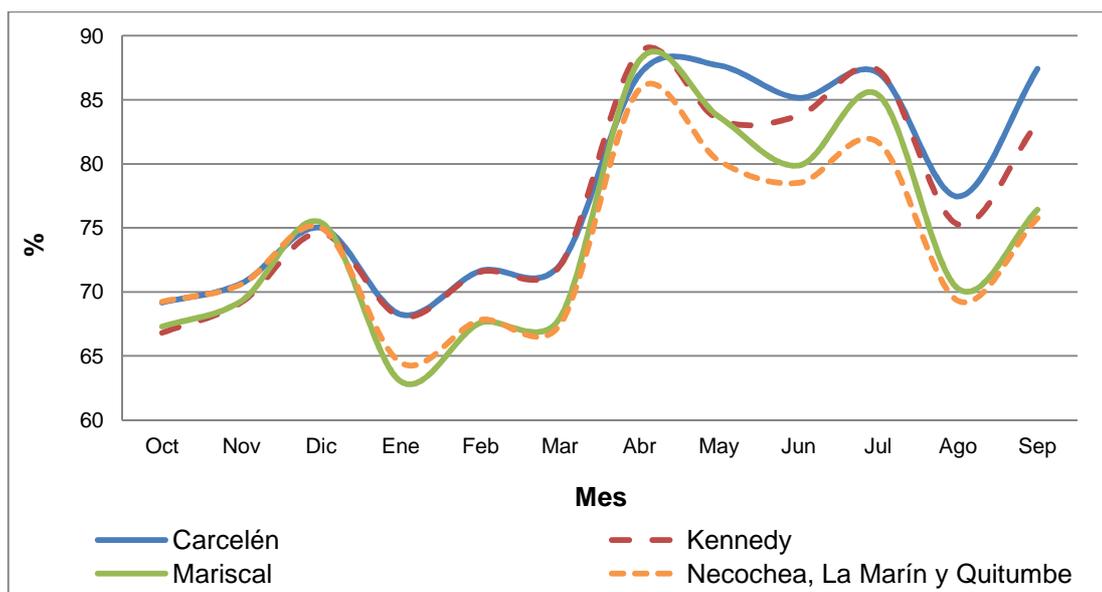
Se observa que el valor de temperatura no presenta variación significativa a lo largo del año de ensayo, pero a partir del mes de abril del año 2010, su valor tiende a disminuir progresivamente hasta alcanzar, en el mes de septiembre del 2010, valores de 11°C aproximadamente. Esto se debe a los intensos períodos de lluvia y frío que soportó la ciudad de Quito durante el segundo semestre del mismo año. La temperatura en la ciudad de Quito en los últimos meses del 2010 disminuyó a tal punto que se registraron valores muy bajos (2°C aproximadamente) atípicos del clima de esta ciudad y de la época.

Se aprecia también que la estación Kennedy es aquella que presenta el menor valor de temperatura a lo largo del período de ensayo; mientras que en el resto de estaciones el valor es similar y mayor que los 13°C, lo cual conjuntamente con la

humedad relativa y los contaminantes presentes propicia el proceso corrosivo. El menor valor de temperatura (8°C aproximadamente) de bería presentar la estación Cruz Loma debido a su ubicación geográfica y a sus características atmosféricas (similares a un páramo de la región andina), pero por la ausencia de datos no se la considera en la Figura 12 (De Humboldt *et al.*, 2007).

### 3.1.3 HUMEDAD RELATIVA

Como se mencionó en el subcapítulo 1.2.1, el porcentaje de humedad relativa es uno de los factores más importantes en el proceso corrosivo por lo que en la Figura 13 se presenta su variación en función del tiempo para todas las estaciones de ensayo.



**Figura 13.** % Humedad Relativa mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

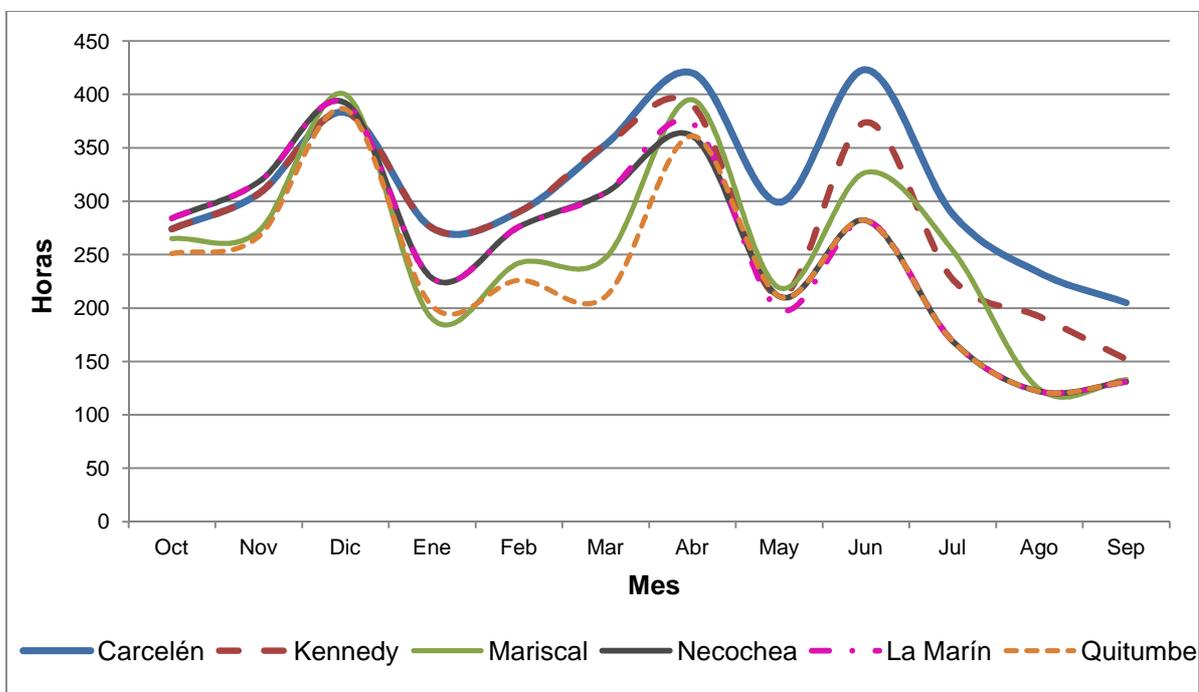
Se observa que en todas las estaciones el porcentaje de humedad relativa sigue la misma tendencia. También es posible observar que durante el primer semestre del año de ensayo los valores promedio se encuentran bajo el 80%, pero desde el mes de marzo del 2010 éstos valores aumentan significativamente debido a que en ese mismo período la temperatura tiende a disminuir y las precipitaciones

pluviales correspondientes a la época invernal que coincidió con aquellos meses del año tienden a crecer, como se observa en las Figuras 11 y 12 respectivamente.

La estación Carcelén es la que presenta el mayor porcentaje de humedad relativa, mientras que las estaciones al sur de la ciudad son las que presentan el menor valor de este parámetro, lo cual no concuerda con los valores de precipitaciones pluviales registrados. Esto quizás se debe a que el porcentaje de humedad relativa no depende únicamente de este factor sino también de otros como temperatura, rocío, etc. que posiblemente son los que predominan en el sector e influyen de manera directa sobre el porcentaje de humedad relativa registrado.

### 3.1.4 TIEMPO DE HUMECTACIÓN

La Figura 14 resume los valores de tiempo de humectación promedio presentados en la Tabla 9 para cada una de las estaciones de ensayo.



**Figura 14.** Tiempo de humectación mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Se observa que la estación Carcelén es la que presenta el mayor número de horas de humectación, igual a 3 750 horas; mientras que la de Quitumbe presenta el menor número (2 819 horas). Para cada una de las estaciones de ensayo, el tiempo de humectación se relaciona directamente con el porcentaje de humedad relativa como se muestra en la Figura 13.

Si se consideran únicamente los valores de tiempo de humectación, se esperaría que las estaciones Carcelén y Kennedy presenten los valores más altos de corrosión y que en el resto de estaciones los valores sean similares.

### 3.2 FACTORES DE CONTAMINACIÓN

Los datos de contaminantes presentes en cada estación de ensayo fueron proporcionados por CORPAIRE y se presentan en el Anexo III. En la Tabla 10 se muestran los valores promedio de concentración de cada contaminante para el período octubre 2009 – septiembre 2010 en cada una de las estaciones.

**Tabla 10.** Promedio de las concentraciones de los contaminantes presentes en cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Estación	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Carcelén	11,23	23,10	27,91	41,48
Kennedy	5,85	26,63	22,81	41,48
Cruz Loma	6,80	9,34	40,72	26,02
Mariscal	22,05	37,55	22,12	25,38
Necochea	7,45	49,85	23,41	43,52
La Marín	9,77	68,95	13,64	43,52
Quitumbe	28,89	31,40	20,81	39,15

(CORPAIRE, 2010)

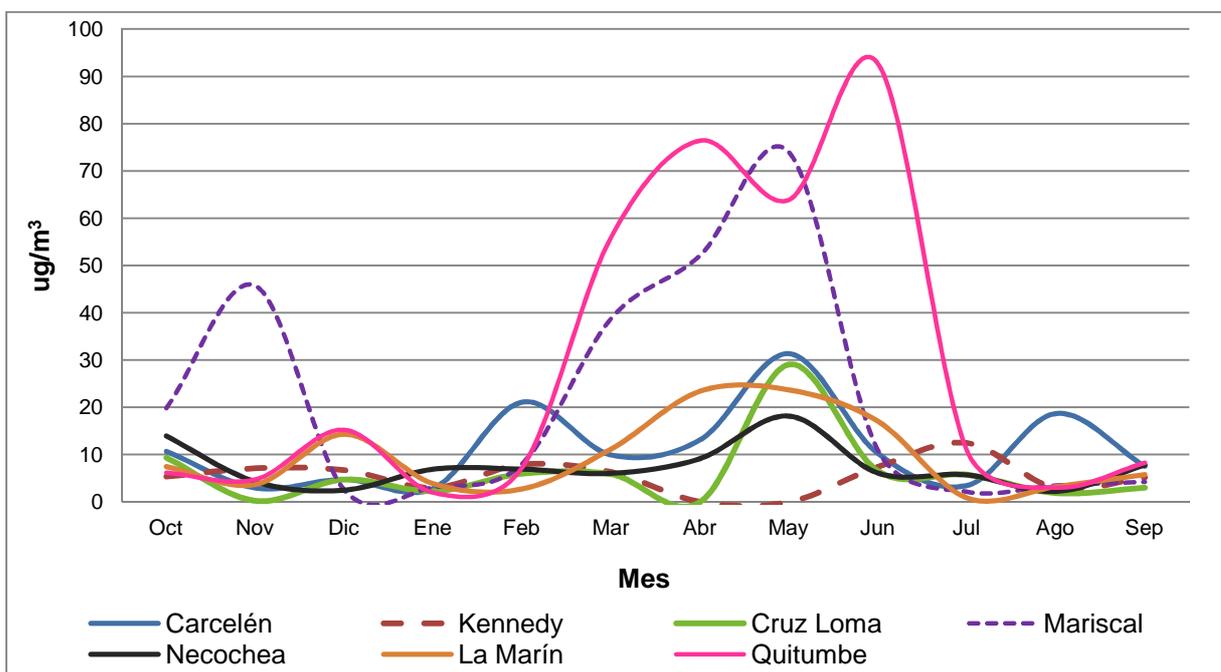
**Nota:** PM<sub>10</sub> se refiere al material particulado de diámetro menor a 10 µm.

A continuación se realiza un análisis de cada uno de los contaminantes atmosféricos presentes en cada estación de ensayo.

### 3.2.1 DIÓXIDO DE AZUFRE

El dióxido de azufre se oxida dando lugar a la formación de ácido sulfúrico, el cual, al disociarse con el agua de la atmósfera forma la denominada lluvia ácida la cual afecta principalmente a metales como el acero al carbono y al cinc.

En la Figura 15 se presenta la concentración de SO<sub>2</sub> en función del tiempo de ensayo para cada una de las estaciones.



**Figura 15.** Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

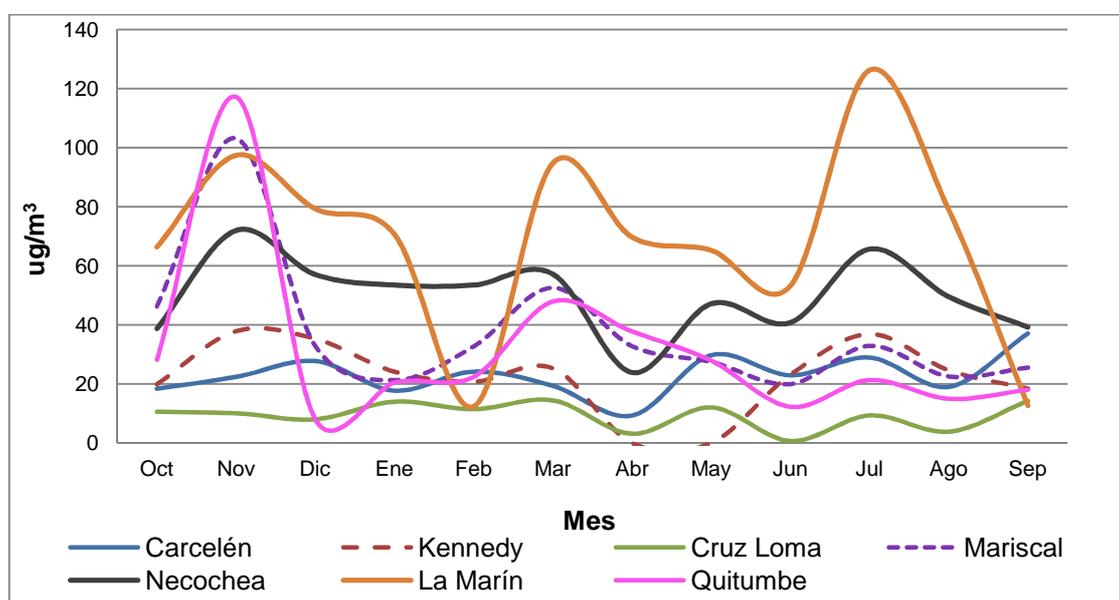
Se observa que las estaciones con mayor concentración de SO<sub>2</sub> son Mariscal y Quitumbe; así también, se observa que durante los meses de marzo, abril y mayo del año 2010 los valores de concentración aumentan en todas las estaciones ya que durante estos meses la cantidad de precipitaciones pluviales también aumentan, lo que origina el depósito de este contaminante en forma de lluvia ácida sobre las superficies expuestas.

También se observa que la estación Quitumbe presenta la mayor concentración promedio de este contaminante (28,89 µg/m<sup>3</sup>), esto se debe a que la estación se encuentra ubicada en un sector de tránsito vehicular elevado, además de la

presencia de industrias como Edesa, Pinturas Cóndor, AYMESA, entre otras, que emanan gran cantidad de gases al ambiente. Se puede notar también que la estación Mariscal presenta un valor elevado de concentración de  $\text{SO}_2$  debido a la gran circulación vehicular del sector, además de la presencia de hoteles, restaurantes y actividad comercial que generan estos niveles de contaminación. Por otro lado, se observa que las estaciones Kennedy y Cruz Loma son aquellas que presentan los valores más bajos de concentración de  $\text{SO}_2$  ya que se encuentran ubicadas en zonas donde el tránsito vehicular es reducido o nulo en caso de Cruz Loma.

### 3.2.2 DIÓXIDO DE NITRÓGENO

En la Figura 16 se presenta la variación de concentración de  $\text{NO}_2$  en función del tiempo de ensayo para cada una de las estaciones.



**Figura 16.** Concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

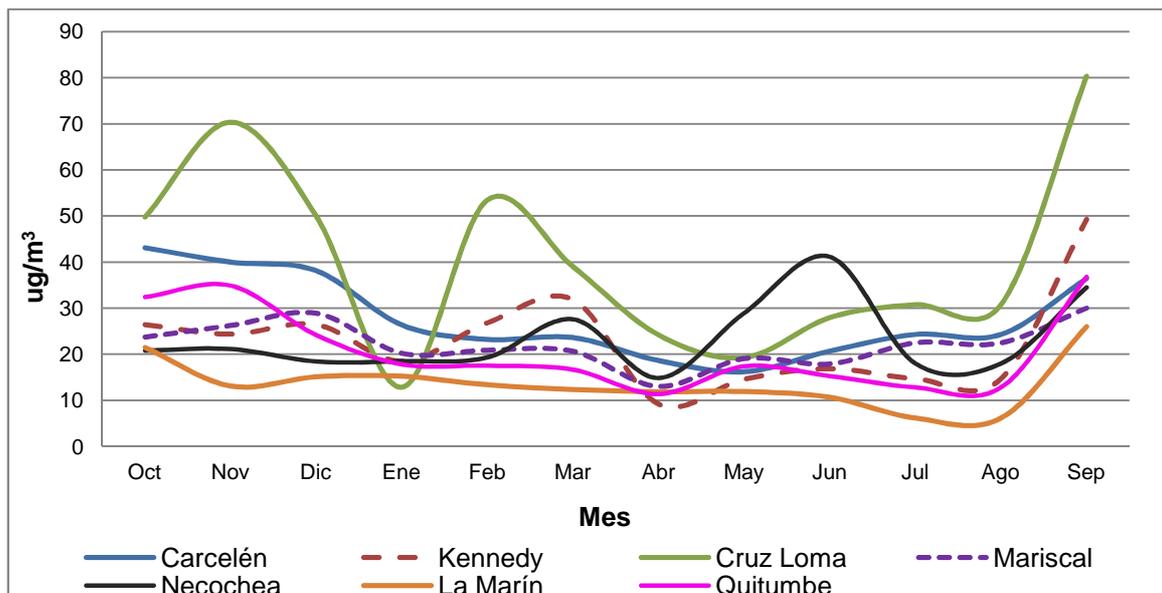
Se observa que los valores de concentración de  $\text{NO}_2$  se elevan durante los meses de noviembre del 2009, marzo, mayo, julio y agosto del 2010; esto se debe también al aumento de precipitaciones pluviales que causan el depósito de estos

contaminantes en forma de lluvia ácida sobre las superficies expuestas. Además, para el mes de noviembre del 2009, una de las causas del aumento de concentración de  $\text{NO}_2$  es la crisis energética que se presentó en el país debido a la reducción del caudal de la central hidroeléctrica de Paute; esto obligó a la utilización de generadores eléctricos en industrias, hospitales, hoteles y otros, ocasionando mayor emanación de gases productos de la combustión del diesel utilizado.

Se aprecia también que las estaciones La Marín, Necochea y Mariscal son las que presentan los valores más altos, lo cual se debe a que el  $\text{NO}_2$  proviene principalmente de procesos de combustión a altas temperaturas, es decir, de motores de combustión interna que son aquellos que se encuentran en los vehículos a gasolina y diesel. Es por esta razón que las estaciones que presentan mayor concentración de este contaminante son aquellas por las cuales se tiene mayor circulación vehicular, especialmente de buses. Así mismo, la estación Cruz Loma presenta el menor valor debido a que en lugar donde se encuentra ubicada no existe circulación vehicular por lo que la poca presencia de  $\text{NO}_2$  puede deberse a incendios forestales o tormentas eléctricas que son muy comunes en la zona (Páez, 2008).

### **3.2.3 OZONO**

En la Figura 17 se muestra la concentración de  $\text{O}_3$  en función del tiempo para cada una de las estaciones de ensayo, y se observa que durante los meses de noviembre del 2009, febrero y marzo del 2010 existe un aumento en la concentración de  $\text{O}_3$  en todas las estaciones. Este comportamiento se debe, en parte, al aumento de radiación solar durante esos meses en los cuales se registró cambios climáticos atípicos de la época.

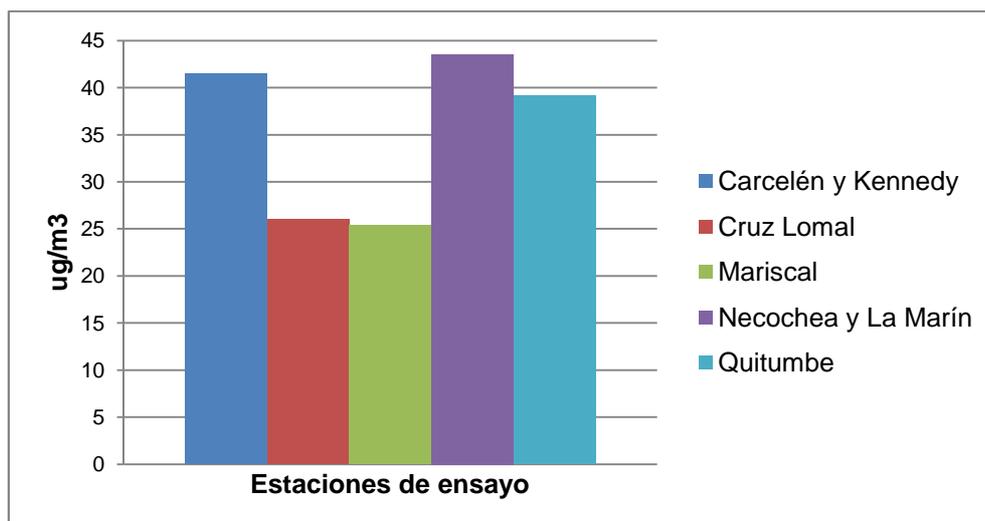


**Figura 17.** Concentración de ozono ( $O_3$ ) mensual para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Se observa que la estación Cruz Loma es la que presenta la mayor concentración de  $O_3$  ( $40,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el año de ensayo. Esto se debe a la ubicación de la misma, la cual se encuentra a una altura aproximada de 4 000 m.s.n.m., en donde se tiene mayor incidencia de radiación ultravioleta que es la que ayuda a la formación del ozono. El resto de estaciones de ensayo presentan valores relativamente parecidos entre sí, a excepción de La Marín que presenta el valor promedio más bajo ( $13,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), esto se debe también a la ubicación de la estación ya que se encuentra en una zona baja de la ciudad.

### 3.2.4 MATERIAL PARTICULADO

En la Figura 18 se presenta la concentración promedio del material particulado para cada estación de ensayo, y se observa que las estaciones Necochea y La Marín son aquellas que presentan los valores promedios más altos de material particulado, esto se debe principalmente a las partículas de hollín que generan los vehículos que utilizan diesel como combustible, los cuales circulan en su mayoría por estos sectores.



**Figura 18.** Concentración de material particulado (PM<sub>10</sub>) promedio para cada una de las estaciones de ensayo durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Para las estaciones Carcelén y Kennedy la elevada concentración de material particulado se debe a la presencia de partículas de polvo provenientes de la erosión del suelo que se presenta en zonas áridas cercanas al lugar donde está ubicada la estación de monitorización, así como también a la presencia de partículas de hollín y de residuos industriales los cuales son depositados en las superficies metálicas a causa del viento. En el caso de las estaciones Cruz Loma y Mariscal, los valores de concentración de este contaminante son los más bajos debido a que no se tienen fuentes de emisión cercanas a las estaciones de ensayo mencionadas.

### 3.3 CORROSIÓN METÁLICA

A continuación se presentan los resultados de penetración de la corrosión atmosférica para el acero al carbono, el acero galvanizado, el cobre y el aluminio, obtenidos para el período de ensayo correspondiente a octubre 2009 – septiembre 2010, así como también los datos de factores meteorológicos y de contaminación para cada estación, los mismos que permiten hacer una relación entre cada uno de estos factores y el proceso corrosivo.

Para cada estación se presentan ejemplos gráficos de un solo mes de exposición para cada material indistintamente y los resultados se presentan en dos partes; la primera que consiste en presentar resultados parciales que corresponden a la monitorización mensual de las placas expuestas y, la segunda, corresponde a resultados generales del año de exposición de cada material respectivamente.

### **3.3.1 ANÁLISIS MENSUAL**

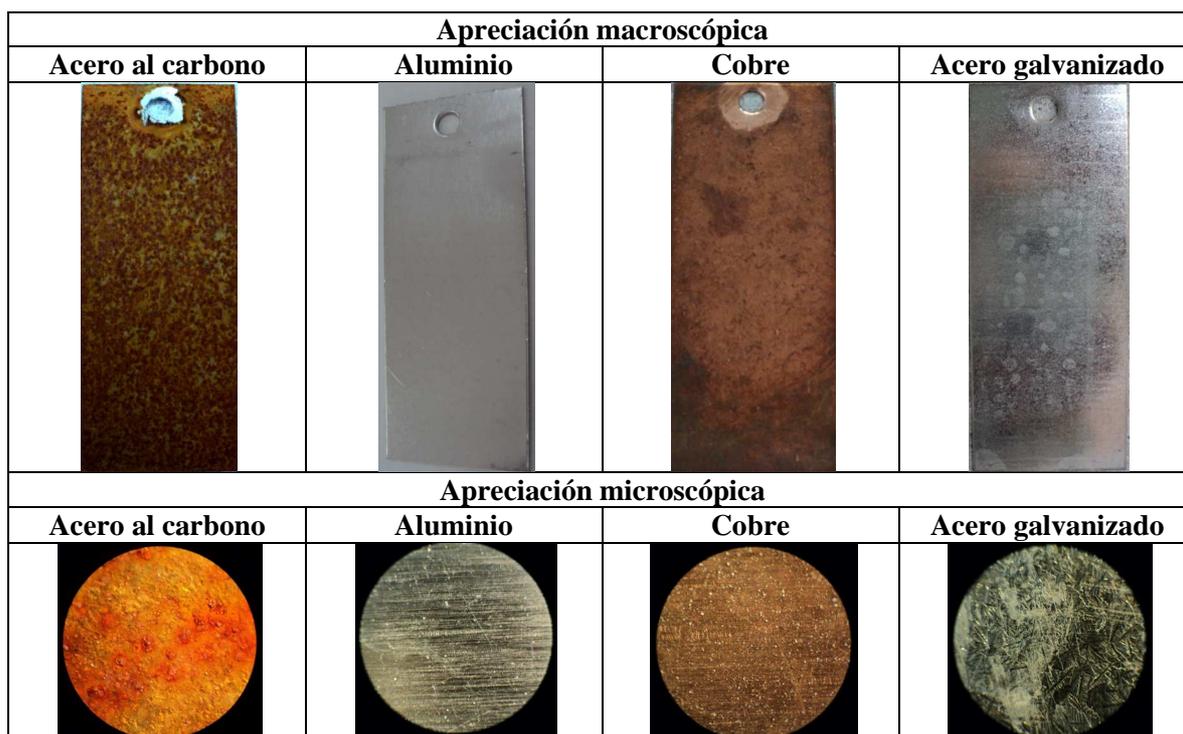
A continuación se presenta el análisis de las placas “flotantes” para cada una de las estaciones. Para ello se utilizan valores mensuales y promedios de los contaminantes atmosféricos, así como también valores mensuales y acumulados de los factores meteorológicos, los cuales se presentan en los Anexos II y III. Además, se presentan las ecuaciones de corrosión para cada una de las estaciones y cada uno de los materiales.

#### **3.3.1.1 Estación Carcelén**

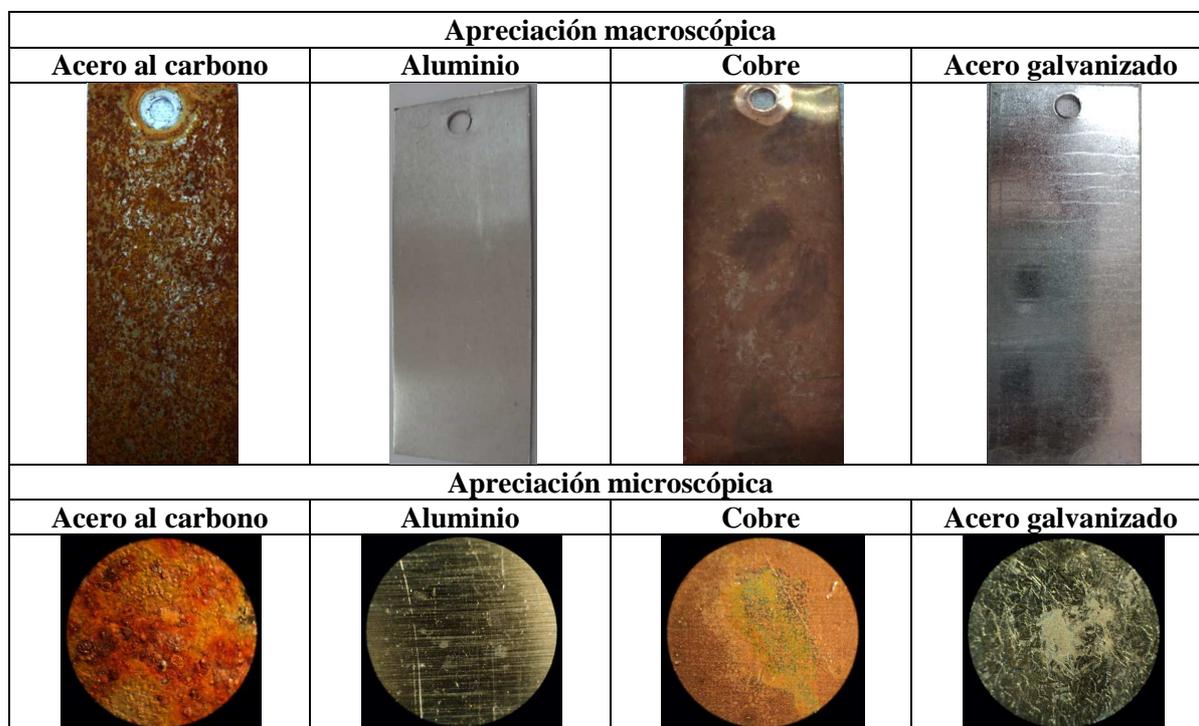
Esta estación se encuentra ubicada en uno de los sectores fabriles de la ciudad de Quito, por ello es importante su monitorización.

##### **a) Apreciación macroscópica y microscópica**

En las Figuras 19 y 20 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de las placas expuestas en la estación Carcelén durante el mes de julio del 2010 y a continuación se realiza el análisis de cada una de las placas de acuerdo al material.



**Figura 19.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Carcelén, correspondiente al mes de Julio del 2010



**Figura 20.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Carcelén, correspondiente al mes de Julio del 2010

- Acero al carbono

En la placa de acero al carbono que se muestra en las Figuras 19 y 20 se observa una capa de óxido color café oscuro más o menos uniforme sobre la cara anterior; mientras que en la cara posterior la capa de óxido no cubre totalmente la superficie y presenta mayor concentración de óxido en el perímetro de la superficie. Esto se debe quizá a que la caída de lluvia en la cara anterior se desborda por los filos de la placa mojándolos en mayor proporción que a la superficie contraria; además, el material particulado se deposita más fácilmente sobre la cara anterior debido a que el viento choca directamente sobre ella. Así también, se observa mediante el microscopio óptico que las dos caras de la placa presentan una capa compacta de óxido con presencia de picaduras, especialmente en la cara posterior. Esto se debe a que esta cara permanece más tiempo húmeda porque el sol no da directamente sobre ella, lo que provoca un ataque corrosivo más severo.

- Aluminio

La placa de aluminio de las Figuras 19 y 20 no presenta cambios claramente visibles sino una disminución leve en el brillo de las dos caras, esto debido a la formación de la capa protectora de óxido de aluminio, especialmente sobre la superficie posterior.

- Cobre

En la placa de cobre de las Figuras 19 y 20 se observa que la cara anterior presenta en su borde inferior una mancha rojiza propia de la cuprita y al microscopio se observa la presencia de material particulado sobre esta superficie; mientras que en la cara posterior se observa la formación de manchas oscuras en el borde inferior y manchas verdosas en el centro de la superficie, lo que indica la posible presencia de brocantita, debido a la concentración de sulfatos en la zona a causa de la presencia de industrias; esto se aprecia de mejor manera con el microscopio óptico.

- Acero galvanizado

En las Figuras 19 y 20 se observa que la placa de acero galvanizado presenta la formación de manchas blanquecinas sobre su superficie y opacidad de la misma; lo cual se corrobora mediante el uso del microscopio óptico. No se observa picaduras en la superficie ni daños físicos.

### **b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

Debido a la cercanía de industrias a la estación Carcelén, el valor de concentración de SO<sub>2</sub> que se presenta es uno de los más altos (11,23 µg/m<sup>3</sup>) de las estaciones ubicadas al norte de la ciudad; mientras que los valores de los otros contaminantes son similares al resto de las estaciones.

Durante el primer semestre del año de ensayo se registraron los valores más altos de concentración de material particulado al igual que en las otras estaciones. Esto se debe a que en esos meses se registraron valores moderados de precipitaciones pluviales, es por ello que el material particulado puede adherirse de mejor manera a la superficie y originar corrosión por aireación diferencial en el metal.

Uno de los factores más importantes es el tiempo de humectación de las superficies metálicas, que para esta estación presentó el valor más alto, igual a 3 750 horas. Así también es el valor de porcentaje de humedad relativa que es de 78,22%, mayor al de todas las estaciones durante el período de ensayo. Esto posiblemente se debe a las condiciones meteorológicas del sector, el cual se encuentra en cierta parte encerrado por montañas que hacen que el viento choque contra ellas lo que origina la recirculación del mismo y por ende se registra el mayor valor de temperatura con respecto a las otras estaciones de ensayo.

En la Tabla 11 se presentan los valores de corrosión del acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono correspondientes a la estación Carcelén para

el período de ensayo octubre del 2009 – septiembre del 2010; mientras que la Figura 21 resume toda la información relacionada con los factores meteorológicos, de contaminación y corrosión de cada uno de los metales y en cada una de las estaciones de ensayo.

**Tabla 11.** Valores de corrosión de acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Carcelén” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	Acero galvanizado ( $\mu\text{m}$ )	Cobre ( $\mu\text{m}$ )	Aluminio ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Acero al carbono ( $\mu\text{m}$ )
Octubre	0,87	0,15	0,23	2,63
Noviembre	0,92	0,05	0,14	2,00
Diciembre	0,21	0,06	0,28	1,92
Enero	0,72	0,06	0,06	1,89
Febrero	0,26	0,09	0,24	1,57
Marzo	0,59	0,10	0,20	1,64
Abril	0,22	0,07	0,16	1,67
Mayo	0,19	0,13	0,19	1,34
Junio	0,40	0,18	0,15	0,35
Julio	0,14	0,01	0,23	1,76
Agosto	0,29	0,11	0,01	1,98
Septiembre	0,28	0,10	0,04	0,94

- Acero al carbono

Se observa que el valor de penetración de corrosión atmosférica más alto se presenta en el mes de octubre del 2009 y es igual a 2,63  $\mu\text{m}$ ; de la misma manera para el mes de octubre del 2009 se registra el valor más alto de concentración de  $\text{O}_3$  igual a 43,08  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , así como también valores significativos de los otros contaminantes. En el mes de junio del 2010 se registra el menor valor de penetración de la contaminación atmosférica sobre el acero al carbono igual a 0,35  $\mu\text{m}$  y uno de los menores valores de concentración de  $\text{O}_3$  igual a 20,70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Como se observa en la Figura 21, la corrosión del acero al carbono no depende de un solo factor sino de la combinación de los contaminantes atmosféricos así como también del tiempo de humectación.

- Aluminio

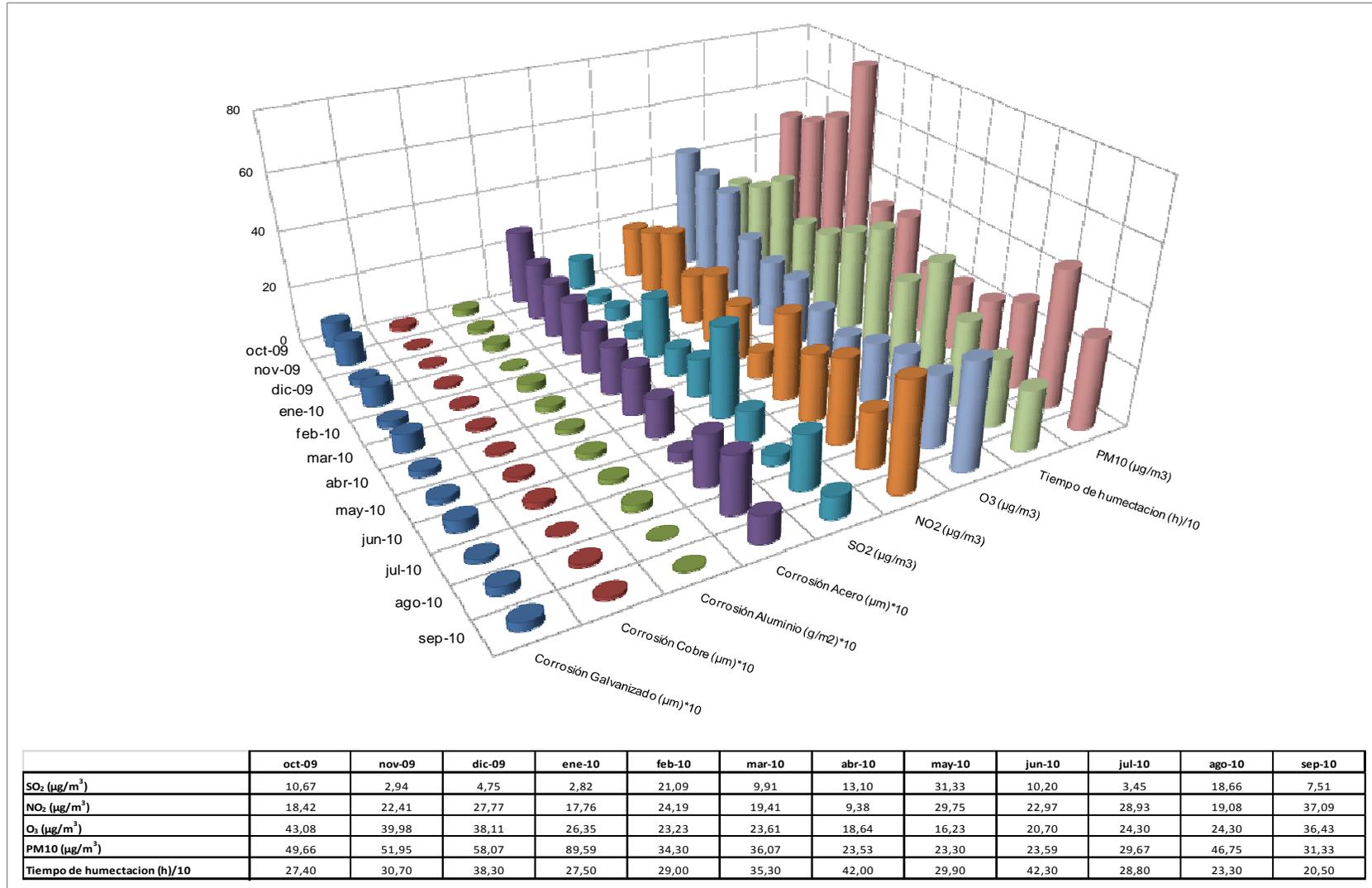
La corrosión del aluminio en esta estación presenta el valor más alto en el mes de diciembre del 2009 e igual a  $0,28 \text{ g/m}^2$ . Para el caso de aluminio, no se evidencia claramente la incidencia de cada uno de los factores meteorológicos y de contaminación sobre el efecto corrosivo, ya que todos los meses la corrosión de este metal presenta valores similares al igual que los factores mencionados. Es posible que la combinación de los contaminantes y de las condiciones atmosféricas provoquen el efecto corrosivo sobre el aluminio.

- Cobre

La penetración de la corrosión atmosférica en el cobre presenta los valores más altos en los meses de octubre del 2009 y junio del 2010 e iguales a  $0,15 \mu\text{m}$  y  $0,18 \mu\text{m}$ , respectivamente. En esta estación se observa que la corrosión depende al igual que en los otros metales, del tiempo de humectación así como también de la combinación de los contaminantes atmosféricos cuyos valores son significativos en los meses donde se registra mayor pérdida de este material.

- Acero galvanizado

Los valores de penetración de corrosión atmosférica sobre el acero galvanizado para los meses de octubre y noviembre del 2009 son los más elevados e iguales a  $0,87 \mu\text{m}$  y  $0,92 \mu\text{m}$  respectivamente. Esto se debe principalmente a la concentración de material particulado que presenta los valores más altos durante los meses de octubre del 2009 a enero del 2010. También es posible mencionar que la pérdida de material se debe a la combinación de los otros contaminantes atmosféricos cuyas concentraciones no varían significativamente a lo largo del período de ensayo pero presentan valores promedio importantes ( $11,23 \mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$ ,  $23,10 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$  y  $27,91 \mu\text{gO}_3/\text{m}^3$ ).



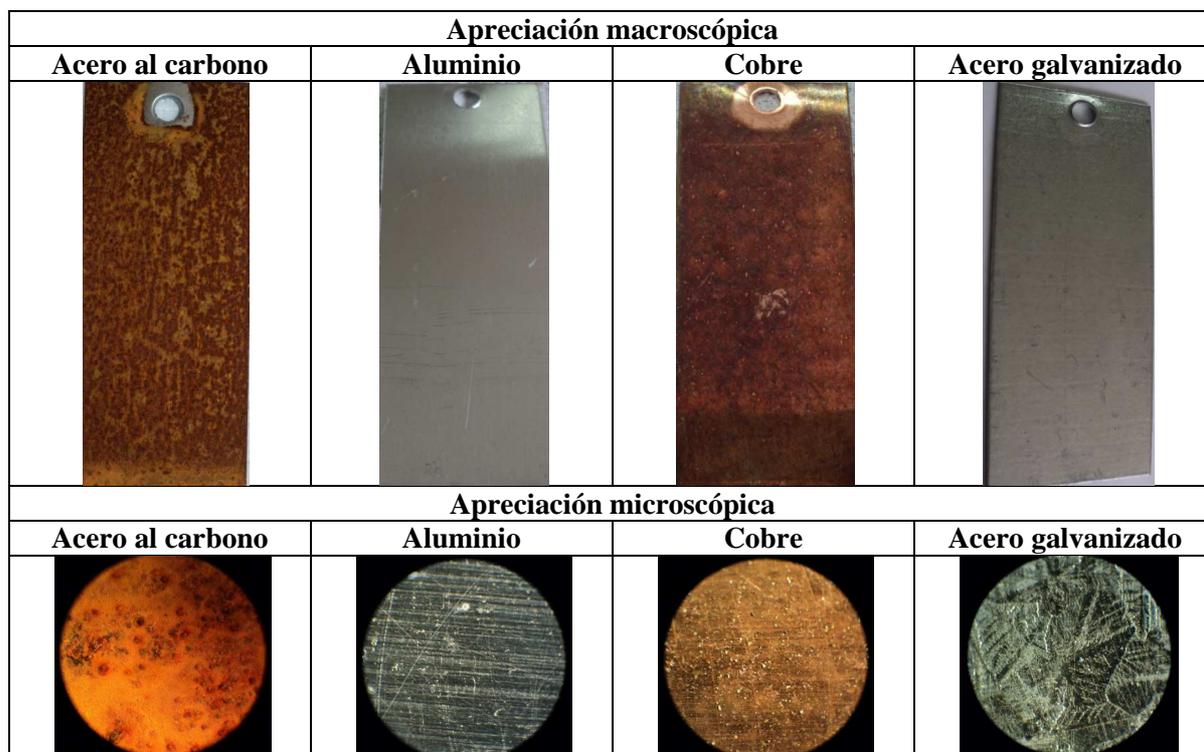
**Figura 21.** Resultados mensuales de la estación “Carcelén”

### 3.3.1.2 Estación Kennedy

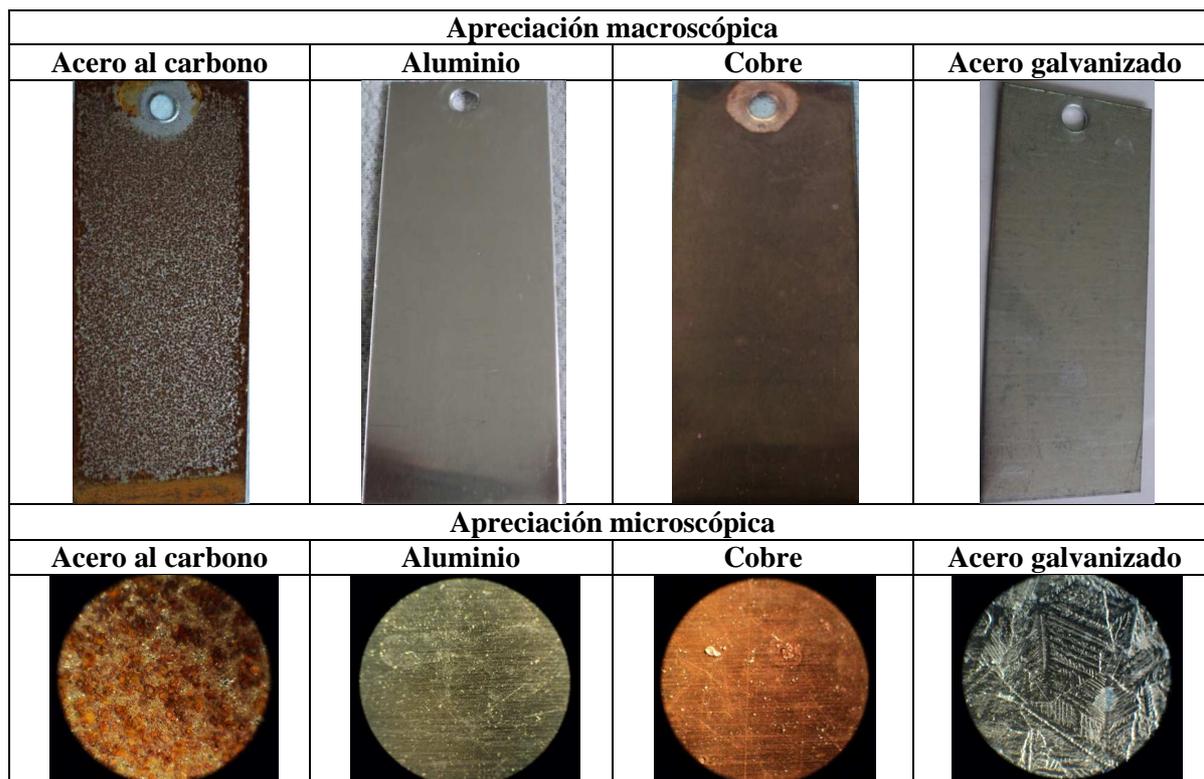
Su monitorización es importante ya que se encuentra muy cerca a la pista del aeropuerto “Mariscal Sucre” de Quito que presenta altos niveles de contaminación debido a la quema de combustibles provenientes de los aviones y a la cantidad de material particulado que es arrastrado por el viento que generan las turbinas de los mismos.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

En las Figuras 22 y 23 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de las placas expuestas en la estación Kennedy durante el mes de julio del 2010.



**Figura 22.** Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Kennedy, correspondiente al mes de Julio del 2010



**Figura 23.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Kennedy, correspondiente al mes de Julio del 2010

- Acero al carbono

En la Figura 22 se observa una capa más o menos uniforme de óxido color café claro sobre la superficie anterior de la placa de acero al carbono, así como también mayor cantidad de óxido de tonalidad más clara en el borde inferior de la misma; también se puede notar con el microscopio óptico, la presencia de picaduras en zonas localizadas de la superficie; mientras que en la Figura 23 se observa que la capa de óxido no cubre en totalidad la superficie posterior de la placa, es decir, gran parte de la superficie se encuentra descubierta. También se puede ver que el perímetro de la misma presenta un color café oscuro, debido a la concentración de la corrosión en estas zonas. Con el microscopio óptico se corrobora lo antes mencionado.

En ambas caras de la placa se observa que el borde inferior presenta mayor corrosión. Esto se debe a la ubicación de la placa flotante en el mueble

portaprobetas que hace que la lluvia se deposite mayormente en la borde inferior de la misma.

- Aluminio

Al igual que para la estación Carcelén, el aluminio presenta una disminución leve de brillo en las dos caras de la placa como se observa en las Figuras 22 y 23, debido a la formación de alúmina sobre las misma. También se observa la presencia de picaduras localizadas sobre la cara anterior, esto se debe a la presencia de material particulado en la zona.

La diferencia de color en las caras de la placa se debe a la variación de luz el momento de tomar la fotografía.

- Cobre

En la superficie anterior de la placa de cobre se observa en la Figura 22, que la superficie posee un color rojizo, típico de la formación de cuprita y manchas oscuras que indican la posible presencia de tenorita. También se aprecia la presencia de material particulado que es arrastrado por el viento generado por las turbinas de los aviones; mientras que, como se observa en la Figura 23, la cara posterior de la placa presenta un color verdoso en toda su superficie, típico de la brocantita que se forma a causa de la concentración de  $\text{SO}_2$  presente en la zona. Esto debido a la quema de combustible de los aviones. También se observa la formación de picaduras focalizadas sobre esta superficie.

- Acero galvanizado

En las Figuras 22 y 23 se observa opacidad en las superficies de la placa de acero galvanizado, especialmente en la cara anterior; también se observa la formación de manchas blanquecinas propias de los óxidos de cinc. Con el microscopio óptico es posible apreciar la forma estrellada que presenta el metal en su estructura y no se observa la presencia de picaduras ni daños físicos en ambas superficies.

## b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes

Por la cercanía de la estación a la pista del aeropuerto “Mariscal Sucre”, el valor de concentración de material particulado es uno de los más altos de todas las estaciones de ensayo e igual a  $41,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero al contrario de lo que se esperó, el valor de concentración de  $\text{SO}_2$  corresponde al más bajo de todas las estaciones ( $5,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) lo que indica que para esta estación la presencia de sulfuros no es determinante en el proceso corrosivo de los metales.

Los valores de concentración de  $\text{NO}_2$  y de  $\text{O}_3$  son relativamente moderados y similares al resto de estaciones e iguales a  $26,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $22,81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente; mientras que el tiempo de humectación presenta un alto valor, igual a 3 428 horas, así como también un valor alto de porcentaje de humedad relativa igual a 77% que se debe posiblemente a factores como rocío o niebla, no así a la temperatura, ya que en esta zona se registra el valor más bajo ( $12,72^\circ\text{C}$ ).

En la Tabla 12 se presentan los valores de corrosión de acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono para el período de ensayo octubre del 2009 – septiembre del 2010.

**Tabla 12.** Valores de corrosión de acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Kennedy” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	Acero galvanizado ( $\mu\text{m}$ )	Cobre ( $\mu\text{m}$ )	Aluminio ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Acero al carbono ( $\mu\text{m}$ )
Octubre	0,55	0,08	0,25	3,01
Noviembre	0,56	0,02	0,16	2,92
Diciembre	0,30	0,17	0,10	2,55
Enero	0,49	0,04	0,10	2,18
Febrero	0,24	0,12	0,13	1,61
Marzo	0,52	0,14	0,23	2,55
Abril	0,20	0,06	0,06	2,03
Mayo	0,24	0,14	0,16	1,51
Junio	0,41	0,18	0,21	3,06
Julio	0,12	0,01	0,23	1,86
Agosto	0,28	0,08	0,06	1,96
Septiembre	0,28	0,10	0,05	1,31

La Figura 24 resume toda la información relacionada con los factores meteorológicos, de contaminación y corrosión de cada uno de los metales y en cada una de las estaciones de ensayo.

- Acero al carbono

Los valores de penetración de corrosión atmosférica más altos para el acero al carbono se presentan en los meses de octubre y noviembre del 2009 y junio del 2010 y son iguales a 3,01  $\mu\text{m}$ , 2,92  $\mu\text{m}$  y 3,06  $\mu\text{m}$ , respectivamente. En el mes de septiembre del 2010 se registra el menor valor de penetración de la corrosión atmosférica igual a 1,306  $\mu\text{m}$ ; mientras que en el mes de noviembre del 2009 se registra el mayor valor de concentración de  $\text{NO}_2$  igual a 37,94  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y en septiembre del 2010 el más bajo (18,49  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), esto indica que uno de los factores influyentes en el fenómeno corrosivo del acero al carbono en esta estación es la concentración de  $\text{NO}_2$ .

También se observa que los meses en que se registran mayores valores de corrosión del acero al carbono, son meses en los que se registran menores cantidades de precipitaciones pluviales, lo que facilita el depósito de los contaminantes sobre la superficie metálica, especialmente de material particulado cuyos valores registrados en esta estación son significativos debido a la cercanía con el aeropuerto. Esto posiblemente origina mayor pérdida de material en estos meses.

Los meses que registran mayores horas de humectación de las superficies metálicas son diciembre del 2009, abril y junio del 2010 cuyos valores superan las 370 horas, es decir, en estos meses la superficie metálica posee más humedad o aumento de la capa de electrolito que origina, de acuerdo a lo mencionado en el subcapítulo 1.2.1, el aumento de la velocidad de corrosión según sea el espesor de la capa de humedad depositada sobre la superficie.

- Aluminio

La corrosión del aluminio presenta el valor más alto en el mes de octubre del 2009 igual a 0,25  $\text{g}/\text{m}^2$ . La pérdida de material, en este caso, se debe principalmente a la presencia de material particulado a causa de la ubicación geográfica de la

estación de ensayo. También se observa que el proceso corrosivo del aluminio depende también del tiempo de humectación y de los otros contaminantes los cuales se depositan en la superficie causando corrosión por picadura.

En esta estación se presentan los valores más bajos de corrosión de aluminio con respecto a las otras estaciones. Esto quizá se debe a la baja concentración de  $\text{SO}_2$  que se registra en la zona. Sin embargo, se observa la influencia de éste contaminante en la pérdida de material sin ser un factor decisivo en el proceso corrosivo del aluminio en esta estación.

- Cobre

La penetración de la corrosión atmosférica en el cobre presenta los valores más altos en los meses de diciembre del 2009 y junio del 2010 y son iguales a  $0,17 \mu\text{m}$  y  $0,18 \mu\text{m}$ . En esta estación se observa que la mayoría de los contaminantes presentes no influyen directamente en el proceso corrosivo del cobre, sino que al igual que en el aluminio, la alta concentración de material particulado, el alto contenido de humedad, el tiempo de humectación de las superficies y la combinación de los otros contaminantes, provocan la pérdida de material.

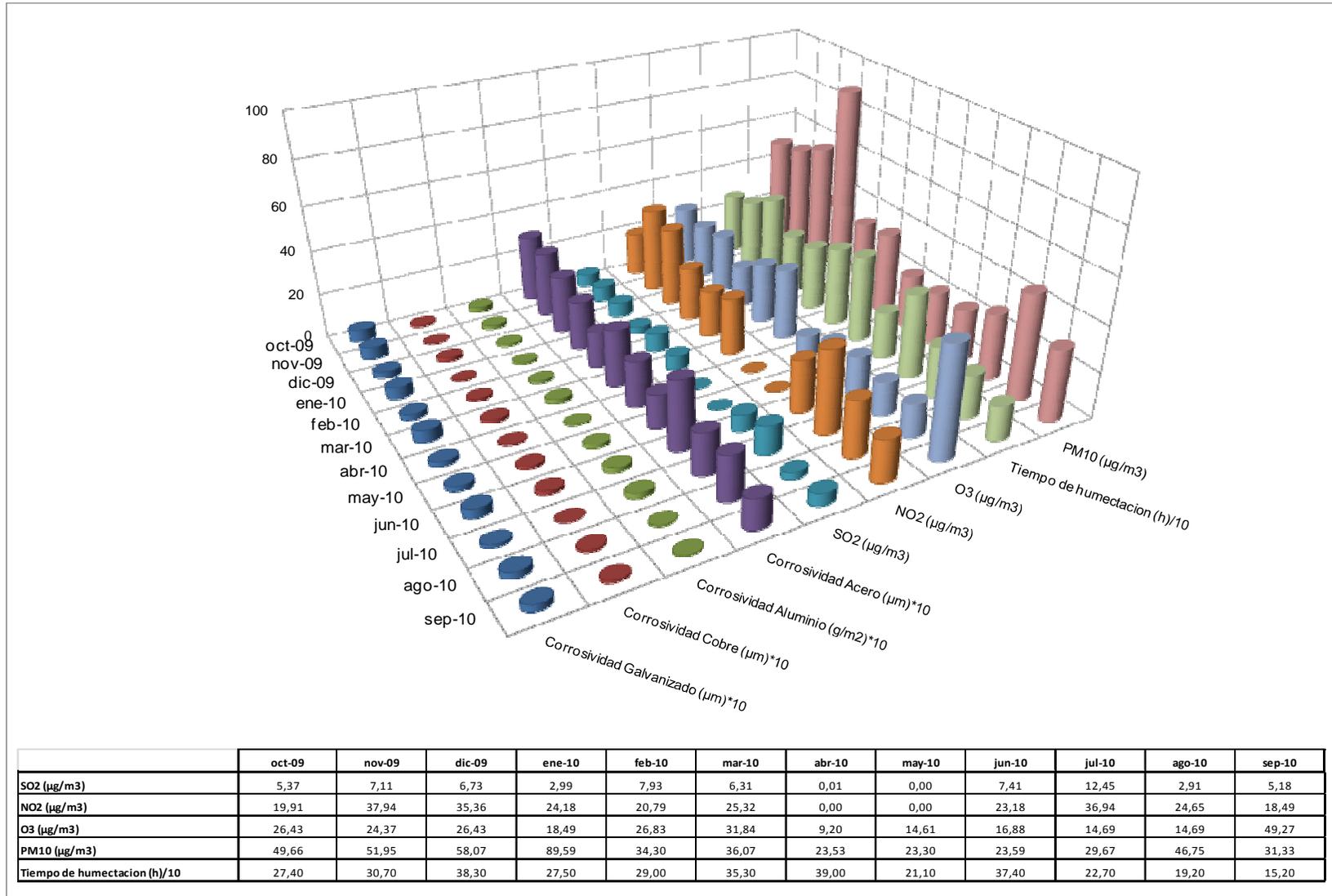
En el Anexo V se observa que la estación Kennedy es una de las estaciones conjuntamente con Carcelén y La Marín, que presentan los valores promedio más bajos de corrosión del cobre, esto debido a que en esta estación se registra el valor más bajo de concentración de  $\text{SO}_2$  igual a  $5,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

- Acero galvanizado

El mayor valor de penetración de corrosión atmosférica en el acero galvanizado corresponde al del mes de noviembre del 2009, igual a  $0,56 \mu\text{m}$ . Esto se relaciona directamente con la concentración de  $\text{NO}_2$ , cuyo valor correspondiente al mes de noviembre es el más alto durante el período de ensayo e igual a  $37,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En este caso el material particulado no tiene un efecto agresivo sobre el acero al galvanizado ya que como se observa en las Figuras 22 y 23, no presenta picaduras como el acero al carbono, el aluminio y el cobre. Sin embargo se observa que el tiempo de humectación también interviene en el proceso corrosivo del acero galvanizado porque los meses en los que se tiene mayor pérdida de

material, son meses en los que se registran tiempos de humectación significativos en esta estación.



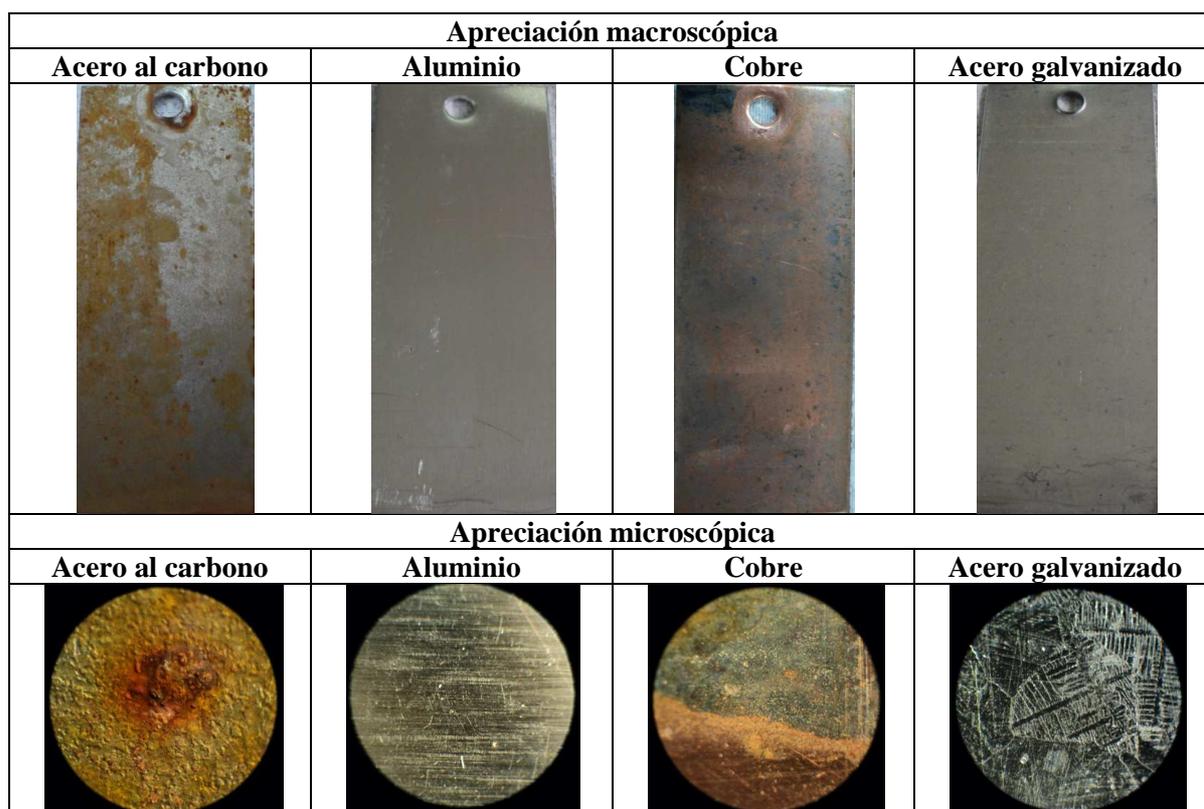
**Figura 24.** Resultados mensuales de la estación “Kennedy”

### 3.3.1.3 Estación Cruz Loma

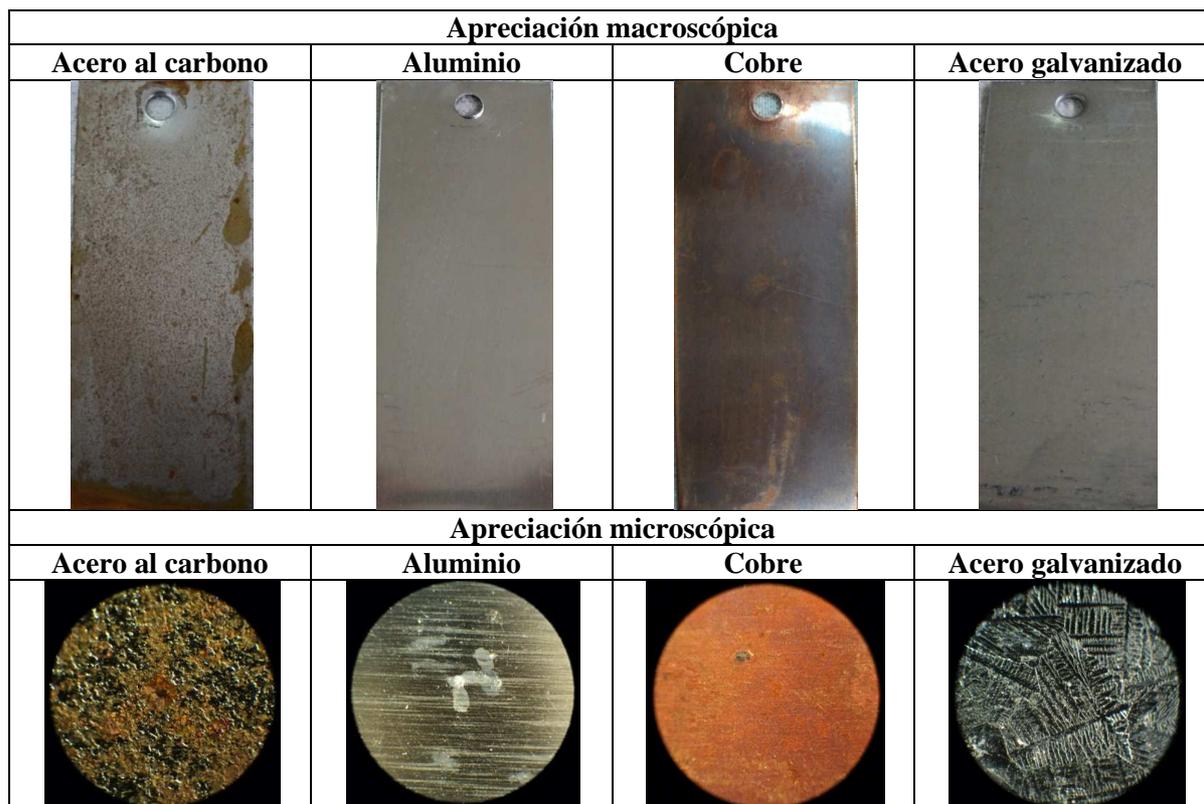
Por su ubicación geográfica y los altos niveles de ozono es importante su monitorización.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

En las Figuras 25 y 26 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de las placas expuestas en la estación Cruz Loma durante el mes de agosto del 2010.



**Figura 25.** Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Cruz Loma, correspondiente al mes de Agosto del 2010



**Figura 26.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Cruz Loma, correspondiente al mes de Agosto del 2010

- Acero al carbono

En la placa de acero al carbono de las Figuras 25 y 26 se observa que, a diferencia de las otras estaciones, no se tiene una capa de óxido uniforme sino ligeras manchas de óxido sobre ambas superficies de la placa. Esto se debe a la gran cantidad de precipitaciones que se presentan en la zona lo cual produce un efecto de lavado sobre la placa y evita la adherencia de los óxidos de hierro que se forman. Con el microscopio óptico se observa que la cara anterior presenta picaduras focalizadas, a diferencia de la cara posterior que no presenta daño alguno.

Es posible apreciar en ambas superficies una capa de corrosión anaranjada en el borde inferior, esto se debe a la acumulación del agua lluvia por la ubicación de la placa en el mueble portaprobetas.

- Aluminio

Al igual que en las otras estaciones, la placa de aluminio de las Figuras 25 y 26 no presenta cambios claramente visibles sino solamente una disminución leve en el brillo de las dos caras de la placa por la formación de alúmina. En la cara posterior se observa la presencia de diminutas manchas blancas que corresponden a manchas de gotas de lluvia con residuos de polvo. No se aprecian picaduras ni daños significativos en la superficie del metal.

- Cobre

En la Figura 25 se observa un color azulado en ciertas zonas de la superficie anterior de la placa. Este color obedece a la posible formación de azurita o carbonato de cobre, también se aprecia la formación de manchas de color negro, lo cual indica la posible presencia de tenorita u óxido cúprico. No se observa la formación de picaduras ni daños en la superficie.

En la Figura 26 se observa también una tonalidad azulada en toda la superficie posterior de la placa y la formación de pequeñas manchas rojizas que son propias de la presencia de cuprita que es el primer óxido que se forma sobre el cobre. No se aprecia picaduras ni ataque corrosivo profundo.

- Acero galvanizado

Como se observa en las Figuras 25 y 26, la placa de acero galvanizado presenta disminución de brillo en ambos lados, así como también la presencia de manchas blanquecinas propias de la formación de óxidos de cinc especialmente en la cara anterior de la placa. En esta estación al igual que en las otras, el acero galvanizado no presenta cambios visibles significativos ni picaduras en su superficie.

**b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

Debido a la ubicación geográfica de la estación (aproximadamente 4 000 m.s.n.m.), se registra un valor elevado de concentración de  $O_3$  ( $40,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el período octubre 2009 – septiembre 2010. Así también, debido a su ubicación y a la ausencia de circulación vehicular en la zona se presentan bajas concentraciones promedio de los otros contaminantes, así:  $6,80 \mu\text{gSO}_2/\text{m}^3$ ,  $9,34 \mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$  y  $26,02 \mu\text{gPM}_{10}/\text{m}^3$ .

Para esta estación no se tienen valores de factores meteorológicos, por lo que el análisis de la corrosión se realizará únicamente con respecto a la concentración de contaminantes atmosféricos.

En la Tabla 13 se presentan los valores de corrosión del acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono correspondientes a la estación Cruz Loma para el período de ensayo octubre del 2009 – septiembre del 2010.

**Tabla 13.** Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Cruz Loma” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	Acero galvanizado ( $\mu\text{m}$ )	Cobre ( $\mu\text{m}$ )	Aluminio ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Acero al carbono ( $\mu\text{m}$ )
Octubre	0,69	0,26	0,29	2,69
Noviembre	0,58	0,17	0,06	2,48
Diciembre	0,34	0,16	0,04	2,94
Enero	0,50	0,08	0,05	1,67
Febrero	0,30	0,13	0,16	2,09
Marzo	0,53	0,14	0,24	1,75
Abril	0,27	0,12	0,01	1,24
Mayo	0,28	0,24	0,20	1,18
Junio	0,44	0,20	0,26	1,55
Julio	0,13	0,09	0,25	1,35
Agosto	0,16	0,14	0,01	1,12
Septiembre	0,28	0,12	0,03	0,79

La Figura 27 resume toda la información relacionada con los factores meteorológicos, de contaminación y corrosión de cada uno de los metales y en cada una de las estaciones de ensayo.

- Acero al carbono

Durante los primeros seis meses de ensayo se registran los valores más altos de penetración de corrosión atmosférica sobre el acero al carbono, el valor más alto (2,94  $\mu\text{m}$ ) se registra en el mes de diciembre del 2009; mientras que el más bajo (0,79  $\mu\text{m}$ ) en septiembre del 2010. Para esta estación la corrosión del acero al carbono depende principalmente de la concentración de  $\text{O}_3$ , cuyo valor es alto en todos los meses en especial el primer semestre de ensayo.

Los otros contaminantes no presentan variaciones significativas y sus valores son bajos con respecto a las otras estaciones. A pesar de registrarse concentraciones moderadas de material particulado, éste no influye directamente en el proceso corrosivo ya que debido a los fuertes vientos en la zona, no se deposita sobre las superficies metálicas expuestas.

- Aluminio

La corrosión del aluminio en esta estación presenta uno de los menores valores promedio (0,13  $\text{g}/\text{m}^2$ ) con respecto a las otras estaciones como se observa en el Anexo V. El mayor valor de corrosión del aluminio se registra en el mes de octubre del 2009 (0,29  $\text{g}/\text{m}^2$ ); en el mismo mes se registra el mayor valor de concentración de material particulado igual a 35,68  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y uno de los valores más altos de  $\text{SO}_2$  igual a 9,36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, al igual que en el acero al carbono, el material particulado que existe en el ambiente no se deposita sobre la superficie metálica por lo que no es uno de los factores predominantes en el proceso corrosivo del aluminio.

A pesar de tener bajas concentraciones de  $\text{SO}_2$  en esta zona, este es uno de los contaminantes que provocan mayor daño en este metal como se mencionó en el subcapítulo 1.1.2.3, por lo que la concentración registrada en el mes de octubre indica una fuerte relación con la pérdida de aluminio en esta estación. Se observa también que la concentración de  $\text{O}_3$  presenta valores elevados en todos los

meses de ensayo, lo que quizá también influya de cierta forma en el proceso corrosivo de este metal en esta estación.

- Cobre

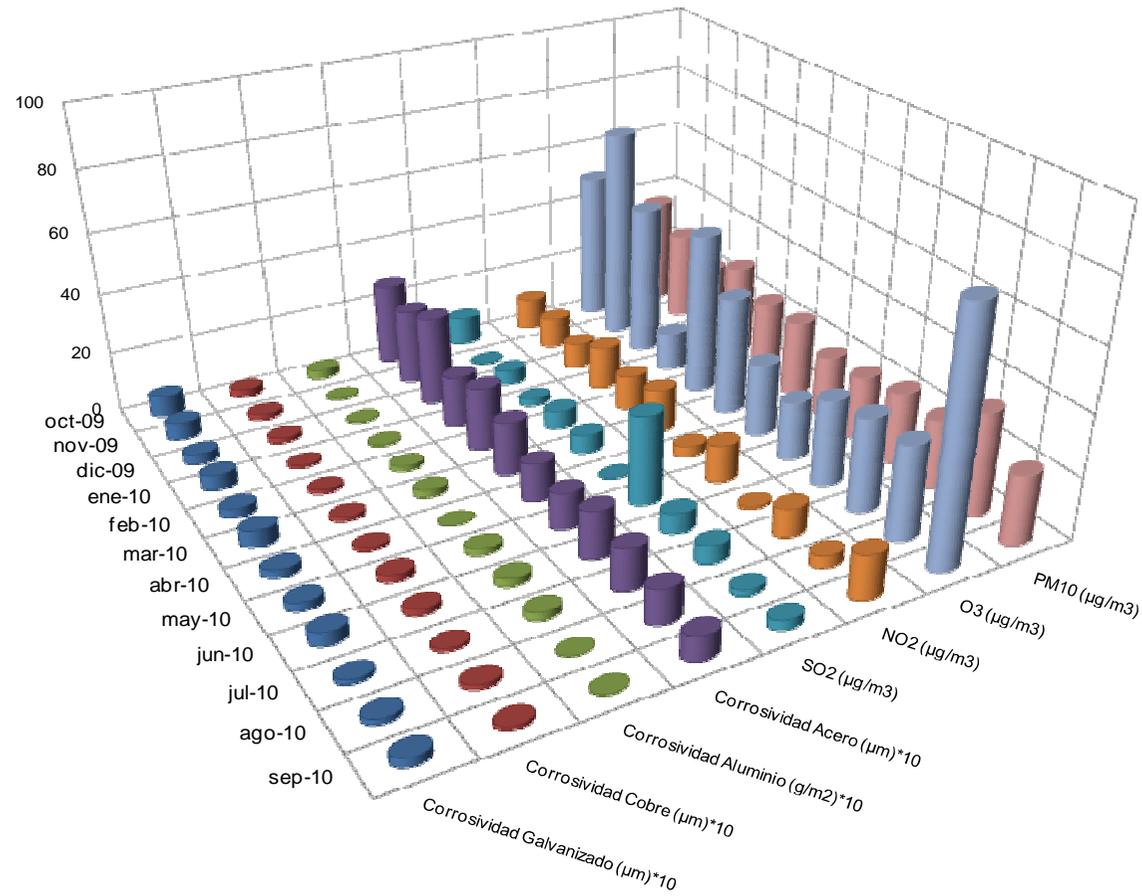
La penetración de la corrosión atmosférica en el cobre presenta los valores más altos en los meses de octubre del 2009 y mayo del 2010 y son iguales a  $0,26 \mu\text{m}$  y  $0,24 \mu\text{m}$  respectivamente; mientras que el valor más bajo se presenta en el mes de enero del 2010 y es igual a  $0,08 \mu\text{m}$ . Para este caso, se observa que la corrosión dependería en mayor proporción de la concentración de  $\text{SO}_2$ , ya que los mayores valores de concentración de este contaminante se registran en octubre del 2009 y mayo del 2010 y son iguales a  $9,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $29,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. Esto al igual que en el aluminio, tiene correspondencia con lo mencionado en el subcapítulo 1.1.2.4 en donde la formación de óxidos de cobre se deben principalmente a la presencia de sulfuros en el ambiente.

Por otro lado, la presencia de  $\text{O}_3$  en la zona posiblemente afecta de cierta forma en el proceso corrosivo de este metal; aunque no es posible notar claramente su influencia. El material particulado y el  $\text{NO}_2$  no presentan relación con la corrosión del cobre debido a la baja concentración de uno de ellos ( $\text{NO}_2$ ) y a la dificultad de adherencia sobre la superficie metálica.

- Acero galvanizado

El valor más alto de penetración de corrosión atmosférica sobre el acero galvanizado se presenta el mes de octubre del 2009 cuyo valor es  $0,69 \mu\text{m}$ ; mientras que el menor valor es igual a  $0,13 \mu\text{m}$  y se tiene en el mes de julio del 2009.

Lo mismo que sucede con el aluminio y el cobre sucede con el acero galvanizado, es decir que, los factores más influyentes sobre la corrosión de este metal son la concentración de  $\text{SO}_2$  y de  $\text{O}_3$ , cuyos valores presentan concentraciones importantes en los meses donde hay mayor corrosión de este metal.



	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10	feb-10	mar-10	abr-10	may-10	jun-10	jul-10	ago-10	sep-10
SO2 (µg/m3)	9,36	0,25	4,74	2,28	5,97	5,86	0,00	29,08	6,54	5,78	1,89	3,01
NO2 (µg/m3)	10,59	10,08	8,05	13,98	11,46	14,39	3,21	12,04	0,74	9,36	3,88	14,25
O3 (µg/m3)	49,79	70,36	49,96	12,84	53,47	39,00	24,17	19,28	27,95	30,75	30,75	80,32
PM10 (µg/m3)	35,68	29,46	23,74	30,39	24,62	24,83	20,07	20,92	23,61	22,85	33,49	22,59

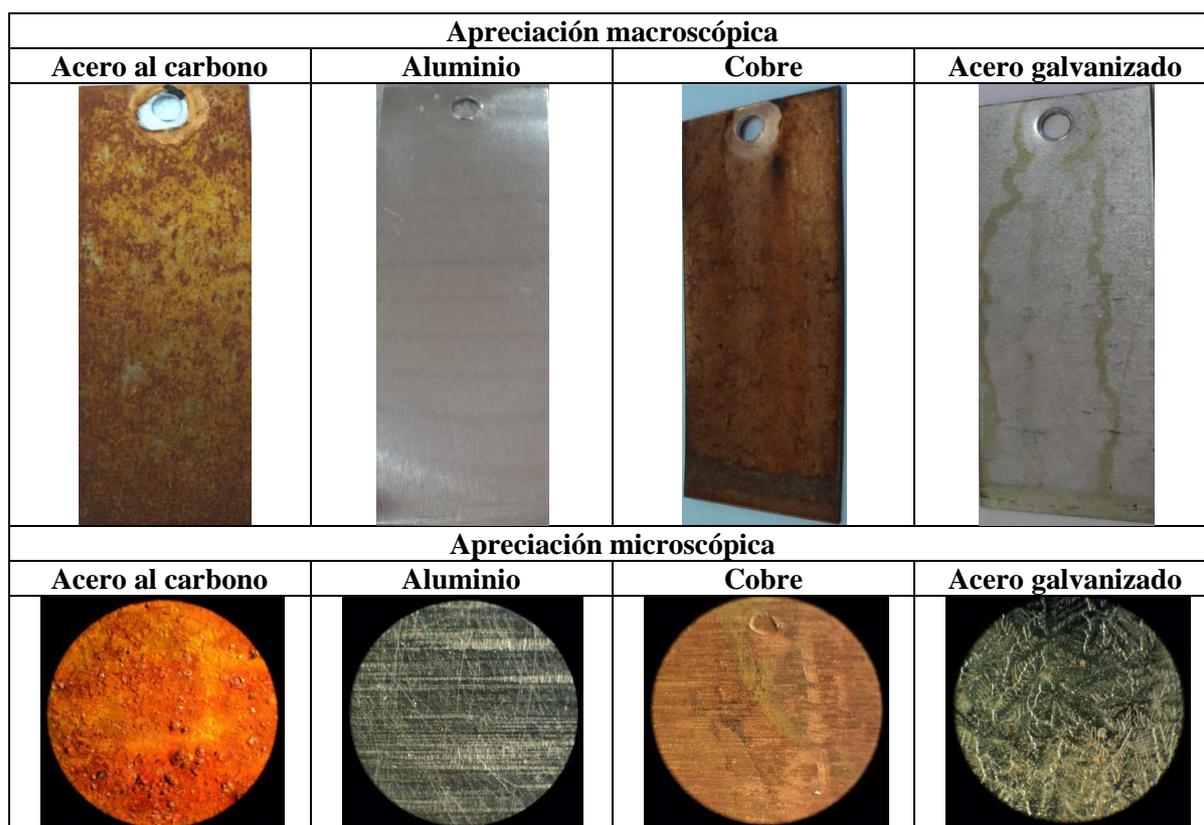
Figura 27. Resultados mensuales de la estación “Cruz Loma”

### 3.3.1.4 Estación Mariscal

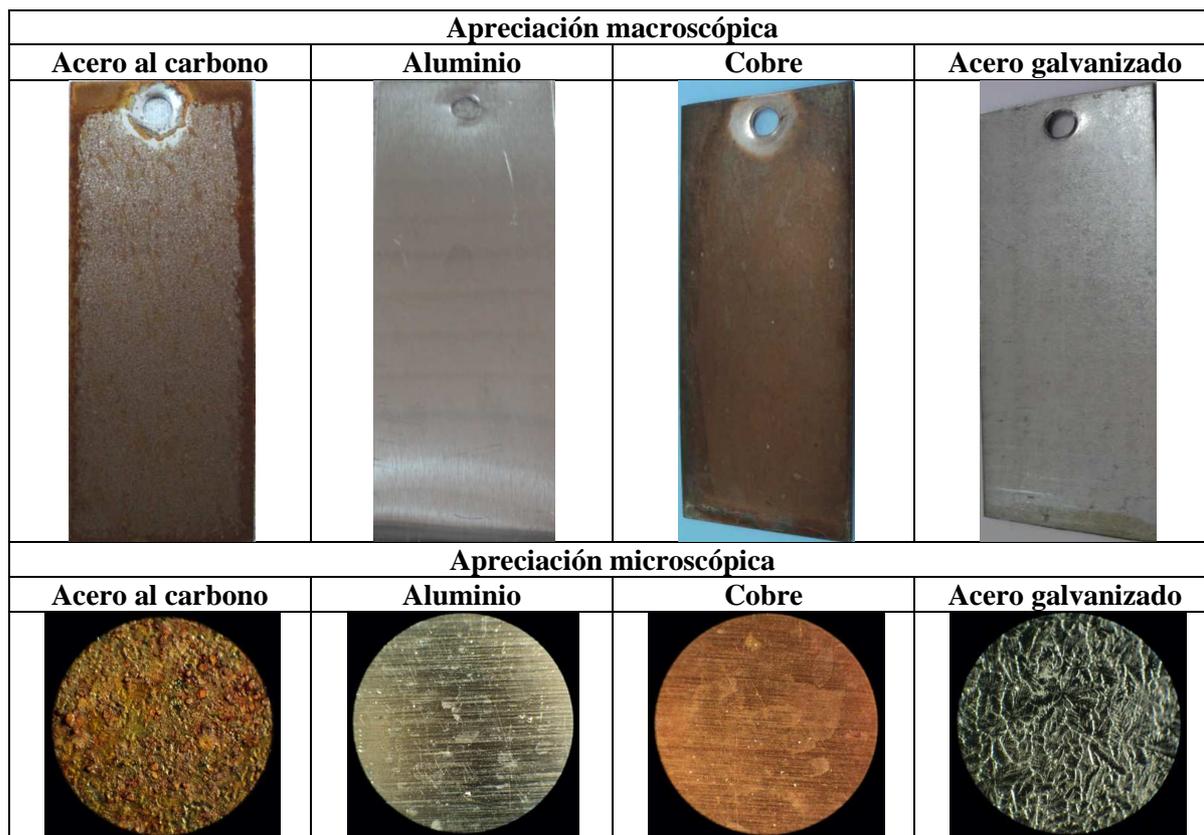
Esta estación se encuentra en un sector con gran cantidad de hoteles, restaurantes, oficinas y universidades por donde circula una cantidad considerable de vehículos y es importante su monitorización.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

En las Figuras 28 y 29 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de las placas expuestas en la estación Mariscal durante el mes de agosto del 2010.



**Figura 28.** Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Mariscal, correspondiente al mes de Agosto del 2010



**Figura 29.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Mariscal, correspondiente al mes de Agosto del 2010

- Acero al carbono

En las Figuras 28 y 29 se observa una capa no uniforme de óxido color café claro sobre las superficies de la placa; también se aprecia en ciertas zonas mayor concentración de óxido como, por ejemplo, en la parte superior de la cara anterior y en los bordes de la cara posterior. Con el microscopio óptico se aprecia la formación de ampollas de óxido en la cara anterior; así como también la presencia de picaduras focalizadas en ambas caras de la placa. Se observa un color amarillento propio de la formación de oxihidróxidos de hierro (goethita) en la superficie posterior de la placa.

- Aluminio

No se aprecia un cambio visible en la placa de aluminio, sino solamente la disminución de brillo de las superficies por la formación de una capa blanquecina

de alúmina. Esto se observa en las Figuras 28 y 29. La diferencia de color entre las dos caras de la placa observadas al microscopio se debe a la variación de luz el momento de tomar la fotografía.

- Cobre

En la Figura 28 se observa un color rojizo en la superficie anterior de la placa de cobre, propio de la presencia de cuprita, así como también manchas oscuras que indican la posible presencia de tenorita. Además, en el borde inferior se observa una mancha color verde, la cual es típica de la brocantita que se forma por la presencia de sulfatos. En la parte superior de la fotografía obtenida mediante microscopía óptica, se observa una falla propia del material y la presencia de la mancha verde que concuerda con lo que se observó a simple vista.

La cara posterior de la placa, como se observa en la Figura 29, presenta disminución de brillo y un color marrón oscuro en sus bordes, así como también la formación de manchas color verde azuladas que, al igual que en la cara anterior, indica la presencia de sulfatos. También se observan picaduras focalizadas en esta cara de la placa.

- Acero galvanizado

En la Figura 28 se observa que la cara anterior de la placa de acero galvanizado presenta manchas de óxido de hierro en su superficie. Esto se debe a la ubicación de la placa en el mueble portaprobetas, ya que sobre esta placa se ubicó la placa de acero al carbono correspondiente a un año de exposición. Con el microscopio óptico se observa que la mancha de óxido de hierro no produce daño a esta superficie.

En las Figuras 28 y 29 se aprecia la disminución de brillo natural del metal. Además, en la cara posterior, se observa la presencia de manchas blanquecinas correspondientes a la formación de óxidos de cinc.

**b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

Por encontrarse en un sector comercial y altamente concurrido, esta estación presenta el segundo valor más alto de concentración de  $\text{SO}_2$  ( $22,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) comparado con las otras estaciones de ensayo; también presenta un valor alto de  $\text{NO}_2$  igual a  $37,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La concentración de  $\text{O}_3$  así como de material particulado es similar al resto de estaciones. También registra valores altos de tiempo de humectación (3 068 horas) y de porcentaje de humedad relativa (74,51%). Esto se debe a la cantidad de precipitaciones sobre la zona, cuyo valor es uno de los más altos e igual a 1 063,60 mm.

En la Tabla 14 se presentan los valores de corrosión del acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono correspondientes a la estación Mariscal para el período de ensayo octubre del 2009 – septiembre del 2010;

**Tabla 14.** Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Mariscal” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	Acero galvanizado ( $\mu\text{m}$ )	Cobre ( $\mu\text{m}$ )	Aluminio ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Acero al carbono ( $\mu\text{m}$ )
Octubre	0,79	0,19	0,21	1,79
Noviembre	0,69	0,16	0,11	2,96
Diciembre	0,23	0,14	0,09	2,54
Enero	0,65	0,06	0,13	2,68
Febrero	0,27	0,08	0,13	1,76
Marzo	0,55	0,09	0,26	2,67
Abril	0,26	0,06	0,01	2,22
Mayo	0,21	0,12	0,25	1,56
Junio	0,45	0,14	0,14	2,71
Julio	0,15	0,03	0,15	2,42
Agosto	0,30	0,11	0,04	1,30
Septiembre	0,25	0,09	0,03	1,29

La Figura 30 resume toda la información relacionada con los factores meteorológicos, de contaminación y corrosión de cada uno de los metales y en cada una de las estaciones de ensayo.

- Acero al carbono

El mayor valor de penetración de corrosión atmosférica sobre el acero al carbono se registra en el mes de noviembre del 2009 y es igual a 2,96  $\mu\text{m}$ ; así mismo en este mes se registra el valor más alto de concentración de  $\text{NO}_2$  (103,22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y valores altos de concentración de  $\text{SO}_2$  y material particulado (45,70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 32,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente). En el mes de septiembre del 2010 se registra el menor valor de penetración de la corrosión atmosférica de 1,29  $\mu\text{m}$ , al igual que bajas concentraciones de  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$ , por lo que es posible que la combinación de los contaminantes atmosféricos mencionados, influyan directamente en el proceso corrosivo de este metal en esta estación.

La concentración de  $\text{O}_3$  es relativamente moderada y similar al resto de estaciones lo que indica que este contaminante no es determinante en el proceso corrosivo del acero al carbono en esta estación.

- Aluminio

La corrosión del aluminio presenta el valor más alto en el mes de marzo del 2010 igual a 0,26  $\text{g}/\text{m}^2$ ; y al igual que en el acero al carbono, la pérdida de material se debe quizá a la concentración de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , cuyos valores para este mes también son significativos e iguales a 38,79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 52,62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente.

- Cobre

El valor de penetración de corrosión atmosférica del cobre para el mes de octubre del 2009 es el valor más alto e igual a 0,19  $\mu\text{m}$ ; así como también altos valores de  $\text{NO}_2$  (46,30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y de material particulado (31,26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Al parecer, el resto de contaminantes no presentan influencia directa en el proceso corrosivo pero actúan de cierta forma sobre la superficie metálica propiciando su deterioro.

- Acero galvanizado

Los meses de octubre y noviembre del 2009 registran los valores más altos de penetración de corrosión atmosférica en el acero galvanizado e iguales a 0,79  $\mu\text{m}$  y 0,69  $\mu\text{m}$ , respectivamente; mientras que el menor valor se presenta en el mes de julio del 2010 y es igual a 0,15  $\mu\text{m}$ .

Como se observó para los tres metales anteriores, los contaminantes que se relacionan principalmente con la pérdida de material son el  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_2$ ; mientras que el tiempo de humectación, el  $\text{O}_3$  y el material particulado influyen en menor manera sobre el proceso corrosivo del acero galvanizado en esta estación.

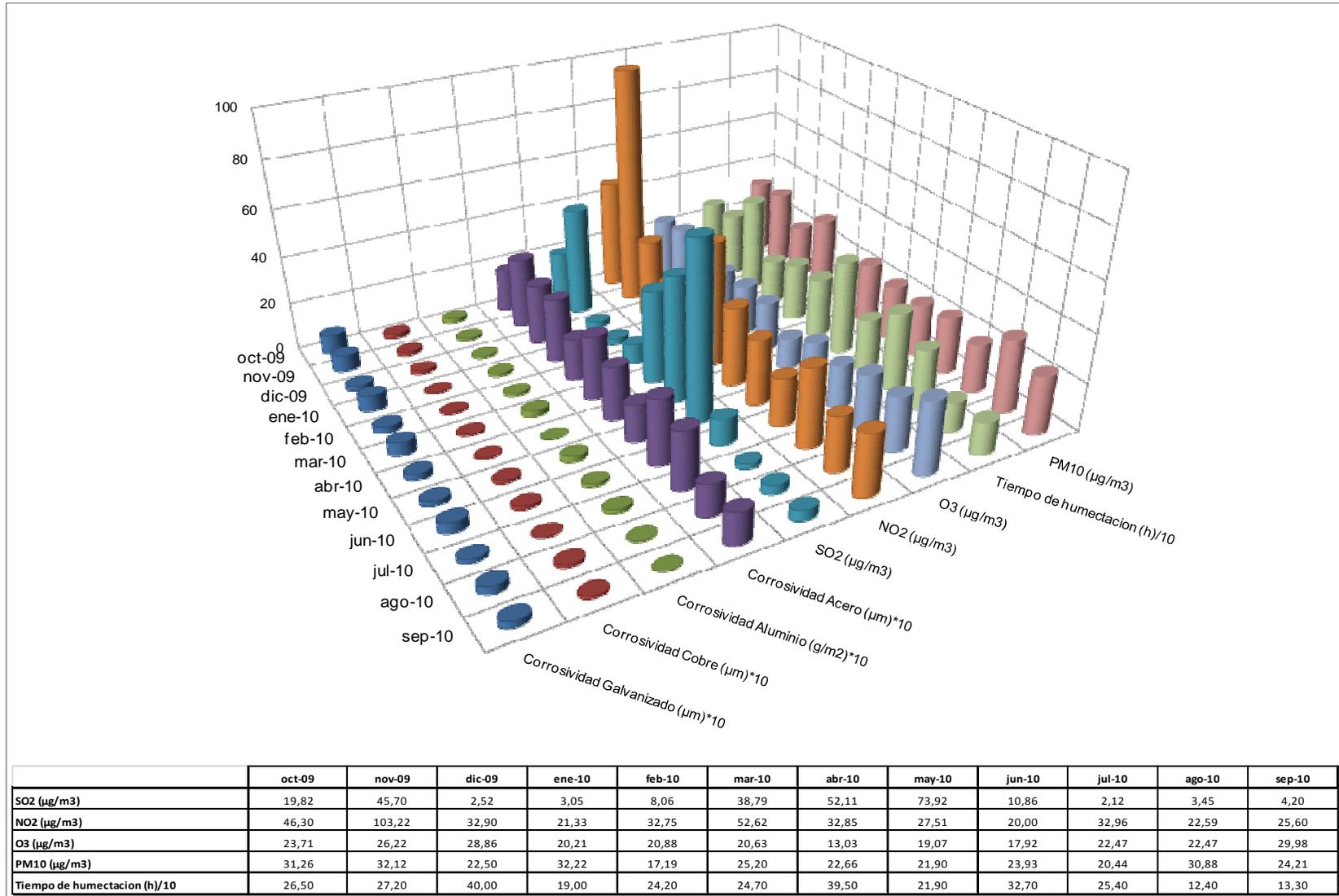


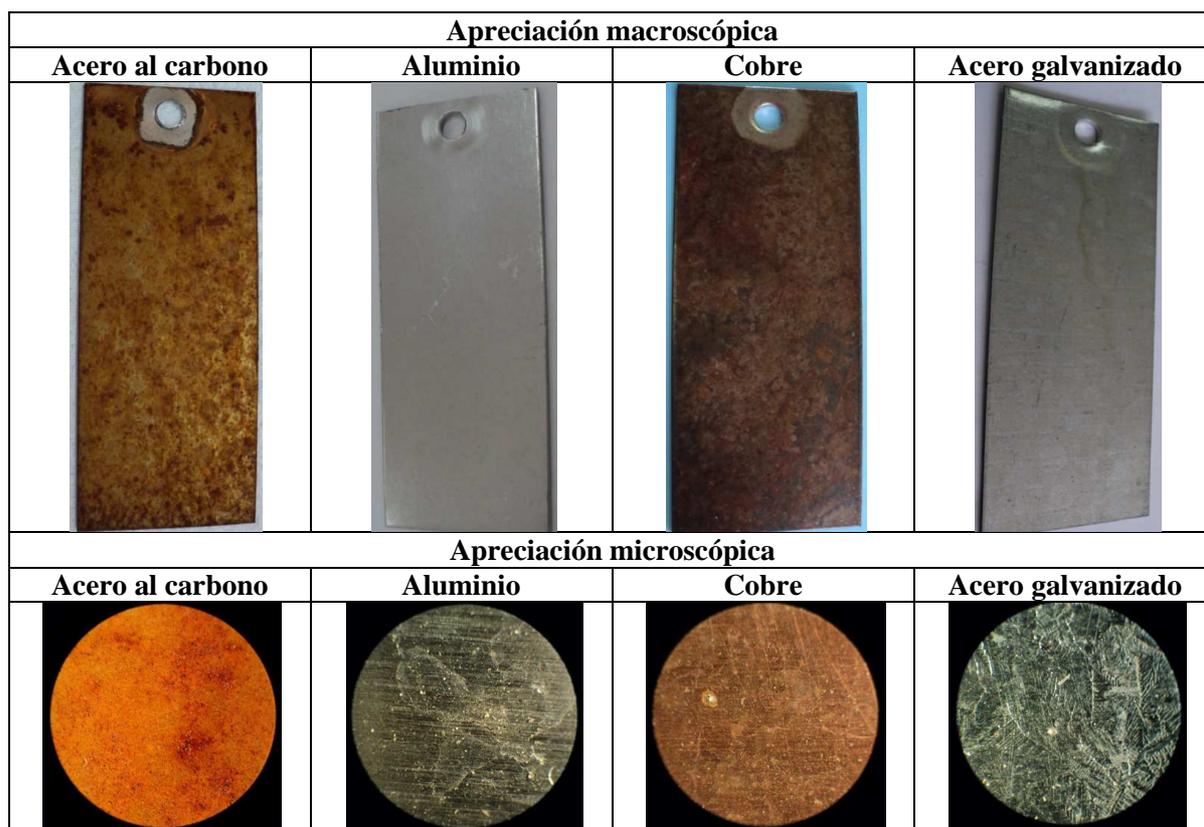
Figura 30. Resultados mensuales de la estación “Mariscal”

### 3.3.1.5 Estación Necochea

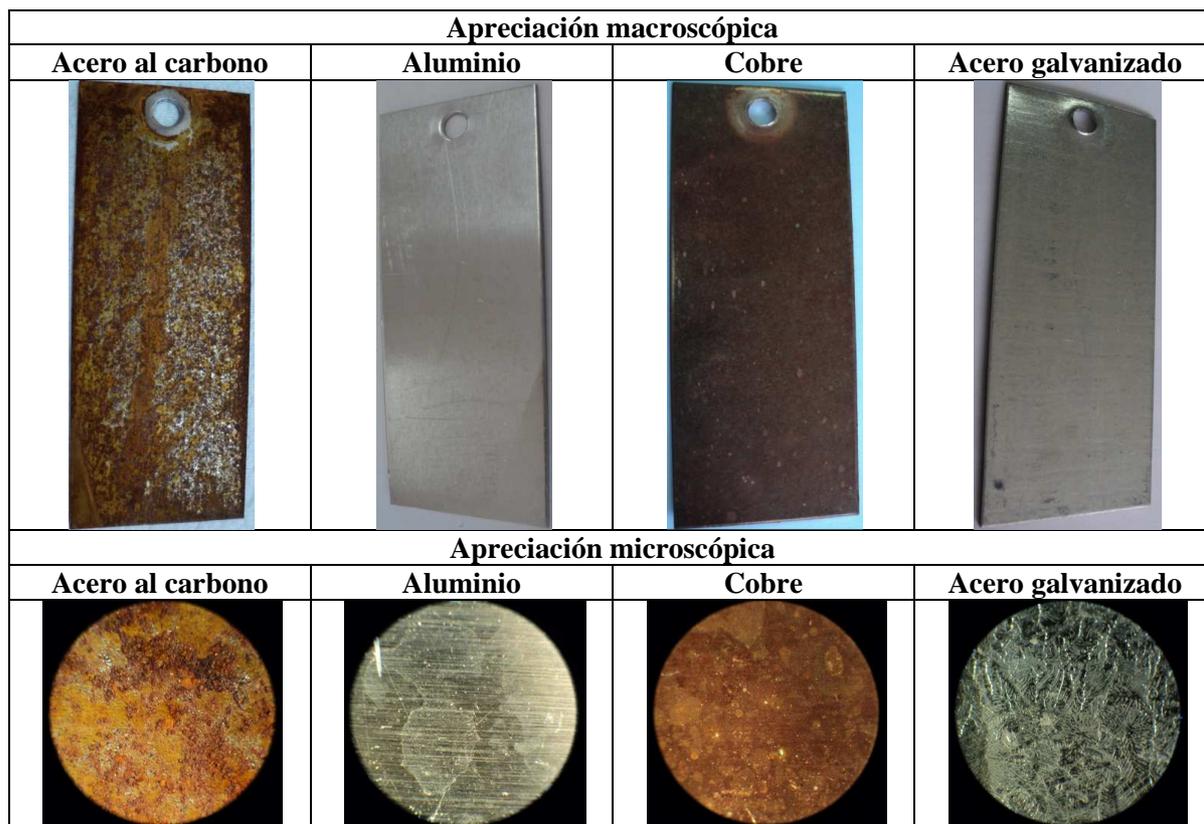
Es importante la monitorización de esta estación debido a que se encuentra en una de las calles con mayor circulación vehicular al sur occidente de la ciudad de Quito.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

En las Figuras 31 y 32 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de las placas expuestas en la estación Necochea durante el mes de mayo del 2010.



**Figura 31.** Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Necochea, correspondiente al mes de Mayo del 2010



**Figura 32.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Necochea, correspondiente al mes de Mayo del 2010

- Acero al carbono

En la Figura 31 se observa una ligera capa de hollín sobre la superficie anterior de la placa. En las figuras 31 y 32 se aprecia una capa de óxido color café claro que se presenta de manera más o menos uniforme en ambas superficies; sin embargo, en la cara posterior se observa mayor concentración de óxido en su perímetro. Esto, al igual que en otras estaciones, se debe al efecto de lavado del agua lluvia sobre la placa. Con el microscopio óptico se observó mayor daño en la cara posterior, mediante la formación de picaduras generalizadas en la superficie; y, en la cara anterior es posible notar que la cantidad de material particulado depositado sobre la superficie es baja en relación a lo que se observa a simple vista.

En esta estación se observa un efecto más agresivo de la corrosión del acero al carbono comparado con las estaciones analizadas anteriormente.

- Aluminio

Debido al tamaño de la fotografía, en la Figura 31 no se aprecia la capa de hollín formada sobre la superficie anterior de la placa; pero se observa falta de brillo y la presencia de material particulado (observación al microscopio); mientras que en la Figura 32 se observa la presencia de manchas blanquecinas que se deben a la formación del óxido de aluminio sobre la superficie posterior de la placa.

- Cobre

En la Figura 31 se observa una coloración marrón oscura de la superficie anterior de la placa, típica de la formación de cuprita; así como también la presencia de manchas negras que indican la posible presencia de tenorita. También se observa la presencia de material particulado y manchas de gotas de agua con residuos de polvo. No se aprecian picaduras ni daño en la superficie.

La cara posterior presenta un color marrón oscuro con manchas claras, algunas de ellas de color verde como se muestra en la Figura 32, esto indica la presencia de sulfatos en la zona y por ende la posible formación de brocantita sobre la superficie.

- Acero galvanizado

Al igual que en la estación Mariscal, en esta estación también se tiene la presencia de una mancha de óxido de hierro sobre la cara anterior de la placa de acero galvanizado como se observa en la Figura 31. Esto, como se mencionó anteriormente, se debe a la ubicación de la placa en el mueble portaprobetas.

En las Figuras 31 y 32 se aprecia la formación de manchas blanquecinas y opacidad en ambas caras de la placa; además de la presencia de material particulado en poca cantidad sobre la superficie anterior. No se observan picaduras ni daños físicos sobre la superficie del metal.

## **b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

En esta estación se presenta uno de los valores más altos de concentración de  $\text{NO}_2$ , igual a  $49,85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con respecto a las otras estaciones. Esto se debe a que la estación se encuentra ubicada en una de las calles que funciona como arteria vehicular para unir el sur con el centro y norte de la ciudad, por lo que se tiene alta circulación de vehículos a gasolina y vehículos a diesel, que son la fuente principal de generación de óxidos de nitrógeno.

Con respecto a los otros contaminantes, en esta estación al igual que en La Marín el valor de concentración de material particulado es el mayor con respecto a las otras estaciones e igual a  $43,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto debido a la gran cantidad de vehículos que circulan por la zona y desprenden material particulado en forma de hollín. En esta estación la cantidad de precipitaciones pluviales presenta un valor considerable e igual a  $1\ 227,00 \text{ mm}$ ; así como también el valor más bajo de porcentaje de humedad relativa, igual a  $73,83\%$ , no así el tiempo de humectación cuyo valor es de  $3\ 082$  horas mayor al de las estaciones Mariscal y Quitumbe.

En la Tabla 15 se presentan los valores de corrosión del acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono correspondientes a la estación Necochea para el período de ensayo octubre del 2009 – septiembre del 2010 y se observa que al igual que en las otras estaciones, el acero al carbono es el metal que presenta los mayores valores de penetración de corrosión atmosférica con respecto a los otros metales.

La Figura 33 resume toda la información relacionada con los factores meteorológicos, de contaminación y corrosión de cada uno de los metales y en cada una de las estaciones de ensayo, y permite observar de mejor manera el análisis mensual efectuado a continuación.

**Tabla 15.** Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Necochea” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	Acero galvanizado ( $\mu\text{m}$ )	Cobre ( $\mu\text{m}$ )	Aluminio ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	Acero al carbono ( $\mu\text{m}$ )
Octubre	0,67	0,14	0,28	0,89
Noviembre	0,24	0,15	0,30	2,99
Diciembre	0,49	0,14	0,24	2,05
Enero	0,37	0,06	0,10	1,92
Febrero	0,40	0,09	0,25	1,48
Marzo	0,49	0,03	0,76	1,89
Abril	0,24	0,01	0,01	1,80
Mayo	0,24	0,13	0,09	0,81
Junio	0,45	0,13	0,21	1,96
Julio	0,12	0,14	0,24	1,93
Agosto	0,29	0,09	0,05	1,07
Septiembre	0,27	0,06	0,04	1,16

- Acero al carbono

El valor de penetración de corrosión atmosférica más alto se presenta en el mes de noviembre del 2009 y es igual a 2,99  $\mu\text{m}$ ; de la misma manera para este mes se registra el valor más alto de concentración de  $\text{NO}_2$  igual a 71,99  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Así mismo, en el mes de mayo del 2010 se registra el menor valor de penetración de la corrosión atmosférica sobre el acero al carbono, de 0,81  $\mu\text{m}$ , así como también un decremento en la concentración de  $\text{NO}_2$ . Con ello es posible decir que la corrosión del acero al carbono en esta estación depende principalmente de la concentración de  $\text{NO}_2$ . Sin embargo, aunque los valores de concentración de  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , material particulado y tiempo de humectación son relativamente moderados, su combinación posiblemente también influye aunque no de manera directa sobre el proceso corrosivo de este metal en esta estación.

- Aluminio

Se observa para el mes de marzo un valor extremadamente alto de corrosión del aluminio, al cual se lo considera un error de medición (gravimetría) de los datos

experimentales, debido a que el aluminio no presenta pérdida de material tan significativa bajo ninguna de las condiciones de estudio.

Al considerar los valores de corrosión de los otros meses, se observa que el mayor valor de corrosión se registra en el mes de noviembre del 2009 ( $0,30 \text{ g/m}^2$ ). Al igual que en el acero al carbono, el proceso de corrosión del aluminio se ve influenciado principalmente por la concentración de  $\text{NO}_2$ . En este caso, el tiempo de humectación del metal también intervendría en la pérdida de material, ya que en el mes de noviembre se registra uno de los valores más altos e igual a 318 horas.

- Cobre

Al igual que en el acero al carbono y el aluminio, la corrosión atmosférica en el cobre se relaciona directamente con la concentración de  $\text{NO}_2$ , ya que la mayor concentración de este contaminante se registra el mismo mes (noviembre del 2009) en el que se tiene el mayor valor de penetración de corrosión atmosférica igual a  $0,15 \mu\text{m}$ .

- Acero galvanizado

La corrosión del acero galvanizado se relaciona principalmente con los niveles de concentración de  $\text{SO}_2$  y no así con la concentración de  $\text{NO}_2$  como en los otros metales. Esto se evidencia en el mes de octubre del 2009, en el cual se registra el valor más alto de penetración de la corrosión atmosférica en el acero galvanizado igual a  $0,67 \mu\text{m}$ , así como también uno de los valores más altos de concentración de  $\text{SO}_2$  igual a  $13,92 \mu\text{g/m}^3$ ; sin embargo no se descarta la influencia de la concentración de  $\text{NO}_2$  y de los otros contaminantes en el proceso corrosivo de este metal.

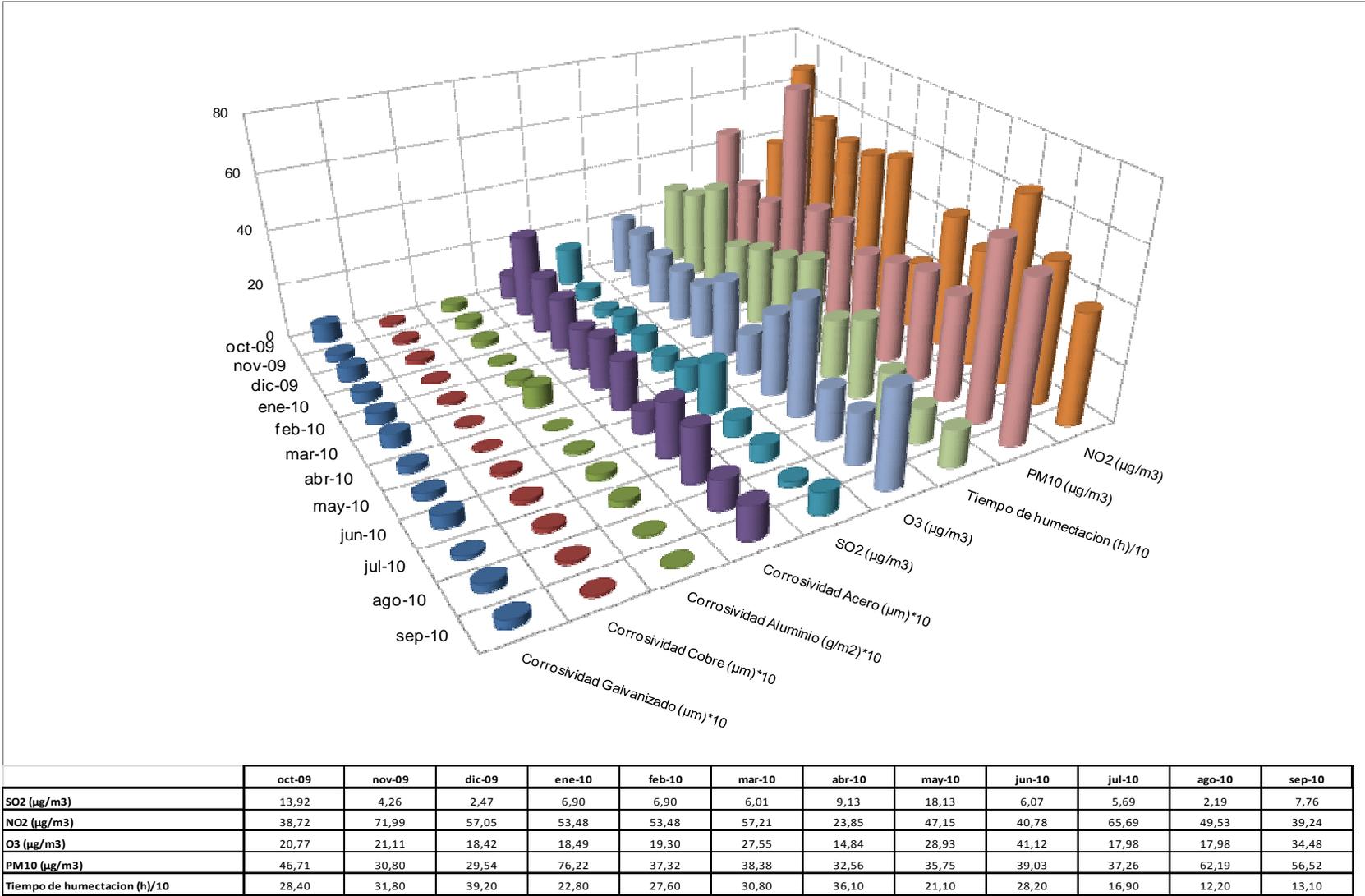


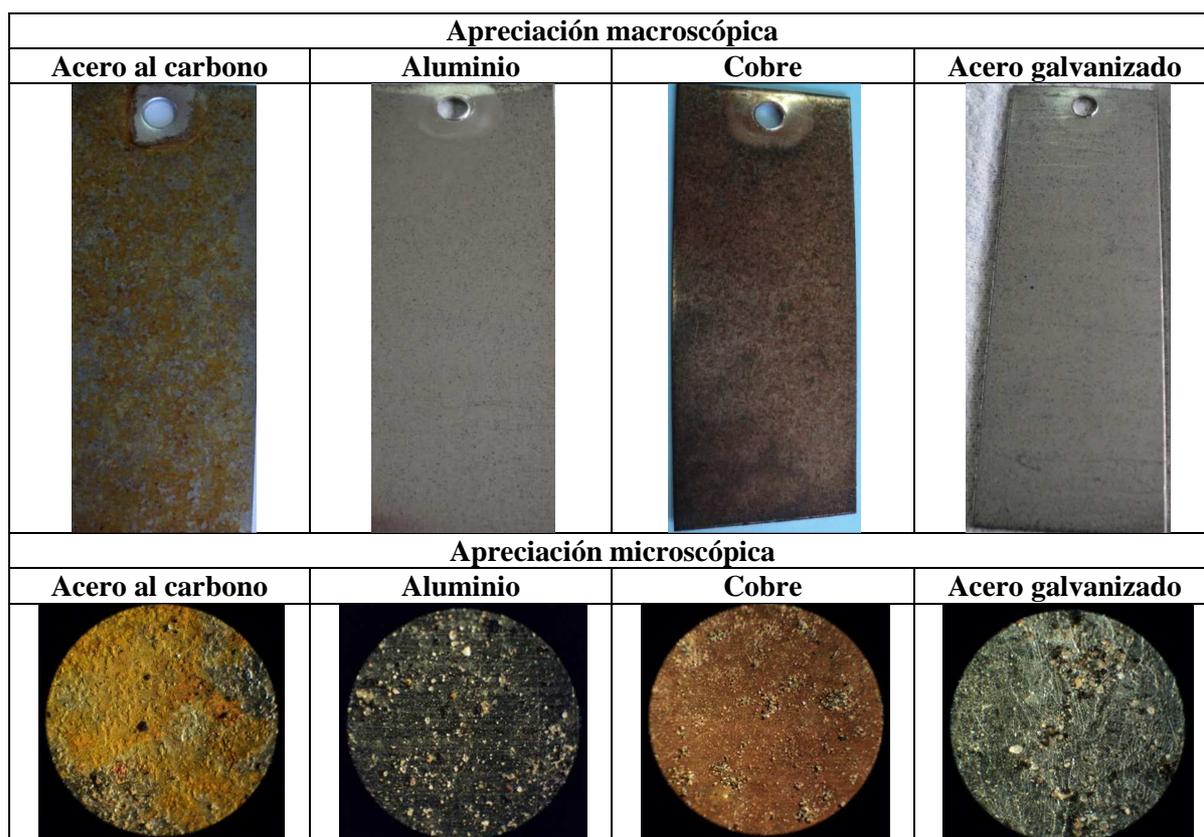
Figura 33. Resultados mensuales de la estación “Necochea”

### 3.3.1.6 Estación La Marín

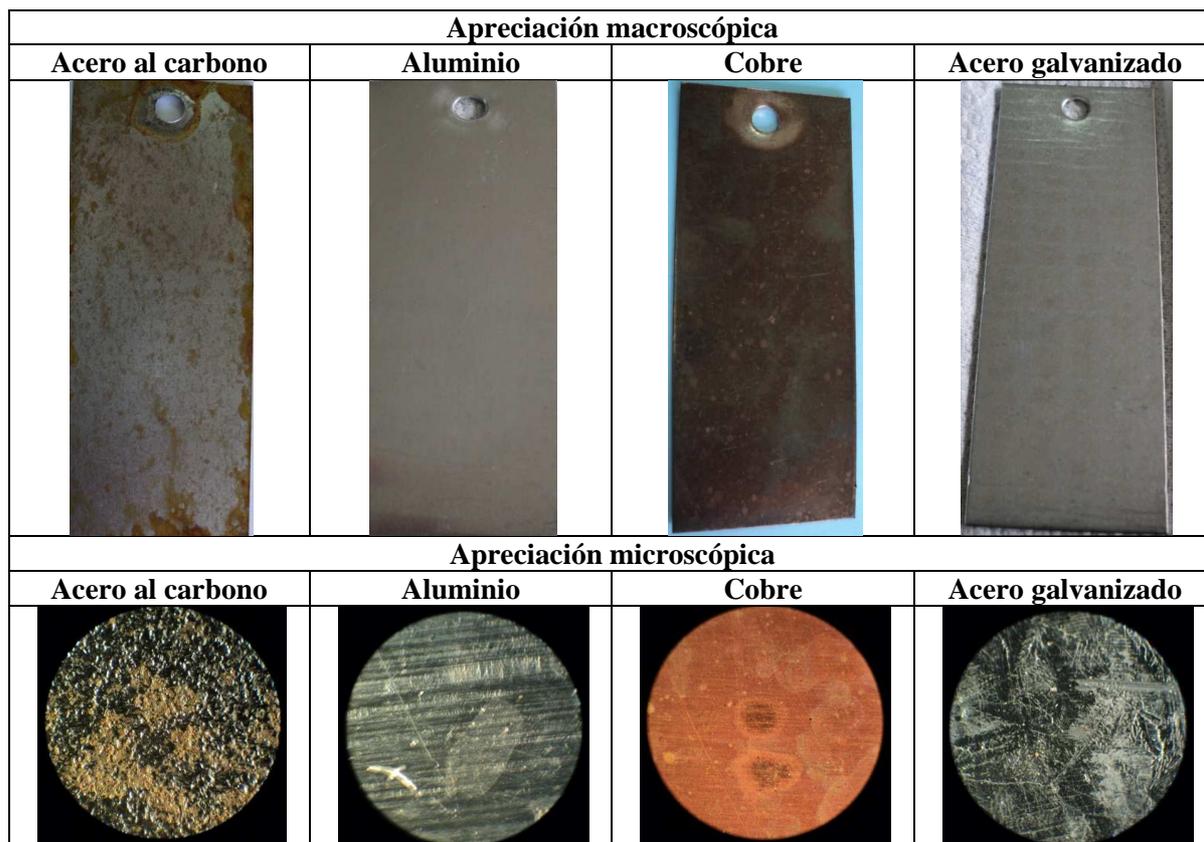
Por lo mencionado en el subcapítulo 2.4.2 y por el elevado tránsito vehicular en la zona, es importante la monitorización de esta estación.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

En las Figuras 34 y 35 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de las placas expuestas en la estación La Marín durante el mes de septiembre del 2010.



**Figura 34.** Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación La Marín, correspondiente al mes de Septiembre del 2010



**Figura 35.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación La Marín, correspondiente al mes de Septiembre del 2010

- Acero al carbono

Al contrario de las otras estaciones, La Marín es una de las que presenta una menor capa de óxido sobre la superficie anterior de la placa como se muestra en la Figura 34. También se observa una capa de hollín sobre esta superficie de la placa, lo cual se debe a la circulación masiva de vehículos que utilizan diesel como combustible. Se aprecia también una capa de óxido color anaranjado que no cubre en totalidad la superficie anterior; mientras que la superficie posterior solamente presenta leves manchas de óxido en el centro como se observa en la Figura 35.

Con ayuda del microscopio se aprecia que la cantidad de material particulado depositado sobre la superficie anterior es menor a la que se observa a simple vista. No se observan picaduras ni daño profundo en las superficies.

- Aluminio

En la Figura 34 se observa claramente la capa de hollín formada sobre la superficie anterior de la placa; así como también la falta de brillo por la formación de manchas blanquecinas propias de la alúmina; mientras que en la figura 35 no se observa depósito de material particulado en la cara posterior de la placa pero si la disminución del brillo al igual que en la cara anterior. Con el microscopio óptico se aprecia la gran cantidad de material particulado (hollín) que se depositó sobre la superficie anterior, y no se observa picaduras ni daño físico en las dos caras del metal.

- Cobre

En la Figura 34 también se aprecia la capa de hollín sobre la superficie anterior de la placa, así como también una coloración marrón oscura típica de la formación de cuprita, y manchas negras correspondientes a la posible formación de tenorita. Al igual que en el aluminio, con el microscopio óptico se observa que la cara anterior (expuesta al sol) presenta gran cantidad de material particulado, pero no se aprecia daño en la superficie ni picaduras.

La cara posterior de la placa presenta una coloración marrón oscura más o menos uniforme, con manchas de tonalidad más clara, y otras de color verde que evidencian la presencia de sulfatos en la zona, esto se aprecia en la Figura 35. No se observa depósito de material particulado a diferencia de la cara anterior y tampoco se aprecia daño en la superficie.

- Acero galvanizado

A diferencia de la estación Necochea, en esta estación el acero galvanizado si presenta una cantidad significativa de material particulado sobre la superficie anterior de la placa como se observa en la Figura 34. En las Figuras 34 y 35 se observa que ambas caras de la placa presentan disminución del brillo natural del metal debido a la formación de una capa de óxidos de cinc sobre la superficie y no se aprecian picaduras ni daños en el metal.

## **b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

La estación “La Marín” debido a la masiva circulación de transporte público (vehículos que utilizan diesel como combustible) por la zona, presenta los niveles más altos de concentración promedio de  $\text{NO}_2$  igual a  $68,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pero debido a su ubicación geográfica, es la estación con menor concentración de  $\text{O}_3$ , cuyo valor es igual a  $13,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Al igual que para la estación Mariscal, La Marín también presenta altos valores de concentración de material particulado ( $43,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Con respecto a la concentración de  $\text{SO}_2$ , y a pesar de que por la zona también se tiene alto tránsito de vehículos livianos que utilizan gasolina como combustible, su concentración no es tan elevada comparada con las estaciones Quitumbe, Mariscal y Carcelén, pero su valor igual a  $9,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , es mayor que aquel que se registra en la estación Necochea, cuyas condiciones de contaminación atmosférica son similares a las de La Marín. También presenta el valor más bajo de porcentaje de humedad relativa, igual a 73,83%, pero un tiempo de humectación igual a 3 082 horas, mayor que el de las estaciones Mariscal y Quitumbe.

En la Tabla 16 se presentan los valores de corrosión de acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono correspondientes a la estación La Marín para el período de ensayo octubre del 2009 – septiembre del 2010; mientras que la Figura 36 resume toda la información relacionada con los factores meteorológicos, de contaminación y corrosión de cada uno de los metales para cada una de las estaciones de ensayo y permite observar de mejor manera el análisis mensual que se encuentra a continuación.

**Tabla 16.** Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “La Marín” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	Acero galvanizado ( $\mu\text{m}$ )	Cobre ( $\mu\text{m}$ )	Aluminio ( $\text{g/m}^2$ )	Acero al carbono ( $\mu\text{m}$ )
Octubre	0,72	0,14	0,29	1,86
Noviembre	0,96	0,02	0,28	2,04
Diciembre	0,98	0,14	0,05	1,77
Enero	0,94	0,05	0,10	1,83
Febrero	0,27	0,06	0,13	0,76
Marzo	0,51	0,02	0,18	1,45
Abril	0,25	0,04	0,01	0,94
Mayo	0,25	0,11	0,31	0,69
Junio	0,41	0,10	0,15	0,93
Julio	0,15	0,11	0,18	1,58
Agosto	0,18	0,04	0,05	0,57
Septiembre	0,18	0,04	0,03	0,73

- Acero al carbono

Los meses de octubre y noviembre del 2009 se registran los mayores valores de penetración de corrosión atmosférica en el acero al carbono e iguales a 1,86  $\mu\text{m}$  y 2,04  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Así también, la concentración de  $\text{NO}_2$  registrada en estos meses presenta valores elevados, aunque cabe recalcar que no son los más altos durante el período de ensayo. Lo mismo sucede con el tiempo de humectación cuyos valores para estos meses son 284 horas y 318 horas respectivamente. En el mes de agosto del 2010 se registra el menor valor de penetración de la contaminación atmosférica sobre el acero al carbono (0,57  $\mu\text{m}$ ), así como también un decremento en la concentración de  $\text{NO}_2$  y el menor valor de tiempo de humectación (122 horas). Esto indica que la corrosión del acero al carbono en esta estación se ve influenciada principalmente por la concentración de  $\text{NO}_2$ , por el tiempo de humectación y en menor escala por la concentración de los otros contaminantes cuyos valores registrados son relativamente moderados a lo largo del período de ensayo.

- Aluminio

El mayor valor de corrosión del aluminio se registra en el mes de mayo del 2010 y es igual a  $0,31 \text{ g/m}^2$ ; así mismo, en este mes la concentración de  $\text{SO}_2$  presenta el valor más alto e igual a  $23,70 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ; lo mismo ocurre con el tiempo de humectación, el cual influye directamente sobre la pérdida de material. Los otros contaminantes presentan concentraciones moderadas durante este mes por lo que en este caso no se los relaciona directamente con la corrosión del aluminio.

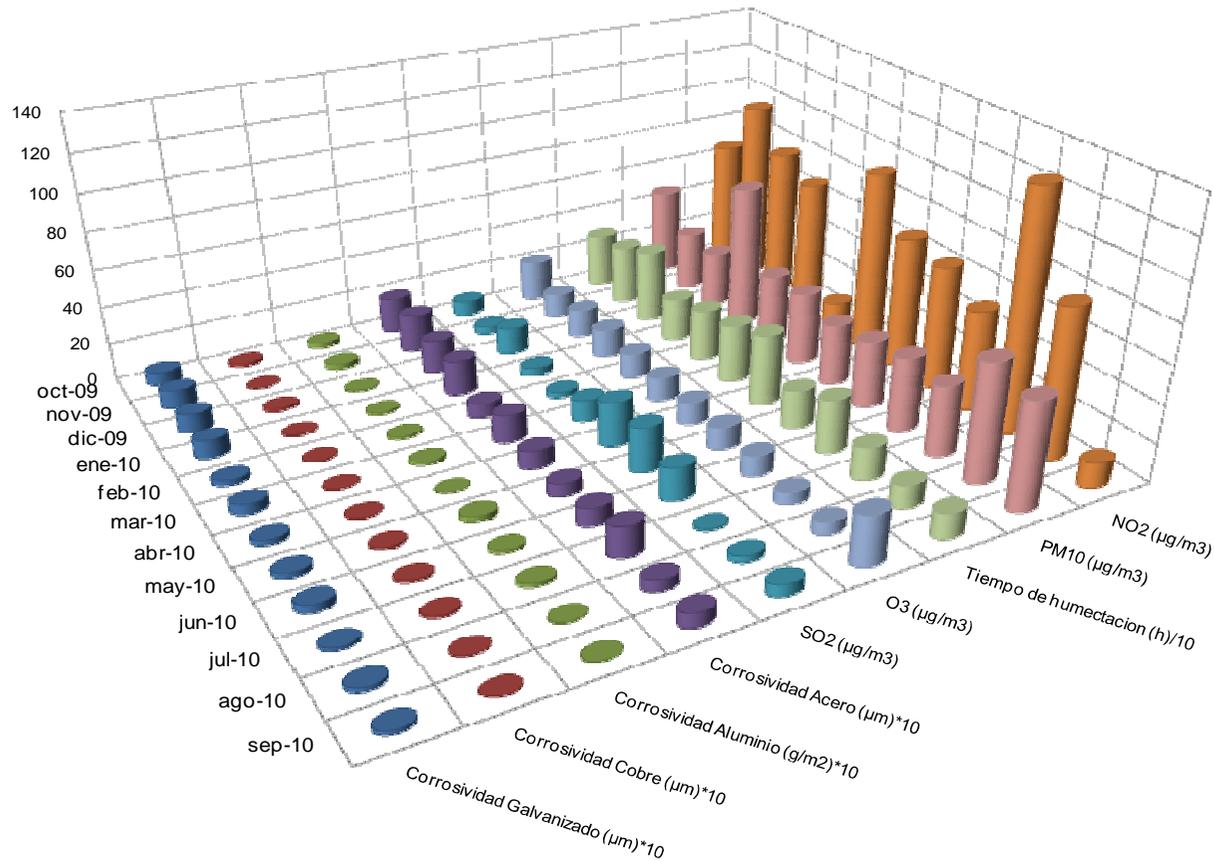
- Cobre

La penetración de la corrosión atmosférica en el cobre presenta el mayor valor en el mes de octubre del 2009 igual a  $1,14 \text{ } \mu\text{m}$ , y los menores valores en los meses de noviembre y marzo e iguales a  $0,02 \text{ } \mu\text{m}$  en ambos casos.

No se observa influencia directa únicamente de algún factor atmosférico o de contaminación, ya que los valores registrados en el mes de octubre en el cual se presentó el mayor valor de corrosión del cobre, son moderados y no varían mayormente mes a mes; por lo que en este caso la pérdida de material se debe a la combinación de la concentración de los contaminantes atmosféricos, así como también al tiempo de humectación de la superficie metálica cuyos valores son altos en los primeros meses de ensayo.

- Acero galvanizado

El acero galvanizado registra el valor más alto de penetración de la corrosión atmosférica en el mes de diciembre del 2009 e igual a  $0,98 \text{ } \mu\text{m}$ ; así también se tiene la mayor cantidad de precipitaciones pluviales ( $128,40 \text{ mm}$ ) y el valor más alto de tiempo de humectación ( $392 \text{ horas}$ ) por lo que es posible notar que este factor también influye en la pérdida de cinc en esta estación. Además, se observa que la presencia de sulfatos y óxidos de nitrógeno en la zona presentan influencia en el proceso corrosivo del acero galvanizado en esta estación, no así el material particulado ni la concentración de  $\text{O}_3$ .



	oct-09	nov-09	dic-09	ene-10	feb-10	mar-10	abr-10	may-10	jun-10	jul-10	ago-10	sep-10
SO2 (µg/m3)	7,46	3,68	14,32	3,85	2,74	11,19	23,41	23,70	17,03	0,85	3,25	5,80
NO2 (µg/m3)	66,45	97,46	79,36	70,70	12,40	94,78	69,75	65,29	53,29	126,26	78,95	12,74
O3 (µg/m3)	21,48	13,12	15,12	15,26	13,39	12,38	11,91	11,92	10,69	6,18	6,18	26,02
PM10 (µg/m3)	46,71	30,80	29,54	76,22	37,32	38,38	32,56	35,75	39,03	37,26	62,19	56,52
Tiempo de humectacion (h)/10	28,40	31,80	39,20	22,80	27,60	30,80	37,30	19,90	28,20	16,90	12,20	13,10

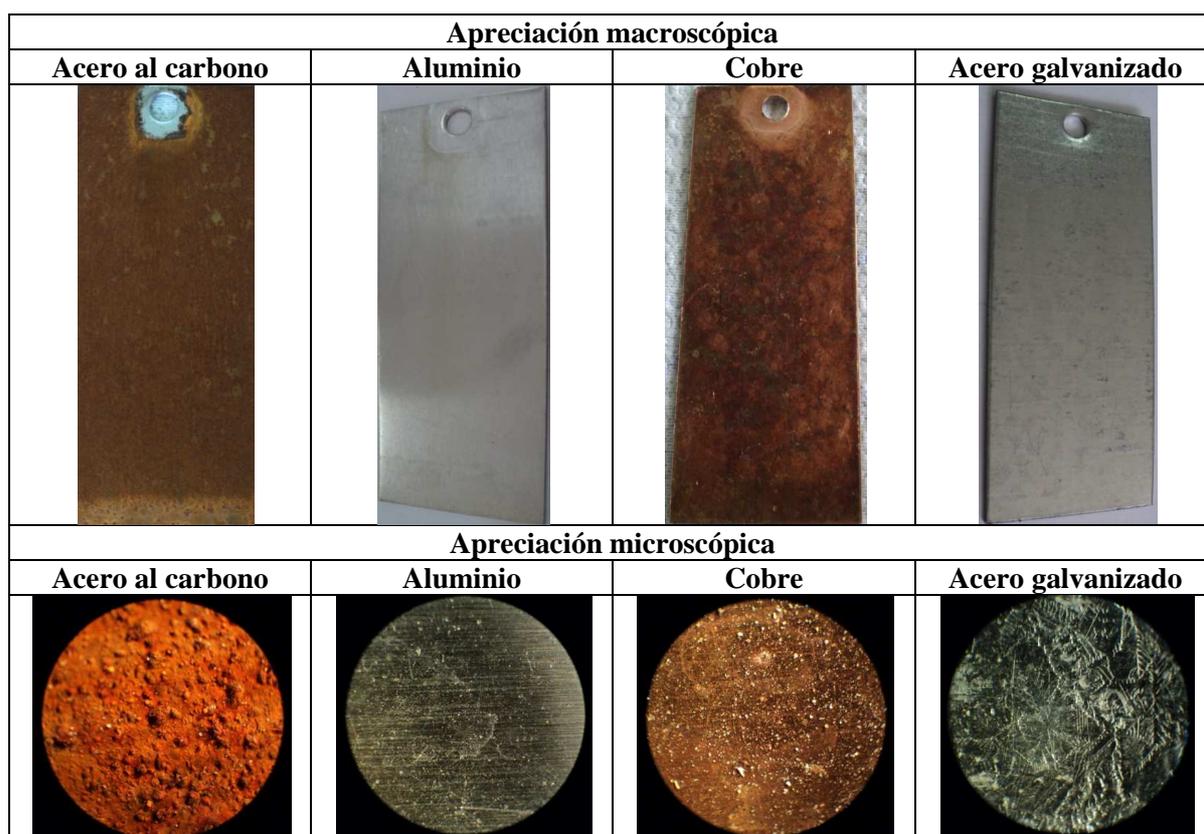
Figura 36. Resultados mensuales de la estación “La Marín”

### 3.3.1.7 Estación Quitumbe

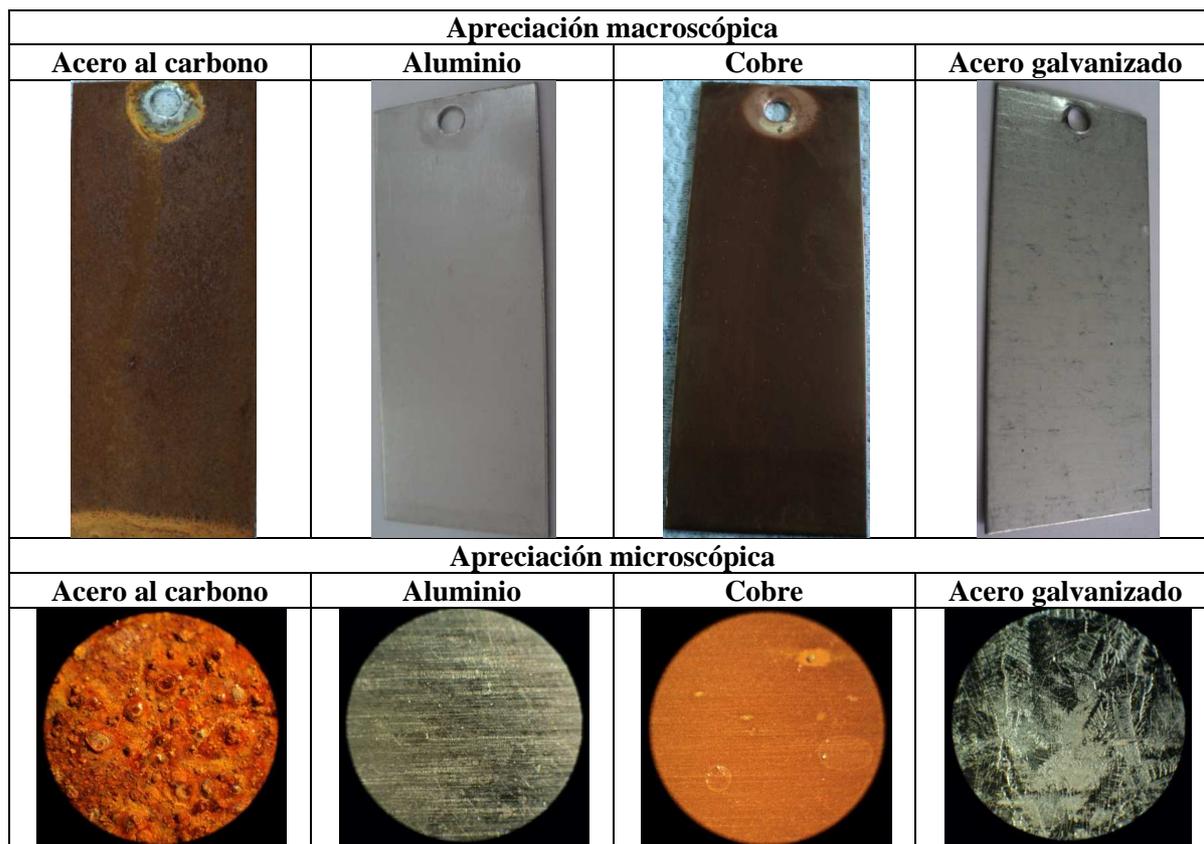
La importancia de la monitorización de esta estación radica en lo mencionado en el subcapítulo 2.4.2.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

En las Figuras 37 y 38 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de las placas expuestas en la estación Quitumbe durante el mes de agosto del 2010.



**Figura 37.** Apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Quitumbe, correspondiente al mes de Agosto del 2010



**Figura 38.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara posterior de las placas de acero al carbono, aluminio, cobre y acero galvanizado de la estación Quitumbe, correspondiente al mes de Agosto del 2010

- Acero al carbono

En las Figuras 37 y 38 se observa que en esta estación el ataque corrosivo sobre el acero al carbono es más severo ya que se aprecia una capa de óxido color café oscuro que se presenta de manera uniforme especialmente sobre la cara anterior de la placa; mientras que en la cara posterior la capa de óxido presenta un color café más oscuro en el centro de la misma. En ambas caras se aprecia una coloración anaranjada en el borde inferior, lo que indica mayor corrosión y pérdida de material en esa zona. Con el microscopio óptico se observa claramente la presencia de ampollas de óxido y picaduras generalizadas especialmente en la cara posterior de la placa.

- Aluminio

En la placa de aluminio que se presenta en la Figura 37 se observa una leve mancha de óxido de hierro en la parte central superior de la cara anterior, esto al igual que en otras estaciones se debe a la ubicación de la placa en el mueble portaprobetas.

En las Figuras 37 y 38 se aprecia una disminución significativa en el brillo de las dos caras de la placa, más no la formación de manchas blanquecinas como se observó en las otras estaciones. También se observa el depósito de material particulado sobre la cara anterior de la placa y a diferencia de las otras estaciones, esta estación es la única en la que se puede observar claramente picaduras sobre las superficies de la placa de aluminio como se muestra en la Figura 37, esto evidencia mayor agresividad del ambiente sobre los metales en esta zona.

- Cobre

En la Figura 37 se observa que la superficie anterior de la placa presenta un color rojo oscuro típico de la cuprita, y manchas de color marrón oscuro y verde, propias de la formación de tenorita y brocantita, respectivamente. Con el microscopio óptico se observa la presencia de gran cantidad de material particulado sobre la superficie, lo cual dificulta observar claramente el daño sufrido en esta cara de la placa.

En la Figura 38, aunque, debido a la variación de luz el momento de tomar la fotografía, no se observa claramente el color café oscuro y verdoso que presenta la superficie posterior de la placa, este color indica la posible presencia de brocantita. No se presentan manchas negras como en la cara anterior, pero se evidencia mayor opacidad y picaduras focalizadas en la superficie.

- Acero galvanizado

En las Figuras 37 y 38 se aprecia la disminución significativa en el brillo natural del cinc en ambas caras de la placa. A diferencia de las otras estaciones no se

observa manchas blanquecinas a lo largo de la superficie y tampoco picaduras ni daños físicos en la placa.

### b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes

Debido a la gran cantidad de fábricas y a sus procesos de combustión que se tienen en el sector, la estación “Quitumbe” presenta el valor más alto de concentración de SO<sub>2</sub> igual a 28,89 µg/m<sup>3</sup>.

Las concentraciones de los otros contaminantes atmosféricos son similares al resto de estaciones; sin embargo, los valores de porcentaje de humedad relativa y tiempo de humectación son los más bajos (73,83% y 2 819 horas, respectivamente).

En la Tabla 17 se presentan los valores de corrosión del acero galvanizado, cobre, aluminio y acero al carbono correspondientes a la estación Quitumbe para el período de ensayo octubre del 2009 – septiembre del 2010.

**Tabla 17.** Valores de corrosión del acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre calculados para la estación “Quitumbe” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	Acero galvanizado (µm)	Cobre (µm)	Aluminio (g/m <sup>2</sup> )	Acero al carbono (µm)
Octubre	0,90	0,17	0,26	3,12
Noviembre	0,92	0,04	0,16	3,10
Diciembre	0,27	0,16	0,08	2,79
Enero	0,72	0,05	0,10	2,87
Febrero	0,20	0,06	0,10	2,04
Marzo	0,96	0,11	0,24	2,97
Abril	0,26	0,06	0,06	2,97
Mayo	0,33	0,15	0,18	1,94
Junio	0,52	0,14	0,20	3,18
Julio	0,16	0,15	0,21	2,84
Agosto	0,29	0,13	0,03	2,92
Septiembre	0,30	0,06	0,01	3,18

La Figura 39 resume toda la información relacionada con los factores meteorológicos, de contaminación y corrosión de cada uno de los metales y en cada una de las estaciones de ensayo.

- Acero al carbono

En el mes de junio del 2010 se registra el valor más alto de penetración de corrosión atmosférica sobre el acero al carbono e igual a  $3,18 \mu\text{m}$ , este valor es el más alto con respecto a todas las estaciones, es decir que, como se mencionó en los análisis visuales, la estación Quitumbe presenta un ambiente más agresivo con respecto a las otras.

En esta estación la corrosión del acero al carbono depende principalmente de la concentración de  $\text{SO}_2$  ya que su mayor valor igual a  $92,65 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se registra el mismo mes en el que se tiene la mayor penetración de corrosión atmosférica; pero también se observa que el tiempo de humectación de la superficie influye en cierta forma sobre la corrosión de este metal ya que el mes de junio se registró uno de los valores más altos e igual a 282 horas. Los otros contaminantes no tienen, al parecer, relación directa con la pérdida de material.

En el mes de mayo del 2010 se registra el valor más bajo de penetración de corrosión que es igual a  $1,94 \mu\text{m}$ , así como también un decremento en las horas de humectación de la superficie.

- Aluminio

La corrosión del aluminio en esta estación presenta el valor más alto en el mes de octubre del 2009 y el más bajo en el mes de septiembre del 2010, estos valores son  $0,26 \text{ g}/\text{m}^2$  y  $0,01 \text{ g}/\text{m}^2$ , respectivamente. Durante los meses mencionados los valores de contaminación registrados son relativamente bajos pero se observa que en octubre del 2009 se presenta el mayor valor de concentración de material particulado que corresponde a  $58,79 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y que para el mes de septiembre del 2010 la concentración de este contaminante decrece. Al parecer, la concentración de material particulado influye directamente en la corrosión de este metal; sin embargo, aunque no se aprecia claramente, es posible que la combinación de los

otros contaminantes también influyan de cierta forma en la pérdida de material en esta estación.

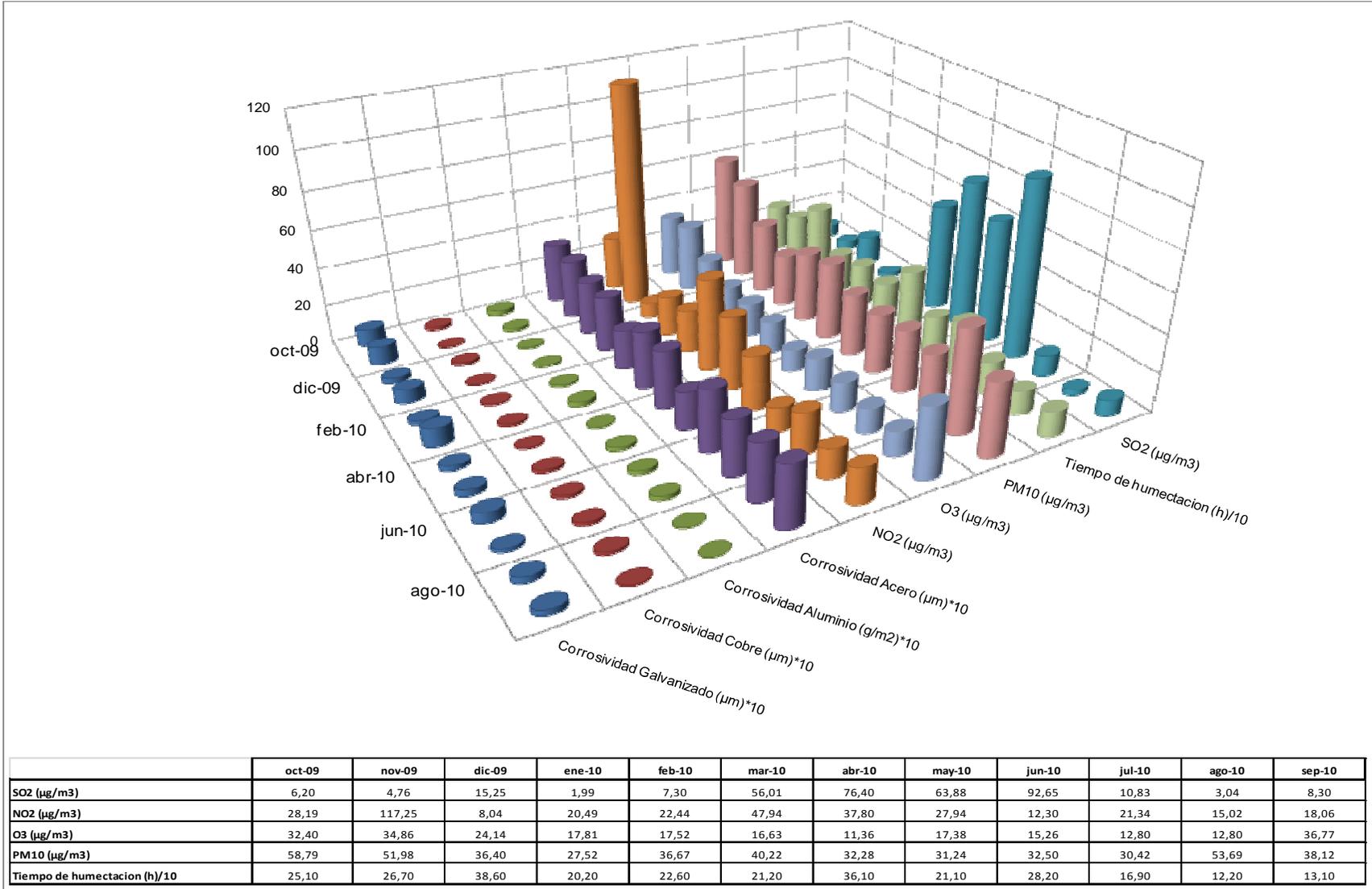
- Cobre

Al igual que sucede con el aluminio, el cobre también presenta el mayor valor de penetración de la corrosión atmosférica en el mes de octubre del 2009 (1,17  $\mu\text{m}$ ); así como también el mayor valor de concentración de material particulado (58,79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), por lo que de la misma manera, es posible decir que este contaminante presenta relación directa con el proceso corrosivo del cobre en esta estación, pero que la combinación de los otros contaminantes y factores meteorológicos también podrían influenciar sobre la pérdida de este material en esta estación.

- Acero galvanizado

La corrosión del acero galvanizado está relacionada principalmente con la concentración de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y material particulado, ya que en el mes de marzo se registran valores altos de concentración de estos contaminantes, así como también el mayor valor de penetración de corrosión atmosférica que es igual a 0,96  $\mu\text{m}$ .

La concentración de  $\text{O}_3$  no presenta variación significativa durante el período de ensayo, por lo que no se observa influencia directa con el proceso corrosivo de este metal.



**Figura 39.** Resultados mensuales de la estación “Quitumbe”

### **3.3.2 ANÁLISIS DESPUÉS DEL AÑO DE EXPOSICIÓN**

Después de haber presentado los resultados de las placas denominadas “flotantes”, se presentan aquí los resultados obtenidos para un año de ensayo.

Para este análisis se utilizaron los valores promedios y acumulados de contaminantes atmosféricos y factores meteorológicos que se presentan en los Anexos II y III.

Con los resultados de corrosión obtenidos para el año de exposición y de acuerdo con la norma ISO 9223, se realizó la clasificación de agresividad de la atmósfera para cada uno de los metales utilizados.

Las fotografías de las placas de cada metal corresponden a las de la estación que presenta mayor ataque corrosivo sobre cada uno de los metales.

Es importante mencionar que para las placas de acero al carbono expuestas durante un año se realizaron también análisis de los óxidos de hierro, mediante microscopía electrónica por EDS y difracción de rayos X para cada una de las estaciones.

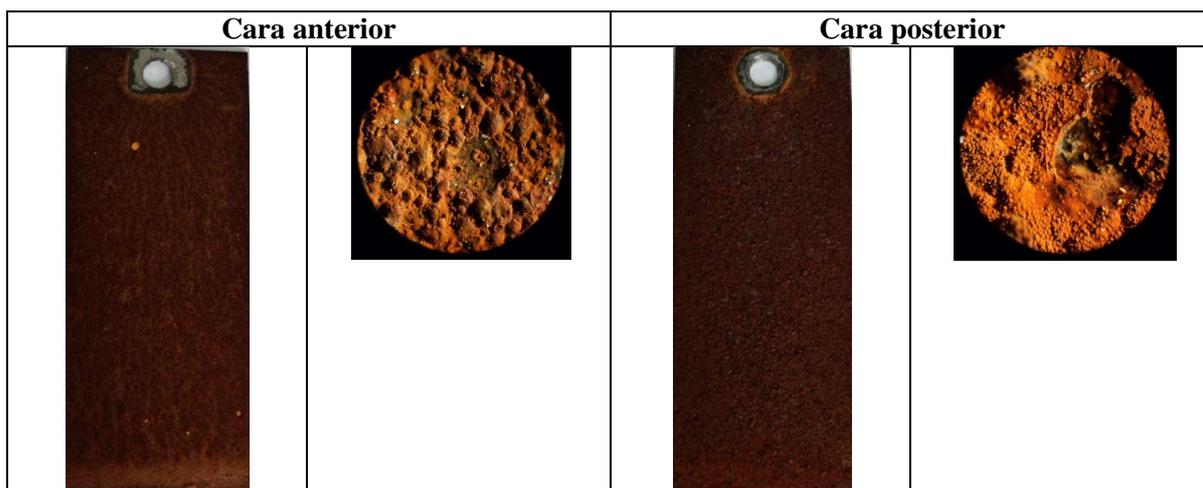
La Figura 54 reúne los datos de corrosión de cada metal, así como también los valores promedio de los contaminantes atmosféricos y factores meteorológicos para el año de ensayo.

#### **3.3.2.1 Corrosión del acero al carbono**

En general, la corrosión atmosférica del acero al carbono inicia en puntos aislados de su superficie en donde se da la formación de “nidos de óxido” que aumentan progresivamente hasta formar una capa de herrumbre en toda la superficie metálica, esta capa de herrumbre puede ser de color café oscuro, marrón, pardo rojizo, entre otros, dependiendo de la atmósfera en la que se encuentre.

### a) Apreciación macroscópica y microscópica

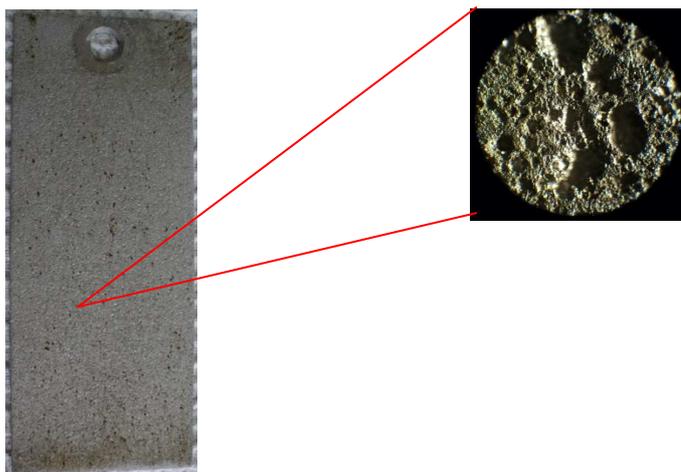
En la Figura 40 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de la placa de acero al carbono expuesta durante 1 año en la estación Quitumbe.



**Figura 40.** Cara anterior y cara posterior de la placa de acero al carbono correspondiente al año de exposición para la estación Quitumbe

Como se observa en la Figura 40, las capas de óxido en ambos casos son muy compactas y de espesor significativo; para el caso de la superficie anterior, el color de la capa de óxido es más claro con respecto a la cara posterior en la cual se evidencia mayor concentración de la corrosión. A simple vista es posible apreciar corrosión generalizada con daño en la superficie. Con el microscopio óptico se observa claramente un ataque corrosivo muy severo, y cuantiosa pérdida de material debido a la formación de picaduras generalizadas y profundas especialmente en la cara posterior de la placa.

En la Figura 41 se presenta la imagen de la placa de acero al carbono después de la limpieza química y se evidencia claramente el daño severo que sufrió el metal, especialmente en la cara posterior en donde se tiene mayor humedad de la superficie, como se mencionó anteriormente.



**Figura 41.** Cara posterior de la placa de acero al carbono de la estación Quitumbe después de la limpieza química, correspondiente al año de exposición

**b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

En la Tabla 18 se presentan los valores anuales de corrosión del acero al carbono correspondientes a cada estación y la clasificación de las atmósferas de acuerdo a la norma ISO 9223.

**Tabla 18.** Valores de penetración de la corrosión atmosférica calculados para las placas de acero al carbono expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223.

Estación	Corrosión anual ( $\mu\text{m}$ )	Clasificación de la atmósfera según norma ISO 9223	
		C2	Baja
Carcelén	12,88	C2	Baja
Kennedy	11,08	C2	Baja
Cruz Loma	13,40	C2	Baja
Mariscal	14,80	C2	Baja
Necochea	9,56	C2	Baja
La Marín	4,45	C2	Baja
Quitumbe	22,41	C2	Baja

Con los resultados presentados en la Tabla 18, se observa que la atmósfera de la ciudad de Quito se clasifica dentro del grupo C2 para el acero al carbono, de acuerdo a la norma ISO 9223, lo que indica un bajo nivel de agresividad contra dicho metal.

La estación que presenta el mayor valor de penetración de la corrosión sobre el acero al carbono para el año de exposición es la estación Quitumbe, cuyo valor es igual a 22,41  $\mu\text{m}$ . Este comportamiento ocurre debido a que en la zona se tienen altos niveles de contaminación, especialmente de  $\text{SO}_2$  ( $30,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) que origina los “nidos de óxido”, los mismos se propagan rápidamente y ocupan toda la superficie metálica.

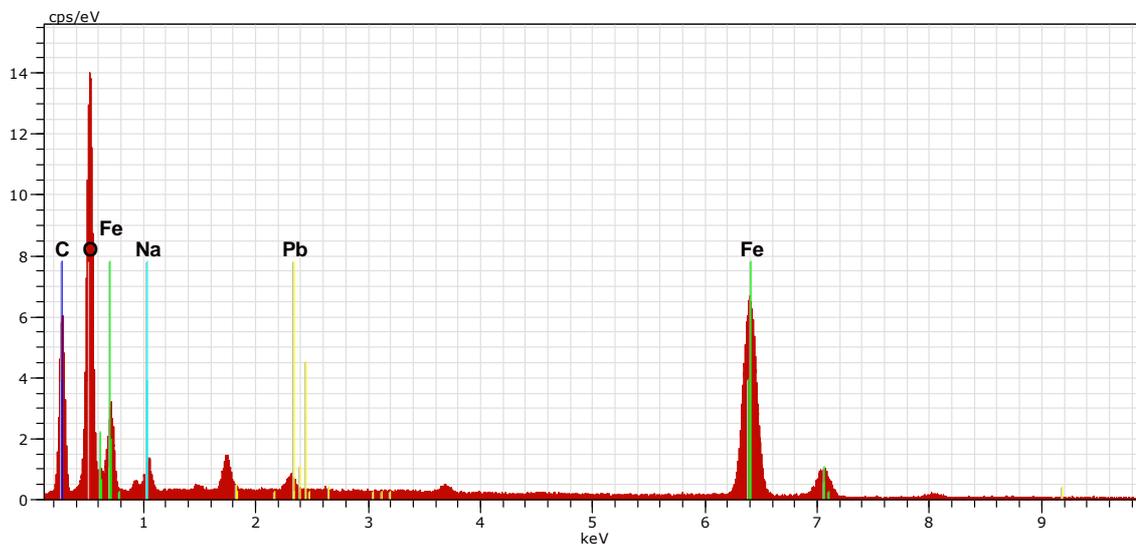
También se observa que para las estaciones Necochea y La Marín, los valores de penetración de la corrosión atmosférica son los más bajos, esto se debe posiblemente a la formación de una capa de hollín sobre la superficie anterior de las placas. En el Anexo II se observa que, para las estaciones mencionadas, las precipitaciones durante el primer semestre del año de ensayo son mayores que para los meses restantes, esto hace que la capa de hollín formada se adhiera fuertemente a la superficie impidiendo el paso de oxígeno y de contaminantes que aceleran el proceso corrosivo.

Para las otras estaciones, los valores de penetración de la corrosión atmosférica son similares entre sí, ya que las concentraciones de contaminantes y los factores meteorológicos analizados no presentan variaciones significativas entre estaciones.

### **c) Análisis por microscopía electrónica de barrido mediante EDS**

Este análisis químico se realizó en el “Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional”, con los óxidos de hierro obtenidos en las placas de acero al carbono expuestas durante un año, ya que éstas presentaron una cantidad de óxido considerable para ser analizada. Para cada una de las estaciones se obtuvieron los espectros que se muestran en el Anexo VI, pero en

la Figura 42 se muestra un ejemplo de uno de ellos y el resumen de los resultados se presenta en la Tabla 19.



**Figura 42.** Espectro de análisis MEB-EDS de la muestra de herrumbre obtenida de la placa de acero al carbono expuesta durante un año en la estación Carcelén

En la Figura 42 se observa la presencia de carbono, oxígeno, hierro, sodio y potasio como elementos presentes en la muestra de herrumbre obtenida de la estación Carcelén.

**Tabla 19.** Porcentajes de elementos obtenidos mediante análisis químico con microscopía electrónica de barrido - EDS para cada una de las estaciones de ensayo

Estación	Oxígeno (%)	Carbono (%)	Hierro (%)	Azufre (%)	Sodio (%)	Plomo (%)
Carcelén	38,45	24,67	34,32	-	2,47	0,88
Kennedy	39,37	13,24	47,21	0,17	-	-
Cruz Loma	39,11	20,36	40,47	0,05	-	-
Mariscal	39,42	16,76	43,52	0,30	-	-
Necochea	37,33	26,64	35,88	0,16	-	-
La Marín	37,33	16,13	44,42	0,47	1,65	-
Quitumbe	38,68	18,75	42,44	0,13	-	-

En la Tabla 19 se observa la presencia de un moderado porcentaje de oxígeno en las estaciones, esto indica que este no es un factor determinante en la corrosión del acero al carbono, ya que en todas las estaciones se tienen porcentajes similares de este contaminante, no así los valores de corrosión presentados en la Tabla 18. También se aprecia alto contenido de hierro, propio de la formación de los óxidos de hierro en la superficie a causa de la corrosión.

Es importante analizar la presencia de carbono en las muestras presentadas, esto debido a que el carbono es un elemento proveniente de la combustión de combustibles fósiles. Se observa en la Tabla 19 que las estaciones con mayor contenido de carbono son Necochea y Carcelén. Sin embargo, en la estación La Marín en donde se esperaba tener un alto valor de este contaminante, se tiene el valor más bajo, esto se debe a que la capa de material particulado que se observa sobre la superficie expuesta es una capa de “hollín” y “smog” (se origina de la combinación de los óxidos de azufre presentes en la atmósfera y el vapor de agua en el aire, que provoca la denominada “lluvia ácida” y la suspensión de varias partículas de contaminantes, entre ellos el azufre), la cual está formada no solamente por carbono como se esperaba sino también por otros contaminantes como en este caso el azufre.

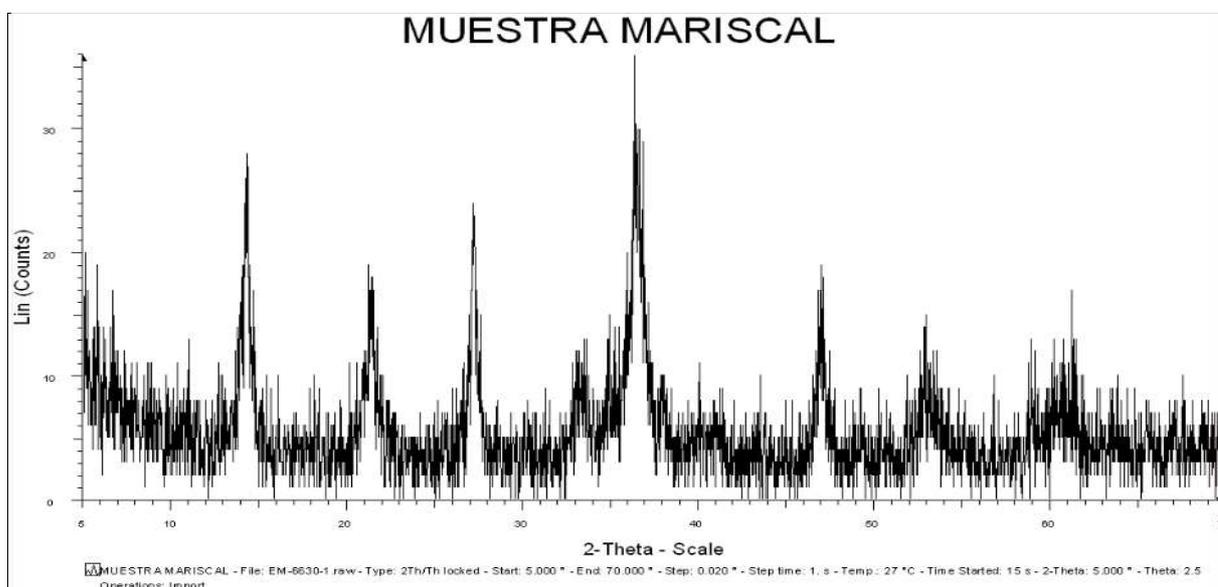
Con respecto a la presencia de azufre, se observa que éste elemento no es significativo, esto quiere decir que no se deposita en gran cantidad sobre las placas metálicas, sino que permanece en el ambiente en forma de sulfato o como ácido presente en la “lluvia ácida”. También cabe recalcar que la estación en la que se tiene un porcentaje mayor de este elemento es La Marín, esto a causa de la cantidad de precipitaciones pluviales en la zona (1 227 mm) y la alta afluencia vehicular que conjuntamente provocan el depósito de este elemento sobre la superficie de los metales expuestos.

En el caso del sodio, se observa que en la estación Carcelén, su porcentaje es el más alto con respecto a las demás. Esto quizá se debe al desprendimiento de este mineral del agua o de la gasolina que utilizan los vehículos que transitan por el sector (Widman, 2009).

#### d) Análisis mediante difracción de rayos X

Debido a la poca cantidad de muestra de óxido de hierro obtenida en un año de exposición, se realizó el análisis únicamente para las estaciones Mariscal y Quitumbe, de las cuales se obtuvo una cantidad adecuada para el análisis.

En la Figura 43 se muestra el difractograma de la estación Mariscal, el cual permite observar de mejor manera el análisis realizado. El difractograma de la estación Quitumbe es muy similar por lo que se lo presenta en el Anexo VII conjuntamente con el informe entregado por el “Departamento de Metalurgia Extractiva”.



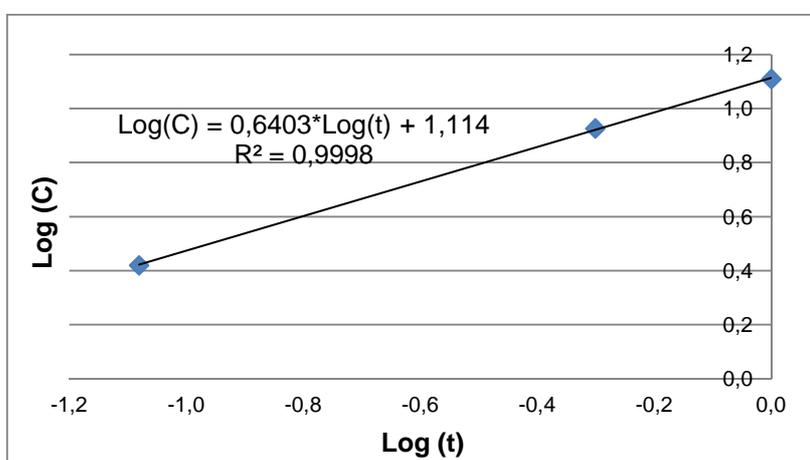
**Figura 43.** Difractograma de los óxidos de hierro de la estación “Mariscal”

Se observa la presencia de picos de difracción correspondientes a la goethita y lepidocrocita en esta estación. Lo mismo se observa en la estación Quitumbe; esto concuerda con la información bibliográfica, en donde dice que la película de corrosión del hierro muestra dos capas; una interna formada por productos de corrosión amorfos y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ; y una externa, formada especialmente por goethita y lepidocrocita que son los oxihidróxidos de hierro que se presentan en atmósferas que no contengan cloruros, es decir, en atmósferas rurales, urbanas e industriales. Cuantitativamente, las muestras analizadas presentan mayor

cantidad de goethita (50%) como se observa en el Anexo VII, esto se debe a que la goethita es el compuesto más estable del acero (Morcillo *et al.*, 1998).

### e) Análisis de las ecuaciones de la cinética de corrosión

Con los datos de corrosión (mensual, semestral y anual) obtenidos en todas las estaciones y mediante la realización de una regresión lineal bilogarítmica como se muestra en la Figura 44, se obtuvieron para el caso del acero al carbono, las siguientes ecuaciones.



**Figura 44.** Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del acero al carbono en la estación Carcelén

$$\text{Carcelén:} \quad C = 13,0017 * t^{0,6403} \quad [3.1]$$

$$\text{Kennedy:} \quad C = 11,5904 * t^{0,5353} \quad [3.2]$$

$$\text{Cruz Loma:} \quad C = 11,7139 * t^{1,1059} \quad [3.3]$$

$$\text{Mariscal:} \quad C = 15,4277 * t^{0,8594} \quad [3.4]$$

$$\text{Necochea:} \quad C = 11,8141 * t^{1,0075} \quad [3.5]$$

$$\text{La Marín:} \quad C = 3,5727 * t^{0,7715} \quad [3.6]$$

$$\text{Quitumbe:} \quad C = 21,7170 * t^{0,7849} \quad [3.7]$$

En el Anexo IX, se observa que para las estaciones Necochea y La Marín, los valores de  $R^2$  iguales a 0,9608 y 0,9297, respectivamente, son los más alejados a la unidad. Esto posiblemente se debe a que en estas estaciones los contaminantes que influyen en el proceso corrosivo ( $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$ ), no son los mismos que en las otras estaciones; por lo que la corrosión del acero al carbono presenta los menores valores en estas estaciones. A pesar de ello, las ecuaciones presentadas se ajustan al proceso corrosivo que se analizó experimentalmente.

El valor del coeficiente “a” en la ecuación  $C = a * t^n$ , representa la corrosión durante el primer año de exposición; y como se observa en las ecuaciones presentadas, la estaciones La Marín y Quitumbe presentan valores de corrosión cercanos a los que se obtuvieron con los datos experimentales. Sin embargo, es importante recalcar que para obtener un modelo matemático más adecuado, que represente de forma más real el proceso corrosivo, se deben tener mayor cantidad de datos experimentales que permitan realizar una mejor regresión lineal.

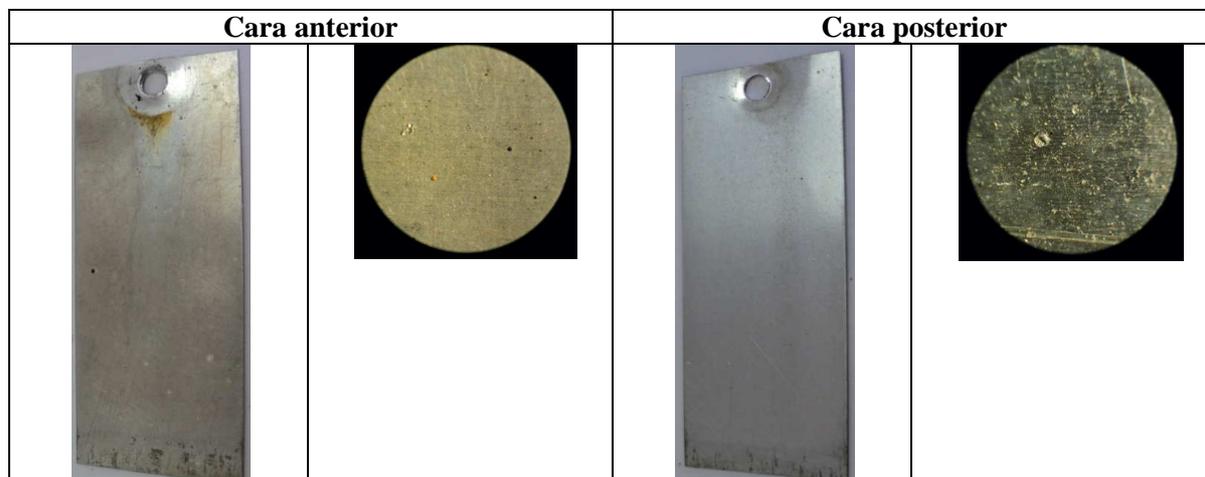
El valor de “n” se refiere al comportamiento físico-químico de los productos de corrosión, pero depende del metal, tipo de atmósfera y condiciones de exposición. Se observa en las ecuaciones 3.1 a la 3.7, que el valor de n en todas las estaciones es superior a 0,5. Esto indica que las capas de óxido no son protectoras, por lo que el proceso corrosivo del acero al carbono se acelera en estas condiciones (Morcillo *et al.* 1998; Salinas, 2004).

### **3.3.2.2 Corrosión del aluminio**

En general, la corrosión atmosférica del aluminio inicia con la formación de óxidos sobre su superficie; estos, son óxidos protectores que impiden la propagación de la corrosión atmosférica sobre el metal.

#### **a) Apreciación macroscópica y microscópica**

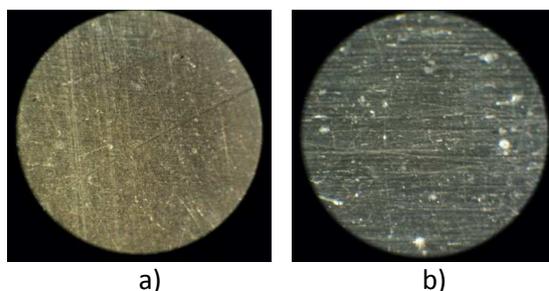
En la Figura 45 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de la placa de aluminio expuesta durante 1 año en la estación Quitumbe.



**Figura 45.** Cara anterior y cara posterior de la placa de aluminio correspondiente al año de exposición para la estación Quitumbe

En la Figura 45 se observa una mancha de óxido de hierro en la parte superior de cara anterior de la placa. Esto se debe a la ubicación de la placa en el mueble portaprobetas, cercana a una placa de acero al carbono. También se observa bastante opacidad en las dos caras de la placa y deterioro del borde inferior; así mismo, la presencia de material particulado y picaduras focalizadas en la superficie de la cara posterior.

En la Figura 46 se presentan las imágenes vistas al microscopio, de la placa de aluminio después de la limpieza química.



**Figura 46.** Observación en microscopio óptico de la placa de aluminio de la estación Quitumbe después de la limpieza química, correspondiente al año de exposición. a) Cara anterior; b) Cara posterior

Es importante mencionar que debido a la variación de luz al momento de tomar la fotografía, la cara posterior de la placa presenta un color muy oscuro con respecto a la cara anterior.

En la Figura 46 se observa que la cara anterior de la placa no presenta mayor variación en su superficie, mientras que la cara posterior presenta restos de material particulado y picaduras focalizadas en su superficie.

#### b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes

En la Tabla 20 se presentan los valores de pérdida de aluminio por unidad de área ( $\text{g/m}^2$ ) para el período octubre 2009 – septiembre 2010 y la clasificación de las atmósferas de acuerdo con la norma ISO 9223.

**Tabla 20.** Valores de corrosión atmosférica calculados para las placas de aluminio expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223

Estación	Corrosión anual ( $\text{g/m}^2$ )	Clasificación de la atmósfera según norma ISO 9223	
Carcelén	1,38	C3	Media
Kennedy	1,41	C3	Media
Cruz Loma	0,90	C3	Media
Mariscal	1,86	C3	Media
Necochea	0,79	C3	Media
La Marín	0,40	C2	Baja
Quitumbe	1,95	C3	Media

De acuerdo con la Tabla 20, la atmósfera de la ciudad de Quito se clasifica dentro del grupo C3 respecto al aluminio, a excepción de la estación La Marín, que está dentro del grupo C2. Esto indica que la atmósfera de Quito presenta un nivel medio de agresividad contra el aluminio (excepto en La Marín). Pero cabe mencionar que la norma ISO 9223 considera una corrosión uniforme para el

aluminio, lo cual, como se mencionó anteriormente, no es el caso ya que la corrosión de este metal se da por picaduras como se expresa en los resultados presentados.

Se observa que la estación Quitumbe es la que presenta el mayor valor de corrosión del aluminio, igual a  $1,95 \text{ g/m}^2$ . Esto se debe a que en ella se registran los niveles más altos de concentración de  $\text{SO}_2$  que son los causantes de la formación de picaduras en el aluminio; lo mismo sucede en la estación Mariscal cuyo valor de corrosión del aluminio es  $1,86 \text{ g/m}^2$ .

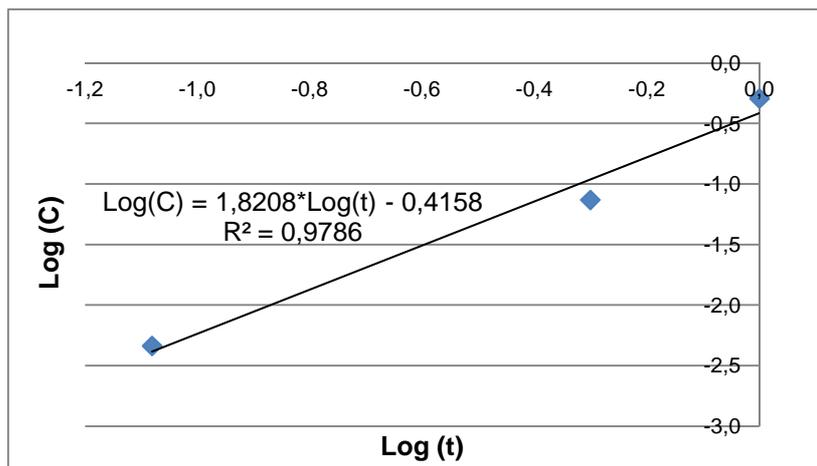
Para las estaciones Necochea y La Marín, los valores correspondientes al año de exposición son los menores, debido a la presencia de la capa de hollín que posiblemente actúa como barrera protectora como ya se mencionó anteriormente.

En el caso de la estación Cruz Loma, el valor de corrosión del aluminio presenta también un valor bajo ( $0,90 \text{ g/m}^2$ ), debido a que en la zona se registran valores bajos de concentración de contaminantes como  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , que son los principales causantes de la pérdida de material en este metal.

### **c) Análisis de las ecuaciones de la cinética de corrosión**

Con los datos de corrosión (un mes, seis meses, un año) obtenidos en todas las estaciones y mediante la realización de una regresión lineal bilogarítmica que se presenta en la Figura 47, se obtuvieron, para el caso del aluminio, las siguientes ecuaciones, las mismas que se presentan en el Anexo IX.

Al contrario de lo que se observó en el acero al carbono, las estaciones Necochea y La Marín para el caso del aluminio presentan los valores de  $R^2$  más cercanos a la unidad, mientras que en las otras estaciones se tienen valores menores pero no tan alejados, a excepción de la estación Kennedy, cuyo valor de  $R^2$  es 0,8663 como se observa en el Anexo IX.



**Figura 47.** Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del aluminio en la estación Carcelén

$$\text{Carcelén:} \quad C = 0,3839 * t^{1,8208} \quad [3.8]$$

$$\text{Kennedy:} \quad C = 0,3279 * t^{1,1378} \quad [3.9]$$

$$\text{Cruz Loma:} \quad C = 0,2884 * t^{1,6846} \quad [3.10]$$

$$\text{Mariscal:} \quad C = 0,3976 * t^{1,8766} \quad [3.11]$$

$$\text{Necochea:} \quad C = 0,2482 * t^{1,6269} \quad [3.12]$$

$$\text{La Marín:} \quad C = 0,1572 * t^{1,4091} \quad [3.13]$$

$$\text{Quitumbe:} \quad C = 0,5123 * t^{1,9462} \quad [3.14]$$

En este caso no se comparan los valores de “a” con los valores de corrosión obtenidos experimentalmente; esto debido a que los valores de corrosión del aluminio que se presentan en la Tabla 20 están en  $\text{g/m}^2$  debido a que la corrosión del aluminio no se da de manera uniforme; mientras que los valores de “a” que se presentan en las ecuaciones 3.8 a 3.14 fueron obtenidos con los valores de corrosión expresados en micras, para ello se utilizó el valor de la densidad del aluminio ( $2,71 \text{ g/cm}^3$ ). Sin embargo, es posible observar una misma tendencia en los datos de “a”, es así que, para la estación La Marín se presenta el menor valor en ambos casos al igual que en la estación Quitumbe cuyo valor es el mayor también en ambos casos.

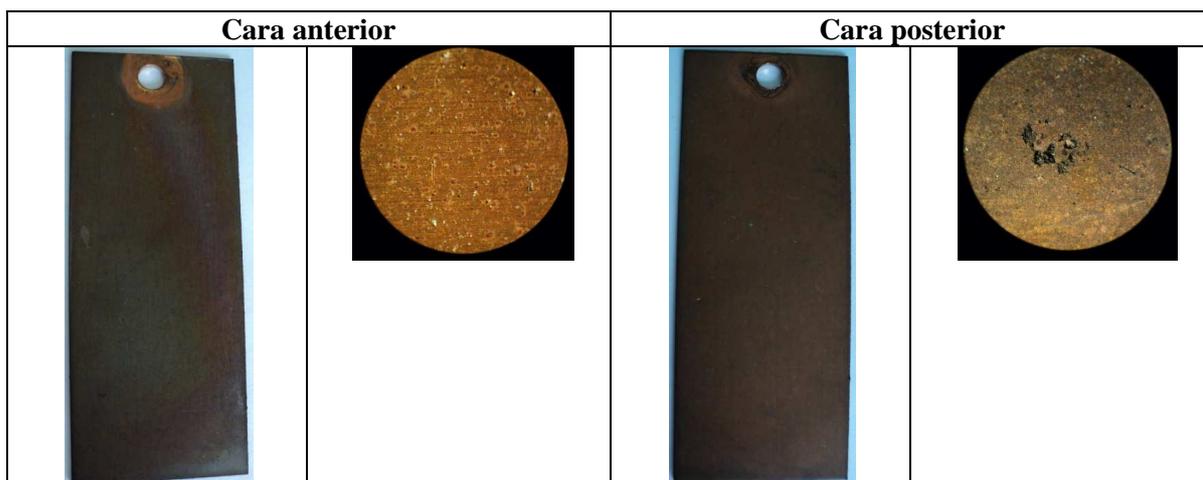
Con respecto a los valores de “n”, se observa que en todas las estaciones se presentan valores mayores a 1, es decir, que el proceso difusivo en la capa de productos de corrosión se acelera debido, en este metal, al proceso de corrosión por picaduras.

### 3.3.2.3 Corrosión del cobre

Cuando empieza el proceso de corrosión atmosférica en el cobre se forma, en general, sobre su superficie una capa delgada de corrosión denominada pátina, la cual es de color café verdoso o verde azulada, y provee un efecto protector dependiendo del pH del electrolito.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

En la Figura 48 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de la placa de cobre expuesta durante 1 año en la estación Necochea.

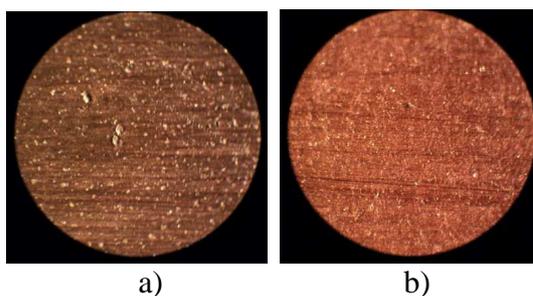


**Figura 48.** Cara anterior y cara posterior de la placa de cobre correspondiente al año de exposición para la estación Necochea

Es posible observar un color marrón oscuro con tonalidades verdes y violáceas en la superficie anterior de la placa, las cuales indican la posible formación de óxidos y sulfatos de cobre; mientras que la cara posterior presenta mayor uniformidad en el color de la superficie, el cual es marrón-verdoso, esto se debe a la posible formación de brocantita.

A simple vista no se aprecia daño en las superficies pero, con el microscopio óptico, se observa la formación de picaduras focalizadas en la superficie anterior y la presencia de gran cantidad de material particulado en la cara posterior, el cual impide apreciar de mejor manera el daño sufrido por la corrosión.

En la Figura 49 se presentan las imágenes vistas al microscopio de la placa de cobre después de la limpieza química. Debido a la variación de luz el momento de tomar la fotografía, la cara posterior presenta un color más anaranjado con respecto a la otra cara de la placa.



**Figura 49.** Observación en microscopio óptico de la placa de cobre de la estación Necochea, después de la limpieza química, correspondiente al año de exposición. a) Cara anterior; b) Cara posterior

Se observa que la cara anterior de la placa presenta picaduras de forma general en la superficie; mientras que en la cara posterior y debido al tamaño de la fotografía, no se aprecia claramente la formación de éstas.

## **b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

En la Tabla 21, se presentan los valores anuales de corrosión del cobre correspondientes a cada estación, y la clasificación de las atmósferas de acuerdo a la norma ISO 9223.

**Tabla 21.** Valores de penetración de la corrosión atmosférica calculados para las placas de cobre expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223

Estación	Corrosión anual ( $\mu\text{m}$ )	Clasificación de la atmósfera según norma ISO 9223	
		Categoría	Nivel de agresividad
Carcelén	2,89	C5	Muy alta
Kennedy	3,36	C5	Muy alta
Cruz Loma	1,06	C3	Media
Mariscal	0,70	C3	Media
Necochea	3,57	C5	Muy alta
La Marín	0,13	C2	Baja
Quitumbe	2,78	C4	Alta

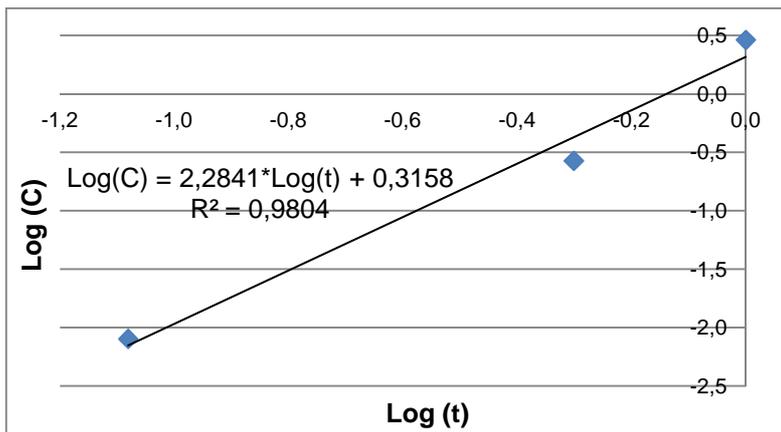
Se observa que la atmósfera de la ciudad de Quito se clasifica dentro de los grupos C3, C4 y C5 con respecto al cobre, lo cual corresponde a niveles altos de agresividad. Esto quiere decir que las condiciones atmosféricas presentes en la ciudad de Quito causan un daño significativo a este metal.

La estación que presenta el valor más bajo de penetración de corrosión atmosférica es La Marín, debido a que registra uno de los porcentajes de humedad relativa más bajos, lo que ocasiona que el proceso reactivo de la cuprita con los contaminantes disminuya y se dificulte la formación de sales básicas que aceleran el proceso corrosivo. A diferencia de los otros metales, la estación Necochea no presenta un valor bajo de corrosión, a pesar que como en los casos anteriores se tiene la presencia de la capa de hollín, la cual en el caso de La Marín si actúa como una barrera contra los contaminantes del medio.

Las estaciones Carcelén, Kennedy, Necochea y Quitumbe presentan valores similares de penetración que se encuentran alrededor de las 3,00  $\mu\text{m}$ .

### c) Análisis de las ecuaciones de la cinética de corrosión

Con los datos de corrosión (un mes, seis meses y un año) obtenidos en todas las estaciones y mediante la realización de una regresión lineal bilogarítmica que se presenta en la Figura 50, se obtuvieron, para el caso del cobre, las siguientes ecuaciones, las mismas que se presentan en el Anexo IX.



**Figura 50.** Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del cobre en la estación Carcelén

$$\text{Carcelén:} \quad C = 2,0692 \cdot t^{2,2841} \quad [3.15]$$

$$\text{Kennedy:} \quad C = 2,1577 \cdot t^{2,1896} \quad [3.16]$$

$$\text{Cruz Loma:} \quad C = 1,0595 \cdot t^{0,9995} \quad [3.17]$$

$$\text{Mariscal:} \quad C = 0,6364 \cdot t^{1,2545} \quad [3.18]$$

$$\text{Necochea:} \quad C = 1,9293 \cdot t^{2,2096} \quad [3.19]$$

$$\text{La Marín:} \quad C = 0,1515 \cdot t^{0,7653} \quad [3.20]$$

$$\text{Quitumbe:} \quad C = 1,4730 \cdot t^{1,5578} \quad [3.21]$$

En el Anexo IX se observa que los valores de  $R^2$  obtenidos, no son tan cercanos a 1 en la mayoría de estaciones, salvo el caso de las estaciones Carcelén, Cruz Loma y Mariscal cuyos valores son 0,9804, 1,0000 y 0,9954 respectivamente. Sin embargo, para obtener ecuaciones de la cinética de corrosión que se ajusten de mejor manera al proceso corrosivo que se da experimentalmente, es necesario

poseer más datos experimentales con los que se pueda realizar la regresión lineal.

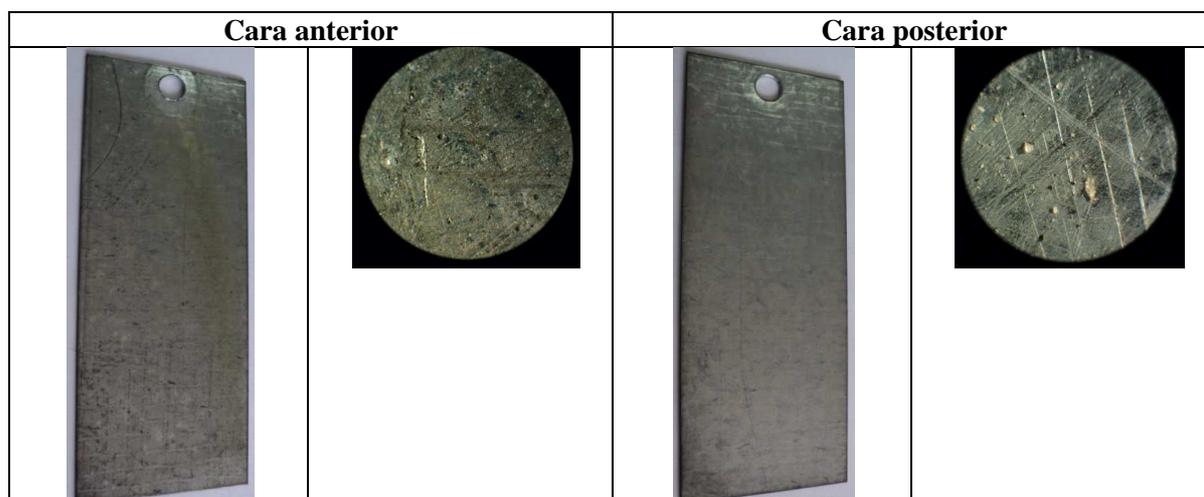
Se observa también en las ecuaciones 3.15 a la 3.21, que el valor de “n” en todas las estaciones es superior a 0,5. Esto indica al igual que en las otras estaciones, que las capas de óxido con el tiempo se vuelve más porosa aumentando el proceso corrosivo en el metal.

### 3.3.2.4 Corrosión del acero galvanizado

En general, cuando el cinc se corroe, se forma sobre su superficie un óxido protector blanquecino denominado hidrocincita, el cual se observa como una ligera pérdida de brillo de la superficie.

#### a) Apreciación macroscópica y microscópica

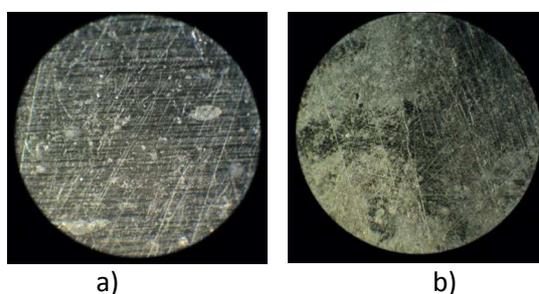
En la Figura 51 se muestra la apreciación macroscópica y microscópica de la placa de acero galvanizado expuesta durante 1 año en la estación Necochea



**Figura 51.** Cara anterior y cara posterior de la placa de acero galvanizado correspondiente al año de exposición para la estación Necochea

Se observa que la placa de acero galvanizado posee material particulado en ambas superficies, así como también la formación de óxidos de cinc. También es posible observar la presencia de picaduras focalizadas en la cara anterior de la placa.

En la Figura 52 se presentan las imágenes vistas al microscopio de la placa de acero galvanizado después de la limpieza química. Debido a la variación de luz el momento de tomar la fotografía, la cara anterior presenta un color más oscuro con respecto a la otra cara de la placa.



**Figura 52.** Observación en microscopio óptico de la placa de acero galvanizado de la estación Necochea después de la limpieza química. Correspondiente al año de exposición.  
a) Cara anterior; b) Cara posterior

Debido al tamaño de la fotografía, no es posible observar las picaduras formadas en la cara anterior de la placa. La cara posterior no presenta daño en la superficie sino solamente la formación de óxidos de cinc.

## **b) Análisis de la corrosión metálica en función de factores meteorológicos y de la concentración de contaminantes**

En la Tabla 22 se presentan los valores anuales de corrosión del acero galvanizado correspondientes a cada estación, y la clasificación de las atmósferas de acuerdo a la norma ISO 9223.

**Tabla 22.** Valores de penetración de la corrosión atmosférica calculados para las placas de acero galvanizado expuestas durante el período octubre 2009 – septiembre 2010 y clasificación de agresividad atmosférica de acuerdo a la norma ISO 9223

Estación	Corrosión anual ( $\mu\text{m}$ )	Clasificación de la atmósfera según norma ISO 9223	
		C3	Media
Carcelén	1,42	C3	Media
Kennedy	1,46	C3	Media
Cruz Loma	1,46	C3	Media
Mariscal	1,36	C3	Media
Necochea	3,12	C4	Alta
La Marín	1,25	C3	Media
Quitumbe	1,34	C3	Media

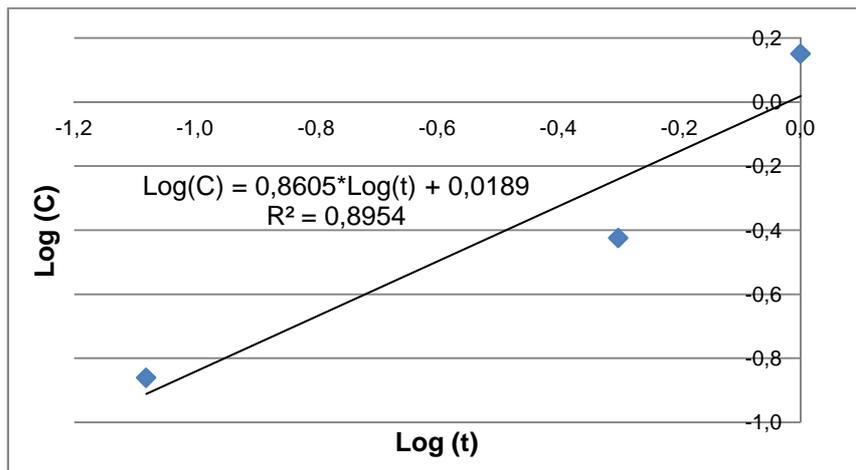
De acuerdo con los resultados de la Tabla 22, la atmósfera de la ciudad de Quito con respecto al acero galvanizado se clasifica dentro del grupo C3, a excepción de la estación Necochea que presenta una clasificación C4. Esto corresponde a un nivel medio de agresividad de la atmósfera sobre este metal.

Se observa que los valores de penetración de la corrosión atmosférica en el acero galvanizado son similares en la mayoría de las estaciones a excepción de la estación Necochea, en la cual, como se observa en la Figura 51, presenta una cantidad significativa de material particulado, que pudo deberse al proceso de construcción del corredor central occidental que pasa muy cerca de esta estación de monitorización y, por la dirección del viento, se depositó sobre las placas ocasionando mayor pérdida de material y por ende mayor penetración de la corrosión.

Se observa también en la Tabla 22 que la estación La Marín presenta el menor valor de penetración de la corrosión atmosférica sobre el acero galvanizado. Cabe mencionar que aunque el valor obtenido no está muy alejado de las otras estaciones, es notorio que, como ya se mencionó anteriormente, la presencia de la capa de hollín sobre la superficie cumple un papel importante sobre el proceso corrosivo en los metales expuestos.

### c) Análisis de las ecuaciones de la cinética de corrosión

Con los datos de corrosión (un mes, seis meses y un año) obtenidos en todas las estaciones y mediante la realización de una regresión lineal bilogarítmica que se presenta en la Figura 53, se obtuvieron, para el caso del acero galvanizado, las siguientes ecuaciones, las mismas que se presentan en el Anexo IX.



**Figura 53.** Regresión lineal para determinar la ecuación de la cinética de corrosión del acero galvanizado en la estación Carcelén

$$\text{Carcelén:} \quad C = 1,0445 * t^{0,8605} \quad [3.22]$$

$$\text{Kennedy:} \quad C = 1,1069 * t^{0,9219} \quad [3.23]$$

$$\text{Cruz Loma:} \quad C = 1,1084 * t^{0,8946} \quad [3.24]$$

$$\text{Mariscal:} \quad C = 1,0639 * t^{0,8338} \quad [3.25]$$

$$\text{Necochea:} \quad C = 1,8659 * t^{0,1855} \quad [3.26]$$

$$\text{La Marín:} \quad C = 0,8453 * t^{0,7662} \quad [3.27]$$

$$\text{Quitumbe:} \quad C = 1,0235 * t^{0,7869} \quad [3.28]$$

En el Anexo IX, se observa que los valores de  $R^2$  en todas las estaciones son menores que 0,93. Esto, como se observa en la Figura 53, se debe a la dispersión de los datos experimentales los cuales, a diferencia de los otros metales, presentan una variación significativa en los valores de corrosión anual con respecto a la corrosión mensual y semestral.

Es posible notar que el valor experimental de la corrosión del acero galvanizado ( $3,12 \mu\text{m}$ ) obtenido en la estación Necochea, es un valor mayor con respecto al valor de "a" que se presenta en la ecuación 3.26, estos valores no concuerdan ya que en dicha estación se presenta un fenómeno no muy común (construcción del corredor sur occidental), el cual arroja los resultados presentados y dificulta obtener una regresión lineal que represente adecuadamente este proceso corrosivo.

Se observa también que los valores de "n" son menores que los presentados en los otros metales. Esto posiblemente se refiere a que el ataque corrosivo es menor en este metal que en los descritos anteriormente; aunque se debe considerar que este coeficiente depende de otros factores y no indica claramente el comportamiento de la capa de óxidos formados.

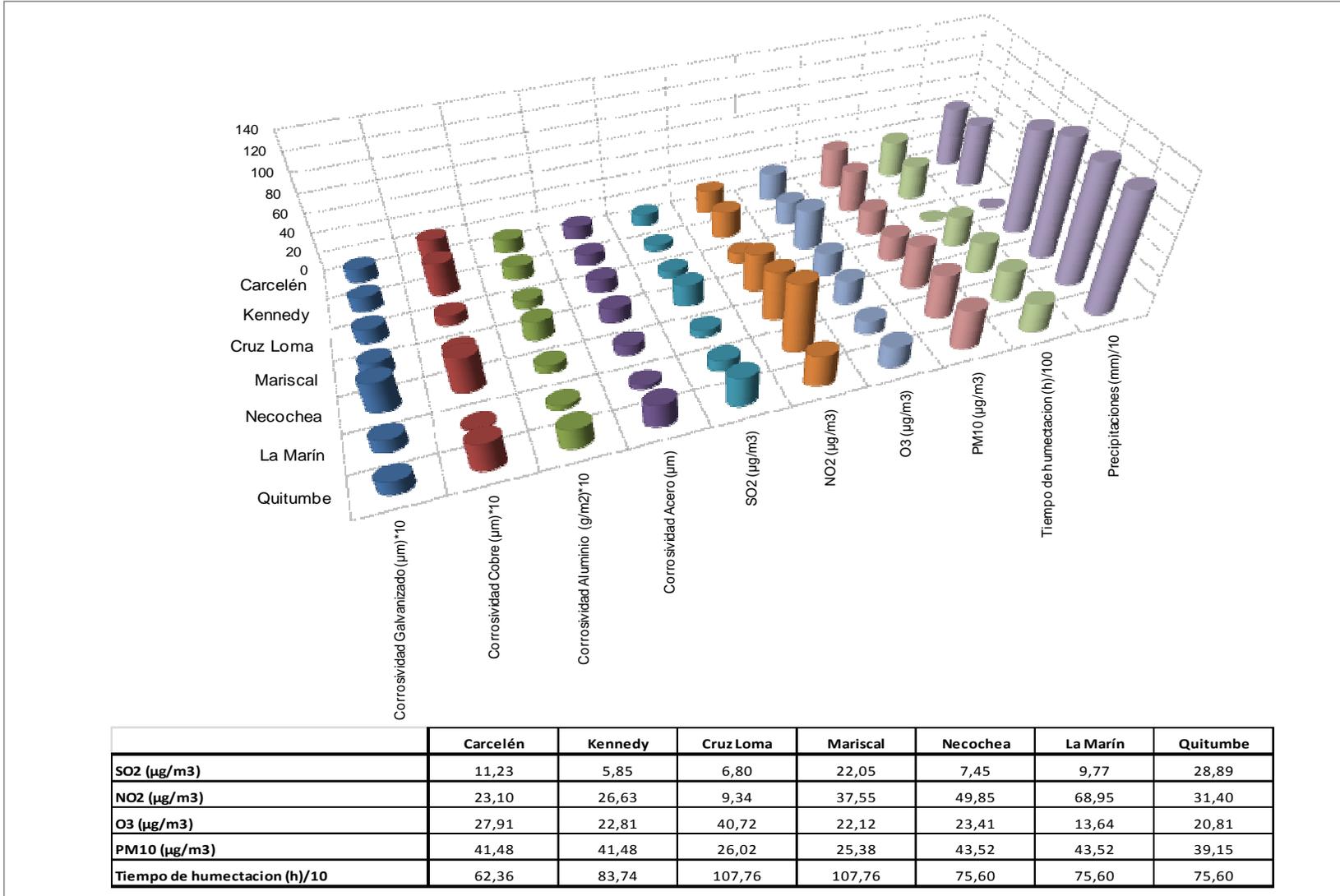


Figura 54. Resultados un año de exposición

### 3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO CON VALORES DE CORROSIÓN DE ESTUDIOS ANTERIORES

El siguiente análisis permite comparar los datos obtenidos en estaciones de monitorización automática con los datos obtenidos en las estaciones de ensayo escogidas para el presente proyecto con el fin de determinar si el ambiente de las zonas críticas de contaminación atmosférica en la ciudad de Quito afecta o no de la misma manera al los metales, como se ha registrado en las otras zonas de la ciudad.

Para la realización de este análisis se han considerado los datos obtenidos en los siguientes proyectos: “Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la Ciudad de Quito” (Cazco y Recalde, 2002) y “Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la Ciudad de Quito parte III” (Narváez, 2006).

En la Tabla 23 se presentan los valores de corrosión del acero al carbono, acero galvanizado, aluminio y cobre para el año de exposición de acuerdo con los proyectos antes mencionados.

**Tabla 23.** Datos de corrosión anual del acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio correspondientes a estudios anteriores

Estación	Corrosión del acero al carbono (um)	Corrosión del acero galvanizado (um)	Corrosión del cobre (um)	Corrosión del aluminio (g/m <sup>2</sup> )
San Gabriel	14,27	0,37	0,52	0,46
Río Coca	17,10	0,34	0,64	0,54
EPN	15,16	0,35	1,01	0,46
Pinturas Cóndor	16,96	0,43	0,68	0,55
Centro	7,77	0,33	0,71	0,49
Los Chillos	13,95	0,39	1,05	0,48
Tumbaco	9,17	0,35	0,92	0,33

(Cazco y Recalde, 2002; Narváez, 2006)

Para realizar la comparación con los datos obtenidos en la Tabla 23 se presentan, en la Tabla 24, los valores de corrosión del acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio para el presente proyecto y la relación entre estaciones de los proyectos mencionados anteriormente.

**Tabla 24.** Datos de corrosión anual del acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio correspondientes al presente proyecto

Estación	Corrosión del acero al carbono (um)	Corrosión del acero galvanizado (um)	Corrosión del cobre (um)	Corrosión del aluminio (g/m <sup>2</sup> )
Carcelén/Río Coca	12,88	1,42	2,89	1,38
Kennedy/Río Coca	11,08	1,46	3,36	1,41
Cruz Loma/San Gabriel	13,40	1,46	1,06	0,90
Mariscal/EPN	14,80	1,36	0,70	1,86
Necochea/Centro	9,56	3,12	3,57	0,79
La Marín/Centro	4,45	1,25	0,13	0,40
Quitumbe/P. Cóndor	22,41	1,34	2,78	1,95

### 3.4.1 COMPARACIÓN DEL ACERO AL CARBONO

Los valores presentados en las Tabla 23 y 24 para el acero al carbono no muestran una diferencia significativa en los datos de penetración de la corrosión obtenidos en las diferentes estaciones del centro de la ciudad, tal es así que para la Necochea se obtuvo un valor igual a 9,56  $\mu\text{m}$ , para La Marín 4,45  $\mu\text{m}$  y para la estación del Centro según el estudio de Cazco-Recalde un valor igual a 7,77  $\mu\text{m}$ . Con ello se observa que la variación de concentración de los contaminantes atmosféricos no influye directamente en el proceso corrosivo, ya que la estación Necochea es aquella que presenta mayor circulación vehicular con respecto a las otras dos y su valor de corrosión en el acero al carbono es similar al de la estación Centro, cuyos datos se obtuvieron en el año 2001 en donde se tenía menor contaminación atmosférica en la zona.

Según la Tabla 24, la estación Quitumbe es aquella que presenta el mayor valor de penetración de la corrosión atmosférica en el acero al carbono. Sin embargo

en las Tabla 23 se observa que la estación correspondiente al mismo sector de la ciudad (Pinturas Cóndor) también presenta un valor elevado aunque no es el mayor. Además, se observa claramente una diferencia significativa entre los valores obtenidos en las dos estaciones, en donde, la de Quitumbe registra el valor más alto igual a 22,41  $\mu\text{m}$ . Esto se debe al incremento de circulación vehicular generado por el actual crecimiento urbano en el sector.

Para el resto de estaciones los valores presentados no varían significativamente entre sí; aunque se debe considerar que los valores de las estaciones Carcelén y Kennedy no corresponden adecuadamente a los valores presentados en la estación Río Coca debido a la diferente ubicación geográfica de las mismas.

### **3.4.2 COMPARACIÓN DEL ACERO GALVANIZADO**

Los valores de penetración de corrosión atmosférica del acero galvanizado presentados en la Tabla 24 son mayores que los que se muestran en la Tabla 23. Esta diferencia significativa se debe a que la atmósfera de la ciudad de Quito actualmente presenta mayor agresividad con respecto a 8 años atrás en los que se realizó el otro estudio. Esto debido al aumento de tráfico vehicular en la ciudad (17% aproximadamente en los últimos tres años), así como también a los cambios climáticos atípicos ocurridos en el año 2010, en donde se registró gran cantidad de precipitaciones y muy bajas temperaturas (Custode, 2008).

El estudio de Cazco-Recalde presentó mayor corrosión del acero galvanizado en la estación Pinturas Cóndor. Sin embargo, en el presente estudio la estación Necochea es aquella que presenta el mayor valor, igual a 3,12  $\mu\text{m}$ . Esto se debe a un proceso casual de trabajos de construcción en la zona de la Necochea durante los meses de ensayo, lo cual posiblemente influyó en el proceso de corrosión de este metal.

Al comparar la estación La Marín con la estación Centro se observa una tendencia similar, ya que en ambos casos el valor presentado es el menor con

respecto a las otras estaciones, esto debido al fenómeno de barrera física que presenta la capa de hollín depositada sobre la superficie metálica.

Para las otras estaciones los valores registrados tanto en el presente estudio como en el proyecto de Cazco-Recalde son similares entre sí.

### **3.4.3 COMPARACIÓN DEL COBRE Y DEL ALUMINIO**

Al igual que en el caso del acero galvanizado, los valores obtenidos en el presente proyecto son significativamente mayores a los obtenidos en el proyecto de Narváez (2006). Esto se debe de igual forma al aumento de la agresividad de la atmósfera a causa del crecimiento poblacional (18% aproximadamente en los últimos 9 años) y de los cambios climáticos que se presentan actualmente (INEC, 2011).

En los datos obtenidos por el estudio de Narváez, las estaciones EPN y Los Chillos son las que registran los mayores valores de corrosión del cobre; mientras que en el presente ensayo se observa que la estación Necochea es aquella que presenta este valor. Esto, al igual que en el acero galvanizado posiblemente se deba a los trabajos de construcción del corredor sur occidental que se mencionó anteriormente.

Con respecto al aluminio, los valores de corrosión más altos se presentan en las estaciones Pinturas Cóndor y Quitumbe respectivamente, es decir, coinciden. Esto a causa de la alta concentración de contaminantes que se registran en la zona, debido a la emanación de gases y procesos de combustión que se realizan en las fábricas del sector.

Tanto para el cobre como para el aluminio la estación La Marín es la que registra los valores más bajos de corrosión. Esto se debe a la presencia de la capa de hollín que actúa como barrera protectora sobre la superficie del metal.

### **3.5 CORROSIÓN DE PLACAS CON RECUBRIMIENTOS**

Como se mencionó anteriormente en el subcapítulo 1.4, existen varios métodos de protección anticorrosiva para los metales, pero uno de los más utilizados debido a la fácil aplicación y bajo costo relativo es el recubrimiento con pinturas. Es por ello que en el presente estudio se utilizó una pintura anticorrosiva como recubrimiento sobre el acero al carbono y una pintura primaria (resina vinílica) para los otros metales. Esto, debido a la diferencia del proceso corrosivo entre ellos.

Debido a que el presente proyecto no se centra en el estudio de recubrimientos, a continuación se realiza únicamente el análisis visual de las placas con recubrimientos. Este análisis tiene como referencia a las normas ASTM D 714, D 610, D 660 y D 661, y sirve para determinar si la pintura aplicada presenta o no deterioro bajo las condiciones ambientales a las que se la ha expuesto.

Las placas con recubrimiento fueron expuestas durante seis meses a las condiciones atmosféricas presentes en cada una de las estaciones de ensayo.

#### **3.5.1 PLACAS DE ACERO AL CARBONO CON RECUBRIMIENTO**

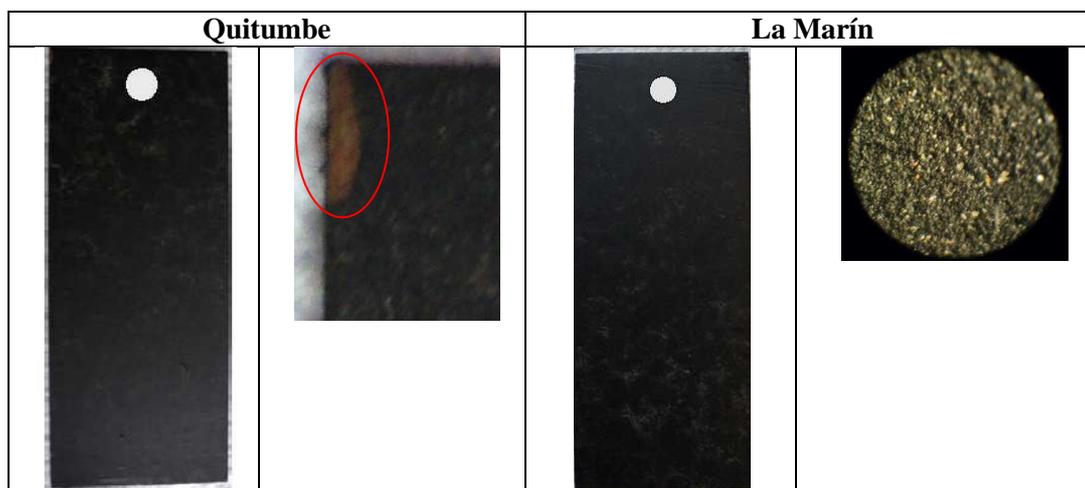
En el presente proyecto se utilizó la pintura “Antiox 901 M” como recubrimiento para el acero al carbono, esto debido a que en proyectos anteriores “Determinación de la corrosión atmosférica de la ciudad de Quito Parte I y Parte II”, esta fue la pintura que presentó mejor resistencia a la corrosión así como también menores daños y fallas en la superficie.

En la Tabla 25 se presentan los resultados obtenidos al emplear la pintura “Antiox 901 M” sobre las placas de acero al carbono en cada una de las estaciones. Cabe mencionar que no se tienen resultados de las placas de la estación Mariscal debido a que el lugar en donde fue colocado el mueble portaprobetas fue demolido por trabajos de construcción en la zona.

**Tabla 25.** Análisis visual según las normas ASTM D 610, D 660, D 661 y D 714, de las placas de acero al carbono recubiertas con pintura “Antiox 901 M”

Estación	Herrumbre		Cuarteamiento		Rotura		Ampollamiento	
	Frente	Atrás	Frente	Atrás	Frente	Atrás	Frente	Atrás
Carcelén	10	10	10	10	10	10	10	10
Kennedy	10	10	10	10	10	10	10	10
Cruz Loma	10	10	10	10	10	10	10	10
Necochea	10	10	10	10	10	10	10	10
La Marín	10	10	10	10	10	10	10	10
Quitumbe	9	10	10	10	10	10	10	10

En las Figura 55 se muestran ejemplos de las placas de acero al carbono recubiertas con pintura “Antiox 901 M”, los cuales corresponden a la estación Quitumbe que presenta una falla en la pintura y a la estación La Marín que presenta material particulado depositado sobre su superficie. No se presentan fotografías de las placas de otras estaciones ya que no presentan deterioro ni fallas en el recubrimiento.



**Figura 55.** Cara anterior de las placas de acero al carbono con recubrimiento de pintura “Antiox 901 M”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe y La Marín

Como se esperaba, y al comparar los resultados presentados en la Tabla 25, con los resultados obtenidos en los proyectos anteriores, los mismos que se presentan en el Anexo VIII; se observa que en todas las estaciones de ensayo, la pintura “Antiox 901 M” presenta buenas características y resistencia al medio ambiente de exposición, es decir, que no presenta deterioro ni fallas visibles (cuarteamiento, rotura, ampollamiento y corrosión), salvo el caso de la estación Quitumbe en donde se aprecia una mancha de herrumbre en la superficie anterior debido a una falla en la aplicación de la pintura como se observa en la Figura 55.

En la caso de la estación La Marín, debido a que la pintura anticorrosiva utilizada es de color oscuro, no se aprecia claramente la capa de hollín depositada sobre la cara anterior de la misma, pero con el microscopio óptico se observa la presencia del material particulado sobre la superficie del recubrimiento. Sin embargo, no se observa daños o fallas en la pintura “Antiox 901 M”.

Esta pintura presenta buena resistencia a la corrosión, ya que posee en su composición fosfato de cinc, el mismo que actúa como pigmento anticorrosivo inhibiendo las reacciones de corrosión sobre el metal (Morcillo *et al.*, 2002).

Es importante mencionar que no se pudo realizar el análisis mediante espectroscopia de infrarrojos ya que el color de la pintura “Antiox 901 M” es muy oscuro y lo único que se obtiene en el análisis es “ruido”; sin embargo, se observa que la aplicación de éste recubrimiento mejora la resistencia a la corrosión del acero al carbono, ya que no se evidencia la presencia de herrumbre sobre las superficies, ni deterioro de las mismas, salvo ciertos casos, en los cuales el porcentaje de corrosión en el recubrimiento estaría alrededor del 0,03%.

### **3.5.2 PLACAS DE ACERO GALVANIZADO CON RECUBRIMIENTO**

En el presente estudio se utiliza acero galvanizado expuesto a atmósferas de agresividad media, por lo que no es necesario colocar recubrimientos sobre este metal debido a que el galvanizado ya es un método de protección (recubrimiento metálico) como se mencionó anteriormente. Para demostrarlo, se realizó el

procedimiento de la norma ASTM A-90 con el cual se determinará el espesor de la capa de cinc depositada sobre el metal base. El resultado se muestra en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Determinación de la cantidad de cinc depositado en las placas de acero galvanizado

	<b>Placa 1</b>	<b>Placa 2</b>
<b>Masa inicial (g)</b>	28,1691	27,6492
<b>Masa final (g)</b>	27,3290	26,9081
<b>Masa perdida (g)</b>	0,8401	0,7411
<b>Promedio de masa perdida (g)</b>	0,7906	
<b>Cinc depositado (g/m<sup>2</sup>)</b>	98,8250	
<b>Cinc depositado (µm)</b>	13,86	

Se observa que el espesor de cinc depositado sobre el acero es de 13 µm. Este espesor es mucho mayor al que se pierde por efecto de la corrosión al año de exposición si se considera la estación Necochea, que es en la que se tiene la mayor pérdida de material como se observa en la Tabla 24.

Para observar de mejor manera lo mencionado, se utilizó la ecuación 3.26 que representa la cinética de corrosión del acero galvanizado en la estación Kennedy ( $R^2=0,9244$ ) y se determinó el tiempo que tardaría el recubrimiento de galvanizado en desgastarse por efecto de la corrosión. El tiempo obtenido indica que la capa de cinc tardaría 14 años 6 meses en deteriorarse. Con esto se demuestra que el galvanizado es un método muy eficaz de protección anticorrosiva para el acero al carbono si se considera una atmósfera moderadamente agresiva como la que se presenta en la ciudad de Quito.

A pesar del resultado presentado en la Tabla 26, se decidió colocar otro revestimiento sobre el acero galvanizado para observar el comportamiento de éste en las condiciones de exposición y su acción de protección sobre el metal utilizado.

Es importante mencionar que ésta pintura se escogió como recubrimiento del acero galvanizado, aluminio y cobre como recomendación de gente especializada en pinturas que son los ingenieros: Edison Acosta de la empresa “Pinturas Cóndor” y Rodrigo Ortiz de la empresa “La Peinture”.

En la Tabla 27 se presentan los resultados obtenidos con la resina vinílica “Vari-Primer 615 SM” sobre las placas de acero galvanizado. Al igual que con el acero al carbono, no se tienen resultados de la estación Mariscal.

**Tabla 27.** Análisis visual según las normas ASTM D 660, D 661 y D 714, de las placas de acero galvanizado recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”

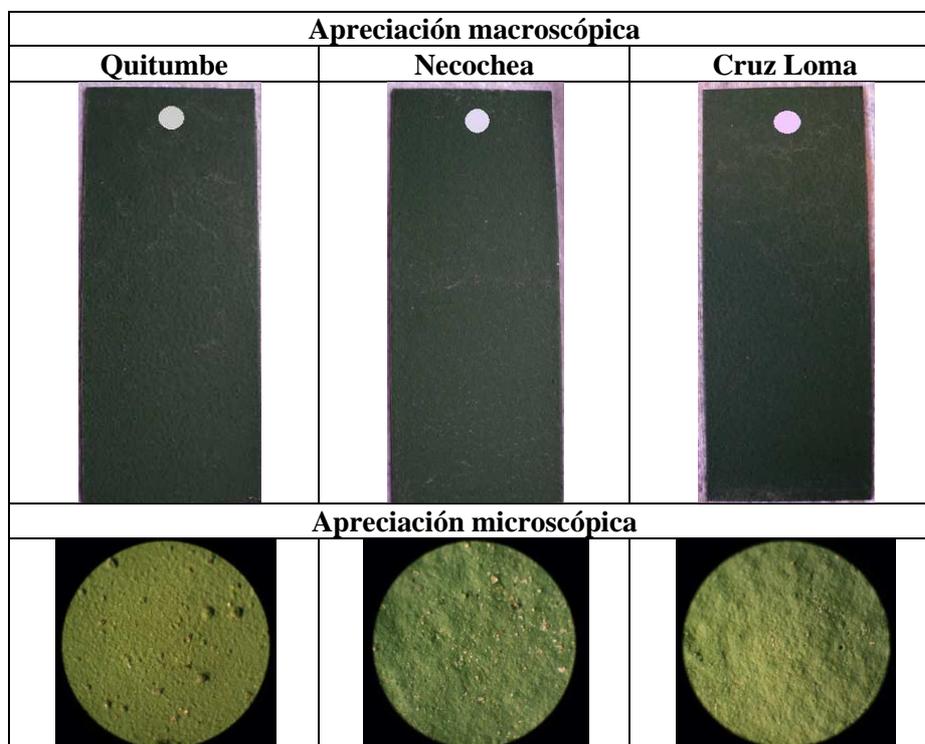
Estación	Cuarteamiento		Rotura		Ampollamiento	
	Frente	Atrás	Frente	Atrás	Frente	Atrás
Carcelén	10	10	10	10	10	10
Kennedy	10	10	10	10	10	10
Cruz Loma	10	10	10	10	10	10
Necochea	10	10	10	10	10	10
La Marín	10	10	10	10	10	10
Quitumbe	10	10	10	10	9F	10

En el caso del acero galvanizado y como se observa en la Tabla 27, la resina “Vari-Primer 615 SM” resiste muy bien a las condiciones atmosféricas y de contaminación a las que ha sido expuesta, ya que como se observa, no presenta fallas de cuarteamiento, rotura ni ampollamiento en la mayoría de estaciones, salvo el caso de la estación Quitumbe.

En la Figura 56 se muestran ejemplos de las placas de acero galvanizado recubiertas con pintura primaria “Vari-Primer 615 SM”, los cuales corresponden a la estación Quitumbe que presenta ampollamiento en su superficie anterior, a la estación Necochea en la que se registra la mayor pérdida de cinc, y a la estación Cruz Loma en la que se observa manchas de agua en la superficie.

No se presentan fotografías de las otras estaciones ya que no presentan deterioro ni fallas en el recubrimiento.

Es importante recalcar que la diferencia de color en las fotografías se debe a la variación de luz el momento de observar las placas con el microscopio óptico.



**Figura 56.** apreciación macroscópica y microscópica de la cara anterior de las placas de acero galvanizado con recubrimiento de pintura primaria “Vari-Primer 615 SM”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe, Necochea y Cruz Loma

En el caso de las estaciones Necochea y La Marín, las superficies recubiertas presentan depósitos de material particulado, el cual se adhiere al film de pintura pero no provoca daños ni fallas en la misma como se observa en la Figura 56. En la estación Cruz Loma se observa manchas en la superficie debido al depósito de gotas de agua lluvia, pero no se aprecia deterioro ni fallas en el recubrimiento.

### 3.5.3 PLACAS DE ALUMINIO CON RECUBRIMIENTO

Al igual que con el acero galvanizado, el aluminio no requiere recubrimientos ya que es sometido previamente a un proceso de anodizado para propiciar la

formación de óxidos protectores y su estabilidad para que puedan funcionar como una barrera protectora ante el proceso corrosivo.

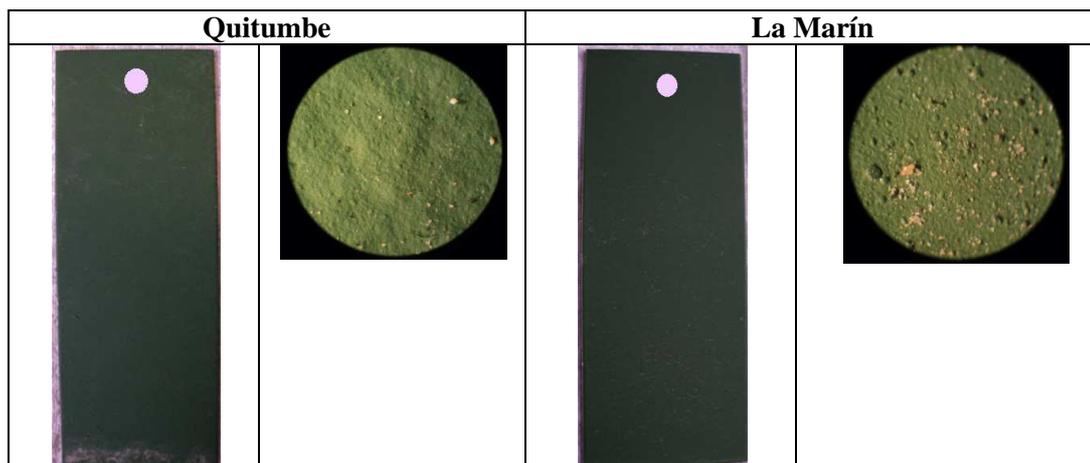
De la misma forma que en el acero galvanizado, se procedió a colocar sobre el aluminio un film de resina “Vari-Primer 615 SM” con el fin de observar su comportamiento y acción sobre el metal base.

En la Tabla 28 se presentan los resultados obtenidos con la resina vinílica “Vari-Primer 615 SM” sobre las placas de aluminio; mientras que en la Figura 57 se muestran ejemplos de las placas de aluminio recubiertas con pintura primaria o resina “Vari-Primer 615 SM”, los cuales corresponden a la estación Quitumbe que registra la mayor pérdida de aluminio y a la estación La Marín que presenta depósito de material particulado en su superficie. Al igual que con los otros metales de estudio, no se tienen resultados de la estación Mariscal.

**Tabla 28.** Análisis visual según las normas ASTM D 660, D 661 y D 714, de las placas de aluminio recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”

Estación	Cuarteamiento		Rotura		Ampollamiento	
	Frente	Atrás	Frente	Atrás	Frente	Atrás
Carcelén	10	10	10	10	10	10
Kennedy	10	10	10	10	10	10
Cruz Loma	10	10	10	10	10	10
Necochea	10	10	10	10	10	10
La Marín	10	10	10	10	10	10
Quitumbe	10	10	10	10	10	10

Es importante mencionar que no se presentan fotografías de las otras estaciones ya que no presentan deterioro ni fallas en el recubrimiento. La diferencia de color en las fotografías de la Figura 57 se debe a la variación de luz el momento de observar las placas con el microscopio óptico.



**Figura 57.** Cara anterior de las placas de aluminio con recubrimiento de pintura primaria “Vari-Primer 615 SM”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe y La Marín

Como se observa en la Tabla 28, la resina utilizada sobre las placas de aluminio no presenta fallas según las normas ASTM utilizadas, lo cual se corrobora con la Figura 57 en la cual no se observa fallas ni deterioro en la capa de recubrimiento, sino solamente el depósito de material particulado sobre la superficie.

### 3.5.4 PLACAS DE COBRE CON RECUBRIMIENTO

En el caso del cobre, la aplicación de recubrimientos depende principalmente del uso que se le vaya a dar. Al igual que el aluminio, el cobre forma óxidos protectores sobre su superficie, los cuales actúan como barrera contra el proceso corrosivo. Sin embargo, debido a que el cobre fue expuesto al exterior, a diferentes condiciones atmosféricas y de contaminación, se utilizó un recubrimiento orgánico (“Vari-Primer 615 SM”) para mejorar la acción de protección frente a la corrosión.

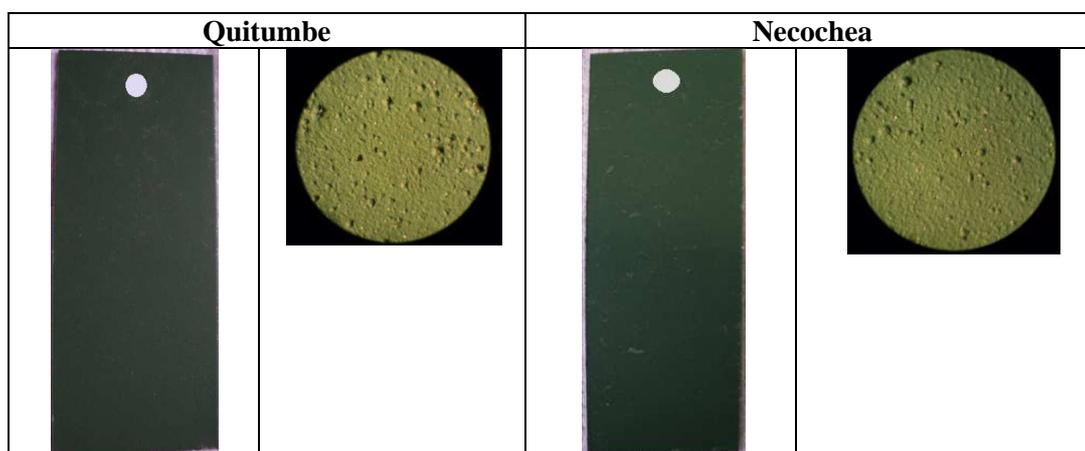
En la Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos con la resina vinílica “Vari-Primer 615 SM” sobre las placas de cobre. Al igual que con los otros metales de estudio, no se tienen resultados de la estación Mariscal.

**Tabla 29.** Análisis visual según las normas ASTM D 660, D 661 y D 714, de las placas de cobre recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”

Estación	Cuarteamiento		Rotura		Ampollamiento	
	Frente	Atrás	Frente	Atrás	Frente	Atrás
Carcelén	10	10	10	10	10	10
Kennedy	10	10	10	10	10	10
Cruz Loma	10	10	10	10	10	10
Necochea	10	10	10	10	9F	10
La Marín	10	10	10	10	10	10
Quitumbe	10	10	10	10	9F	10

En la Figura 58 se muestran ejemplos de las placas de cobre recubiertas con resina “Vari-Primer 615 SM”, los cuales corresponden a las estaciones Quitumbe y Necochea que presentan fallas en el recubrimiento. No se presentan fotografías de las otras estaciones ya que no presentan deterioro ni fallas en el recubrimiento. La diferencia de color en las fotografías se debe a la variación de luz que se da el momento de observar las placas con el microscopio óptico.

En la Figura 58, a simple vista no se aprecia el ampollamiento de la cara anterior de las placas de cobre de las estaciones Quitumbe y Necochea, pero con el microscopio óptico es posible notar esta falla en el recubrimiento.



**Figura 58.** Cara anterior de las placas de cobre con recubrimiento de pintura primaria “Vari-Primer 615 SM”, después de seis meses de exposición en las estaciones Quitumbe y Necochea

En la estación Necochea se tiene la presencia de material particulado sobre la superficie anterior de la placa. Sin embargo, es posible que el material particulado no sea el causante de las ampollas presentadas en el recubrimiento, ya que la estación La Marín presenta mayor cantidad de este contaminante y no se observa fallas ni deterioro en su recubrimiento. Las ampollas presentadas quizá se deban a una inadecuada preparación de la superficie del metal o a las condiciones atmosféricas propias de la zona. Lo mismo sucede en la estación Quitumbe.

De forma generalizada se observa que para este tipo de recubrimientos (recubrimientos orgánicos), la variación de condiciones meteorológicas no presenta influencia directa en el comportamiento de los mismos, ya que como se observa en las Tablas 26, 27, 28 y 29, en ninguna de las estaciones se presentan fallas significativas a pesar de tener condiciones meteorológicas diferentes. También se observa que en la cara frontal de las placas, la pintura tiende a sufrir ciertas fallas, lo que indica que a pesar de tener mayor humedad en la cara posterior de las mismas, la radiación ultravioleta influye mayormente sobre los revestimientos en comparación con la humedad.

Es importante mencionar que no existe variación en la tonalidad del color de los recubrimientos utilizados. Esto quizá varié con el aumento del tiempo de exposición de los mismos y que al igual que con el acero al carbono, en el caso del aluminio, cobre y acero galvanizado, tampoco se realizó análisis mediante espectroscopia de infrarrojos, ya que se observa que los recubrimientos presentados resisten de buena manera el ambiente de exposición; además que los metales utilizados presentan una buena resistencia a la corrosión por la formación de óxidos protectores en su superficie por lo que en muchos de los casos no se requiere aplicar recubrimientos sobre ellos.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- La ciudad de Quito presenta diferentes condiciones atmosféricas y de contaminación por sectores de la ciudad; es así que los valores de precipitaciones pluviales y humedad relativa, así como también de concentración de contaminantes atmosféricos, difieren drásticamente de una estación de ensayo a otra.
- De acuerdo con los valores de corrosión obtenidos en el año de ensayo y en base a la norma ISO 9223, las atmósferas presentes en las diferentes estaciones registran niveles de agresividad baja en el caso del acero al carbono, agresividad media para el aluminio y el acero galvanizado y agresividad alta y muy alta para el cobre, a excepción de la estación La Marín en la cual la atmósfera registra una agresividad baja para todos los metales ensayados.
- Las placas de acero al carbono presentaron mayor penetración de corrosión, debido a la facilidad del hierro en ceder sus electrones y oxidarse rápidamente. La estación Quitumbe es la que registra el mayor valor de corrosión de este metal (22,41  $\mu\text{m}$ ).
- La capa de óxido sobre la superficie de acero al carbono se presenta de manera uniforme sobre la superficie; sin embargo, el lado frontal presenta una capa más delgada de óxido con respecto a la cara posterior. Esto a causa del efecto de lavado que se da en la superficie anterior de la placa.
- Las placas de aluminio son las que presentan menor pérdida de material, debido al que el proceso corrosivo se da lentamente a causa de la formación de alúmina sobre su superficie, y a que la corrosión no se da de manera uniforme sino por picaduras.

- Las placas de acero galvanizado presentan valores de corrosión similares en todas las estaciones, es decir que los factores atmosféricos y meteorológicos en atmósferas de agresividad media no influyen significativamente en el proceso corrosivo del cinc.
- La corrosión del cobre presenta valores muy diferentes de acuerdo con la estación de ensayo; es decir, que los factores meteorológicos y de contaminación atmosférica influyen en el procesos corrosivo del mismo, especialmente el porcentaje de humedad relativa el cual favorece la formación de sales básicas de cobre que propician el proceso corrosivo del mismo.
- En la estación La Marín se registran los menores valores de corrosión del acero al carbono, del aluminio, del cobre y del acero galvanizado; lo cual se debe a la formación de una capa de hollín sobre la superficie de los metales, la misma que actúa como barrera protectora evitando el paso de los otros contaminantes atmosféricos que aceleran en proceso corrosivo.
- El análisis por difracción de rayos X de los productos de corrosión del acero al carbono, muestra que en las estaciones analizadas (Mariscal y Quitumbe) se tiene presencia de lepidocrecita y goethita, que son los oxihidróxidos de hierro que se forman en atmósferas urbanas e industriales.
- De acuerdo con el análisis por MEB-EDS de los productos de corrosión del acero al carbono, se confirma la presencia de oxígeno, carbono, hierro y azufre, propios de la contaminación atmosférica registrada en las estaciones de ensayo.
- Las ecuaciones de la cinética de corrosión, muestran valores del coeficiente “a” mucho más altos para el caso del acero al carbono con respecto a los otros metales, lo cual indica que el acero al carbono es más fácilmente corrosible que los otros metales bajo las condiciones atmosféricas y de contaminación presentes en la ciudad de Quito.

- Los valores del coeficiente “n”, para todos los metales y en todas las estaciones son mayores que 0,5, lo que indica que bajo las condiciones ambientales presentadas, el mecanismo de difusión de la corrosión es muy elevado.
- El acero galvanizado expuesto a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Quito, presenta un alto grado de protección que garantiza un largo tiempo de vida útil del mismo.
- De acuerdo con el análisis mediante las normas ASTM D 610, D 660, D 661 y D 714, la pintura “Antiox 901 M” aplicada sobre las placas de acero al carbono presenta buenas características de resistencia al deterioro y a la corrosión, ya que no presenta fallas considerables debido al uso de fosfato de cinc como pigmento corrosivo.
- De acuerdo al análisis mediante las normas ASTM D 660, D 661 y D 714, la pintura primaria “Vari-Primer 615 SM” aplicada sobre las placas de acero galvanizado, aluminio y cobre, presenta buena resistencia al deterioro, debido a la presencia de tetraoxocromato de cinc como pigmento anticorrosivo. Sin embargo, la incidencia de la luz solar sobre la cara frontal influye en mayor proporción sobre el revestimiento, que la cantidad de humedad en la superficie expuesta.

## 4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos que abarquen mayores tiempos de exposición de los metales, para obtener más datos de corrosión; así como también de concentraciones de contaminantes atmosféricos, y analizar de mejor manera la influencia de los mismos sobre el proceso corrosivo.
- Obtener datos de los factores meteorológicos, específicamente en cada una de las estaciones de ensayo, especialmente en la estación Cruz Loma en la que aún no se tiene sensores meteorológicos de ningún tipo instalados.
- Realizar ensayos acelerados para establecer una correlación con los valores de corrosión obtenidos experimentalmente en este proyecto.
- Colocar recubrimientos en los metales de acuerdo al uso específico que se les vaya a dar y al medio ambiente al cual van a estar expuestos.
- Realizar ensayos que abarquen mayores tiempos de exposición de las placas con recubrimientos, para observar de forma más clara las fallas que sufren los mismos, bajo las condiciones atmosféricas y de contaminación presentes en los distintos sectores de la ciudad de Quito.
- Utilizar para el acero al carbono y para el acero galvanizado, recubrimientos de pintura en base a la norma ISO 12944-5 "Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 5: Protective paint systems"; la misma que se aplica en función de la categorización de las atmósferas que registra la norma ISO 9223.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adabache, A., Silva, M. y Galván, R., 2009, “Microscopio electrónico de barrido un instrumento útil para la ciencia”, [http://pdf-esmanual.com/books/5331/el\\_microscopio\\_electr%C3%93nico\\_de\\_barrido\\_un\\_instrumento\\_%C3%9Atil\\_para\\_.html](http://pdf-esmanual.com/books/5331/el_microscopio_electr%C3%93nico_de_barrido_un_instrumento_%C3%9Atil_para_.html), (Febrero, 2011).
- Almeida, C., 2011, “Estudio del comportamiento de sistemas de pinturas alquídicas con pigmentos nanoparticulados de óxido de cinc y dióxido de titanio en atmósferas urbanas e industriales de la Ciudad de Quito”, Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química, EPN, Quito, Ecuador.
- ASTM A-90, 1995, “Standard Test Method for Weight of Coating on Iron and Steel Articles with Zinc or Zinc-Alloy Coatings”, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 610, 2008, “Standard Test Method for Evaluating Degree of Rusting on Painted”, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 660-01, 2005, “Standard Test Method for Evaluating Degree of Checking on Exterior Paints”, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 661, 2005, “Standard Test Method for Evaluating Degree of Cracking on Exterior Paints”, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 714, 2009, “Standard Test Method for Evaluating Degree of Blistering of Paints”, American Society for Testing and Materials.
- ASTM G1-03, 2003, “Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens”, American Society for Testing and Materials.

- ASTM G07-05, 2005, "Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials", American Society for Testing and Materials.
- ASTM G50-76, 2003, "Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Test on Metals", American Society for Testing and Materials.
- ASTM G92-86, 2003, "Standard Practice for Characterization of Atmospheric Test Sites", American Society for Testing and Materials.
- Ávila, J. y Genescá, J., 1995, "Más allá de la herrumbre. La Física y la Química de la Corrosión", [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec\\_8.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_8.html), (Enero, 2011).
- Barros, E., 2003, "Anodizado", <http://www.kr2-egb.com.ar/anodizado.htm>, (Marzo, 2011).
- Bedón, F., 2009, "Seminario Técnico de Corrosión, Selección de Materiales, Control y Tratamiento en la Industria Petrolera. Protección Catódica".
- Bot, A., 2010, "Óxido de cinc", [http://simple.wikipedia.org/wiki/Zinc\\_oxide](http://simple.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide), (Febrero, 2011).
- Brizuela, P. y Garay, H., 2011, "Generalidades del Acero", <http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/NCI6017/10%20Materiales/Acero.pdf>, (Marzo, 2011).
- Callister, W., 2007, "Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2", Editorial Reverté S.A., Barcelona, España, p. 588.
- Cazco, G. y Recalde, P., 2002, "Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la Ciudad de Quito", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.

- CORPAIRE, 2009, “Informe de la calidad del aire”, <http://remmaq.corpaire.org/>, (Enero, 2011).
- CORPAIRE, 2010, “Redes de monitorización manuales y pasivas”, <http://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/Home>, (Enero, 2011).
- Cortés, M. y Ortíz, P., 2004, “Corrosión”, <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/corrosion.pdf>, (Enero, 2011).
- Custode, R., 2008, “Es nuestro derecho respirar aire puro”, [http://remmaq.corpaire.org/paginas/articulos/aire\\_puro\\_04.pdf](http://remmaq.corpaire.org/paginas/articulos/aire_puro_04.pdf), (Junio, 2011).
- De Humboldt, A., Goldbrunner, A., Pittier, H. y Röhl, E., 2007, “Pisos Térmicos”, [http://es.wikipedia.org/wiki/Pisos\\_t%C3%A9rmicos](http://es.wikipedia.org/wiki/Pisos_t%C3%A9rmicos), (Marzo, 2011).
- Dupont Pinturas, 2010, “Dupont material safety data sheet 615SM.TXT”, México D.F., México.
- EXPOCOLOR S.A, 2007, “Productos Línea Metalmecánica”, <http://www.expocolor.com.ec/>, (Abril, 2011).
- Flinn, R. y Trojan, P., 1979, “Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones”, 2da. edición, Editorial Mc. GrawHill Latinoamericana S.A., Bogotá, Colombia, p.516.
- Früh, A., 2006, “Pourbaix Diagram of Iron”, [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Pourbaix\\_Diagram\\_of\\_Iron.svg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Pourbaix_Diagram_of_Iron.svg), (Marzo, 2011).
- Genescá, J., 1995, “Más allá de la herrumbre III. Corrosión y Medio Ambiente”, [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec\\_6.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_6.htm), (Enero, 2011).

- Gómez, M., Peñaranda, S. y Estrada, D., 2009, "Corrosión del cobre en suelos con diferentes grados de agresividad", <http://www.rlmm.org/ojs/index.php/rlmm>, (Febrero, 2011).
- Gómez, F., 2004, "Manual Básico de Corrosión para Ingenieros", Servicio de Publicaciones Universidad de Murcia, Murcia, España, pp.13, 28, 55-62.
- González, J., 2007, "La pintura como inhibidor de corrosión de las estructuras metálicas", *Informes de la Construcción*, 59 (506), 133.
- Google Maps, "Av. Mariscal Sucre, Quito, Ecuador", <http://maps.google.com/>, (2011).
- Google Maps, "Av. Morán Valverde, Quito, Ecuador", <http://maps.google.com/>, (2011).
- Google Maps, "Av. Necochea, Quito, Ecuador", <http://maps.google.com/>, (2011).
- Google Maps, "Av. Pichincha, Quito, Ecuador", <http://maps.google.com/>, (2011).
- Google Maps, "Capitán Alfonso Yépez, Quito, Ecuador", <http://maps.google.com/>, (2011).
- Google Maps, "Francisco del Campo, Quito, Ecuador", <http://maps.google.com/>, (2011).
- Google Maps, "Luis Cordero, Quito, Ecuador", <http://maps.google.com/>, (2011).
- Harding, J., 2007, "Cristales", Edaf S.A., Madrid, España, p.158.
- Hurlbut, C. y Klein, C., 1997, "Manual de mineralogía", 4ta. edición, REVERTÉ S.A., Barcelona, España, pp. 438, 439.

- INEC, 2011, "Censo de población y vivienda 2001" [http://www.inec.gob.ec/web/guest/descargas/basedatos/cen\\_nac/cen\\_pob\\_nac\\_2001?doAsUserId=p%252Bx9vuBVM9g%253D](http://www.inec.gob.ec/web/guest/descargas/basedatos/cen_nac/cen_pob_nac_2001?doAsUserId=p%252Bx9vuBVM9g%253D), (Junio, 2011).
- ISO 4618-1, 1998, "Paints and Varnishes. Terms and definitions for coating materials", ISO.
- ISO 9223, 1992, "Corrosion of metals and alloys. Classification of Corrosivity Atmospheres", ISO.
- Jiménez, L., Gil, L. y Larez, M., 2006, "Causas del deterioro corrosivo en las estructuras metálicas de la correa transportadora de alúmina", <http://www.scielo.org.ve/pdf/uct/v10n39/art02.pdf>, (Marzo, 2011).
- Molera, P., 1990, "Metales resistentes a la corrosión", MARCOMBO S.A., Barcelona, España, p. 64.
- Morales, R., 2006, "Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago", 1ra. edición, Editorial Universitaria S.A., Santiago de Chile, Chile, p.184.
- Morcillo, M., Almeida, E., Fragata, F. y Panossian, Z., 1998, "Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica Parte I", Gráficas Salué S.A., Madrid, España, pp. 6-9, 12-33, 320-332.
- Morcillo, M., Almeida, E., Rosales, B., Uruchurtu, J. y Marrocos, M., 2002, "Corrosión y Protección de Metales en las Atmósferas de Iberoamérica Parte II", Gráficas Salué S.A., Madrid, España, pp. 64, 65, 67-78, 83-94, 111, 112, 118-122, 167, 168, 673-690, 737.
- Narváez, B., 2006, "Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la Ciudad de Quito parte III", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.

- Orozco, R., Martínez, E., Galván, R., Ramírez, J. y Fernández, I., 2007, "Corrosión: Fenómeno natural, visible y catastrófico", <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol20num2/articulos/corrosion/index.html>, (Febrero, 2011).
- Padilla, E., 1999, "Estudio de la Corrosión de Materiales en Atmósfera de Lima-Método ALCAN", Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 2(4), 48.
- Páez, C., 2008, "Gestión de la Calidad del Aire", Carlos Páez Pérez ®, Quito, Ecuador, 2-6, 53-55, 61-65, 184-199.
- Perry, R., Chilton, C., 1982, "Manual del Ingeniero Químico", Volumen II, 5ta. edición, McGraw-Hill, México, México D.F., pp.23-3, 23-4, 23-5, 23-6, 23-7, 23-8, 23-9.
- Rodríguez, L., Genescá, J., Uruchurtu, J. y Hernández, L., 1999, "Corrosividad Atmosférica", 1ra. Edición, Plaza y Valdés S.A. de C.V., México D.F., México, pp. 24-37, 41, 42.
- Salinas, M., 2004, "Determinación de la Corrosividad Atmosférica en la Ciudad de Quito parte II", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química, EPN, Quito, Ecuador.
- Schweigger, E., 2005, "Manual de pinturas y recubrimientos plásticos", Editorial Díaz de Santos, España, p. 102.
- Sherwin y Williams, 2005, "Definiciones Básicas", <http://www.sherwin.com.ar/estructura.asp?intSec=25>, (Febrero, 2011).
- Sinche, S., 2009, "Protección anticorrosiva del acero mediante el uso de pinturas alquídicas con pigmento de óxido de hierro en atmósferas marina e industrial", Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico, EPN, Quito, Ecuador.

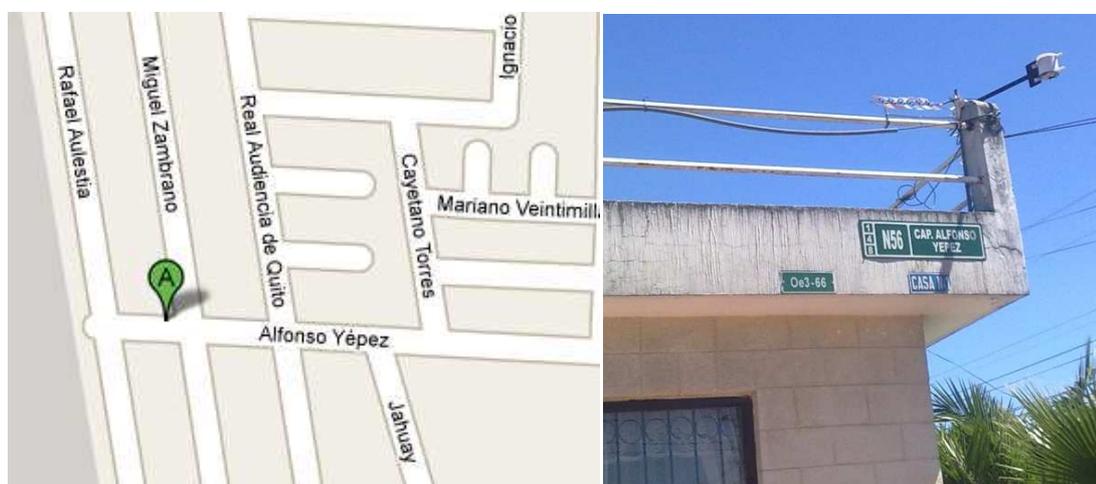
- TITAN Industrias, 2011, “Wash Primer”, <http://www.titanlux.com/diccionario.asp?letra=w>, (Abril, 2011).
- Widman International SRL, 2009, “Contaminación”, <http://www.widman.biz/Analisis/contaminacion.html>, (Marzo, 2011).

## **ANEXOS**

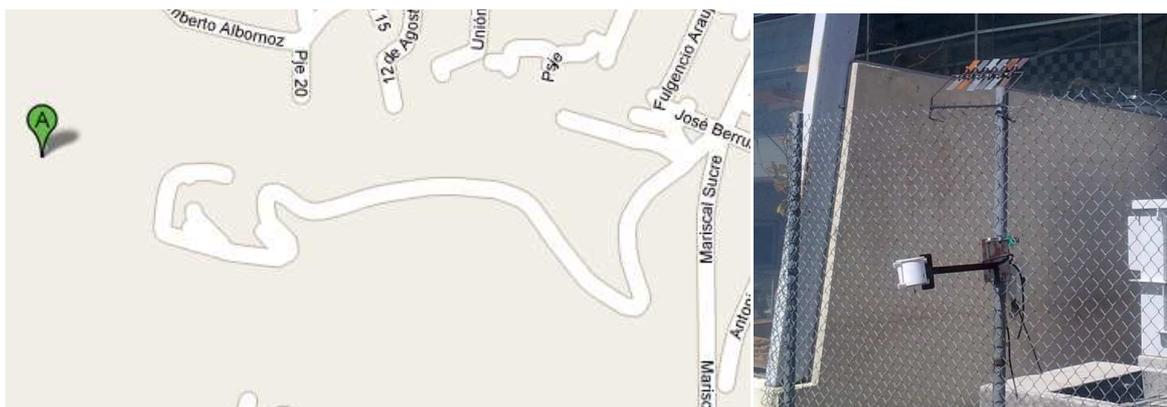
## ANEXO I UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESTACIONES DE ENSAYO EN LA CIUDAD DE QUITO



**Anexo I. 1.** Ubicación de la estación “Carcelén”  
(Google Maps, 2011)



**Anexo I. 2.** Ubicación de la estación “Kennedy”  
(Google Maps, 2011)



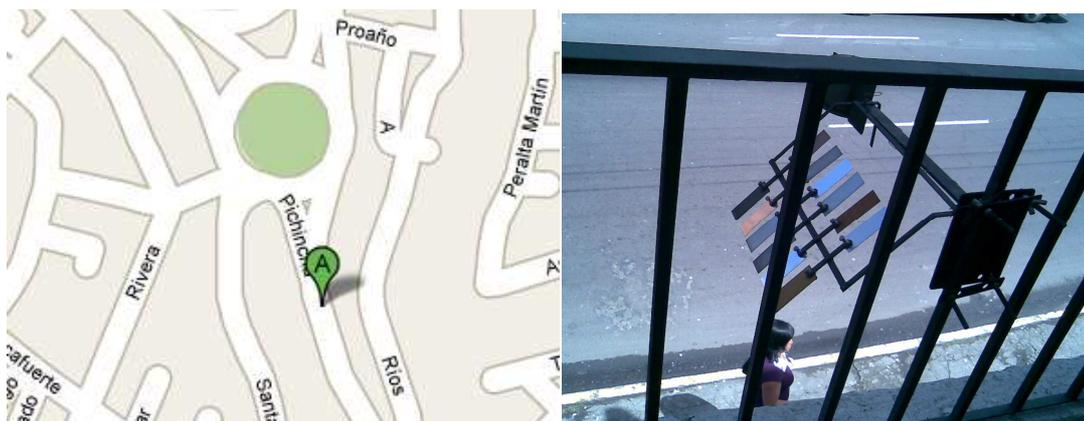
**Anexo I. 3.** Ubicación de la estación “Cruz Loma”  
(Google Maps, 2011)



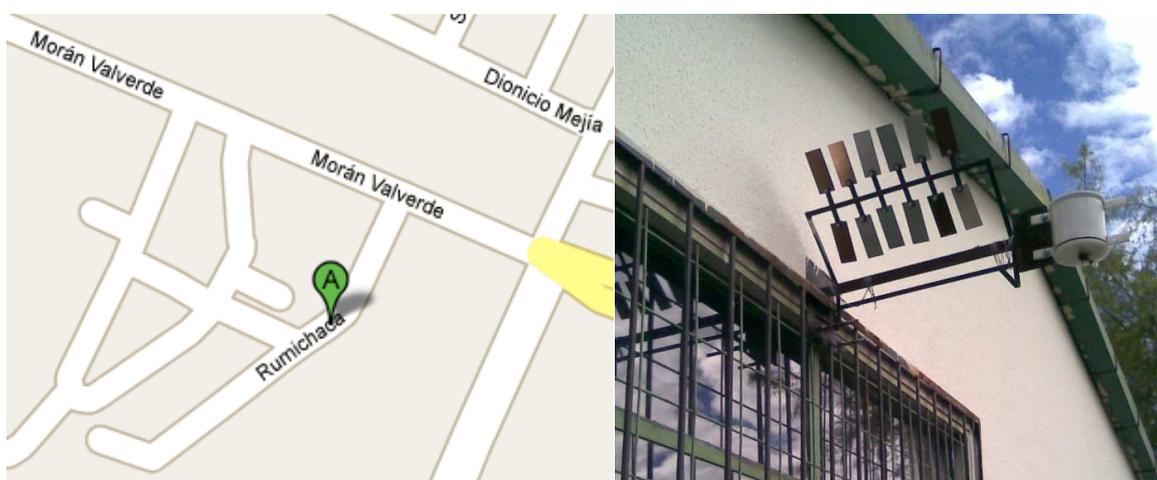
**Anexo I. 4.** Ubicación de la estación “Mariscal”  
(Google Maps, 2011)



**Anexo I. 5.** Ubicación de la estación “Necochea”  
(Google Maps, 2011)



**Anexo I. 6.** Ubicación de la estación “La Marín”  
(Google Maps, 2011)



**Anexo I. 7.** Ubicación de la estación “Quitumbe”  
(Google Maps, 2011)

## ANEXO II DATOS METEOROLÓGICOS POR ESTACIÓN

**Anexo II. 1.** Datos meteorológicos mensuales para el período octubre 2009 – septiembre 2010 estación “Carcelén”

Mes	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Tiempo de humectación (h)
Octubre	14,77	69,16	64,40	274
Noviembre	15,01	70,67	7,60	307
Diciembre	14,86	75,00	68,20	383
Enero	15,38	68,23	25,80	275
Febrero	15,82	71,64	40,10	290
Marzo	15,65	72,12	26,40	353
Abril	13,09	87,01	125,90	420
Mayo	12,49	87,68	87,60	299
Junio	11,65	85,16	49,60	423
Julio	11,37	87,09	13,10	288
Agosto	11,41	77,45	16,50	233
Septiembre	10,85	87,42	87,60	205

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo II. 2.** Datos meteorológicos mensuales para el período octubre 2009 – septiembre 2010 estación “Kennedy”

Mes	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Precipitación (mm)	Tiempo de humectación (h)
Octubre	14,20	66,80	60,30	274
Noviembre	13,80	69,20	7,20	307
Diciembre	13,70	74,60	64,50	383
Enero	14,69	68,07	2,98	275
Febrero	15,32	71,56	33,50	290
Marzo	15,08	72,04	30,40	353
Abril	12,52	88,73	155,20	390
Mayo	12,60	83,44	84,90	211
Junio	11,11	83,76	41,50	374
Julio	10,69	87,30	73,30	227
Agosto	10,87	75,25	23,60	192
Septiembre	10,46	83,23	80,80	152

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo II. 3.** Datos meteorológicos mensuales para el período octubre 2009 – septiembre 2010 estación “Mariscal”

<b>Mes</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Tiempo de humectación (h)</b>
Octubre	14,41	67,28	77,00	265
Noviembre	14,52	69,30	51,10	272
Diciembre	14,33	75,40	163,70	400
Enero	15,08	62,99	5,80	190
Febrero	15,54	67,58	46,40	242
Marzo	15,35	67,98	31,40	247
Abril	12,75	88,09	211,70	395
Mayo	12,59	83,65	174,00	219
Junio	11,76	79,86	45,50	327
Julio	11,25	85,36	105,20	254
Agosto	11,59	70,25	61,00	124
Septiembre	11,31	76,40	90,80	133

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo II. 4.** Datos meteorológicos mensuales para el período octubre 2009 – septiembre 2010 estación “Necochea”

<b>Mes</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Tiempo de humectación (h)</b>
Octubre	14,54	69,24	105,50	284
Noviembre	14,62	70,62	69,40	318
Diciembre	14,42	75,01	128,40	392
Enero	14,99	64,47	51,50	228
Febrero	15,45	67,82	103,40	276
Marzo	15,41	67,46	28,60	308
Abril	13,06	85,84	261,70	361
Mayo	12,59	80,23	157,90	211
Junio	12,10	78,52	61,10	282
Julio	11,78	81,66	120,40	169
Agosto	11,80	69,31	27,60	122
Septiembre	11,52	75,78	111,50	131

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo II. 5.** Datos meteorológicos mensuales para el período octubre 2009 – septiembre 2010 estación “La Marín”

<b>Mes</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Tiempo de humectación (h)</b>
Octubre	14,54	69,24	105,50	284
Noviembre	14,62	70,62	69,40	318
Diciembre	14,42	75,01	128,40	392
Enero	14,99	64,47	51,50	228
Febrero	15,45	67,82	103,40	276
Marzo	15,41	67,46	28,60	308
Abril	13,06	85,84	261,70	373
Mayo	12,59	80,23	157,90	199
Junio	12,10	78,52	61,10	282
Julio	11,78	81,66	120,40	169
Agosto	11,80	69,31	27,60	122
Septiembre	11,52	75,78	111,50	131

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo II. 6.** Datos meteorológicos mensuales para el período octubre 2009 – septiembre 2010 estación “Quitumbe”

<b>Mes</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>	<b>Precipitación (mm)</b>	<b>Tiempo de humectación (h)</b>
Octubre	14,54	69,24	105,50	251
Noviembre	14,62	70,62	69,40	267
Diciembre	14,42	75,01	128,40	386
Enero	14,99	64,47	51,50	202
Febrero	15,45	67,82	103,40	226
Marzo	15,41	67,46	28,60	211
Abril	13,06	85,84	261,70	361
Mayo	12,59	80,23	157,90	211
Junio	12,10	78,52	61,10	282
Julio	11,78	81,66	120,40	169
Agosto	11,80	69,31	27,60	122
Septiembre	11,52	75,78	111,50	131

(CORPAIRE, 2010)

## ANEXO III DATOS DE CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES POR ESTACIÓN

**Anexo III. 1.** Concentración mensual de los contaminantes presentes en la estación “Carcelén” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Octubre	10,67	18,42	43,08	49,66
Noviembre	2,94	22,41	39,98	51,95
Diciembre	4,75	27,77	38,11	58,07
Enero	2,82	17,76	26,35	89,59
Febrero	21,09	24,19	23,23	34,30
Marzo	9,91	19,41	23,61	36,07
Abril	13,10	9,38	18,64	23,53
Mayo	31,33	29,75	16,23	23,30
Junio	10,20	22,97	20,70	23,59
Julio	3,45	28,93	24,30	29,67
Agosto	18,66	19,08	24,30	46,75
Septiembre	7,51	37,09	36,43	31,33

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo III. 2.** Concentración mensual de los contaminantes presentes en la estación “Kennedy” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Octubre	5,37	19,91	26,43	49,66
Noviembre	7,11	37,94	24,37	51,95
Diciembre	6,73	35,36	26,43	58,07
Enero	2,99	24,18	18,49	89,59
Febrero	7,93	20,79	26,83	34,30
Marzo	6,31	25,32	31,84	36,07
Abril	0,01	-	9,20	23,53
Mayo	-	-	14,61	23,30
Junio	7,41	23,18	16,88	23,59
Julio	12,45	36,94	14,69	29,67
Agosto	2,91	24,65	14,69	46,75
Septiembre	5,18	18,49	49,27	31,33

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo III. 3.** Concentración mensual de los contaminantes presentes en la estación “Cruz Loma” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Octubre	9,36	10,59	49,79	50,63
Noviembre	0,25	10,08	70,36	53,81
Diciembre	4,74	8,05	49,96	31,31
Enero	2,28	13,98	12,84	30,55
Febrero	5,97	11,46	53,47	29,92
Marzo	5,86	14,39	39,00	32,63
Abril	-	3,21	24,17	31,61
Mayo	29,08	12,04	19,28	25,64
Junio	6,54	0,74	27,95	29,98
Julio	5,78	9,36	30,75	27,62
Agosto	1,89	3,88	30,75	46,27
Septiembre	3,01	14,25	80,32	26,74

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo III. 4.** Concentración mensual de los contaminantes presentes en la estación “Mariscal” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Octubre	19,82	46,30	23,71	31,26
Noviembre	45,70	103,22	26,22	32,12
Diciembre	2,52	32,90	28,86	22,50
Enero	3,05	21,33	20,21	32,22
Febrero	8,06	32,75	20,88	17,19
Marzo	38,79	52,62	20,63	25,20
Abril	52,11	32,85	13,03	22,66
Mayo	73,92	27,51	19,07	21,90
Junio	10,86	20,00	17,92	23,93
Julio	2,12	32,96	22,47	20,44
Agosto	3,45	22,59	22,47	30,88
Septiembre	4,20	25,60	29,98	24,21

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo III. 5.** Concentración mensual de los contaminantes presentes en la estación “Necochea” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Octubre	13,92	38,72	20,77	46,71
Noviembre	4,26	71,99	21,11	30,80
Diciembre	2,47	57,05	18,42	29,54
Enero	6,90	53,48	18,49	76,22
Febrero	6,90	53,48	19,30	37,32
Marzo	6,01	57,21	27,55	38,38
Abril	9,13	23,85	14,84	32,56
Mayo	18,13	47,15	28,93	35,75
Junio	6,07	40,78	41,12	39,03
Julio	5,69	65,69	17,98	37,26
Agosto	2,19	49,53	17,98	62,19
Septiembre	7,76	39,24	34,48	56,52

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo III. 6.** Concentración mensual de los contaminantes presentes en la estación “La Marín” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Octubre	7,46	66,45	21,48	46,71
Noviembre	3,68	97,46	13,12	30,80
Diciembre	14,32	79,36	15,12	29,54
Enero	3,85	70,70	15,26	76,22
Febrero	2,74	12,40	13,39	37,32
Marzo	11,19	94,78	12,38	38,38
Abril	23,41	69,75	11,91	32,56
Mayo	23,70	65,29	11,92	35,75
Junio	17,03	53,29	10,69	39,03
Julio	0,85	126,26	6,18	37,26
Agosto	3,25	78,95	6,18	62,19
Septiembre	5,80	12,74	26,02	56,52

(CORPAIRE, 2010)

**Anexo III. 7.** Concentración mensual de los contaminantes presentes en la estación “Quitumbe” durante el período octubre 2009 – septiembre 2010

Mes	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Octubre	6,20	28,19	32,40	58,79
Noviembre	4,76	117,25	34,86	51,98
Diciembre	15,25	8,04	24,14	36,40
Enero	1,99	20,49	17,81	27,52
Febrero	7,30	22,44	17,52	36,67
Marzo	56,01	47,94	16,63	40,22
Abril	76,40	37,80	11,36	32,28
Mayo	63,88	27,94	17,38	31,24
Junio	92,65	12,30	15,26	32,50
Julio	10,83	21,34	12,80	30,42
Agosto	3,04	15,02	12,80	53,69
Septiembre	8,30	18,06	36,77	38,12

(CORPAIRE, 2010)

## **ANEXO IV DATOS EXPERIMENTALES PARA CADA METAL Y EN CADA ESTACIÓN DE ENSAYO**

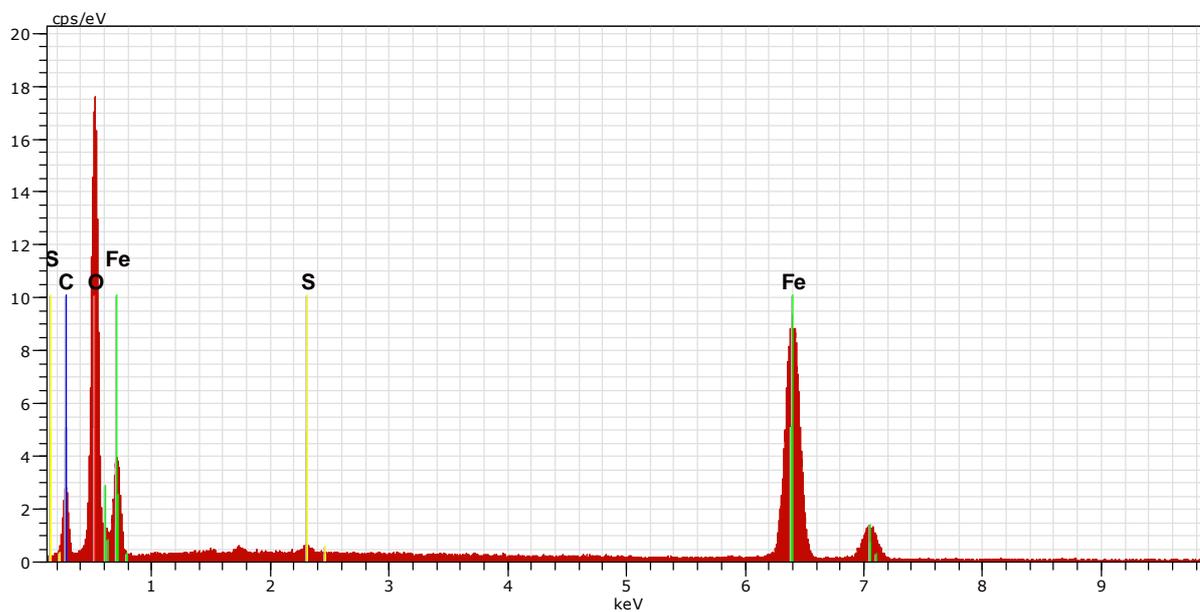
Los datos experimentales se encuentran el CD adjunto.

## ANEXO V DATOS PROMEDIOS DE CORROSIÓN DE CADA METAL

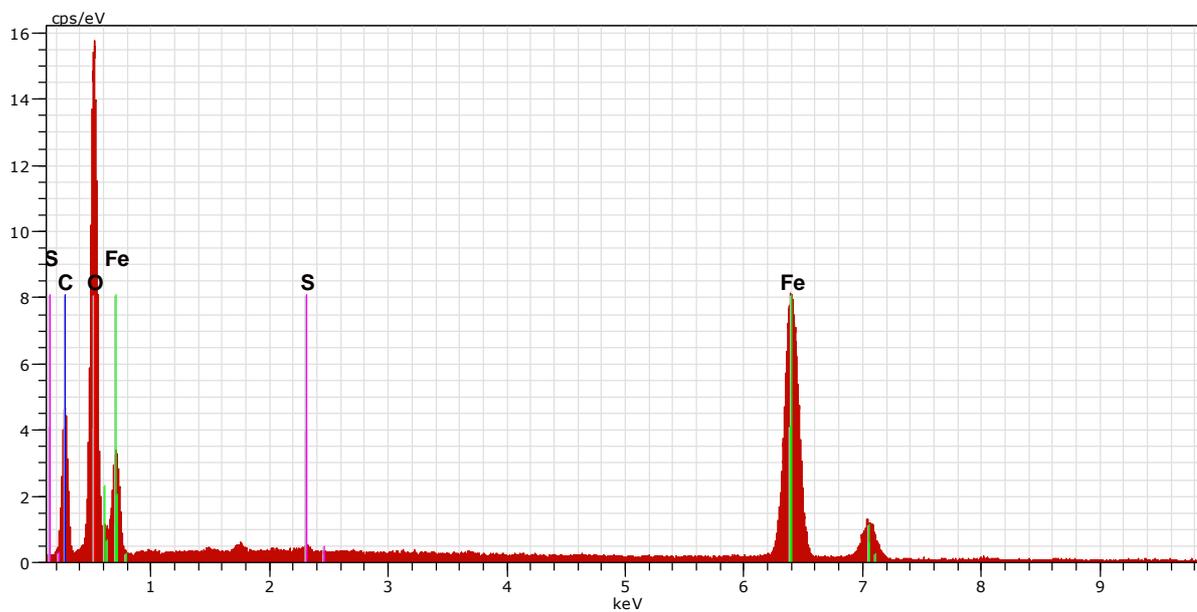
**Anexo V. 1.** Valores de corrosión promedio calculados para el acero galvanizado, acero al carbono, aluminio y cobre para cada una de las estaciones de ensayo. Período octubre 2009 – septiembre 2010

<b>Estación</b>	<b>Acero galvanizado (µm)</b>	<b>Cobre (µm)</b>	<b>Aluminio (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Acero al carbono (µm)</b>
Carcelén	0,42	0,09	0,16	1,64
Kennedy	0,35	0,09	0,15	2,21
Cruz Loma	0,37	0,15	0,13	1,74
Mariscal	0,40	0,11	0,13	2,16
Necochea	0,36	0,10	0,21	1,66
La Marín	0,48	0,07	0,15	1,26
Quitumbe	0,49	0,11	0,14	2,83

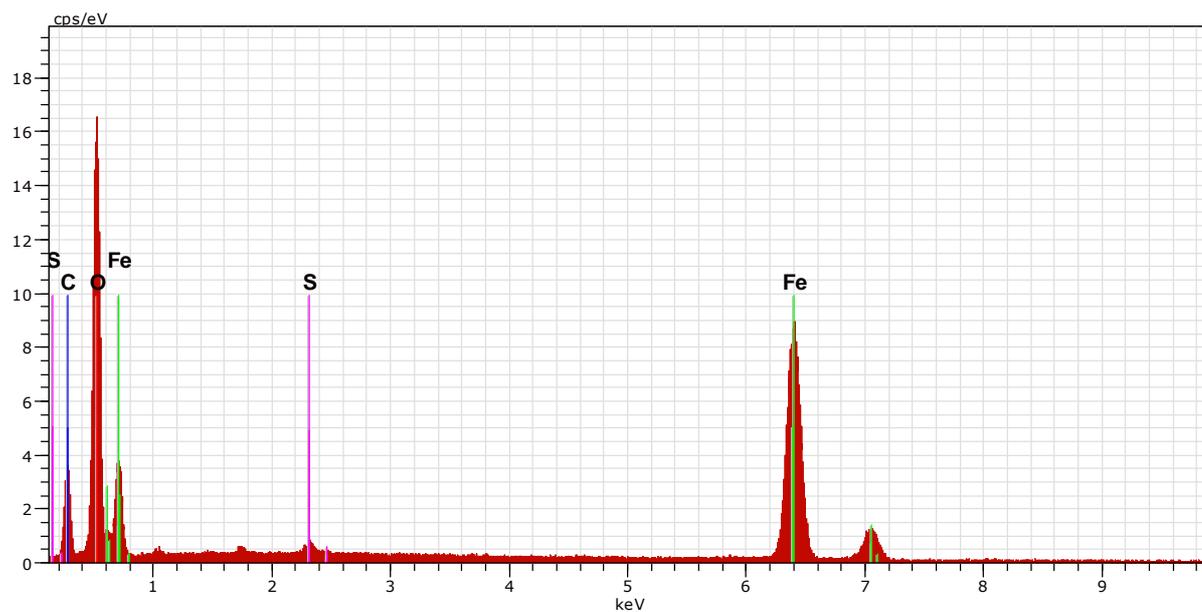
## ANEXO VI ESPECTROS DEL ANÁLISIS MEB-EDS



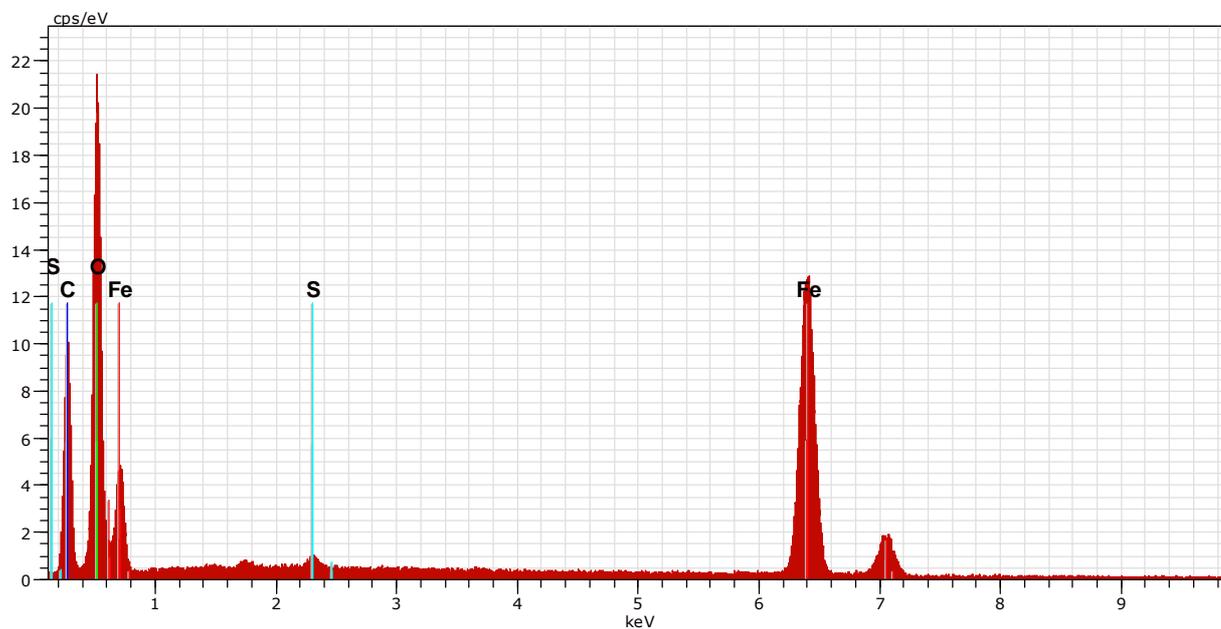
**Anexo VI. 1.** Espectro obtenido mediante MEB-EDS de los óxidos de hierro de la Estación “Kennedy”



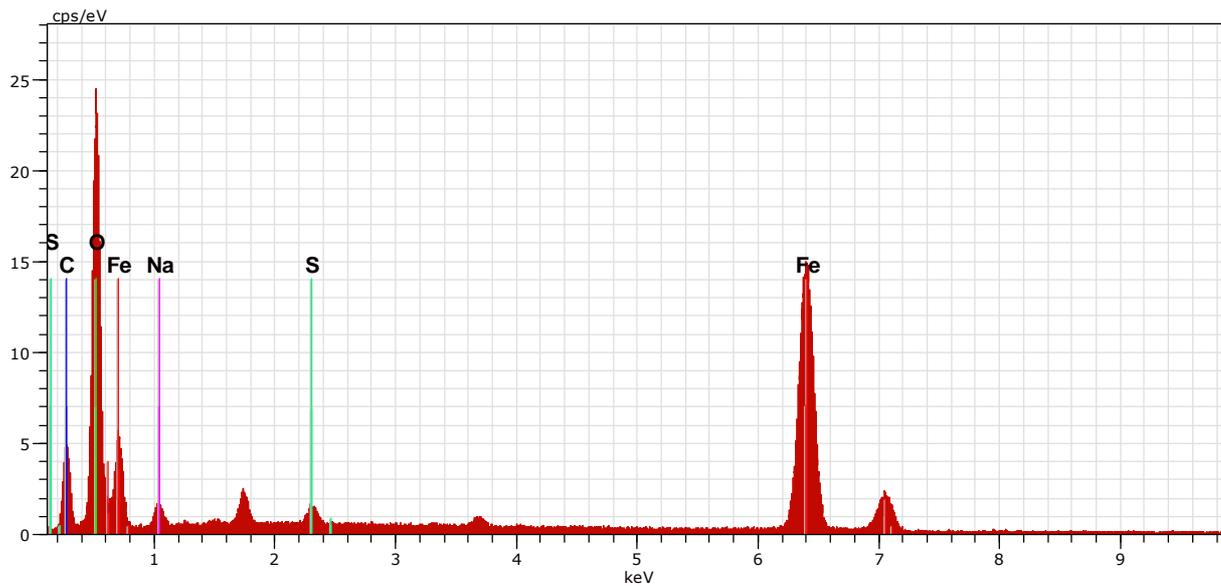
**Anexo VI. 2.** Espectro obtenido mediante MEB-EDS de los óxidos de hierro de la Estación “Cruz Loma”



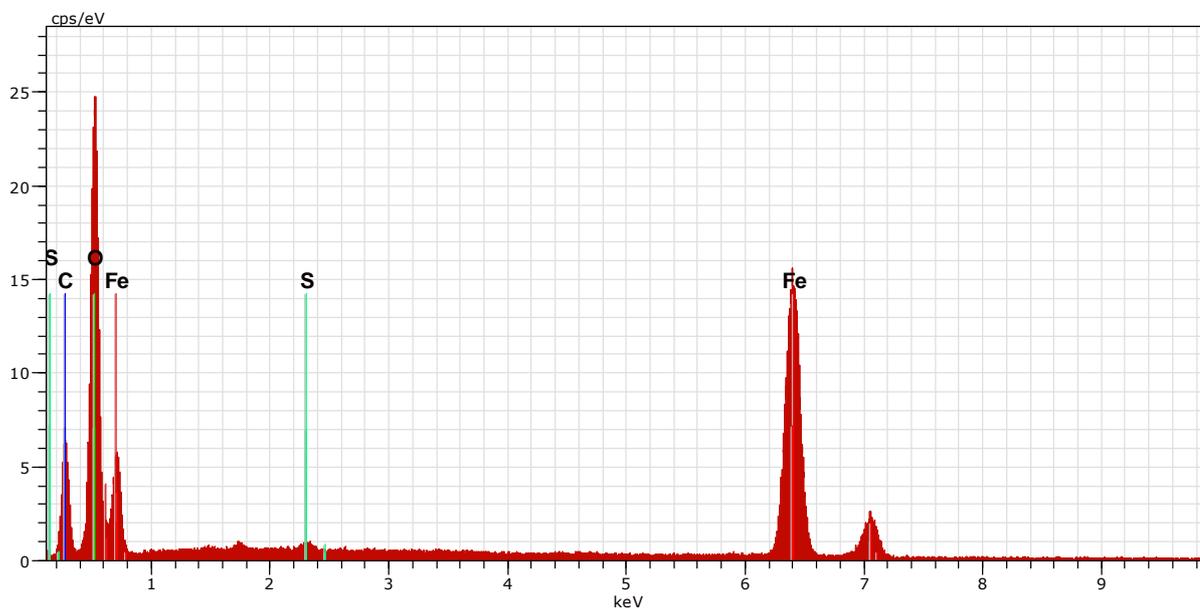
**Anexo VI. 3.** Espectro obtenido mediante MEB-EDS de los óxidos de hierro de la Estación "Mariscal"



**Anexo VI. 4.** Espectro obtenido mediante MEB-EDS de los óxidos de hierro de la Estación "Necochea"



**Anexo VI. 5.** Espectro obtenido mediante MEB-EDS de los óxidos de hierro de la Estación "La Marín"



**Anexo VI. 6.** Espectro obtenido mediante MEB-EDS de los óxidos de hierro de la Estación "Quitumbe"

## ANEXO VII ANÁLISIS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X



### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

#### Resultados de Análisis

**Solicitante:** Dr. Luis Lascano

**Referencia:** RM-6630

**Fecha:** 08/09/11

**Muestras recibidas:** Dos muestras sólidas denominadas

**Muestra 1:** Muestra Mariscal 1 año (Código cliente)

**Muestra 2:** Muestra Quitumbe 1 año (Código cliente)

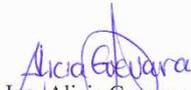
#### Resultados Análisis Difracción de Rayos X

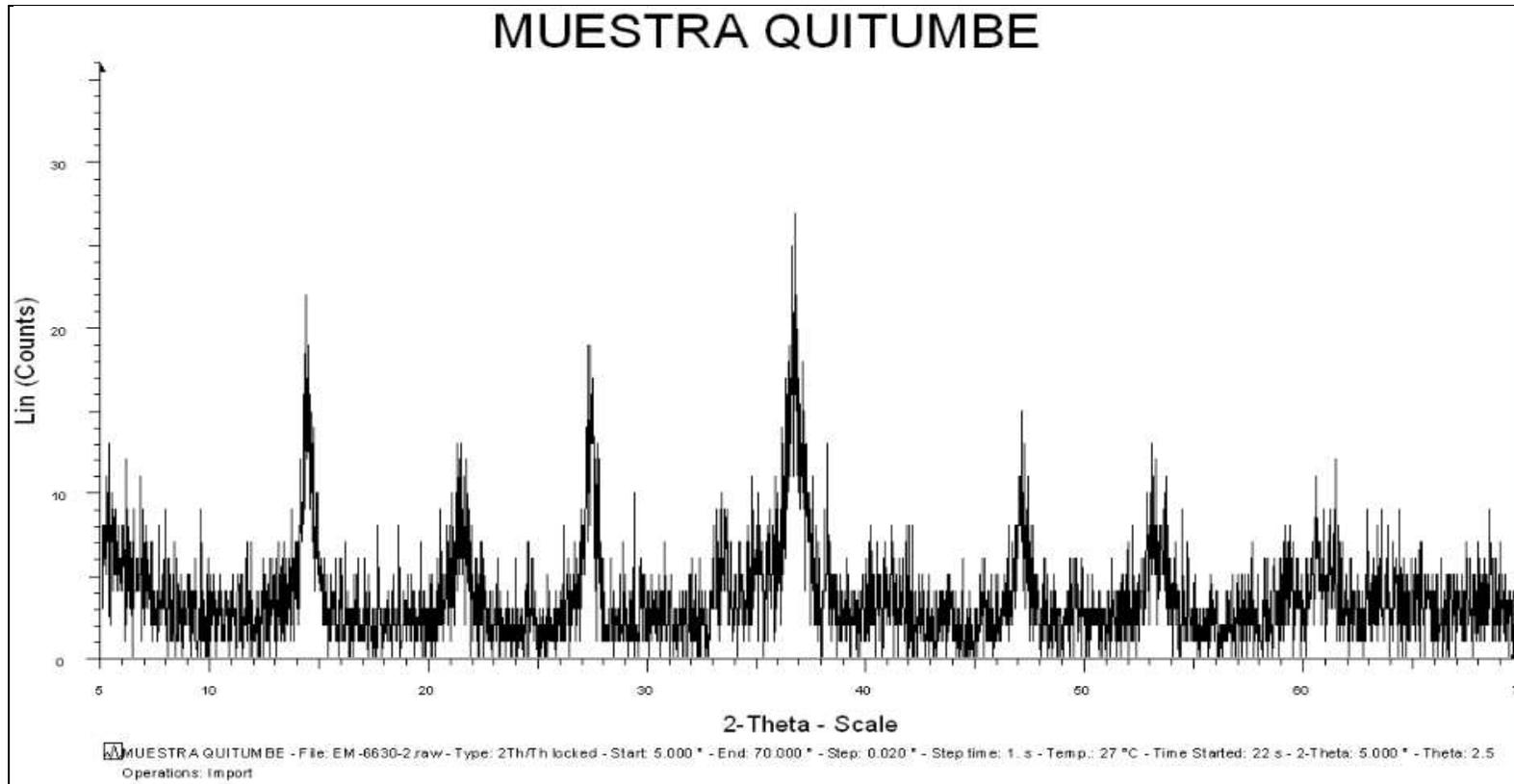
La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE, y el programa Diffrac plus para cualificación y cuantificación. A continuación se detallan los resultados obtenidos:

Nombre	Formula	Muestra 1 Contenido aproximado (%)	Muestra 2 Contenido (%)
Goethita	FeO(OH)	50	55
Lepidocrocita	FeO(OH)	40	40
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	--
Grupo plagioclasa (albita, andesina, anortita)	(Na,Ca)Al(Si,Al)Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	5	5

Nota: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida. Los resultados presentados son aproximados debido a la calidad de los difractogramas (adjuntos) obtenidos.

  
Ing. Ernesto de la Torre  
Jefe de Departamento

  
Ing. Alicia Guevara  
Responsable



**Anexo VII. 2.** Difractograma de los óxidos de hierro de la estación “Quitumbe”

**ANEXO VIII RESULTADOS VISUALES DE LOS PROYECTOS  
“DETERMINACIÓN DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN LA  
CIUDAD DE QUITO, PARTE I Y PARTE II” PARA LAS PLACAS  
CON RECUBRIMIENTOS**

**Anexo VIII. 1.** Análisis visual según las normas ASTM D 714, D 610, D 660 y D 661, de las placas de acero al carbono recubiertas con pintura Antiox, Proyecto “Determinación de la corrosión atmosférica, Parte I”, 10 meses de exposición

Estación	Ampollaje		Herrumbre		Checking		Observaciones
	Frente	Atrás	Frente	Atrás	Frente	Atrás	
San Gabriel 1-6	10	10	10	10	10	10	Polvo fácilmente desprendible en la limpieza. Herrumbre presente en la estación Politécnica posiblemente debido a que el tratamiento previo a la aplicación de la pintura no fue adecuado.
San Gabriel 4-6	10	10	10	10	10	10	
Río Coca 1-6	10	10	10	9	10	10	
Río Coca 4-6	10	10	10	10	10	10	
Los Chillos 1-6	10	10	10	10	10	10	
Los Chillos 4-6	10	10	10	10	10	10	
Tumbaco 1-6	10	10	10	10	10	10	
Tumbaco 4-6	10	10	10	9	10	10	
Politécnica Nacional 1-6	10	10	10	3	10	10	
Politécnica Nacional 4-6	10	10	10	4	10	10	
Pinturas Cóndor 1-6	10	10	10	10	10	10	
Pinturas Cóndor 4-6	10	10	10	10	10	10	
Centro 1-6	10	10	10	10	10	10	
Centro 4-6	10	10	10	10	10	10	

**Anexo VIII. 2.** Análisis visual según las normas ASTM D 714, D 610, D 660 y D 661, de las placas de acero al carbono recubiertas con pintura Antiox, Proyecto “Determinación de la corrosión atmosférica, Parte II”, 18 meses de exposición

Estación	Ampollaje		Herrumbre		Checking		Observaciones
	Frente	Atrás	Frente	Atrás	Frente	Atrás	
San Gabriel 2-6	10	10	10	10	10	10	Polvo fácilmente desprendible en la limpieza. Herrumbre en la estación Politécnica por posible errores de aplicación
Río Coca 2-6	10	10	10	10	10	10	
Los Chillos 2-6	10	10	10	10	10	10	
Tumbaco 2-6	10	10	10	10	10	10	
Politécnica Nacional 2-6	10	10	8	8	10	10	
Pinturas Cóndor 2-6	10	10	9	10	10	10	
Centro 2-6	10	10	10	10	10	10	

## ANEXO IX ECUACIONES DE LA CINÉTICA DE CORROSIÓN

En este anexo se presentan las ecuaciones obtenidas mediante la regresión lineal de los datos experimentales para todas las estaciones; así como también el coeficiente  $R^2$  que indica cuán buena es la regresión lineal obtenida.

### Anexo IX. 1. Acero al carbono

**Anexo IX.1. 1.** Ecuaciones de cinética de corrosión del acero al carbono para cada estación de ensayo

Estación	Regresión lineal	$R^2$	Cinética de corrosión
Carcelén	$\text{Log}(C) = 0,6403 * \text{Log}(t) + 1,114$	0,9998	$C = 13,0017 * t^{0,6403}$
Kennedy	$\text{Log}(C) = 0,5353 * \text{Log}(t) + 1,0641$	0,9935	$C = 11,5904 * t^{0,5353}$
Cruz Loma	$\text{Log}(C) = 1,1059 * \text{Log}(t) + 1,0687$	0,9864	$C = 11,7139 * t^{1,1059}$
Mariscal	$\text{Log}(C) = 0,8594 * \text{Log}(t) + 1,1883$	0,9978	$C = 15,4277 * t^{0,8594}$
Necochea	$\text{Log}(C) = 1,0075 * \text{Log}(t) + 1,0724$	0,9606	$C = 11,8141 * t^{1,0075}$
La Marín	$\text{Log}(C) = 0,7715 * \text{Log}(t) + 0,553$	0,9297	$C = 3,5727 * t^{0,7715}$
Quitumbe	$\text{Log}(C) = 0,7849 * \text{Log}(t) + 1,3368$	0,9985	$C = 21,7170 * t^{0,7849}$

### Anexo IX. 2. Aluminio

**Anexo IX.2. 1.** Ecuaciones de cinética de corrosión del aluminio para cada estación de ensayo

Estación	Regresión lineal	$R^2$	Cinética de corrosión
Carcelén	$\text{Log}(C) = 1,8208 * \text{Log}(t) - 0,4158$	0,9786	$C = 0,3839 * t^{1,8208}$
Kennedy	$\text{Log}(C) = 1,1378 * \text{Log}(t) - 0,4843$	0,8663	$C = 0,3279 * t^{1,1378}$
Cruz Loma	$\text{Log}(C) = 1,6846 * \text{Log}(t) - 0,5400$	0,9935	$C = 0,2884 * t^{1,6846}$
Mariscal	$\text{Log}(C) = 1,8766 * \text{Log}(t) - 0,4006$	0,9266	$C = 0,3976 * t^{1,8766}$
Necochea	$\text{Log}(C) = 1,6269 * \text{Log}(t) - 0,6052$	0,9913	$C = 0,2482 * t^{1,6269}$
La Marín	$\text{Log}(C) = 1,4091 * \text{Log}(t) - 0,8035$	0,9981	$C = 0,1572 * t^{1,4091}$
Quitumbe	$\text{Log}(C) = 1,9462 * \text{Log}(t) - 0,2905$	0,9724	$C = 0,5123 * t^{1,9462}$

### Anexo IX. 3. Cobre

**Anexo IX.3. 1.** Ecuaciones de cinética de corrosión del cobre para cada estación de ensayo

Estación	Regresión lineal	R <sup>2</sup>	Cinética de corrosión
Carcelén	$\text{Log}(C) = 2,2841 * \text{Log}(t) + 0,3158$	0,9804	$C = 2,0692 * t^{2,2841}$
Kennedy	$\text{Log}(C) = 2,1896 * \text{Log}(t) + 0,334$	0,9633	$C = 2,1577 * t^{2,1896}$
Cruz Loma	$\text{Log}(C) = 0,9995 * \text{Log}(t) + 0,0251$	1,0000	$C = 1,0595 * t^{0,9995}$
Mariscal	$\text{Log}(C) = 1,2545 * \text{Log}(t) - 0,1963$	0,9954	$C = 0,6364 * t^{1,2545}$
Necochea	$\text{Log}(C) = 2,2096 * \text{Log}(t) + 0,2854$	0,9329	$C = 1,9293 * t^{2,2096}$
La Marín	$\text{Log}(C) = 0,7653 * \text{Log}(t) - 0,8197$	0,9489	$C = 0,1515 * t^{0,7653}$
Quitumbe	$\text{Log}(C) = 1,5578 * \text{Log}(t) + 0,1682$	0,8655	$C = 1,4730 * t^{1,5578}$

### Anexo IX. 4. Acero galvanizado

**Anexo IX.4. 1.** Ecuaciones de cinética de corrosión del cobre para cada estación de ensayo

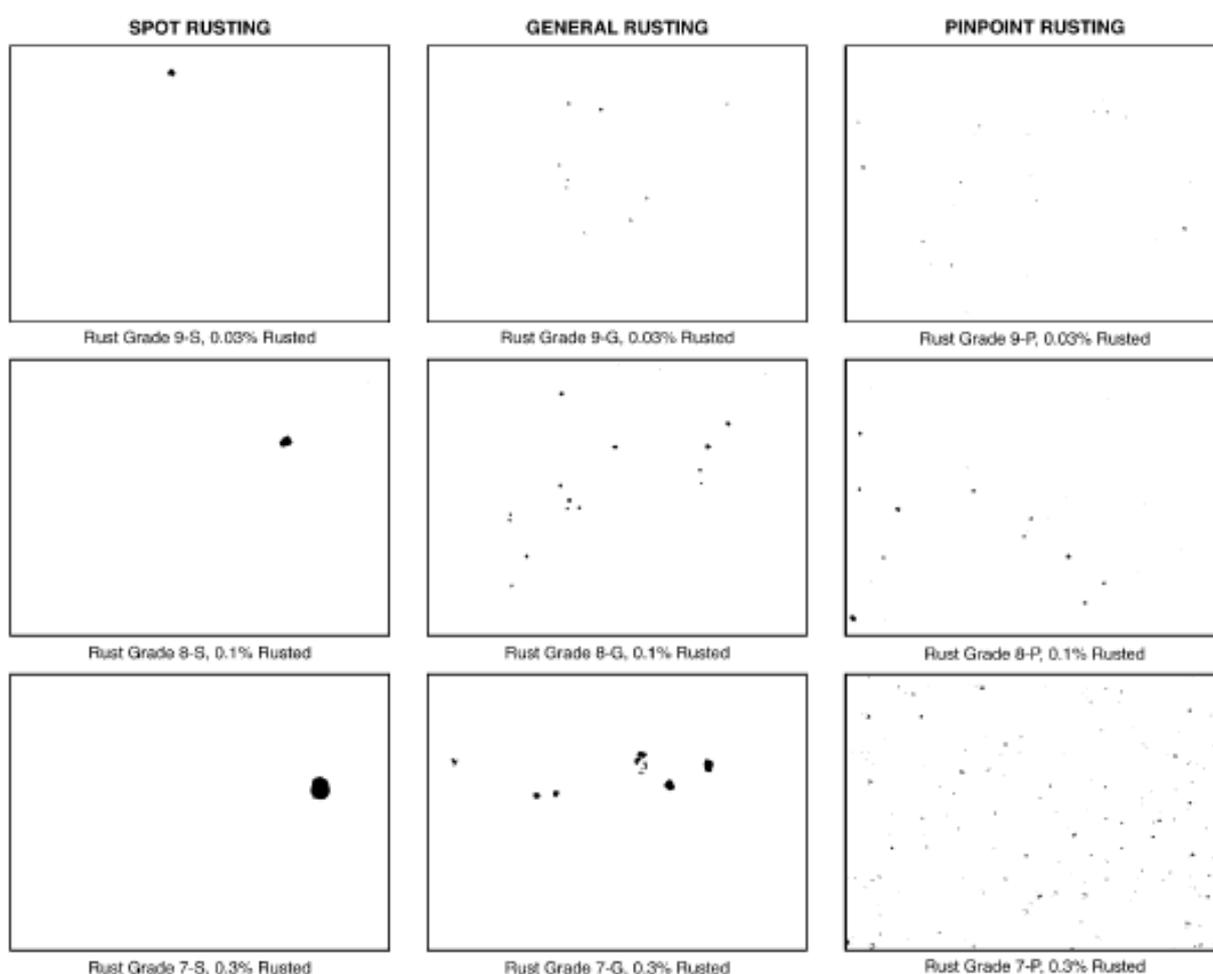
Estación	Regresión lineal	R <sup>2</sup>	Cinética de corrosión
Carcelén	$\text{Log}(C) = 0,8605 * \text{Log}(t) + 0,0189$	0,8954	$C = 1,0445 * t^{0,8605}$
Kennedy	$\text{Log}(C) = 0,9219 * \text{Log}(t) + 0,0441$	0,9244	$C = 1,1069 * t^{0,9219}$
Cruz Loma	$\text{Log}(C) = 0,8946 * \text{Log}(t) + 0,0447$	0,9190	$C = 1,1084 * t^{0,8946}$
Mariscal	$\text{Log}(C) = 0,8338 * \text{Log}(t) + 0,0269$	0,9237	$C = 1,0639 * t^{0,8338}$
Necochea	$\text{Log}(C) = 1,1855 * \text{Log}(t) + 0,2709$	0,8516	$C = 1,8659 * t^{1,1855}$
La Marín	$\text{Log}(C) = 0,7662 * \text{Log}(t) - 0,073$	0,8049	$C = 0,8453 * t^{0,7662}$
Quitumbe	$\text{Log}(C) = 0,7869 * \text{Log}(t) + 0,0101$	0,9036	$C = 1,0235 * t^{0,7869}$

**ANEXO X NORMA ASTM G1 “STANDARD PRACTICE FOR  
PREPARING, CLEANING AND EVALUATING CORROSION TEST  
SPACIMENS”**

La norma ASTM G1 se encuentra en el CD adjunto.

## ANEXO XI NORMA ASTM D 610 “STANDARD PRACTICE FOR EVALUATING DEGREE OF RUSTING ON PAINTED STEEL SURFACES”

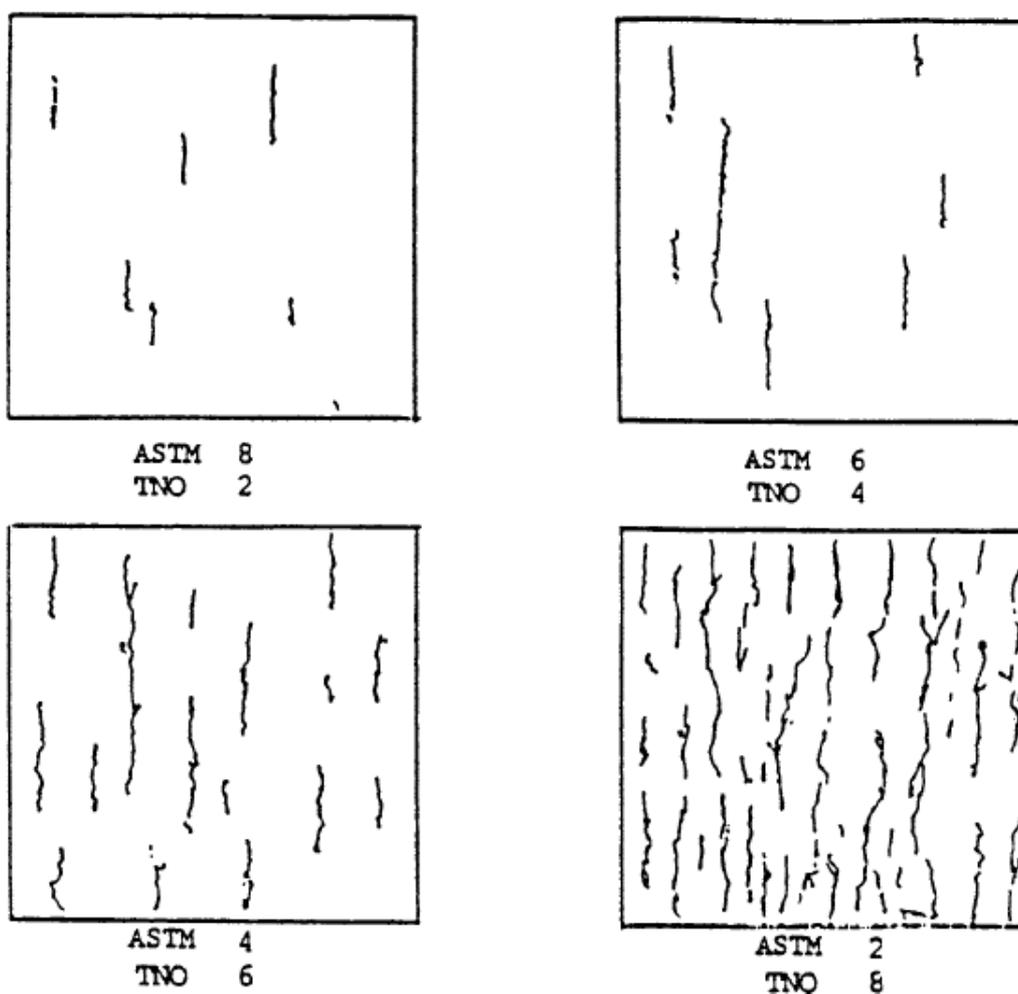
A continuación se presentan los estándares visuales correspondientes a los grados de corrosión 7, 8 y 9 que son aquellos que se utilizaron en el presente proyecto. La norma completa se encuentra en el CD adjunto.



**Anexo XI. 1.** Estándares visuales correspondientes a los grados de corrosión 7, 8 y 9 para superficies de acero pintadas, según la norma ASTM D 610

**ANEXO XII. NORMAS ASTM D 660 “STANDARD TEST METHOD FOR EVALUATING DEGREE OF CHECKING OF EXTERIOR PAINTS” Y ASTM D 661 “STANDARD TEST METHOD FOR EVALUATING DEGREE OF CRACKING OF EXTERIOR PAINTS”**

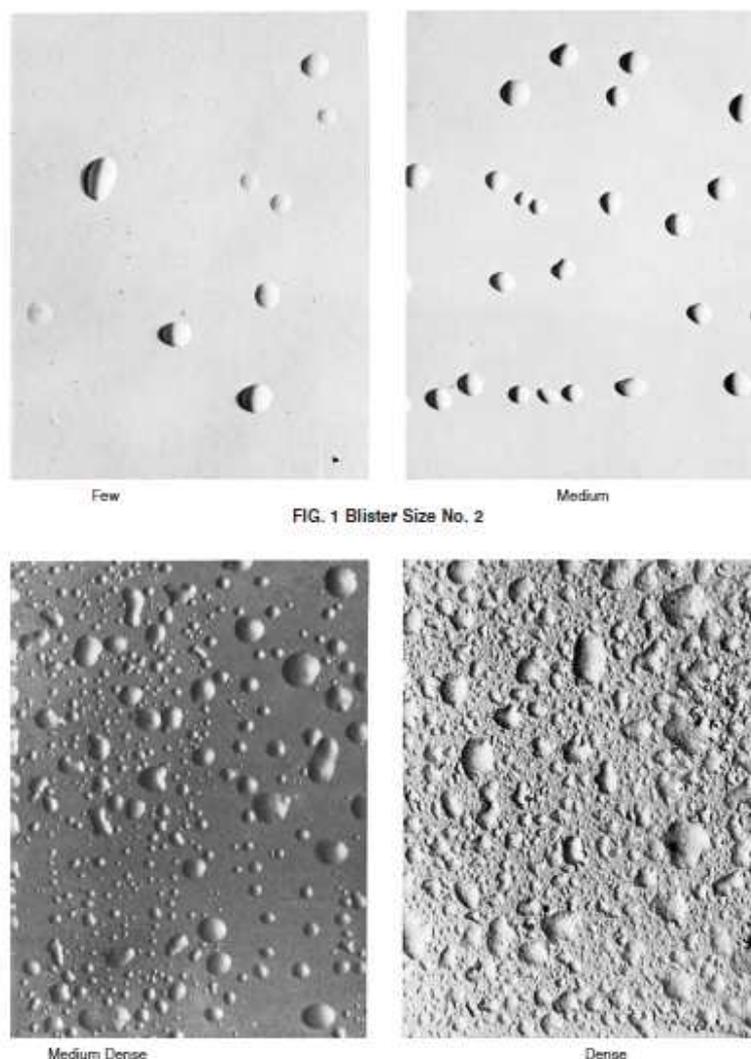
A continuación se presenta un ejemplo de los estándares visuales utilizados en la realización del presente proyecto. Las normas completas se encuentran en el CD adjunto.



**Anexo XII. 1.** Estándares visuales correspondientes a grado de checking o cuarteamiento irregular, según la norma ASTM D 660

### ANEXO XIII. NORMA ASTM D 714 “STANDARD TEST METHOD FOR EVALUATING DEGREE OF BLISTERING OF PAINTS”

A continuación se presenta un ejemplo de los estándares visuales utilizados para determinar el grado de ampollamiento en una película de pintura. Para observar de mejor manera la utilización de los estándares, se presenta el estándar correspondiente al grado 2 de ampollamiento. La norma completa se encuentra disponible en el CD adjunto.



**Anexo XIII. 1.** Estándares visuales correspondientes a grado 2 de ampollamiento, según la norma ASTM D 714