



Universitat Ramon Lull

TESIS DOCTORAL

Título	CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO Y DEL ALUMINIO EN DIFERENTES TIPOS DE ATMÓSFERAS DE EL SALVADOR
Realizada por	Carmen Elena Menjívar Benítez
en el Centro	IQS School of Engineering
y en el Departamento	Química Analítica y Aplicada
Dirigida por	Dr. Jordi Abellà Iglesias

DEDICATORIA

A mi país... que merece una mejor realidad...

A mi hija María José...

...si la UCA no investiga, estará siempre atada al carro de la dependencia científica y su saber sobre la realidad salvadoreña será siempre un saber dependiente, un saber prestado, un saber de segunda mano (P. Ignacio Martín Baró, 1976).

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso y la Virgen María que siempre se hacen presentes en mi vida para bendecirme.

A las instituciones que han financiado el desarrollo de esta investigación: El IQS, la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas y la Cátedra UNESCO.

Quiero agradecer sincera y profundamente al Director de este proyecto, el Dr. Jordi Abellà por su incondicional apoyo: Por estar siempre pendiente de mis avances y por su compromiso para que este trabajo culminara felizmente.

A las autoridades de la UCA: el P. Andreu Oliva y el Ing. Carlos Rivas, quienes creyeron en este proyecto e impulsaron su realización.

A los Doctores Rosa Nomen y Julià Sempere que desde hace más de diez años están comprometidos con el programa para América Latina y cuyo cariño y entusiasmo me ha inspirado a culminar mi proyecto particular.

A las empresas e instituciones que me abrieron las puertas para poder realizar este experimento: la UCA, la UTEC, la UDB, Fertica, Sherwin Williams y Salvanatura. Quiero agradecer personalmente al Ing. Luis Guzmán, a don Óscar Henríquez, al Ing. Juan Francisco Sifontes, a la Ing. Soraya de Quijada, al Ing. Leopoldo Gómez, a doña Marta Quezada, al Ing. Carlos Pacas y al Ing. Nelson Hércules, porque siempre estuvieron pendientes de mis láminas y del desarrollo del experimento.

A las personas que cordialmente me prestaron un lugarcito en sus propiedades para poder situar mis racks: Aracely Artiga, Ismael Sánchez, Josué y sus abuelitos, don Carlos Urías y don Dimas, Morena Cruz y don Moisés Rodríguez.

Al Ing. Óscar Chaverri Quirós de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, cuya colaboración espontánea y desinteresada fue un gran aporte para esta investigación.

A las personas de la Unidad de Gestión de Datos e Información del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales por su oportuna colaboración.

A los jóvenes cuyos trabajos de graduación han sido las bases de la investigación sobre Corrosión Atmosférica en El Salvador y quienes me ayudaron incondicionalmente para aprender sobre el tema: Kryssia Díaz, Roque Góchez, Zicri Montiel, Virginia Claros, Genaro Portillo, Christopher Arana, Manuel Guillén, Javier Hernández, Boris Espinal, Víctor Cordero, Wilson Espinal, Raphael Castro y Max Menjívar.

A Fernando Pineda y Josué Valdez, que estuvieron presentes en el desarrollo de este experimento, que siempre me apoyaron y que trabajaron dura e incondicionalmente junto a mí. A Eliseo Portillo, Samia Navarrete, Carlos Ayala y David Arévalo que colaboraron y se entusiasmaron con esta investigación.

A mis compañeros de la UCA: Mi actual jefa, Loli Rovira, cuyo entusiasmo y apoyo me motivó a no sucumbir en el camino; mi exjefe, el Dr. Francisco Chávez, que me dio la oportunidad de incorporarme a este programa y cuya gestión oportuna me permitió realizar este proyecto; Aracely, apoyo incondicional y compañera de triunfos y momentos difíciles; Frida, Claudia y Luis que siempre estuvieron ahí para escucharme y animarme a seguir; el Mr. Recinos, que siempre me apoyó con la entrega oportuna de reactivos y equipo y sobre todo porque siempre está pendiente de mis avances; el Inge. Sánchez, de quien he aprendido mucho y que siempre me animó a finalizar este documento; Arturo Escalante, quien compartió sus valiosos conocimientos sobre ArcMap e hizo mi maravilloso "Mapa de Corrosión"; Laura Orellana, quien tuvo a bien compartir sus conocimientos de estadística y me enseñó cómo hacer e interpretar los ANOVA; el Inge. Cañas y el Dr, Osegueda quienes me dieron muy buenos tips para el análisis de mis resultados.

A mi familia: Mi madre Ana María, mi prima Patricia y mis hermanos, por quererme e inspirarme a crecer. A mi compañero Christopher, por estar presente para apoyarme e impulsarme. A mis cuñadas Carla y Gracia María por su ayuda incondicional.

A la personita que llegó inesperadamente en medio de este proyecto, a quien amo con todo mi corazón: Mi adorada bebecita María José, por ser un sol brillante que me llena de luz y felicidad y por inspirarme a ser mejor cada día.

TÍTULO: CORROSIÓN DEL ACERO AL CARBONO Y DEL ALUMINIO EN DIFERENTES TIPOS DE ATMÓSFERAS DE EL SALVADOR.

RESUMEN: La presente tesis doctoral se enmarca dentro del Programa de Doctorado para América Latina de la Escuela de Ingeniería IQS, la Universidad Ramon Llull y la Cátedra UNESCO, el cual promueve la cooperación entre instituciones de educación superior para mejorar el nivel de los académicos de las universidades de Latinoamérica.

La investigación fue desarrollada en El Salvador, Centroamérica, y estudia el comportamiento de la corrosión atmosférica del acero al carbono y del aluminio en diferentes tipos de atmósferas (rural, urbana, industrial, marina y combinaciones de las mismas) con el fin de clasificarlas de acuerdo a su agresividad, de caracterizar los productos de corrosión obtenidos y construir el primer Mapa de Corrosión de El Salvador.

El experimento consistió en medir la pérdida de masa sufrida por probetas de acero de bajo carbono laminado en frío y de aluminio expuestas durante doce meses en catorce diferentes sitios de El Salvador. El daño ocasionado por la corrosión se representa por la masa o el grosor perdido durante la exposición y es expresada en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$, en mmy^{-1} y en μmy^{-1} . La velocidad de corrosión se midió cada tres meses con el fin de estudiar el comportamiento del fenómeno en el tiempo y el valor obtenido a doce meses en cada sitio, fue empleado para caracterizar qué tan agresivas son las atmósferas estudiadas y para construir el Mapa de Corrosión Atmosférica.

El óxido de hierro formado por la corrosión en una atmósfera rural, una atmósfera urbana y una atmósfera marina, fue analizado por difracción de rayos X para encontrar la estructura cristalina de los productos de corrosión y por la técnica de Microscopio Electrónico de Barrido para obtener el análisis elemental de los mismos.

PALABRAS CLAVE:

Corrosión Atmosférica

Acero al carbono

Aluminio

El Salvador

Mapa de Corrosión

TITLE: CARBON STEEL AND ALUMINUM CORROSION IN DIFFERENT TYPES OF ATMOSPHERES OF EL SALVADOR.

SUMMARY: This thesis is part of the Doctoral Program for Latin America of the IQS School of Engineering, Ramon Llull University and the UNESCO Chair, that promotes the inter-university cooperation to enhance institutional capacities in the Latin American Universities.

The investigation was developed in El Salvador, Central America, and studies the behavior of atmospheric corrosion of carbon steel and aluminum, in different types of atmospheres (rural, urban, industrial, marine and combination of these) in order to classify their corrosivity, to characterize the corrosion products and produce the first Atmospheric Corrosivity Map of El Salvador.

The experiment consisted of measuring the mass loss suffered by cold rolled low carbon steel and aluminum coupons exposed during twelve months in fourteen different sites of El Salvador. The corrosion damage is represented as the thickness or mass loss during exposure and it is expressed as corrosion rate in $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{y}^{-1}$, mmy^{-1} or μmy^{-1} . The corrosion rate was measured every three months in order to study the behavior of the phenomenon over the time; the rate value obtained at the twelfth month in each site, was used to characterize how aggressive are the studied atmospheres and to create the Atmospheric Corrosivity Map.

The iron oxide formed by corrosion in a rural, an urban and a marine environment, was analyzed by X-Ray Diffraction to find the crystal structure of the corrosion products and by Scanning Electron Microscope for the elemental analysis of such products.

KEYWORDS:

Atmospheric Corrosion

Carbon steel

Aluminum

El Salvador

Corrosivity Map

INDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición e Importancia de la Corrosión Atmosférica	4
1.2 Factores que Influyen en la Corrosión Atmosférica	5
1.2.1 Condiciones climatológicas	6
1.2.2 Composición y tipos de atmósferas.....	9
1.2.3 Naturaleza de los materiales expuestos	14
1.2.4 Tiempo de exposición de los materiales a la atmósfera	20
1.3 Medida de la corrosión atmosférica.....	20
1.3.1 Importancia de medir y monitorear la corrosión atmosférica.....	23
1.4 Mapas de Corrosión Atmosférica	24
1.4.1 Georreferenciación y herramientas SIG para la construcción de mapas de corrosión atmosférica.....	26
2.- ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN EL SALVADOR	27
2.1 Diseño Preliminar de un mapa de corrosión atmosférica en El Salvador.....	27
2.2 Diseño de una red de monitoreo de corrosión atmosférica en el Área Metropolitana de San Salvador.....	28
2.3. Evaluación del CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) como protección anticorrosiva del acero al carbono expuesto a la atmósfera del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)	30
2.4 Efecto de las emisiones vehiculares en el potencial de corrosión atmosférica del Área Metropolitana de San Salvador.....	31
2.5 Alcance del efecto de los vectores industriales y vehiculares en el potencial de corrosión atmosférica.....	32
3.- OBJETIVOS	33
3.1 Objetivo General.....	33
3.2 Objetivos específicos.....	33
4.- PARTE EXPERIMENTAL	35
4.1 Ubicación geográfica y condiciones climatológicas de El Salvador	35
4.2 Localización de las estaciones de ensayo para el monitoreo	41
4.3 Montaje del experimento de monitoreo	61
4.4 Preparación de los especímenes para el ensayo	66
4.5 Montaje de las láminas en los racks.....	69
4.6 Ubicación de los racks en los sitios de monitoreo	70

4.7 Retiro de los especímenes.....	70
4.8 Limpieza de los especímenes posterior a la exposición	71
4.9 Obtención de la Velocidad de Corrosión	81
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
5.1 Resultados del Acero al Carbono.....	85
5.1.1 Velocidades de corrosión en el AMSS (acero al carbono)	87
5.1.2 Velocidades de corrosión en atmósferas rurales o poco contaminadas fuera del AMSS (acero al carbono)	105
5.1.3 Velocidades de corrosión en atmósferas marinas (acero al carbono).....	110
5.1.4 Mapa de Corrosión Atmosférica de El Salvador en base al acero al carbono	115
5.1.5 Productos de corrosión del acero al carbono.....	115
5.2 Resultados del Aluminio.....	121
5.2.1 Velocidades de corrosión en el AMSS (aluminio)	125
5.2.2 Velocidades de corrosión en atmósferas rurales o poco contaminadas fuera del AMSS (aluminio)	129
5.2.3 Velocidades de corrosión en atmósferas marinas (aluminio)	131
5.3 Condiciones meteorológicas y de composición de la atmósfera de cada sitio de monitoreo.....	140
6.- CONCLUSIONES.....	143
BIBLIOGRAFÍA.....	145
Anexo I. Descripción de los Sitios de Monitoreo	157
Anexo II. Lavados Químicos del acero al carbono	177
Anexo III. Cálculo de velocidades de corrosión.....	193
Anexo IV. Condiciones climatológicas de los sitios de monitoreo	229

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tasa de deposición de dióxido de azufre de acuerdo al tipo de atmósfera..	14
Tabla 1.2 Productos de corrosión para aluminio, hierro, cobre y cinc	15
Tabla 1.3 Designación SAE para aceros al carbono	18
Tabla 1.4 Categorización de la agresividad de la atmósfera según la norma ISO 9223	23
Tabla 4.1 Zonificación climática de El Salvador	41
Tabla 4.2 Condiciones climatológicas monitoreadas en las estaciones meteorológicas del AMSS.....	45
Tabla 4.3 Clasificación del Flujo vehicular	48
Tabla 4.4 Sitios de monitoreo de corrosión atmosférica en El Salvador	60
Tabla 4.5 Composición de la lámina de acero al carbono empleada en la investigación*	62
Tabla 4.6 Composición de la lámina de aluminio empleada en la investigación*	63
Tabla 4.7 Datos de los ciclos de lavado químico de las láminas de acero al carbono .	77
Tabla 4.8 Datos obtenidos en los ciclos de lavado químico de los blancos.....	78
Tabla 5.1 Velocidades de corrosión del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	85
Tabla 5.2 Velocidades de corrosión del acero al carbono en mmy^{-1}	86
Tabla 5.3 Resultados de velocidad del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en el AMSS.....	92
Tabla 5.4 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono para la UCA, la UTEC, Soyapango y el Bulevar del Ejército.....	93
Tabla 5.5 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono para San Marcos y la UDB.....	94
Tabla 5.6 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono para la UCA, la UTEC, Soyapango, Bulevar del Ejército, San Marcos y la UDB.....	94
Tabla 5.7 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono en los siete sitios del AMSS	94
Tabla 5.8 Análisis de varianza (ANOVA) de los sitios del AMSS	96
Tabla 5.9 Comparaciones múltiples del análisis de varianza de los resultados del AMSS	97
Tabla 5.10 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a tres meses y su respectiva significancia	101

Tabla 5.11 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a seis meses y su respectiva significancia	103
Tabla 5.12 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a nueve meses y su respectiva significancia	103
Tabla 5.13 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a doce meses y su respectiva significancia	104
Tabla 5.14 Resultados de velocidad del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en Comasagua, Los Planes y Villanueva	107
Tabla 5.15 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono en Comasagua, Los Planes y Villanueva	107
Tabla 5.16 Análisis de varianza (ANOVA) de Comasagua, Los Planes y Villanueva	108
Tabla 5.17 Comparaciones múltiples del análisis de varianza de los resultados de Comasagua, Los Planes y Villanueva	109
Tabla 5.18 Resultados de velocidad del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en San Blas, Acajutla y La Puntilla	112
Tabla 5.19 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono en San Blas, Acajutla y La Puntilla	112
Tabla 5.20 Coeficiente de variación entre los resultados del acero al carbono para San Blas y Acajutla	112
Tabla 5.21 Análisis de varianza (ANOVA) de San Blas, Acajutla y La Puntilla	113
Tabla 5.22 Comparaciones múltiples del análisis de varianza de los resultados de San Blas, Acajutla y La Puntilla	113
Tabla 5.23 Resultados de DRX para la atmósfera urbana de la UCA	117
Tabla 5.24 Resultados de DRX para la atmósfera rural de Los Planes	117
Tabla 5.25 Resultados de DRX para la atmósfera rural de Los Planes	120
Tabla 5.26 Velocidades de corrosión del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	121
Tabla 5.27 Velocidades de corrosión del aluminio en $\mu\text{m.y}^{-1}$	122
Tabla 5.28 Resultados de velocidad del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en el AMSS	128
Tabla 5.29 Coeficientes de variación entre los resultados del aluminio en los siete sitios del AMSS	128
Tabla 5.30 Resultados de velocidad del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en Los Planes, Villanueva y Comasagua	131
Tabla 5.31 Coeficientes de variación entre los resultados del aluminio de Comasagua, Los Planes y Villanueva	131

Tabla 5.32 Resultados de velocidad del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en.....	134
Tabla 5.33 Coeficientes de variación entre los resultados del aluminio de Acajutla, San Blas, La Puntilla	134
Tabla 5.34 Resultados de cada sitio y descripción del aspecto de las láminas después de la exposición	136
Tabla 5.35 Valor nominal asignado al aspecto de las láminas de aluminio después de la exposición.....	138
Tabla 5.36 Valor nominal del aspecto de las láminas de aluminio de cada sitio.....	138
Tabla 5.37 Velocidad de corrosión de las atmósferas del AMSS y las condiciones de cada sitio	141
Tabla 5.38 Velocidad de corrosión de las atmósferas rurales o poco contaminadas y las condiciones de cada sitio	142
Tabla 5.39 Velocidad de corrosión de las atmósferas marinas y las condiciones de cada sitio	142
Tabla I.1 Tipos de atmósferas monitoreadas	157
Tabla I.2 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 1 (Santa Tecla).....	159
Tabla I.3 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 2 (Bicentenario).....	161
Tabla I.4 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 3 (UCA).....	162
Tabla I.5 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 4 (UTE).....	164
Tabla I.6 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 5 (San Marcos).....	165
Tabla I.7 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 6 (UDB).....	166
Tabla I.8 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 7 (Soyapango)	167
Tabla I.9 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 8 (Bulevar del Ejército)	168
Tabla I.10 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 9 (Comasagua)	170
Tabla I.11 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 10 (Los Planes)	172
Tabla I.12 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 11 (Villanueva).....	173
Tabla I.13 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 11 (Villanueva).....	174
Tabla I.14 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 13 (San Blas).....	175
Tabla I.15 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 14 (La Puntilla)	176
Tabla II.1 Datos de pérdida de masa de las láminas de acero al carbono durante el lavado químico (Santa Tecla)	177

Tabla II.2 Diferencia de masa entre cada lavado químico en las láminas de Santa Tecla expuestas durante tres meses	178
Tabla III. 1 Valores críticos para el cociente de rechazo Q.....	195
Tabla III.2 Resultados del acero al carbono en Santa Tecla (valor promedio y coeficiente de variación)	196
Tabla III.3 Resultados del acero al carbono en Santa Tecla para tres, seis y nueve meses (mediana y desviación estándar)	197
Tabla III.4 Resultados del acero al carbono en la UCA (valor promedio y coeficiente de variación)	198
Tabla III.5 Resultados del acero al carbono en la UTEC (valor promedio y coeficiente de variación)	198
Tabla III.6 Resultados del acero al carbono en San Marcos (valor promedio y coeficiente de variación)	199
Tabla III.7 Resultados del acero al carbono en la UDB (valor promedio y coeficiente de variación)	199
Tabla III.8 Resultados del acero al carbono en la UDB a tres meses (mediana y desviación estándar).....	200
Tabla III.9 Resultados del acero al carbono en Soyapango (valor promedio y coeficiente de variación)	201
Tabla III.10 Resultados del acero al carbono en el Bulevar del Ejército (valor promedio y coeficiente de variación)	201
Tabla III.11 Resultados del acero al carbono en Comasagua (valor promedio y coeficiente de variación)	202
Tabla III.12 Resultados del acero al carbono en Los Planes (valor promedio y coeficiente de variación)	202
Tabla III.13 Resultados del acero al carbono en Villanueva (valor promedio y coeficiente de variación)	203
Tabla III.14 Resultados del acero al carbono en Acajutla (valor promedio y coeficiente de variación)	204
Tabla III.15 Resultados del acero al carbono en San Blas (valor promedio y coeficiente de variación)	204
Tabla III.16 Resultados del acero al carbono La Puntilla (valor promedio y coeficiente de variación)	205
Tabla III.17 Resultados del aluminio en Santa Tecla antes de la prueba de Q.....	206

Tabla III.18 Resultados del aluminio en Santa Tecla después de la prueba de Q	207
Tabla III.19 Resultados del aluminio en la UCA antes de la prueba de Q	208
Tabla III.20 Resultados del aluminio en la UCA después de la prueba de Q.....	209
Tabla III.21 Resultados del aluminio en la UTEC antes de la prueba de Q	209
Tabla III.22 Resultados del aluminio en la UTEC después de la prueba de Q	211
Tabla III.23 Resultados del aluminio en San Marcos antes de la prueba de Q.....	211
Tabla III.24 Resultados del aluminio en San Marcos después de la prueba de Q	213
Tabla III.25 Resultados del aluminio en la UDB antes de la prueba de Q	213
Tabla III.26 Resultados del aluminio en la UDB después de la prueba de Q.....	215
Tabla III.27 Resultados del aluminio en Soyapango antes de la prueba de Q.....	215
Tabla III.28 Resultados del aluminio en Soyapango después de la prueba de Q.....	217
Tabla III.29 Resultados del aluminio en el Bulevar del Ejército antes de la prueba de Q	217
Tabla III.30 Resultados del aluminio en Bulevar del Ejército después de la prueba de Q	219
Tabla III.31 Resultados del aluminio en Comasagua antes de la prueba de Q.....	219
Tabla III.32 Resultados del aluminio en Comasagua después de la prueba de Q.....	220
Tabla III.33 Resultados del aluminio en Los Planes antes de la prueba de Q	221
Tabla III.34 Resultados del aluminio en Los Planes después de la prueba de Q	222
Tabla III.35 Resultados del aluminio en Villanueva antes de la prueba de Q	223
Tabla III.36 Resultados del aluminio en Villanueva después de la prueba de Q.....	224
Tabla III.37 Resultados del aluminio en Acajutla antes de la prueba de Q	225
Tabla III.38 Resultados del aluminio en Acajutla después de la prueba de Q	225
Tabla III.39 Resultados del aluminio en San Blas antes de la prueba de Q	226
Tabla III.40 Resultados del aluminio en San Blas después de la prueba de Q.....	227
Tabla III.41 Resultados del aluminio en La Puntilla antes de la prueba de Q	227
Tabla IV.1 Datos de la estación de Procafé	229
Tabla IV.2 Datos de la estación de Ilopango	231
Tabla IV.3 Datos de la estación de Acajutla	233
Tabla IV.4 Datos de la estación UCA.....	235
Tabla IV.5 Valores de temperatura para cada sitio de monitoreo	238
Tabla IV.6 Valores de humedad relativa y lluvia acumulada para cada sitio de monitoreo.....	238
Tabla IV.7 Valores de velocidad del viento en cada sitio de monitoreo	239

Tabla IV.8 Sitios de monitoreo con datos de flujo vehicular	240
Tabla IV.9 Distancia a la costa de cada sitio de monitoreo	241
Tabla IV.10 Tipo de cobertura vegetal en cada sitio	242

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Corrosión atmosférica del hierro	4
Figura 1.2 Contenidos de carbono en los aceros al carbono.....	17
Figura 1.3 Clasificación de la agresividad de las atmósferas de acuerdo a las Normas ISO y ASTM.....	22
Figura 1.4 Mapa de corrosión atmosférica para la zona metropolitana de la Ciudad de México	24
Figura 1.5 Mapa de corrosión de Argentina	25
Figura 4.1 Ubicación geográfica de la República de El Salvador	35
Figura 4.2 Mapa de altitudes de El Salvador.....	37
Figura 4.3 Temperaturas históricas normales anuales en El Salvador, período 1961-1990	38
Figura 4.4 Cantidades históricas anuales de lluvia en milímetros en El Salvador, periodo 1961-1990.....	39
Figura 4.5 Lluvia registrada en El Salvador de 2000 a 2005	39
Figura 4.6 Promedio mensual de humedad relativa en El Salvador	40
Figura 4.7 Ubicación del Área Metropolitana de San Salvador dentro de El Salvador.	42
Figura 4.8 División administrativa del AMSS y número de habitantes por municipio...	43
Figura 4.9 Topografía del Área Metropolitana de San Salvador.....	44
Figura 4.10 Estaciones meteorológicas de la Red automática de la DGOA en el AMSS y estación UCA.....	44
Figura 4.11 Territorio urbano y rural del Área Metropolitana de San Salvador	46
Figura 4.12 Principales zonas industriales del AMSS	47
Figura 4.13 Áreas identificadas como las de mayor contaminación en el AMSS.....	50
Figura 4.14 Red de Monitoreo de Calidad del Aire, REDCA, en diciembre 2009	51
Figura 4.15 Promedios anuales de PM 2.5	52
Figura 4.16 Sitios inicialmente propuestos para realizar el monitoreo de corrosión atmosférica en el AMSS	53
Figura 4.17 Localización de los sitios de monitoreo del Área Metropolitana de San Salvador	54
Figura 4.18 Sitios para realizar el monitoreo de la corrosión en atmósferas rurales o poco contaminadas en las afueras del AMSS: Comasagua, San José Villanueva y Los Planes de Renderos	55

Figura 4.19 Estaciones meteorológicas cercanas a Comasagua, San José Villanueva y Los Planes de Renderos.....	56
Figura 4.20 Línea de Costa de El Salvador.....	57
Figura 4.21 Sitios para realizar el monitoreo de la corrosión en atmósferas marinas: Puerto de Acajutla, Complejo residencial San Blas, Playa La Puntilla.	59
Figura 4.22 Estaciones meteorológicas cercanas a Acajutla, San Blas y La Puntilla ..	59
Figura 4.23 Sitios de monitoreo de la Corrosión Atmosférica en El Salvador.....	60
Figura 4.24 Dimensiones del panel para sujetar los especímenes.....	65
Figura 4.25 Dimensiones de la base de madera para sujetar el panel.....	65
Figura 4.26 Rack de monitoreo montado.....	66
Figura 4.27 Identificación de las láminas en los racks.....	68
Figura 4.28 Balanza Analítica Digital empleada en la investigación.....	69
Figura 4.29 Deslizadores con cabeza de plástico y piezas de poliuretano.....	69
Figura 4.30 Disposición de las láminas en los racks.....	69
Figura 4.31 Racks siendo sujetos y asegurados en los sitios de monitoreo.....	70
Figura 4.32 Retiro de las láminas.....	71
Figura 4.33 Orden en que fueron retiradas las láminas durante el monitoreo.....	71
Figura 4.34 Lámina antes y después de ser sometida a limpieza mecánica (pulido) ..	72
Figura 4.35 Vista de los productos de corrosión antes y después del lavado químico	75
Figura 4.36 Ciclos de limpieza química versus pérdida de masa sufrida por los especímenes.....	78
Figura 4.37 Comparación de lámina de aluminio sin exponer y láminas de aluminio expuestas a atmósfera marina durante tres, seis, nueve y doce meses respectivamente.....	80
Figura 4.38 Dimensiones de las láminas y áreas no expuestas al ambiente.....	82
Figura 5.1 Velocidades de corrosión del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	88
Figura 5.2 Comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en los siete sitios del AMSS.....	90
Figura 5.3 Velocidades de corrosión del acero al carbono (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) del AMSS ordenadas descendientemente.....	91
Figura 5.4 Relación entre los resultados de la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército a tres meses.....	102
Figura 5.5 Relación entre los resultados de la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército a seis meses.....	103

Figura 5.6 Relación entre los resultados de la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército a nueve meses	104
Figura 5.7 Relación entre los resultados de UTEC, Soyapango y el Bulevar del Ejército a doce meses	104
Figura 5.8 Comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en las atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS	105
Figura 5.9 Velocidades de corrosión del acero al carbono (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS ordenadas descendientemente	106
Figura 5.10 Comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en las atmósferas marinas	110
Figura 5.11 Velocidades de corrosión del acero al carbono (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas marinas ordenadas descendientemente.....	111
Figura 5.12 Mapa de Corrosión Atmosférica de El Salvador en base a los resultados en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ del acero al carbono	116
Figura 5.13 Micrografías y análisis elemental del óxido obtenido en la UCA.....	118
Figura 5.14 Micrografías y análisis elemental del óxido obtenido en Los Planes	119
Figura 5.15 Micrografías y análisis elemental del óxido obtenido en San Blas.....	121
Figura 5.16 Velocidades de corrosión del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	124
Figura 5.17 Comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en los sitios del AMSS	126
Figura 5.18 Velocidades de corrosión del aluminio (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) del AMSS ordenadas descendientemente.....	127
Figura 5.19 Comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS.....	129
Figura 5.20 Velocidades de corrosión del aluminio (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS ordenadas descendientemente.....	130
Figura 5.21 Comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en atmósferas marinas.....	132
Figura 5.22 Velocidades de corrosión del aluminio (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas marinas ordenadas descendientemente	133
Figura 5.23 Mapa de Corrosión Atmosférica de El Salvador en base a los resultados en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ del aluminio	135
Figura 5.24 Aspecto de una lámina sin exponer y de una lámina del Bulevar del Ejército expuesta durante 12 meses.....	139

Figura 5.25 Aspecto de las láminas expuestas durante doce meses a las atmósferas marinas: La Puntilla, Acajutla y San Blas	139
Figura 5.26 Aspecto de las láminas de aluminio después de la exposición vs velocidad de corrosión.....	140
Figura I.1 Sitios de monitoreo de corrosión atmosférica en El Salvador.....	157
Figura I.2 Vías con mayor flujo vehicular en Santa Tecla.....	158
Figura I.3 Rack de monitoreo, ubicación del Sitio (1) Santa Tecla y de la estación Procafé	159
Figura I. 4 Ubicación del Sitio (2) Parque del Bicentenario, de la estación UCA y foto del rack de monitoreo	160
Figura I. 5 Ubicación de la UCA en el Área Metropolitana de San Salvador y detalle del Campus	161
Figura I.6 Imagen satelital y fotografía del sitio (3) UCA	162
Figura I.7 Detalles de la ubicación de la UTEC en el AMSS y del Sitio (4) de monitoreo	163
Figura I.8 Rack de monitoreo ubicado en la UTEC	164
Figura I.9 Ubicación de San Marcos en el AMSS y ubicación del Sitio (5)	165
Figura I.10 Ubicación de la UDB en el AMSS y detalles del Sitio (6).....	166
Figura I.11 Ubicación de Soyapango en el AMSS y del sitio (7).....	167
Figura I. 12 Ubicación del sitio (8) en el AMSS y de la estación meteorológica de Ilopango.....	168
Figura I.13 Racks de monitoreo en el Sitio (8) Bulevar del Ejército.....	169
Figura I.14 Ubicación del Sitio (9) Comasagua y de la estación meteorológica Procafé	169
Figura I.15 Detalles de la ubicación del Sitio (9) Comasagua y foto del rack de monitoreo.....	170
Figura I.16 Detalles de la ubicación del sitio 10 (Los Planes) y rack de monitoreo....	171
Figura I.17 Detalles de la ubicación del sitio 11 (Villanueva).....	172
Figura I.18 Ubicación del Sitio 12 (Acajutla).....	173
Figura I.19 Rack de monitoreo ubicado en el Sitio 12 (Acajutla)	174
Figura I. 20 Ubicación del Sitio 13 (San Blas)	174
Figura I.21 Detalle de la ubicación del Sitio 13 (San Blas) y de las estaciones meteorológicas	175
Figura I.22 Rack de monitoreo en San Blas.....	175

Figura I.23 Ubicación del Sitio 14 (La Puntilla).....	176
Figura II.1 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Santa Tecla durante tres meses	178
Figura II.2 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Santa Tecla durante seis meses.....	179
Figura II.3 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UCA durante tres meses.....	180
Figura II.4 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UCA durante seis meses	180
Figura II.5 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UTEC durante tres meses.....	181
Figura II.6 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UTEC durante seis meses	181
Figura II.7 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Marcos durante tres meses	182
Figura II.8 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Marcos durante seis meses.....	182
Figura II.9 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UDB durante tres meses.....	183
Figura II.10 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UDB durante seis meses	183
Figura II.11 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Soyapango durante tres meses	184
Figura II.12 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Soyapango durante seis meses.....	184
Figura II.13 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en el Bulevar del Ejército durante tres meses.....	185
Figura II.14 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en el Bulevar del Ejército durante seis meses.....	185
Figura II.15 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Comasagua durante tres meses	186
Figura II.16 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Comasagua durante seis meses.....	186

Figura II.17 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Los Planes durante tres meses.....	187
Figura II.18 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Los Planes durante seis meses	187
Figura II.19 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Villanueva durante tres meses.....	188
Figura II.20 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Villanueva durante seis meses	188
Figura II.21 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Acajutla durante tres meses	189
Figura II.22 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Acajutla durante seis meses	189
Figura II.23 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Blas durante tres meses	190
Figura II.24 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Blas durante seis meses.....	190
Figura II.25 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en La Puntilla durante tres meses.....	191
Figura II.26 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en La Puntilla durante seis meses	191

SIGLAS

ACS: American Chemical Society

AMSS: Área Metropolitana de San Salvador

ANOVA: Analysis of Variance (Análisis de Varianza)

ASTM: American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para el Análisis de Materiales)

COAMSS: Consejo de Alcaldes del Área Metropolitana de San Salvador

DIGESTYC: Dirección General de Estadística y Censos

DGOA: Dirección General del Observatorio Ambiental

ISO: International Organization for Standardization (Organismo Internacional de Normalización)

MARN: Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales

MICAT: Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica

OPAMSS: Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador

PM₁₀: Partículas menores a 10 micras

PM_{2.5}: Partículas menores a 2.5 micras

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

PTS: Partículas Suspendidas Totales

REDCA: Red de Monitoreo de Calidad del Aire

SAE: Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices)

SIG: Sistemas de Información Geográfica

TOW: Time of wetness (Tiempo de humectación)

UCA: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas

UDB: Universidad Don Bosco

UTEC: Universidad Tecnológica de El Salvador

VMT: Viceministerio de Transporte

1.- INTRODUCCIÓN

La corrosión se define como el desgaste sufrido por los materiales debido a su interacción con el medio que les rodea, provocando el deterioro de sus propiedades. La corrosión no puede evitarse, por tratarse de un fenómeno termodinámicamente espontáneo, pero puede intervenir sobre dicho fenómeno para lograr que ocurra a una menor velocidad, alargando la vida útil de los materiales.

Cualquier material es susceptible de corroerse al estar expuesto a la acción de un medio agresivo, aunque generalmente, cuando se habla de corrosión, el término es atribuido al daño sufrido por metales. Cuando el desgaste se debe a la interacción del material metálico con la atmósfera, el fenómeno es conocido como “corrosión atmosférica”; los componentes de la atmósfera que tienen mayor influencia en la corrosión de los metales son: La humedad y los gases y partículas que generan películas ácidas sobre la superficie metálica, principalmente dióxido de azufre y cloruros.

Cuando un metal se corroe, ocurre la pérdida del mismo; en general, las pérdidas ocasionadas por la corrosión atmosférica son cuantiosas y no están únicamente referidas a costos directos como reposición de materiales y mantenimiento preventivo y correctivo, sino también costos medio ambientales como aumento de la explotación minera, gasto energético y generación de mayor cantidad de desechos para tratar y disponer o costos indirectos como interrupciones en la producción, pérdida y contaminación de productos, sobredimensionamiento de estructuras o los ocasionados por daños y accidentes.

La corrosión atmosférica ocasiona millones de dólares en pérdidas cada año y son los países desarrollados los que realizan la mayor parte de investigaciones sobre el fenómeno, lo cual les permite realizar estimaciones de los costos directos e indirectos ocasionados por el desgaste de los materiales y obtener herramientas que les orientan a tomar decisiones más acertadas en la reducción de los costos por corrosión, las cuales van dirigidas a lograr que el fenómeno ocurra más lentamente, tales como seleccionar adecuadamente los materiales a emplear, elegir protecciones idóneas para las estructuras expuestas a la atmósfera y decidir la frecuencia óptima de los mantenimientos.

Las investigaciones sobre corrosión atmosférica realizadas a lo largo del tiempo, han ido orientadas tanto a estudiar y comprender los mecanismos del fenómeno, a evaluar el comportamiento de los materiales y protecciones empleadas y a la obtención de información de referencia de qué tan agresivo es un ambiente determinado.

La agresividad de un ambiente o atmósfera puede ser estimada directamente, encontrando la velocidad con la que un metal determinado se desgasta al estar expuesto durante un tiempo dado a la atmósfera en estudio o indirectamente a través de la medida de determinados parámetros climatológicos y contaminantes presentes. La información obtenida puede ser representada cartográficamente en un “mapa de corrosión” que se construye monitoreando los mencionados parámetros a través de una serie de estaciones distribuidas representativamente en el área de interés.

La construcción de un mapa de corrosión que abarque todo un país, generalmente es un proyecto poco viable, por la cantidad de recursos que demanda, por lo que en la mayoría de los casos se ha optado, ya sea por realizar el estudio en zonas que tengan relevancia y sean factibles de acceder o por realizar las medidas en lugares representativos de “tipos de atmósferas” (rural, urbana, industrial y marina) y luego extrapolar los datos a todo el país.

Muchos son los países que han tomado la iniciativa de crear mapas de corrosión para evaluar la agresividad característica de su atmósfera; por ejemplo, en la región centroamericana, Costa Rica y Panamá son los países que han realizado algunos esfuerzos por construir mapas de corrosión, mientras que en otras regiones de Iberoamérica se tiene mapas de corrosión de regiones de México, Cuba, Chile, España, Argentina, entre otros.

En El Salvador, el tema de corrosión atmosférica se ha abordado de manera reactiva más que preventiva, por lo que existen pocos estudios que proporcionen información acerca del comportamiento del mencionado fenómeno, ya que hasta cierto punto, se desconoce la verdadera importancia de este tema, se ignoran los costos económicos y ambientales provocados por la corrosión en el país y no se tiene suficientes datos que permitan conocer el comportamiento de los materiales ante el ambiente de El Salvador, por lo que difícilmente pueden tomarse medidas preventivas adecuadas para reducir el impacto ocasionado.

En ese sentido, la presente investigación se plantea el estudio de la corrosión atmosférica del acero al carbono y aluminio en El Salvador, con el fin de evaluar la agresividad de los tipos particulares de las atmósferas del país, caracterizar los productos de corrosión obtenidos y construir el primer mapa de corrosión representativo del territorio nacional.

La investigación se llevó a cabo tomando medidas directas del desgaste sufrido por probetas de acero de bajo carbono laminado en frío y de aluminio durante doce meses de exposición en catorce puntos de monitoreo en atmósferas rurales, urbanas industriales y marinas de El Salvador, siguiendo metodologías basadas en las Normas ASTM e ISO.

En los siguientes apartados, se documenta la investigación “Corrosión atmosférica del acero al carbono y del aluminio en El Salvador”. En el primer apartado se aborda brevemente el fundamento teórico sobre el cual se basó la investigación, el cual incluye, la definición e importancia de la corrosión atmosférica y los factores que influyen en este fenómeno, la descripción de la forma en que generalmente se mide la corrosión atmosférica y como esta información puede ser plasmada en un mapa de corrosión.

En el segundo apartado, se comenta algunos de los estudios sobre corrosión atmosférica realizados en El Salvador desde 2010 en la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas y que han sentado las bases para el desarrollo de la presente investigación.

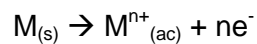
En la tercera sección del documento se plasman los objetivos del estudio; en la cuarta parte se describe detalladamente la parte experimental de la investigación, incluyendo cómo se llevó a cabo el monitoreo de la corrosión atmosférica, la ubicación geográfica y condiciones climatológicas del territorio salvadoreño, la localización de las estaciones del ensayo, el montaje del experimento, como se llevó a cabo el retiro de los especímenes y finalmente se muestra los datos y resultados del experimento.

En la quinta parte del documento se presenta el análisis estadístico de los resultados y el mapa de corrosión construido a partir de los mismos; finalmente, se presenta las conclusiones derivadas de la investigación.

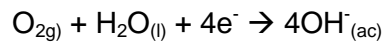
1.1 Definición e Importancia de la Corrosión Atmosférica

La corrosión atmosférica se define como el desgaste que sufren los materiales expuestos al aire y sus contaminantes; es un fenómeno de naturaleza electroquímica, en cuyo proceso anódico el metal se disuelve (oxida) en la capa de humedad formada sobre su superficie, mientras que el proceso catódico viene dado casi siempre por la reducción del oxígeno atmosférico.

La reacción general de oxidación del metal que se corroe se representa como sigue:



Mientras que la reacción de reducción del oxígeno atmosférico en presencia de humedad se representa con la siguiente ecuación:



La corrosión atmosférica inicia cuando se alcanza cierta humedad relativa en la superficie del metal, formándose una delgada película de electrolito y la corrosión procede como una reacción de oxidación-reducción; en la Figura 1.1 se representa la corrosión atmosférica del hierro.

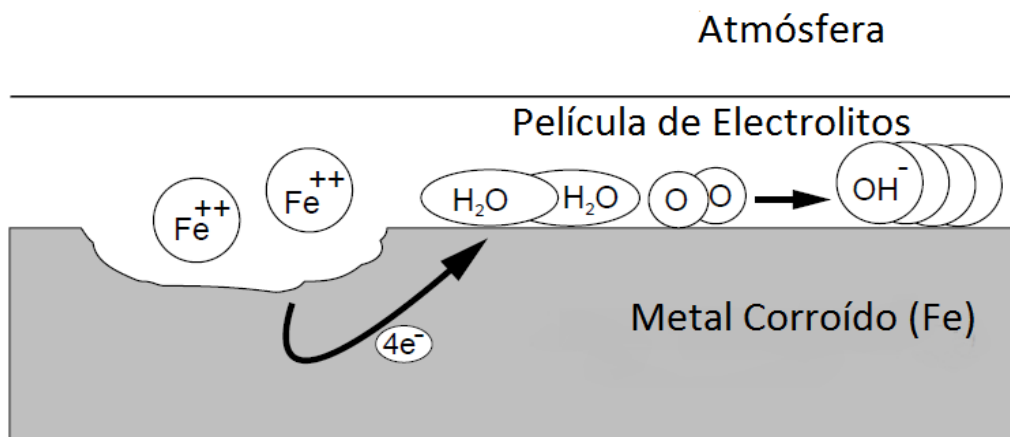


Figura 1.1 Corrosión atmosférica del hierro
(Roberge 2000)

La corrosión es un fenómeno que no puede evitarse, ya que ocurre espontáneamente debido a la tendencia natural que tienen la mayoría de los metales para regresar a su estado oxidado original al ser expuestos a la acción de una sustancia oxidante; en cambio, sí puede influirse sobre la velocidad con que ocurre la corrosión.

De forma natural, la velocidad se ve afectada con la formación de los productos de corrosión, ya sea que ocurra con mayor rapidez, debido a la solubilidad de los mismos en el electrolito o porque formen una película protectora en la superficie del metal que haga que el fenómeno ocurra muy lentamente; la formación de la mencionada película protectora se conoce como “pasivación”.

De todos los procesos de corrosión, el ocasionado por la exposición a la atmósfera es el más visible, ya que produce más pérdidas en términos económicos, puesto que aproximadamente un 80% de las estructuras metálicas están expuestas a la acción agresiva de la atmósfera, siendo esta última la responsable de más de la mitad de las pérdidas ocasionadas por la corrosión. En los Estados Unidos, la mitad de los gastos destinados a la protección de las estructuras se usa en la lucha contra la corrosión atmosférica (J. González Fernández 1989).

Para evaluar los daños ocasionados por la corrosión atmosférica los ensayos más confiables son los realizados directamente en los ambientes que se quiere estudiar, con el fin de valorar *in situ* qué tan agresiva es una atmósfera, con la acción conjunta de todos los factores que intervienen en el proceso de corrosión.

Las principales limitantes de los ensayos de corrosión atmosférica es que requieren tiempos de al menos un año para la obtención de resultados confiables y dado que la composición de la atmósfera varía en función de la evolución industrial y demográfica del territorio, los resultados no tienen validez permanente, siendo más conveniente caracterizar “el tipo” de atmósfera y no el punto geográfico donde se lleva a cabo el ensayo.

1.2 Factores que Influyen en la Corrosión Atmosférica

La agresividad de una atmósfera sobre los materiales expuestos a la misma, está influenciada por la acción conjunta de factores como las condiciones climatológicas, la composición y los tipos de atmósferas, la naturaleza de los materiales y el tiempo que estos últimos se hallen expuestos a la acción corrosiva del ambiente. Los mencionados factores y su influencia en la corrosión atmosférica son detallados en las siguientes secciones.

1.2.1 Condiciones climatológicas

El clima es el conjunto de condiciones atmosféricas propias de una región. Algunos de los elementos que permiten clasificar el clima de una determinada zona geográfica son: La temperatura ambiente, el régimen de lluvias, la velocidad y dirección del viento y la radiación solar.

Atmospheric Corrosion of Copper in Ibero-America

Los parámetros climáticos que más influyen en la corrosión atmosférica son: la humedad relativa, la temperatura ambiente, el régimen de lluvias y la dirección y velocidad del viento (Mariaca Rodríguez, y otros 1999) de la forma en que son descritos a continuación:

Humedad relativa, tiempo de humectación y temperatura ambiente

Debido a que la corrosión es un fenómeno electroquímico, esta se producirá siempre que se tenga una “capa de electrolito” sobre la superficie de un material; dicha capa proviene ya sea por precipitación atmosférica o por adsorción de moléculas de agua en la superficie del metal aunadas a las sales disueltas en la atmósfera. Cuanto mayor es el tiempo de permanencia de la película húmeda sobre el metal, mayor es el efecto corrosivo producido.

La humedad relativa es considerada la variable meteorológica de mayor incidencia sobre el potencial agresivo de las atmósferas y puede ser analizada a través del “*tiempo de humectación*” (TOW por su significado en inglés *time of wetness*), el cual se define como el período durante el cual la superficie de un material está cubierta por una película de agua que hace posible la corrosión atmosférica y se calcula como el número de horas al año en que la humedad relativa es superior a 80 % para temperaturas ambientales superiores a 0°C (ISO 9223 1992).

También debe tenerse en cuenta que para cada metal se tiene una “humedad crítica” (Revie y Uhlig 1971) es decir, aquella humedad relativa por encima de la cual la tasa de corrosión aumenta bruscamente; este parámetro no es constante y depende de la tendencia del metal, sus productos de corrosión y otras sustancias adheridas a la superficie para absorber humedad en presencia de contaminantes atmosféricos. Por ejemplo, la humedad crítica del hierro es 60 % en una atmósfera libre de dióxido de azufre (Roberge 2000).

En cuanto a la temperatura del ambiente, su incidencia en la velocidad de corrosión es compleja y sus efectos no son aislados, ya que de manera general, puede decirse que un aumento de la temperatura tiende a estimular el ataque corrosivo en un metal, debido al aumento de la velocidad de las reacciones electroquímicas y procesos de difusión del oxígeno u otros gases corrosivos, por lo tanto, para una humedad constante, un aumento de la temperatura provocaría una mayor velocidad de corrosión.

Por otro lado, un incremento en la temperatura implica evaporación de la película de agua, provocando ausencia de electrolito en la superficie del metal y haciendo que disminuya la concentración de oxígeno y otros gases disueltos, por lo que la tasa de corrosión disminuye; mientras que si la humedad relativa es elevada y la temperatura de la superficie del metal es inferior a la del ambiente, se condensa vapor de agua contenido en el aire sobre la superficie del espécimen, favoreciendo la corrosión del metal al aumentar su humectación (Roberge 2000).

De lo anterior se infiere que la incidencia de la temperatura y la humedad sobre la velocidad de corrosión atmosférica es de naturaleza compleja, por lo que el efecto de ambos factores dependerá de las condiciones particulares del ambiente de estudio.

Régimen de lluvias

Durante la época lluviosa, la humedad relativa del ambiente supera el 80 % y la superficie de los metales expuestos se mantiene cubierta por una película visible de agua, acelerando el proceso corrosivo. Puede ser que la lluvia elimine los contaminantes presentes en la superficie del metal, por lo que la tasa de corrosión tendería a disminuir, mientras que otras fuentes de humedad como la niebla o rocío que no tienen la capacidad de lavar la superficie metálica podrían incluso intensificar el proceso corrosivo; este comportamiento ocurrirá siempre y cuando en ambos casos se trate de un mismo *tiempo de humectación*, ya que difícilmente unas pocas horas diarias de rocío tendrán mayor efecto que un día lluvioso (Mariaca Rodríguez, y otros 1999)

Dirección y velocidad del viento

El viento está caracterizado por su dirección y velocidad. El viento sopla con mayor frecuencia desde una dirección, por lo tanto, esa dirección más frecuente o

predominante es la que se denomina como dirección del viento. Particularmente al estudiar el potencial de corrosión atmosférica es importante considerar la dirección del viento, ya que éste arrastra los contaminantes atmosféricos hacia una dirección específica, por lo tanto al diseñar un experimento que analice el efecto de corrosión se debe evaluar hacia donde sopla el viento predominantemente, ya que se esperaría obtener un mayor valor de corrosión en las zonas hacia donde el viento va dirigido.

La velocidad del viento influye en la velocidad con la cual avanza el proceso corrosivo, debido a que a mayores velocidades, se transporta mayor cantidad de sustancias promotoras de la corrosión, como sales o gases ácidos (J. González Fernández 1984).

En los ensayos de corrosión se ha encontrado que las mayores tasas de corrosión se localizan sobre las superficies expuestas verticalmente de cara al viento, en tanto que las probetas montadas con una inclinación de 45° respecto a la horizontal no revelan ninguna diferencia significativa entre la corrosión de la cara que mira hacia arriba (cara superior) y la que mira hacia tierra (cara inferior) (Mariaca Rodríguez, y otros 1999).

Clasificación climática

Como se ha visto, el clima de la región influye en el proceso corrosivo que sufren los metales expuestos al ambiente. Teniendo en cuenta factores como la temperatura ambiente y el régimen de precipitaciones, es posible clasificar las zonas geográficas de acuerdo a su clima; el esquema de clasificación climática mayormente utilizado es el de Köppen que reconoce a la vegetación nativa como la mejor expresión del clima de la región, indicando que el crecimiento de la planta no sólo está influenciado por la cantidad de lluvia, sino por la intensidad de la evaporación y transpiración que origina la pérdida de humedad en la superficie de la vegetación.

La clasificación de Köppen identifica los tipos de clima por letras: pudiendo ser una, dos o tres; la primera letra es mayúscula (A, B, C, D, E, H) y representa un grupo climático, la segunda es una letra minúscula (f, s, w, m, x) que representa la distribución estacional de las precipitaciones y la tercera, otra letra minúscula (a, b, c, d, h, k) que simboliza los regímenes de temperatura (Inzunza 2002).

Los grupos climáticos designados por la letra mayúscula son:

-
- A: Clima tropical lluvioso
 - B: Clima seco
 - C: Clima templado lluvioso
 - D: Clima de invierno
 - E: Clima polar
 - H: Clima de alta montaña

La distribución estacional de las precipitaciones se clasifica de la siguiente forma:

- f: Clima lluvioso todo el año con ausencia de período seco
- s: Estación seca en verano
- w: Estación seca en invierno
- m: Precipitación de tipo monzónico
- x: Lluvia escasa todo el año

El régimen de temperaturas designado por esta clasificación es:

- a: La temperatura media del mes más cálido es mayor a 22°C
- b: La temperatura media del mes más cálido es inferior a 22° C, pero con temperaturas medias de al menos cuatro meses superiores a 10° C
- c: Menos de cuatro meses con temperatura media superior a 10° C
- d: El mes más frío está por debajo de -38° C
- h: La temperatura media anual es superior a 18° C
- k: La temperatura media anual es inferior a 18° C

De la combinación de estas condiciones surge la clasificación de las diferentes zonas climáticas del mundo, tales como Af (Ecuatorial), Aw (Tropical), Am (Monzónico), Bsh (Etapas cálidas) Bsk (Etapas frías), entre otros (Inzunza 2002).

1.2.2 Composición y tipos de atmósferas

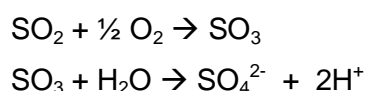
Algunas de las sustancias presentes en la atmósfera son agentes oxidantes o son donantes de aniones para los metales expuestos, con lo que tienen un efecto agresivo sobre los mismos. Las actividades antropogénicas que se llevan a cabo en un determinado territorio, las características propias de la región y la composición del aire, han sido la base para caracterizar las atmósferas como rurales, urbanas, industriales y marinas. La severidad del ataque atmosférico varía de un sitio a otro, de acuerdo a la composición y tipo de atmósfera, tal como se detalla a continuación:

Composición de la atmósfera

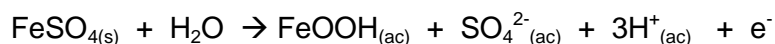
La tropósfera o primera capa de la atmósfera de La Tierra está compuesta por 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 0.93% de argón; contiene además el resto de gases nobles, vapor de agua y dióxido de carbono. Las sustancias como dióxido de azufre, metano, ozono y óxidos de nitrógeno son componentes accidentales o contaminantes de la tropósfera, ya que modifican su composición natural y degradan su calidad, poniendo en riesgo la salud de las personas y la preservación o conservación del ambiente.

La presencia de algunas especies químicas contaminantes de la atmósfera, incluso a nivel de traza, puede tener un gran impacto en el comportamiento de la corrosión, en especial aquellas sustancias que estimulan la producción de compuestos ácidos en la superficie del metal expuesto, destacándose el dióxido de azufre y los cloruros, que son consideradas las especies químicas que más influyen en la corrosión atmosférica.

El dióxido de azufre proviene de la quema de combustibles fósiles que contienen azufre. En presencia de oxígeno se oxida a trióxido de azufre, el cual se transforma en ácido sulfúrico (H_2SO_4) al disolverse en la película de humedad que recubre a los metales expuestos, tal como se presenta a continuación (Roberge 2000):



Se cree que los electrones requeridos para la oxidación del azufre provienen de la disolución anódica, y en caso particular del hierro, a partir de la oxidación del metal a iones ferrosos (Fe^{2+}) y férricos (Fe^{3+}). La presencia de iones sulfato conduce a la formación de sulfato de hierro, el cual hidroliza, formando especies solubles en la superficie del metal, generando un ataque autocatalítico del hierro (Roberge 2000):

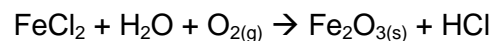


En cuanto a la acción de los iones cloruros (Cl^-) sobre la corrosión atmosférica, son el cloruro de sodio y el cloruro de magnesio presentes en atmósferas salinas los que aumentan notablemente la velocidad del ataque corrosivo, ya que constituyen el electrolito que se deposita en la superficie metálica. Con ellos se forma el cloruro del metal expuesto (hierro, cobre o cinc); el de hierro, por ser más soluble, produce un ataque continuo de corrosión en el metal, mientras que para los otros metales se

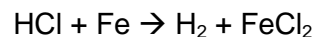
forman compuestos menos solubles, siendo estos materiales un poco más resistentes que el hierro a la corrosión por cloruros.

Se sabe que en los metales ferrosos, los cloruros compiten con los iones hidróxido (OH⁻) para producir la reacción anódica de oxidación del metal. Los iones hidróxido tienden a formar compuestos poco solubles que ejercen un efecto pasivante sobre la superficie del hierro, mientras que los cloruros forman compuestos solubles que aceleran la corrosión del metal (Barton 1976).

Para el caso del hierro, los iones cloruro se depositan sobre la superficie dando lugar a la formación del cloruro de hierro II, el cual en presencia del oxígeno del aire y la humedad reaccionan formando óxido de hierro y ácido clorhídrico:

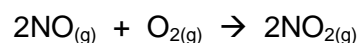


Se ha especulado que el ion cloruro que se deposita en la superficie metálica provoca cambios locales de pH en la zona anódica debido a la hidrólisis del producto de corrosión (Kamimura, y otros 2012) que genera ácido clorhídrico, el cual ataca al metal y forma de nuevo el cloruro ferroso:



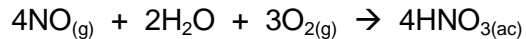
La generación de cloruro ferroso, por efectos del ácido viene a acelerar el proceso corrosivo del material, pues un solo ion cloruro para desencadenar todo el proceso. Ahora el cloruro ferroso (corrosión del metal) se forma por dos vías: Bajo los efectos del ácido, que ataca a mayor velocidad, y debido a los iones cloruro. Con la formación del cloruro ferroso se repite un ciclo que constantemente está generando óxido férrico y ácido clorhídrico que continúa atacando la superficie metálica.

Otras especies que participan en los procesos de corrosión atmosférica son los óxidos de nitrógeno, originados de los procesos de combustión al igual que el dióxido de azufre. El gas emitido directamente de las fuentes es el óxido nítrico (NO), el cual se transforma en dióxido de nitrógeno (NO₂) debido a su reacción con oxígeno (O₂) u ozono (O₃) en la atmósfera, de acuerdo a lo siguiente:





Con el tiempo, los óxidos de nitrógeno se oxidan a ácido nítrico:



Los óxidos de nitrógeno tienen un efecto corrosivo más marcado en el cobre que en el hierro, por lo que es alrededor de este metal que gira la mayor parte de investigaciones al respecto de este contaminante (Syed 2006).

El material particulado también puede acelerar los procesos corrosivos, ya que al depositarse en la superficie del metal y combinarse con la humedad forma una celda galvánica entre él y el metal; si además es de naturaleza higroscópica forma una capa electrolito en la superficie del material expuesto y al absorber humedad hace que disminuya la "humedad crítica" del metal (Roberge 2000).

En los sitios de mayor actividad industrial también se encuentra a otras sustancias potencialmente corrosivas como fosfatos, hidrógeno sulfatos, amoníaco y sales de estos.

Un elemento a tener en consideración a la hora de evaluar la composición de la atmósfera es la cobertura vegetal, ya sea en territorios urbanos, rurales o marinos. La vegetación captura gases de efecto invernadero, contribuyendo a la reducción de la contaminación del aire. Es de suponer que tiene la capacidad de capturar además otras de las sustancias que se encuentran en la atmósfera e inciden en la corrosión, tales como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, nieblas salinas y material particulado.

Existen diferentes clasificaciones de la cobertura vegetal; para el presente trabajo se usará la siguiente (Laguna 2012):

Vegetación arbórea. Comprende formación vegetal leñosa, con predominio de especies arbóreas de una altura superior a cinco metros o más.

Vegetación arbustiva y herbácea: Caracterizada por la presencia de arbustos, palmas, enredaderas y vegetación de bajo porte.

Vegetación agropecuaria: Es la que está dirigida a la producción de alimentos u otras materias primas de uso comercial o industrial.

Áreas abiertas sin o con poca vegetación: Se componen de suelos desnudos y coberturas arenosas o afloramientos rocosos

Tipos de Atmósferas

Para efectos de estudios de corrosión atmosférica, históricamente las atmósferas han sido clasificadas en cuatro tipos: Rural, Urbana, Industrial y Marina o combinaciones de estos (Syed 2006). A continuación se describe brevemente cada uno de ellos (Tullmin y Roberge 2000):

Atmósfera Rural

Los ambientes rurales están por lo general libres de agentes químicos agresivos, siendo la humedad el principal parámetro que ocasiona la corrosión de los metales expuestos, además de trazas de dióxido de azufre y dióxido de carbono provenientes de algunos procesos de combustión y algunas partículas orgánicas e inorgánicas. La tasa de deposición de cloruros en este tipo de atmósferas es inferior a $15 \text{ mg Cl}^- \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Morales, y otros 2005). El tipo de atmósfera rural es generalmente el menos corrosivo de los cuatro presentados.

Atmósfera Urbana

Si la actividad industrial es reducida en el territorio, la atmósfera urbana es poco agresiva. Los agentes corrosivos característicos suelen ser el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno provenientes de emisiones vehiculares y algunas emisiones domésticas; tal como ya se mencionó, estos óxidos pueden producir películas ácidas sobre los metales expuestos cuando se disuelven el rocío o la niebla.

Atmósfera Industrial

En este tipo de ambientes, la principal fuente de agentes corrosivos son las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno provenientes de la quema de combustibles por los automotores o en instalaciones industriales. Cuando estos contaminantes se depositan en la superficie del metal, hacen que la humedad crítica descienda a valores cercanos a 60 % (Syed 2006).

En los tres tipos de atmósfera mencionados se tiene presencia de dióxido de azufre, aunque en cantidades diferentes. De acuerdo a la investigación de Morales y otros, la

tasa de deposición de dióxido de azufre varía si la atmósfera es rural, urbana o industrial, según se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Tasa de deposición de dióxido de azufre de acuerdo al tipo de atmósfera

Tipo de atmósfera	Tasa de deposición de SO ₂ (mg m ⁻² día ⁻¹)
Rural	< 10
Urbana	10 – 100
Industrial	>100

Adaptado de (Morales, y otros 2005)

Atmósfera Marina

Se considera que la atmósfera marina está asociada al territorio ubicado en una franja de 1.0 km costa adentro (Victori y Abellà). La agresividad de este tipo de atmósfera depende de la topografía y distancia de la costa marina, de la dirección y velocidad del viento y de la humedad relativa; aunque la tasa de corrosión disminuye con la distancia hacia la costa, las tormentas fuertes pueden acarrear nieblas salinas hasta 15 km tierra adentro.

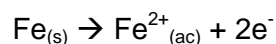
La corrosión en los ambientes marinos ocurre debido a los cloruros que se depositan sobre la superficie metálica a una tasa entre 15 y 1500 mg Cl⁻ m⁻² día⁻¹ (Morales, y otros 2005), provocando severos daños a los materiales expuestos, sobre todo cuando la humedad relativa excede el 55 % (Syed 2006).

1.2.3 Naturaleza de los materiales expuestos

La naturaleza de los materiales expuestos juega un papel determinante en el comportamiento de su degradación al ser expuestos a la atmósfera, puesto que la mejora continua de las propiedades físico-químicas y mecánicas de los metales en su estado puro no les exime de su tendencia natural y espontánea a combinarse con el oxígeno u otras sustancias oxidantes.

Los metales mayormente utilizados en estructuras expuestas y por lo tanto, los que comúnmente son evaluados en estudios de corrosión atmosférica son: Acero al carbono (mayoritariamente contiene hierro), aluminio, cobre, cinc y acero inoxidable (Syed 2006).

En caso de ser el hierro el metal que se corroe, la reacción de oxidación es la siguiente:



Los productos que se forman debido a la corrosión son de naturaleza similar a la mineral de donde proviene el metal. Estos productos pueden ser vistos como membranas o películas “pasivantes”, es decir, que reducen el transporte de electrones entre la atmósfera y el metal y por lo tanto disminuyen la velocidad con la cual el material se corroe. Dependiendo si el metal es hierro, aluminio, cobre o cinc, los productos varían (Ver Tabla 1.2), teniendo unos mayor efecto pasivante que otros. Por ejemplo, los productos del aluminio y cinc son más pasivantes por ser más insolubles y adherentes que los productos del hierro, ya que estos últimos tienden a ser más voluminosos y por desprenderse con mayor facilidad de la superficie metálica.

Tabla 1.2 Productos de corrosión para aluminio, hierro, cobre y cinc

Metal	Especies Comunes	Especies No Comunes
Al	Al(OH) ₃ Al ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	AlOOH, Al _x (OH) _y (SO ₄) _z , AlCl(OH) ₂ ·4H ₂ O
Fe	Fe ₂ O ₃ , FeOOH FeSO ₄ ·4H ₂ O	Fe _x (OH) _y Cl _z , FeCO ₃
Cu	Cu ₂ O, Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆ Cu ₄ SO ₄ (OH) ₆ ·2H ₂ O Cu ₃ SO ₄ (OH) ₄	Cu ₂ Cl(OH) ₃ , Cu ₂ CO ₃ (OH) ₂ Cu ₂ NO ₃ (OH) ₃
Zn	ZnO, Zn ₅ (OH) ₆ (CO ₃) ₂ ZnCO ₃	Zn(OH) ₂ , ZnSO ₄ Zn ₅ Cl ₂ (OH) ₈ ·H ₂ O

(Roberge 2000)

La goetita (Fe₂O₃·H₂O) y la lepidocrocita (FeO(OH)) han sido identificadas como productos de corrosión de la superficie del acero al carbono expuesto a ambientes rurales, industriales y marinos en Pensilvania y Carolina del Norte (EEUU), mientras que la magemita magnética (g-Fe₂O₃) fue encontrada en sitios marinos (Sei J., Cookb y Townsendc 1999).

La herrumbre obtenida la Costa Caribe de Panamá consistía de akaganeita (β-FeOOH), goethita (α-FeOOH), lepidocrocita (g-FeOOH), magnetita no estequiométrica (Fe_{3-x}O₄) y maghemita (g-Fe₂O₃). Las cantidades importantes de magnetita/maghemita

y akaganeita se deben a la alta contaminación de cloruros, y se pueden relacionar a altas tasas de corrosión (Jaén y de Araque 2006).

Otros productos de corrosión encontrados en la capa de óxido de especímenes expuestos a sitios urbanos e industriales en Sao Paulo (Brasil) han sido la lepidocrocita (γ -FeOOH), goetita (α -FeOOH) y magnetita (Fe_3O_4) (Altobeli Antunes, y otros 2014).

En la presente investigación, el estudio sobre corrosión atmosférica se enfocó en dos metales: Acero al carbono y aluminio, por lo tanto son estos los que se describen a continuación:

Acero al carbono

El acero al carbono es una aleación base hierro que contiene como máximo 2.1 % de carbono y otros metales aleados en cantidades residuales. El hierro y el acero al carbono son ampliamente empleados debido a su dureza, maquinabilidad y bajo costo, pero tienen la desventaja de corroerse rápidamente a la atmósfera, aunque la formación de capas de herrumbre sobre la superficie del metal permite que la velocidad de corrosión disminuya con el tiempo. Generalmente, el primer año de exposición se tiene tasas de corrosión mayores y estas tienden a disminuir en los siguientes años (Roberge 2000).

Para mejorar su resistencia a la corrosión, los aceros al carbono son aleados con otros elementos como silicio y aluminio (que se agregan para fomentar la desoxidación) o el manganeso y el cerio (utilizados para evitar los efectos perjudiciales que tiene el azufre residual en el acero).

Usualmente los aceros al carbono contienen desde 0.30 % hasta 1.65 % de manganeso y de 0.20 % hasta 0.60 % de silicio; también puede hallarse compuestos indeseables como azufre, ya que cantidades mayores a 0.05 % lo vuelven frágil, aunque, dependiendo del uso que se dará al acero, puede agregarse entre 0.10 y 0.30 % de azufre para mejorar su maquinabilidad; el fósforo es otro elemento no deseado, ya que fragiliza los aceros al carbono, aunque comúnmente se encuentra en cantidades mayores a 0.04 % en los mismos (Roberge 2000).

Se considera que el elemento que más contribuye a la dureza de los aceros es el carbono. Aun cuando no haya otros elementos presentes, un alto contenido de carbono proporciona suficiente dureza. Este efecto puede ser cuantificado determinando el “carbono equivalente” (CE) en el acero.

El CE puede definirse con fórmulas distintas; una de las más empleadas es la representada de la siguiente manera:

$$CE = C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Es importante hacer este cálculo sobre la base del análisis químico del material y no sobre la composición especificada en la hoja técnica del metal, ya que esta indica los contenidos máximos de cada componente, por lo que el valor de CE resultará falsamente elevado (EPRI 2007).

La presencia de carbono le confiere al metal, resistencia a la tracción y dureza, sin embargo la ductilidad y soldabilidad decrecen al aumentar el contenido de carbono (Kirk 1996). Según a la proporción de carbono en el acero, estos pueden ser de bajo (low), de moderado (mild), de medio (medium), de alto (high) o de ultra alto (ultra high) carbono, de acuerdo a los contenidos mostrados en la Figura 1.2.

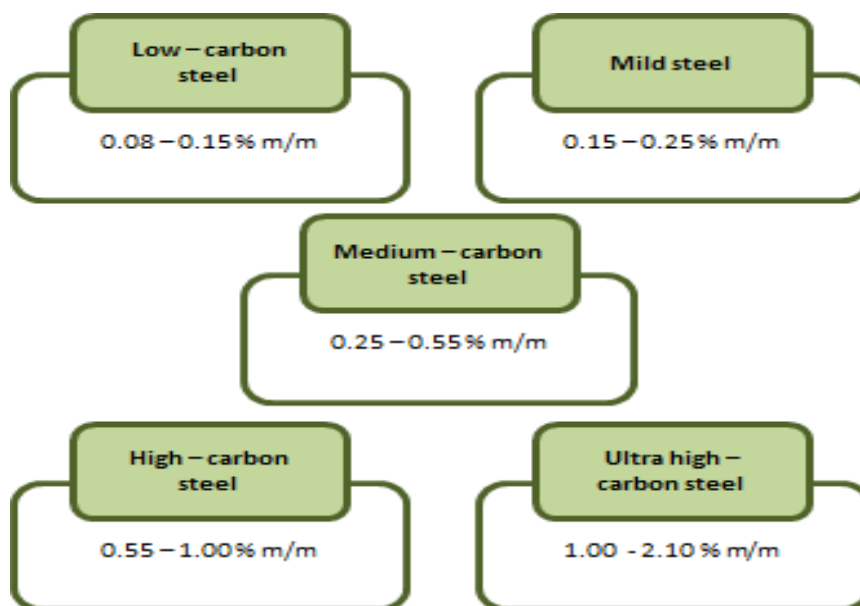


Figura 1.2 Contenidos de carbono en los aceros al carbono
Adaptado de (ASM International 2000) (EPRI 2007)

Los aceros de bajo y moderado carbono presentan mayor resistencia a la corrosión, son más adecuados para la soldadura y el maquinado, características necesarias para la construcción de estructuras. No resisten el ataque de químicos agresivos, pero con protección adecuada se utiliza en atmósferas corrosivas e incluso en estructuras construidas bajo el agua. El desgaste sufrido por los aceros al carbono, es mayor en atmósferas muy húmedas, salinas o industriales que en sitios secos y en atmósferas rurales (ASM International 2000).

Los aceros con diferentes grados de carbono han sido designados empleando distintos sistemas. El más utilizado es la designación SAE (Society of Automotive Engineers) que emplea cuatro dígitos que van referidos a la composición química del acero.

Si el primer dígito es uno (1) indica que se trata de acero al carbono; si segundo dígito es cero (0) se refiere a aceros al carbono no resulturados con un máximo de 1 % de manganeso en su composición. Los dos últimos dígitos indican la concentración de carbono en centésimas de porcentaje. Por ejemplo un acero 1040 es un acero con 0.4 % de carbono. En la Tabla 1.3 se presenta la designación SAE para aceros al carbono.

Tabla 1.3 Designación SAE para aceros al carbono

Aceros al Carbono	Descripción
10XX	No resulturado, 1.0 % máximo de manganeso
11XX	Resulturado
12XX	Resulturado y refosforizado
15XX	No-resulturado, de 1.0 – 1.65 % de Manganeso

Adaptada de (Total Materia)

El acero al carbono laminado en caliente o en frío es el metal más utilizado en estructuras expuestas a la atmósfera, siendo este material el de mayor interés para los estudios de corrosión atmosférica (Syed 2006).

El laminado es generalmente el primer paso para trabajar los metales. El laminado en caliente se lleva a cabo por encima de la temperatura de recristalización; para el caso del acero esto es por encima de 925°C, para que el metal pueda ser formado y típicamente tiene un menor costo que el laminado en frío, ya que se evitan retrasos,

puesto que el metal no debe ser recalentado. Durante el enfriamiento, el acero puede encoger, siendo su forma y tamaño menos predecible que la del acero laminado en frío. Las barras de acero laminadas en caliente se emplean generalmente en soldaduras y en la construcción de estructuras que no requieren gran precisión en su forma.

El laminado en frío se realiza a temperaturas por debajo de punto de recristalización, típicamente se hace a temperatura ambiente, por lo que el acero no encogerá o cambiará de forma o apariencia una vez ha sido laminado. Los aceros laminados en frío tienen un acabado liso y brillante, por lo que se emplean en aquellos procesos donde la apariencia de los productos es importante (Capital Steel & Wire INC).

Aluminio

El aluminio es el metal más abundante de la corteza terrestre. Su baja densidad, gran elasticidad, conductividad térmica y eléctrica, su resistencia a la corrosión y su capacidad para formar aleaciones, permiten que sea uno de los metales más utilizados diferentes industrias, entre ellas, la construcción.

Alrededor del 25 % de la producción de aluminio es utilizada en la industria de la construcción, el 18 % se destina a la fabricación de medios de transporte, 17 % a recipientes y embalajes y 14 % a líneas de energía eléctrica (Rayner - Canham 2000). Las aplicaciones del aluminio en edificaciones y arquitectura incluyen la construcción de techos, marcos de ventanas, revestimientos, puertas, entre otros.

A pesar de ser uno de los metales menos nobles, es sumamente estable en ambientes oxidantes, debido a la formación de una delgada película continua de óxido de aluminio, la cual “crece” sobre la superficie del metal cuando este es expuesto al oxígeno, agua u otro agente oxidante. La capa de óxido tiene un volumen molecular 1.3 veces mayor a la cantidad de aluminio consumida por la reacción de oxidación (Hatch 1984).

De acuerdo a los elementos aleantes y los tratamientos térmicos, el aluminio presenta diferentes propiedades, tales como buena apariencia, alta resistencia a la corrosión, soldabilidad y resistencia a las fracturas.

El aluminio generalmente se utiliza en aleación con otros metales. Las aleaciones se clasifican en series, de acuerdo a lo mostrado a continuación (Sapa profiles UK):

Serie 1000: Aluminio con un mínimo de 99 % de pureza

Serie 2000: Aleado con cobre

Serie 3000: Aleado con manganeso

Serie 4000: Aleado con silicio

Serie 5000: Aleado con magnesio

Serie 6000: Aleado con silicio – magnesio

Serie 7000: Aleado con cinc

Serie 8000: Aleado con otros elementos

1.2.4 Tiempo de exposición de los materiales a la atmósfera

La cantidad total de metal que se deteriora por efecto de la corrosión atmosférica aumenta en la medida que el tiempo de exposición al ambiente es mayor; mientras que la tasa o velocidad de corrosión, es decir, la cantidad de metal que se pierde por unidad de área o espesor en un tiempo determinado, es alta al inicio de la exposición del metal a la atmósfera y tiende a disminuir con el tiempo, debido a las películas pasivantes que se forman sobre la superficie del metal.

La tasa o velocidad de corrosión generalmente se mide en las siguientes unidades:

Gramos / metros cuadrados – año ($\text{g/m}^2\text{-año}$): Mide la masa de metal perdida por unidad de área expuesta por cada año de exposición al ambiente.

Micrómetros / año ($\mu\text{m}\text{y}^{-1}$) o en Milímetros / año (mmy^{-1}): Mide el espesor de material que se pierde por cada año de exposición al ambiente.

1.3 Medida de la corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica se mide en función de qué tan agresiva es una atmósfera, lo cual puede hacerse sobre la base de dos criterios: Medir la tasa o velocidad con la cual los metales se corroen al ser expuestos a dicha atmósfera o clasificarla de acuerdo a parámetros ambientales, tal como lo recomiendan la Normas ISO 9223 y la ASTM G-92 y se muestra esquematizado en la Figura 1.3.

Establecer la tasa de corrosión no resulta fácil, ya que como se mencionó, esta no es lineal en el tiempo, aunque resulta una buena aproximación al exponer probetas

metálicas durante al menos un año al ataque atmosférico y medir la cantidad de metal perdido por efecto de la corrosión (ASTM G92-86 2010) & (ISO 9223 1992).

La Norma ISO 9223 recomienda exponer probetas metálicas, previamente pesadas y medidas, durante un año al ataque atmosférico. Las probetas que pueden ser de acero al carbono, cinc, cobre o aluminio, son luego limpiadas y finalmente pesadas para encontrar cuánta masa de metal base se oxidó durante la exposición.

Con el dato de pérdida de masa, el área expuesta, la densidad del metal y el tiempo de exposición, se calcula la tasa o velocidad con la cual ocurrió la corrosión, expresando ésta en $\text{g/m}^2\text{-año}$ o en $\mu\text{m}\text{y}^{-1}$ (micrómetros por año); los detalles del procedimiento se describen en las Normas ISO 9226 “Determinación de la tasa de corrosión de especímenes estándar para la evaluación del potencial de corrosión” e ISO 8565 “Ensayos de corrosión atmosférica – Requerimientos generales”

La ASTM G-92 propone que las probetas metálicas sean de acero al cobre o cinc y que estas se expongan a la atmósfera durante un tiempo no menor a un año, realizando medidas de las tasas de corrosión en períodos regulares de tiempo (por ejemplo cada 3, 6, 9 y 12 meses), lo cual permitiría valorar los cambios en el potencial de corrosión del lugar del ensayo a lo largo del tiempo.

La tasa o velocidad de corrosión se expresa en unidades de espesor perdido por tiempo de exposición, como por ejemplo mmy^{-1} (milímetros por año); los detalles del procedimiento se describen en las Normas ASTM G-1 “Práctica estándar para preparar, limpiar y evaluar especímenes en ensayos de corrosión” y ASTM G-50 “Práctica estándar para llevar a cabo ensayos de corrosión atmosférica en metales”.

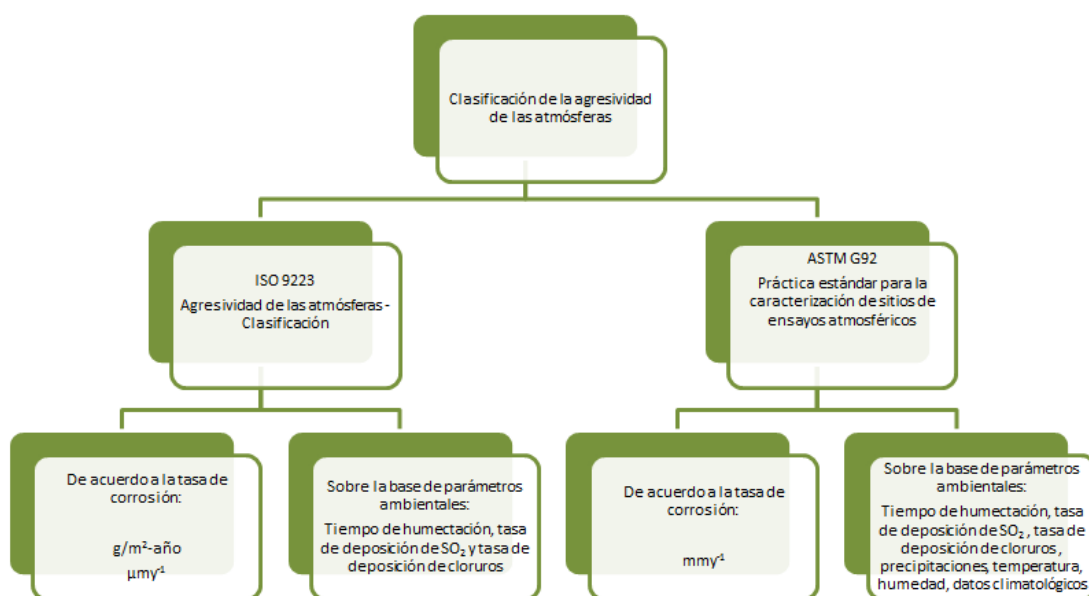


Figura 1.3 Clasificación de la agresividad de las atmósferas de acuerdo a las Normas ISO y ASTM
Adaptado de (ISO 9223 1992) & (ASTM G92-86 2010)

La categorización de la agresividad de las atmósferas está claramente establecida en la Norma ISO 9223, mientras que la ASTM G-92 no establece un parámetro claro para realizar la clasificación. En la Tabla 1.4 se muestra la categorización de la agresividad de la atmósfera según la Norma ISO 9223, la cual es realizada de acuerdo a la tasa o velocidad de corrosión de cada metal. Por ejemplo, si el ensayo se realiza con acero al carbono y la tasa de corrosión obtenida luego de un año de exposición es $275 \text{ g} / \text{m}^2$ año, la atmósfera será caracterizada como C3, es decir, de “agresividad media”.

El segundo criterio para categorizar qué tan agresiva es la atmósfera está basado en los parámetros ambientales. La Norma ISO 9223 sugiere monitorear el tiempo de humectación, la tasa de deposición (o la concentración) de dióxido de azufre y la tasa de deposición de cloruros durante un año, obtener el promedio de estos valores, e interpretarlos de acuerdo a las guías dadas en la mencionada normativa. Debido a que para la presente investigación la categorización de la agresividad de las atmósferas se desarrolló obteniendo la tasa de corrosión, no se ahonda en el procedimiento de categorización sobre la base de datos meteorológicos sugerida por la Norma ISO 9223.

Tabla 1.4 Categorización de la agresividad de la atmósfera según la norma ISO 9223

Velocidad de corrosión (VC) en g / m ² año				Categorización del Grado de Corrosión	Agresividad de la atmósfera
Acero al carbono	Cobre	Aluminio	Cinc		
VC<10	VC<0.9	VC~0	VC<0.7	C1	Muy Baja
10≤VC≤200	0.9≤VC≤5	VC<0.6	0.7≤VC≤5	C2	Baja
200≤VC≤400	5≤VC≤12	0.6≤VC≤2	5≤VC≤15	C3	Media
400≤VC≤650	12≤VC≤25	2≤VC≤5	15≤VC≤30	C4	Alta
VC>650	VC>25	VC>5	VC>30	C5	Muy Alta

Adaptado de (ISO 9223 1992)

La Norma ASTM G-92 sugiere monitorear además de los parámetros mencionados en la Norma ISO 9223, la humedad, la temperatura, la precipitación y los datos climatológicos durante un año, pero no establece como se hará la interpretación de los mismos para caracterizar la agresividad de la atmósfera.

1.3.1 Importancia de medir y monitorear la corrosión atmosférica

La recolección, análisis y uso de la información de manera sistemática, para realizar el seguimiento de un fenómeno particular, por ejemplo, medir la velocidad de corrosión atmosférica, implica llevar a cabo un “monitoreo”, el cual se realiza ubicando puntos o estaciones preparadas para recolectar los datos que permitan cumplir los objetivos del monitoreo.

Medir y monitorear la corrosión atmosférica genera datos que permiten lograr objetivos como los siguientes:

- Evaluar y seleccionar materiales adecuados para un ambiente determinado
- Establecer programas de mantenimiento de las estructuras expuestas
- Estimar la vida útil de los metales expuestos
- Evaluar y seleccionar métodos de control de la corrosión

- Diagnosticar situaciones de daño por corrosión
- Realizar estudios de los productos y mecanismos de corrosión en un ambiente
- Obtener información de referencia del potencial de corrosión de una atmósfera
- Representar cartográficamente los datos obtenidos

1.4 Mapas de Corrosión Atmosférica

Un mapa de corrosión atmosférica es una representación cartográfica del grado de corrosión atmosférica de las regiones geográficas de un país. La representación del mismo puede hacerse de dos formas:

Mapa de Puntos: Indican las localizaciones geográficas específicas donde se hicieron las mediciones, concluyendo acerca del grado de corrosión atmosférica en ese punto, tal como el que se muestra en la Figura 1.4.

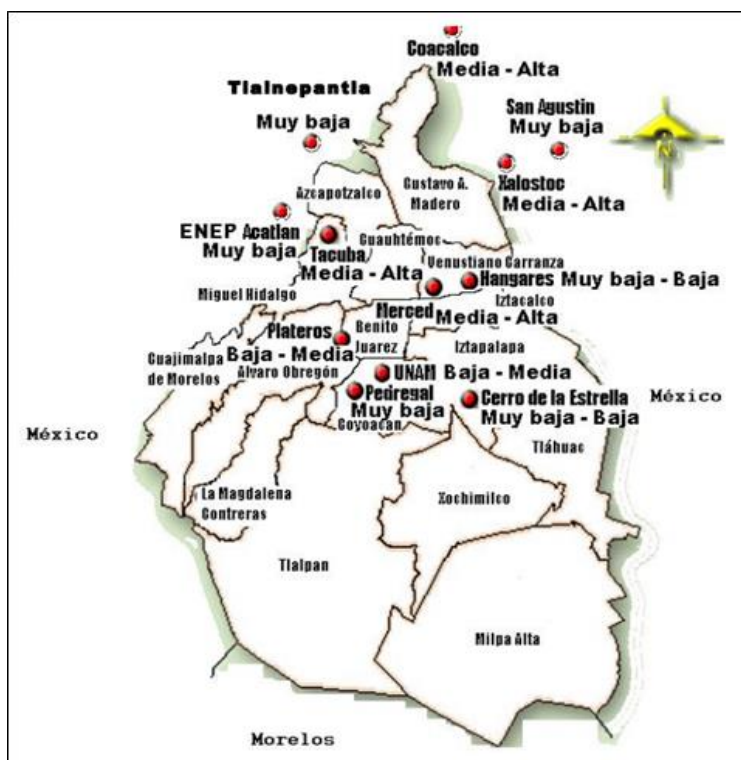


Figura 1.4 Mapa de corrosión atmosférica para la zona metropolitana de la Ciudad de México (Muñoz Ledo y Uruchurtu Chavarín 2002)

Mapa de áreas: Cubren zonas determinadas del territorio, mostrando el grado de corrosión atmosférica dentro de la misma, como el presentado en la Figura 1.5.



Figura 1.5 Mapa de corrosión de Argentina
(Corrosion Doctors-Corrosion in Argentina)

Los mapas de corrosión atmosférica brindan orientación clara acerca de aquellas regiones que presentan mayor o menor agresividad atmosférica, siendo esto un factor importante a considerar para la selección de los materiales de construcción de los proyectos industriales, la instalación de estructuras metálicas a la intemperie, el tipo de recubrimiento necesario para la protección de las mismas, así como la frecuencia de su mantenimiento (Genescà 1995), ya que el desconocimiento de esto resulta en pérdidas económicas o gastos innecesarios.

Algunos de los países que cuentan con Mapas de Corrosión son: Estados Unidos, Inglaterra, China, Nueva Zelanda, Japón; además de los países iberoamericanos que se unieron bajo el proyecto “Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica”, por sus siglas MICAT, en el que participaron Argentina, Chile, Brasil, Perú, Colombia, Venezuela, Panamá, Cuba, Costa Rica, México, Portugal y España que dio inicio en 1988 y finalizó diez años después.

1.4.1 Georreferenciación y herramientas SIG para la construcción de mapas de corrosión atmosférica

Para la construcción de un mapa de corrosión atmosférica es necesario disponer de una red de estaciones de monitoreo que sean representativas, ya sea que la corrosión se mida de forma directa (tasa de corrosión) o de forma indirecta (datos meteorológicos).

Para poder ubicar en un mapa de corrosión los datos generados durante el monitoreo, las estaciones de monitoreo pueden ser localizadas con un alto nivel de precisión o “georreferenciadas” de acuerdo a sus coordenadas geoespaciales de longitud y latitud. La georreferenciación se emplea para dibujar puntos, polígonos o líneas sobre un mapa, facilitando la medición de distancias y áreas entre puntos, permitiendo comparar distintos tipos de información que está referida a un mismo lugar.

Las herramientas informáticas SIG (Sistema de Información Geográfica) pueden emplearse para representar las tasas de corrosión medidas luego de un tiempo dado de exposición. El software Google Earth permite georreferenciar cada punto o estación de monitoreo y representar las tasas de corrosión en un “mapa de puntos” como el de la Figura 1.4.

2.- ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN EL SALVADOR

Hasta 2010 no existía ningún estudio publicado acerca del comportamiento de la corrosión atmosférica en El Salvador. A la fecha se ha realizado cinco investigaciones que han producido datos de corrosión atmosférica en diferentes sitios de El Salvador. Las investigaciones realizadas son:

2.1 Diseño Preliminar de un mapa de corrosión atmosférica en El Salvador

(Díaz, Góchez y Montiel 2010).

Este trabajo tuvo como objetivo general, “Reunir los elementos metodológicos y experimentales necesarios que permitieran establecer las bases para la construcción de un mapa de corrosión atmosférica en El Salvador”.

Para lograr el objetivo, se adaptó las metodologías de pruebas directas de campo sugeridas por la ASTM G-1, G-33 y G-50 para tres tipos de atmósfera en El Salvador: Atmósfera rural, atmósfera urbano-industrial y atmósfera industrial; se siguió la prueba de estimación meteorológica sugerida por la ISO 9223 para un tipo de atmósfera: Urbana. La interpretación de resultados para los cuatro tipos de atmósfera, se realizó sobre la base de lo recomendado en la Norma ISO 9223.

Para realizar esta investigación se contaba con cinco meses (veinte semanas), por lo que las pruebas fueron adaptadas para ser desarrolladas a una menor escala que la sugerida por las normativas: Las pruebas en campo se realizaron en diez semanas y no en un año y el tamaño de las probetas era de 3.0 cm x 2.5 cm x 0.3 cm y no de 10.0 cm x 15.0 cm x 0.3 cm.

Luego de las diez semanas de exposición, se encontró que la atmósfera rural tenía una agresividad C2 (baja), la urbana-industrial, C3 (media) y la atmósfera industrial, C4 (alta), con tasas de corrosión 193, 214 y 598 g/m²-año respectivamente.

Para la prueba de estimación meteorológica se calculó del tiempo de humectación empleando datos de humedad relativa y concentración de dióxido de azufre proporcionados por el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Para el caso de cloruros, se desestimó la presencia de los mismos en la atmósfera evaluada, ya que geográficamente se hallaba a más de 30 km de la costa más cercana.

Para este cuarto punto cabe aclarar que los datos empleados fueron de la estación meteorológica que en ese momento el Ministerio del Medio Ambiente tenía ubicada y funcionando en el Centro de Gobierno de San Salvador y por ello pudo obtenerse los datos requeridos. El resultado obtenido fue una atmósfera de agresividad C2-C3 (agresividad baja-media).

Se buscaba además comprobar la aplicabilidad de los métodos de interpolación espacial *Inverse Distance Weighted Interpolation* (IDW) y los *Polígonos de Thiessen* para la representación cartográfica de las velocidades promedio de corrosión en el tiempo de exposición de las pruebas en campo.

Las principales conclusiones fueron:

La adaptación de las normas ASTM relacionadas con los experimentos en campo sobre corrosión atmosférica, así como la adaptación de la norma ISO 9223 para la clasificación de la agresividad atmosférica partiendo de datos meteorológicos, fue realizada con éxito, llegándose a la construcción de un mapa de corrosión atmosférica de las zonas en estudio; estableciendo, por tanto, las bases para la creación de dicho proyecto a escala nacional.

El método de estimación meteorológica resultó ser una buena aproximación del grado de corrosión atmosférica, siempre y cuando se cuente con la información meteorológica requerida. Así, la clasificación de la atmósfera en el Centro de Gobierno de San Salvador (a partir del método de estimación meteorológica) es de tipo media-baja, resultado muy cercano con los obtenidos en el sitio de exposición en campo más próximo.

El método de interpolación espacial IDW pierde validez cuando se utiliza para predecir valores en regiones cada vez más alejadas de los puntos de control.

2.2 Diseño de una red de monitoreo de corrosión atmosférica en el Área Metropolitana de San Salvador.

(Claros y Portillo 2011).

El objetivo general de este proyecto era “Diseñar una Red de Monitoreo de Corrosión Atmosférica en el Área Metropolitana de San Salvador”. Para ellos se identificó los

elementos necesarios para diseñar una red de monitoreo de corrosión atmosférica, se definió los factores que permitieran fraccionar el Área metropolitana de San Salvador en territorios con características particulares, se estableció el número apropiado de puntos de monitoreo correspondiente a cada territorio, se seleccionó la localización óptima de las estaciones de monitoreo dentro de los diferentes territorios asociados a una atmósfera determinada, con el fin de obtener representatividad del comportamiento de potencial de corrosión de dicho espacio.

El fraccionamiento del AMSS en territorios con características particulares se realizó en base a factores demográficos (factores asociados a la actividad humana) y geográficos (ubicación del territorio) representativos de cada región; en base a lo anterior, se estableció que en el AMSS existen tres tipos de atmósferas predominantes: rural, urbana e industrial.

El número óptimo de puntos designados para monitorear las diferentes áreas clasificadas con atmósferas rural, urbana e industrial dentro del AMSS, se estableció a partir de la relación de agresividad de las diferentes atmósferas. A partir del valor de la agresividad de las atmósferas sobre acero al carbono y aluminio tomado de la norma ISO 9223, se estableció que la atmósfera industrial es ocho veces más agresiva que la atmósfera rural y dos veces más agresiva que la atmósfera urbana, también se estableció que la atmósfera urbana es cuatro veces más agresiva que la atmósfera rural.

A partir de qué tan agresiva es un atmósfera con respecto a otra y teniendo además en cuenta la superficie y disposición de los territorios rurales, urbanos e industriales se calculó que para monitorear el territorio rural del AMSS se necesitan tres puntos de monitoreo, para el territorio urbano, trece y para el territorio asociado a atmósfera industrial, cuatro.

Para decidir la mejor ubicación de los puntos de monitoreo con la finalidad de obtener datos representativos, se tomó en cuenta tanto el flujo vehicular, la contaminación atmosférica de los diferentes lugares, la existencia de polígonos industriales; además de tener en cuenta la accesibilidad del lugar donde serán colocados las estaciones de monitoreo.

2.3. Evaluación del CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) como protección anticorrosiva del acero al carbono expuesto a la atmósfera del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

(Arana, Guillén y Hernández 2012).

El objetivo general de esta investigación era evaluar el comportamiento del CNSL como protección anticorrosiva del acero al carbono expuesto a la atmósfera del Área Metropolitana de San Salvador.

Para ello se evaluó el comportamiento del CNSL como recubrimiento anticorrosivo del acero al carbono expuesto en diferentes sitios del Área Metropolitana de San Salvador, en base a análisis apreciativos e instrumentales y se evaluó cualitativamente el comportamiento del CNSL como protección anticorrosiva en diferentes tiempos de exposición a la atmósfera.

Como resultado se obtuvo que el CNSL resultó ser una buena protección contra la corrosión atmosférica, ya que en los seis puntos de monitoreo se observó menor degradación de la superficie del metal recubierto, en comparación con las láminas sin recubrimiento del mismo punto. Esto comprobó la efectividad del CNSL como recubrimiento ya que generó una capa protectora que disminuyó la degradación del acero.

De acuerdo a los resultados del análisis instrumental, por espectroscopia de dispersión de rayos X, al comparar los especímenes de un mismo punto de monitoreo, ambos a una misma resolución, se observó que los especímenes con recubrimiento presentaron una superficie uniforme con pocos sitios de corrosión localizada; encontrándose en la superficie, átomos de hierro y un contenido muy bajo de oxígeno, así como presencia de carbono; este último probablemente de la composición del CNSL y el oxígeno pudiera deberse ya sea al radical hidróxido del CNSL o al oxígeno del aire que reaccionó con el hierro en ese punto de análisis. Los especímenes sin recubrimiento presentaron zonas totalmente corroídas, con alta presencia de oxígeno, evidenciando una pronunciada corrosión en los puntos de análisis.

Esta investigación fue publicada en la Revista CONIA 2012 (Congreso de Ingeniería y Arquitectura de la UCA) con el título de “Una alternativa Natural para el control de la Corrosión atmosférica”.

2.4 Efecto de las emisiones vehiculares en el potencial de corrosión atmosférica del Área Metropolitana de San Salvador

(Espinal 2012).

El objetivo general era estudiar el efecto que las emisiones vehiculares tienen sobre el potencial de corrosión atmosférica en el Área Metropolitana de San Salvador. Para ello se desarrolló ensayos de campo para observar la influencia del flujo vehicular en el potencial de corrosión de diferentes atmósferas del Área Metropolitana de San Salvador, se evaluó los productos de corrosión obtenidos en ensayos de campo y fueron relacionados con las emisiones vehiculares en diferentes puntos del Área Metropolitana de San Salvador y se desarrolló ensayos de laboratorio para evaluar el potencial de corrosión del dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre sobre el acero al carbono.

De las seis atmósferas evaluadas, la que tuvo el mayor potencial de corrosión fue la que tenía el mayor flujo vehicular, con casi setenta y dos mil automóviles por día, siendo la zona más transitada de los seis puntos evaluados; la atmósfera menos agresiva, fue la del menor flujo vehicular, con diez mil quinientos automóviles por día.

Al evaluar los productos de corrosión, por espectroscopia de dispersión de rayos X, en los especímenes de tres de los seis puntos de monitoreo estudiados, se encontró azufre, hierro y oxígeno en los dos sitios de mayor flujo vehicular.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se comprobó que el dióxido de azufre posee un potencial de corrosión más alto que el dióxido de nitrógeno; esto se evidenció porque la velocidad de corrosión provocada directamente por el dióxido de azufre en el acero al carbono fue $7846 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, mientras que la ocasionada por el dióxido de nitrógeno fue $3762 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Al exponer acero al carbono a la mezcla de ambos gases contaminantes, la velocidad de corrosión fue $13513 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$; de acuerdo a lo anterior, al combinar los gases, la pérdida de masa sufrida por el acero al carbono es mayor que para los gases individuales, y que el dióxido de nitrógeno, más que ser un agente corrosivo, es un catalizador de la corrosión.

2.5 Alcance del efecto de los vectores industriales y vehiculares en el potencial de corrosión atmosférica

(Cordero y Espinal 2014).

El objetivo principal era evaluar el alcance del efecto de los vectores industriales y vehiculares en el potencial de corrosión atmosférica. Para ello se encontró el comportamiento de la corrosión atmosférica con la variación de la distancia respecto a una fuente de emisión fija y a un arteria de alto flujo vehicular, empleando el método CLIMAT para medir la corrosión; además de estimarse la distancia a la cual las emisiones industriales y las emisiones vehiculares ejercen influencia sobre el potencial de corrosión atmosférica mediante la interpretación de un mapa de corrosión.

Se encontró que hubo menores valores de velocidad de corrosión para el acero al carbono medida que había una mayor distancia de separación al foco de emisiones vehiculares, aunque se encontró que el alcance de las emisiones vehiculares sobrepasaba el área evaluada de 0.18 km².

Al analizar el comportamiento que se da hacia todas las direcciones en el radio de distancia de 1 km con respecto al foco de emisión, es apreciable que existe una disminución en la magnitud de la velocidad de corrosión para el acero. Para el caso de los puntos instalados a 2 km de distancia del foco de emisión, los puntos que se ubican en la dirección oeste presentan una tendencia de reducción en los valores de velocidad de corrosión, mientras que los puntos ubicados en la dirección este, pierden la tendencia esperada y sufren un aumento en el valor de velocidad de corrosión; por lo tanto, se concluyó que el alcance de las emisiones industriales en el potencial de corrosión atmosférica se encuentra dentro del primer kilómetro de distancia al foco de emisión, siempre que no existan interferencias de otras fuentes secundarias de emisiones.

Esta investigación fue publicada en la Revista CONIA 2014 (Congreso de Ingeniería y Arquitectura de la UCA).

3.- OBJETIVOS

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

3.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de la corrosión sufrida por el acero al carbono y aluminio en diferentes atmósferas rurales, urbanas, industriales y marinas de El Salvador.

3.2 Objetivos específicos

Medir cada tres meses las velocidades de corrosión del acero al carbono expuesto durante un año en cinco atmósferas urbanas y en dos atmósferas industriales del Área Metropolitana de San Salvador; en dos atmósferas rurales y una urbana fuera del Área Metropolitana de San Salvador y en tres atmósferas marinas y evaluar cómo dichas velocidades se comportan a lo largo del tiempo.

Encontrar los principales productos de corrosión del acero al carbono que se forman en las atmósferas urbanas, rurales y marinas y valorar si estos óxidos corresponden con los obtenidos en atmósferas similares en otros sitios.

Medir cada tres meses las velocidades de corrosión del aluminio expuesto durante un año en cinco atmósferas urbanas y en dos atmósferas industriales del Área Metropolitana de San Salvador; en dos atmósferas rurales y una urbana fuera del Área Metropolitana de San Salvador y en tres atmósferas marinas y evaluar como dichas velocidades se comportan a lo largo del tiempo.

Caracterizar la agresividad de las atmósferas rurales, urbanas, industriales y marinas de El Salvador, de acuerdo a la Norma ISO 9223, con los resultados de velocidad de corrosión obtenidos para el acero al carbono y aluminio.

4.- PARTE EXPERIMENTAL

Para evaluar la corrosión sufrida por el acero al carbono y el aluminio en diferentes atmósferas de El Salvador era necesario montar una red de monitoreo que permitieran evaluar representativamente los cuatro tipos de atmósferas sugeridos por la teoría (marina, industrial, rural y urbana).

Para identificar el tipo de atmósfera deben tenerse en cuenta factores como densidad poblacional, flujo vehicular, grado de contaminación atmosférica, espacios industrializados que generen emisiones corrosivas y cercanía a la costa marina (Claros y Portillo 2011).

Además de los mencionados, otros factores como la topografía, el clima, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento tienen influencia en los procesos de corrosión, por lo tanto, es deseable, siempre que sea factible, recopilar la mayor cantidad de información al respecto en cada sitio de ensayo.

4.1 Ubicación geográfica y condiciones climatológicas de El Salvador

La República de El Salvador se encuentra en Centroamérica, limita al norte y este con Honduras, al sudeste con el Golfo de Fonseca, al sur con el océano Pacífico, y al oeste y noroeste con Guatemala, tal como se muestra en la Figura 4.1. Las coordenadas de su centro geográfico son 13°50'N y 88°55'O.



Figura 4.1 Ubicación geográfica de la República de El Salvador
(Google Earth 2015)

El país tiene un área de 20742 kilómetros cuadrados y se divide en 14 departamentos, divididos a su vez en 39 distritos y 262 municipios. La ciudad más importante de cada departamento se conoce como “cabecera departamental”. La capital de la República de El Salvador es San Salvador que a su vez es la cabecera del departamento de San Salvador. Se estima que en 2014 la población era de 6328196 habitantes (DIGESTYC), lo que lo vuelve el país más densamente poblado de la región centroamericana con 305 habitantes por kilómetro cuadrado.

El Salvador está situado en la parte exterior del cinturón climático de los trópicos. Durante el año, los cambios en las temperaturas son pequeños, en contraste a las lluvias que muestran grandes oscilaciones en el transcurso del año. Se presentan dos estaciones: La estación seca (llamada “verano”) que ocurre de noviembre a abril y la lluviosa (llamada “invierno”) que sucede de mayo a octubre.

El Salvador es un país volcánicamente muy activo, ya que se encuentra en el cinturón de fuego del Pacífico. Tiene un 90% de su territorio conformado por materiales volcánicos. En base a las investigaciones geológicas y a los reconocimientos de campo recientes en la Cordillera Volcánica se determinó que en El Salvador existen 23 volcanes individuales y se identificaron cinco campos volcánicos con antecedentes sísmicos que agrupan estructuras volcánicas y lagos cratéricos (DGOA-Geología-Vulcanología).

Temperaturas anuales promedio

La temperatura histórica promedio de El Salvador es 23.5°C, teniendo una temperatura máxima anual promedio de 30.5°C y una mínima anual promedio de 19.0°C. Los meses donde históricamente se registran las temperaturas más altas son marzo y abril, mientras que en diciembre y enero se registran las temperaturas más bajas (Boletín Climatológico Anual 2012).

Las temperaturas promedio varían según la altura en metros sobre el nivel medio del mar, distinguiéndose tres zonas térmicas con los siguientes promedios anuales de temperatura:

De 0 a 800 metros

El promedio de temperatura disminuye con la altura de 27 a 22°C en las planicies costeras y de 22 a 28°C en las planicies internas.

De 800 a 1200 metros

El promedio de temperatura disminuye con la altura de 20 a 22°C en las planicies altas y de 19 a 21°C en las faldas de montañas.

De 1200 a 2700 metros

De 16 a 20°C en planicies altas y valles, de 19 a 21°C en faldas de montañas y de 10 a 16°C en valles y hondonadas sobre 1800 metros.

En la Figura 4.2 se muestra el mapa de altitudes de El Salvador y en la Figura 4.3, el promedio de temperaturas anuales registradas entre 1961 y 1990. Este segundo mapa fue construido con datos producidos en el proyecto PNUD ELS97G32.

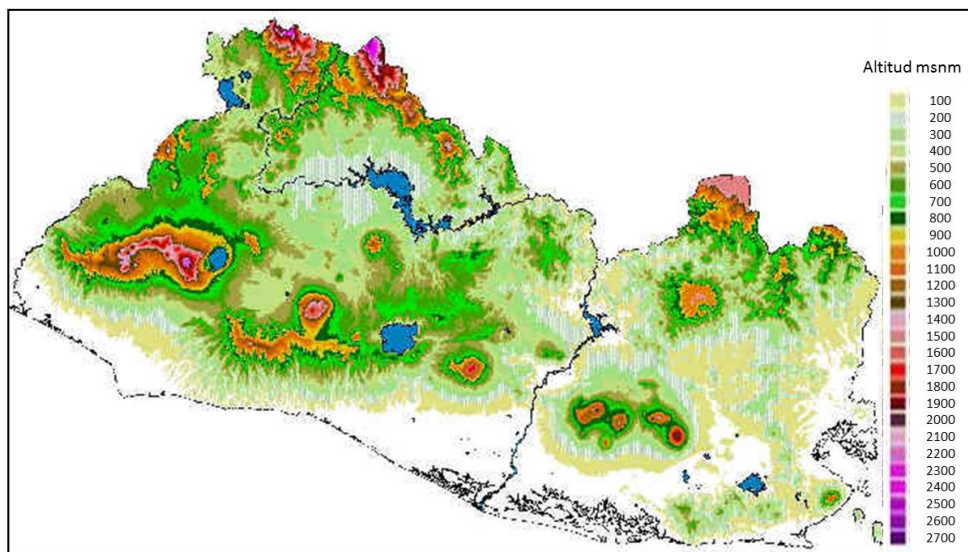


Figura 4.2 Mapa de altitudes de El Salvador
(El Clima en El Salvador)

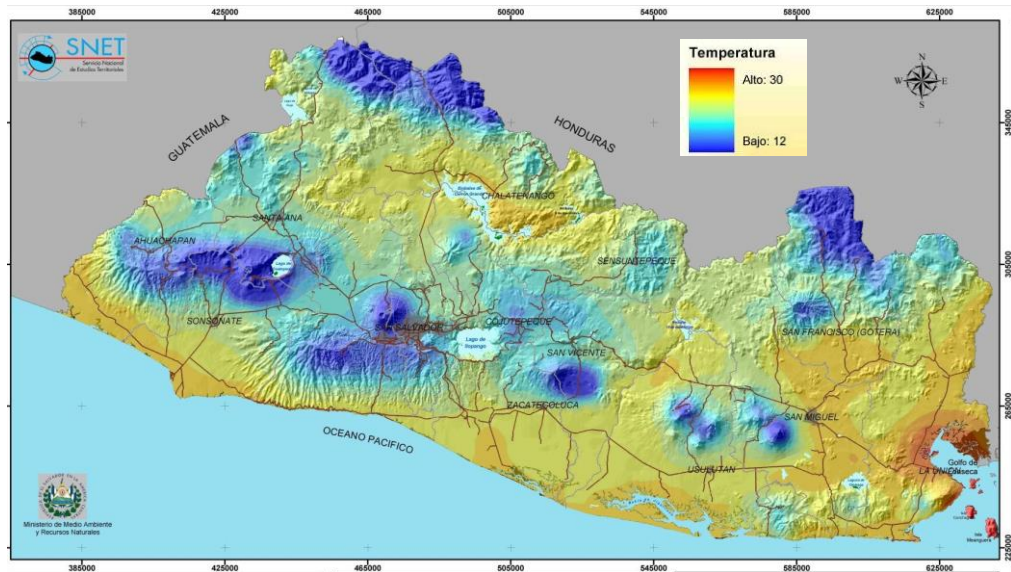


Figura 4.3 Temperaturas históricas normales anuales en El Salvador, período 1961-1990 (Mapa de Temperatura de El Salvador 2002)

Régimen de llluvias

En El Salvador desde el punto de vista meteorológico se dan dos épocas y dos transiciones durante el curso del año, la época seca se desarrolla de mediados de noviembre a mediados de abril, la transición seca- lluviosa de mediados de abril a mediados de mayo. La época lluviosa se desarrolla desde mediados de mayo a mediados de noviembre y al final, la transición lluviosa seca que abarca desde mediados de octubre a mediados de noviembre. La época lluviosa por lo general suele comenzar en las planicies, valles intermedios y montañas, al Oeste y al Norte del territorio y luego se extiende al Este (zona oriental) y al Sur (planicies costeras).

La distribución mensual de las llluvias es bimodal (dos máximos) observándose el máximo principal en septiembre y el segundo en junio en la mayor parte del territorio, asociados estos a la mayor frecuencia de temporales que pueden presentarse. Durante la época lluviosa, entre julio y agosto ocurre una disminución de las llluvias llamada “canícula” que afecta más la zona oriental del país (DGOA-Meteorología).

La Figura 4.4 muestra el promedio histórico de las cantidades normales anuales en milímetros de llluvia registradas en El Salvador entre 1961 y 1990. Este mapa fue construido con datos producidos en el proyecto PNUD ELS97G32.

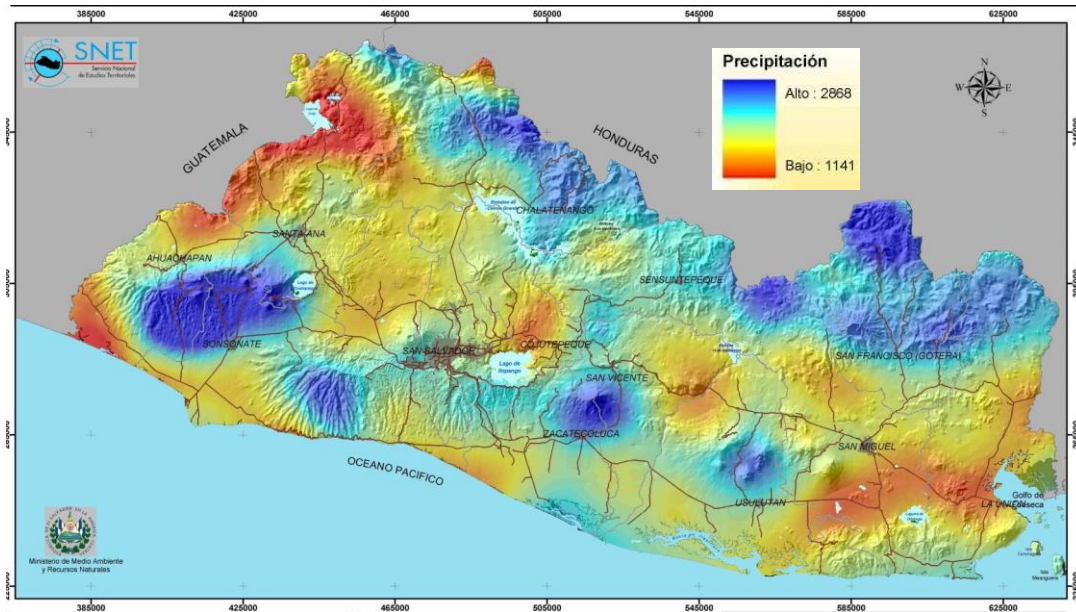


Figura 4.4 Cantidades históricas anuales de lluvia en milímetros en El Salvador, periodo 1961-1990. (Mapa de Pluviosidad de El Salvador 2002)

En el gráfico mostrado en la Figura 4.5 puede verse la lluvia acumulada en cada año desde 2000 a 2005 en El Salvador. Durante estos años, se tuvo un promedio anual de lluvia acumulada entre 1500 y 2200 mm.

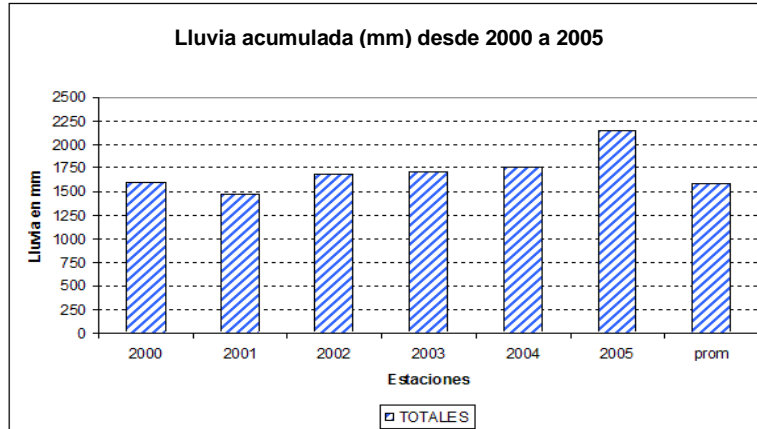


Figura 4.5 Lluvia registrada en El Salvador de 2000 a 2005 (DGOA-Meteorología)

Humedad relativa

La humedad relativa varía de acuerdo a las estaciones (seca o lluviosa). Como puede verse en la Figura 4.6 el mes que presenta las humedades relativas más altas es septiembre, donde en casi todo el territorio se tiene una humedad promedio de 83 a 88%, mientras que es el mes de febrero donde se presentan las humedades relativas menores (entre 66 y 71 %).

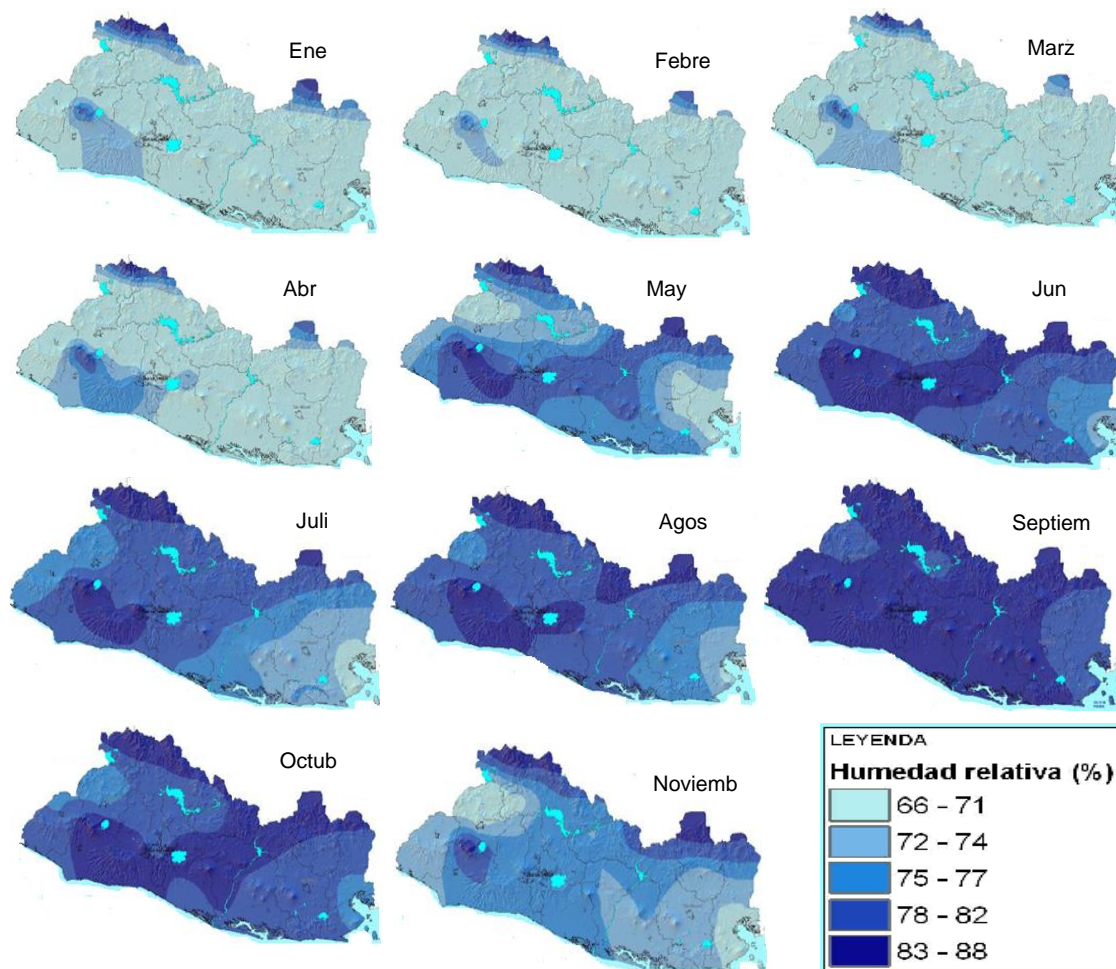


Figura 4.6 Promedio mensual de humedad relativa en El Salvador
(Sistema de Referencia Territorial para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres)

Velocidad y dirección del viento

Las velocidades y direcciones predominantes de los vientos son registradas por las estaciones meteorológicas de la Red Automática de la Dirección General del Observatorio Ambiental que se encuentran repartidas en los diferentes departamentos. Las velocidades medias registradas en el año, varían de 5 a 11 km/h, soplando predominantemente hacia el norte (MARN-Perfiles Climatológicos).

Clima

En la sección 1.2.1 se describió la clasificación climática según Köppen, la cual toma en cuenta la temperatura y el régimen de precipitaciones de una región geográfica. En la Tabla 4.1 se muestra la zonificación climática de El Salvador, de acuerdo a la mencionada clasificación:

Tabla 4.1 Zonificación climática de El Salvador

Elevación (msnm)	Temperatura anual promedio	Tipo de clima
0 - 800	22 a 27 °C en las planicies costeras 22 a 28 °C en las planicies internas	Aw Tropical: Caliente subhúmedo con lluvias en verano (sabana). Se da entre la zona ecuatorial y los desiertos cálidos (entre 10 y 25° de latitud norte y sur). Estación invernal seca que aumenta a medida se aleja del ecuador. Precipitación mínima superior a 100mm.
800 - 1200	20 a 22°C en las planicies altas 19 a 21°C en las faldas de montañas	
1200 -1800 (Tierra templada)	16 a 20 °C en planicies altas y valles 19 a 21°C en faldas de montañas	
1800 -2700 (Tierra fría)	10 a 16°C en valles y hondonadas	

msnm: metros sobre el nivel del mar

4.2 Localización de las estaciones de ensayo para el monitoreo

Realizar el monitoreo de corrosión atmosférica en todo el territorio salvadoreño resulta poco factible, por lo que se optó por elegir sitios que permitieran evaluar de manera representativa los cuatro tipos de atmósferas (marina, industrial, rural y urbana) y a los cuales fuera posible acceder de tal manera que el proyecto lograra finalizar exitosamente.

Atmósferas urbanas e industriales: Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

Como punto de partida se optó por monitorear el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), por ser este el casco industrial y urbano más grande del país; abarca sólo el 3 % del territorio nacional, con una extensión aproximada de 610 Km² y alberga alrededor del 27 % de la población total del país (COAMSS-OPAMSS), es decir, un poco más de 1.7 millones de habitantes (DIGESTYC).

En la Figura 4.7 se muestra la ubicación del Área Metrolitana de San Salvador dentro de El Salvador, la cual se sitúa en una superficie que se extiende alrededor del centro geográfico de la ciudad de San Salvador con una latitud norte de 13° 42' y longitud oeste de 89° 12'.



Figura 4.7 Ubicación del Área Metropolitana de San Salvador dentro de El Salvador
Adaptado de (Google Earth 2015)

De acuerdo a la Ley de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Área Metropolitana de San Salvador y de los Municipios Aledaños emitida por la Asamblea Legislativa de la República de El Salvador en 1993, el Área Metropolitana de San Salvador y sus municipios aledaños forman una misma unidad urbanística o conurbación.

El AMSS está constituida por 14 municipios pertenecientes a los departamentos de San Salvador y La Libertad (Antiguo Cuscatlán, Santa Tecla, Apopa, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Ciudad Delgado, Ilopango, Mejicanos, Nejapa, San Marcos, San Martín, San Salvador, Soyapango y Tonacatepeque), cuya división administrativa y número de habitantes es mostrada en la Figura 4.8

La altitud máxima del AMSS es el Volcán de San Salvador, también conocido como El Boquerón, que alcanza los 1874 metros. La zona urbanizada del AMSS ocupa en su mayoría un área ubicada entre 400 y 1000 metros sobre el nivel del mar y se ha desarrollado en la parte más plana del Valle de San Salvador, que está delimitado al norte por el Volcán de San Salvador, al este por el Lago de Ilopango y el Cerro San Jacinto (1154 metros) y al sur por la Cordillera del Bálsamo, esta última, se extiende a una altura media entre 1000 y 1200 metros (COAMSS-OPAMSS). Lo anterior es mostrado en la Figura 4.9

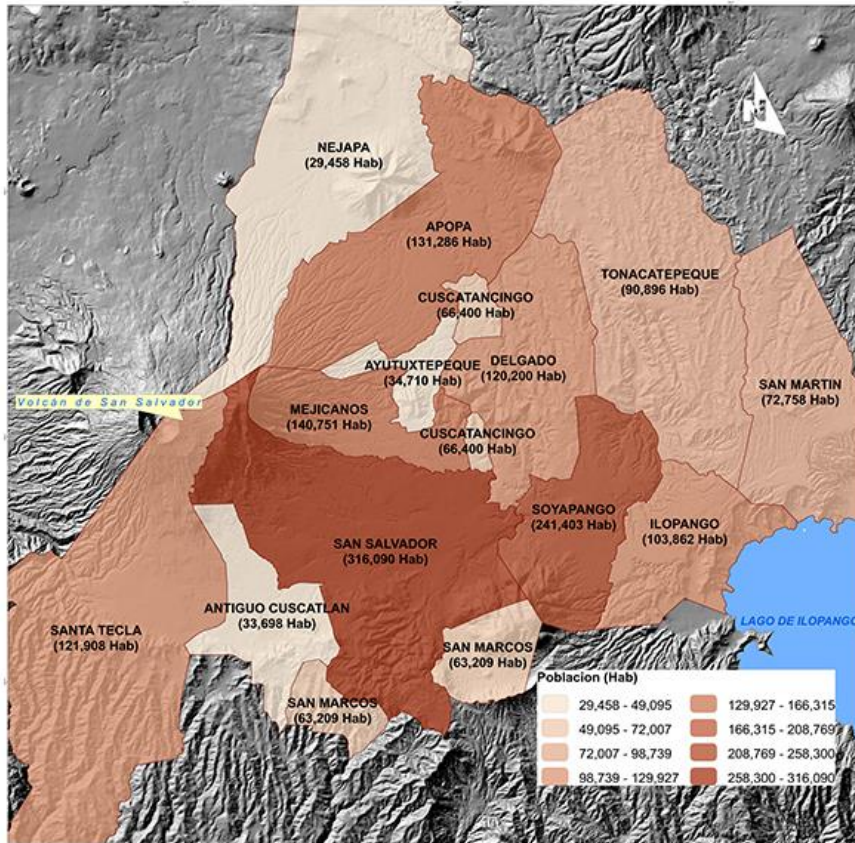


Figura 4.8 División administrativa del AMSS y número de habitantes por municipio. (COAMSS-OPAMSS)

Las condiciones climáticas del Área Metropolitana de San Salvador son monitoreadas desde cinco estaciones meteorológicas de la Red Automática de la Dirección General del Observatorio Ambiental. Para la presente investigación también se ha tomado en cuenta los datos meteorológicos registrados en la estación que se encuentra ubicada en la Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas (UCA). La ubicación de estas estaciones puede verse en la Figura 4.10.

Las condiciones climatológicas que han sido identificadas como de mayor influencia en los procesos corrosivos y que son monitoreadas en estas estaciones se presentan en la Tabla 4.2.

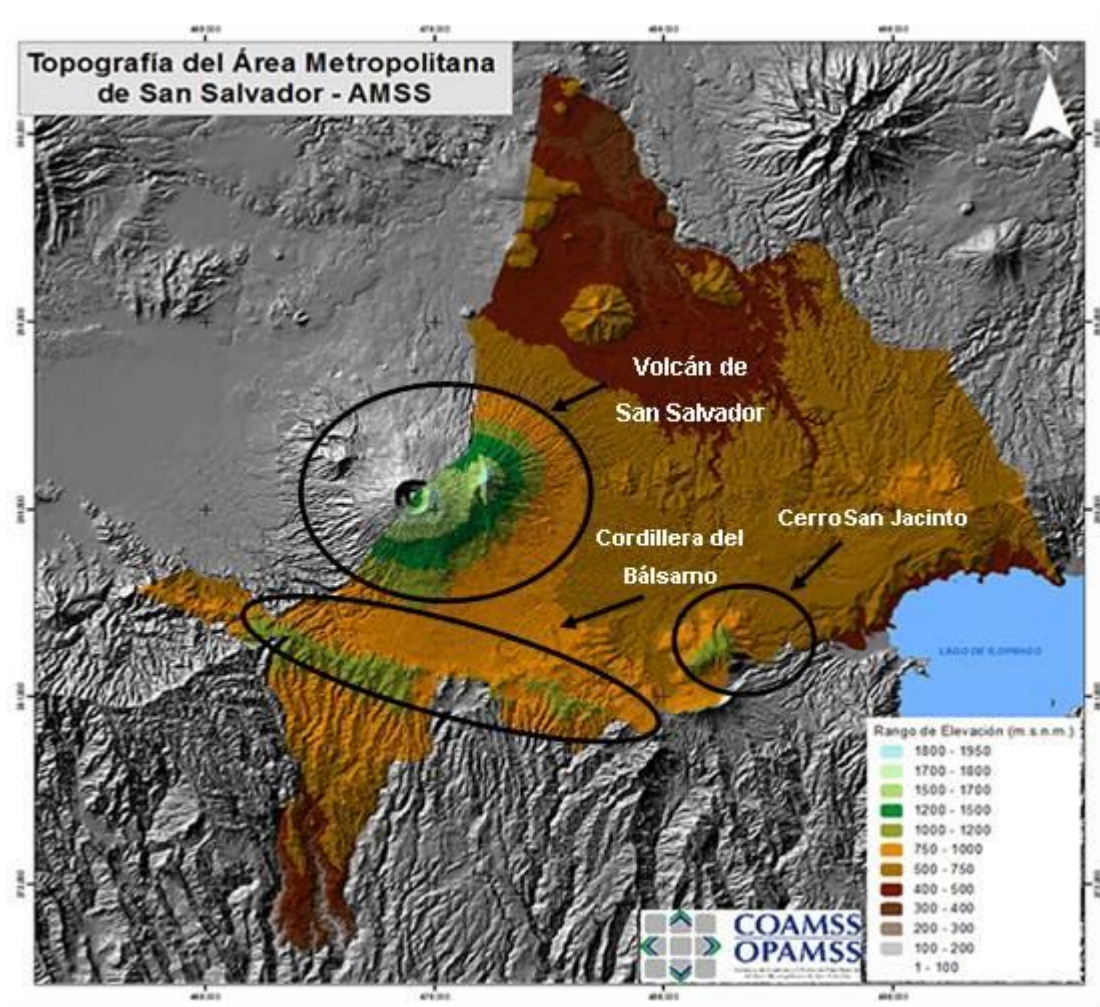


Figura 4.9 Topografía del Área Metropolitana de San Salvador
Adaptada de (COAMSS-OPAMSS)



Figura 4.10 Estaciones meteorológicas de la Red automática de la DGOA en el AMSS y estación UCA
Adaptado de (Google Earth 2015) & (DGOA - Red Automática de Monitoreo)

Tabla 4.2 Condiciones climatológicas monitoreadas en las estaciones meteorológicas del AMSS

Estación meteorológica	Coordenadas geográficas		Condición climática monitoreada
	Latitud	Longitud	
Procafé	13.6840°	-89.2870°	Temperatura del aire Dirección del viento Precipitación Acumulada
UES	13.7190°	-89.2030°	
Ilopango	13.6980°	-89.1180°	
UCA	13.679522°	-89.235568°	Humedad Relativa Velocidad del Viento
Belloso	13.6930°	-89.1910°	Precipitación acumulada
La Cima	13.6590°	-89.2150°	

(DGOA - Red Automática de Monitoreo)

De 1938 a 1977 el AMSS se urbanizó a una tasa de 1.26 km² x año, acelerando el consumo de suelo natural y agrícola, provocado principalmente por los procesos de industrialización de la economía nacional, lo que estimuló las grandes migraciones de población hacia San Salvador y sus municipios aledaños. Para los años 2007 y 2008, el AMSS ocupaba 159.71 km², con un promedio de consumo de suelo de 3.24 km² por año desde 1977.

El área en negro presentada en la Figura 4.11 constituye el espacio urbano actual del AMSS y este se ha expandido en aquellos sitios donde las condiciones topográficas del territorio lo permiten e incluso en espacios no adecuadas para el asentamiento de personas; el territorio mostrado en verde constituye el espacio rural del AMSS (COAMSS-OPAMSS).

El Área Metropolitana de San Salvador es el centro direccional del país en materia política, financiera, económica y cultural concentrándose aquí el 70 % de la inversión pública y privada. Los espacios industriales más importantes ubicados en el AMSS son mostrados en la Figura 4.12 y descritos a continuación:

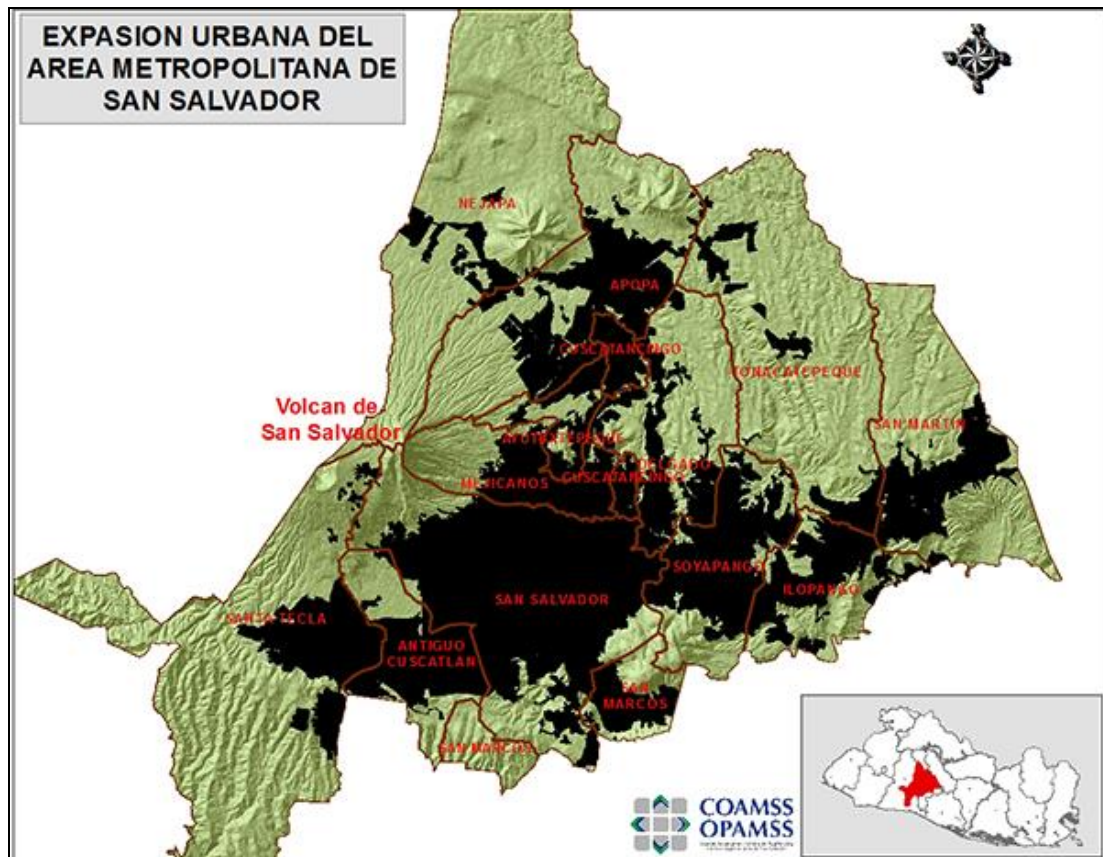


Figura 4.11 Territorio urbano y rural del Área Metropolitana de San Salvador (COAMSS-OPAMSS)

Zona Industrial Boulevard del Ejército Nacional: Se encuentra ubicada en los municipios de Soyapango e Ilopango, recorre una distancia lineal de aproximadamente 6.3 km. Esta zona industrial posee diferentes industrias como fábricas de papel, procesamiento de productos alimenticios, bebidas y derivados, materiales de construcción, industrias textiles, industrias de pinturas, generadoras termoeléctricas e industrias farmacéuticas y químicas.

Zona Industrial Apopa-Nejapa: Se ubica en los municipios de Apopa y Nejapa y comprende un ingenio azucarero, una industria textil y una planta térmica de generación de energía eléctrica.

Zona Industrial Merliot-Santa Elena: Se ubica en el municipio de Antigua Cuscatlán, en esta zona se ubican industrias de distintos rubros, entre ellos productos alimenticios, empaques, productos plásticos, metales y productos químicos.

Zona industrial Plan de la Laguna: Se ubica en el municipio de Antigua Cuscatlán. En esta zona se albergan muchas empresas industriales, entre estas se encuentran: dulcerías, productos plásticos, maquilas, fábricas de harinas para consumo humano y concentrado para animales.



En el Área Metropolitana de San Salvador se concentra el 26 % de las emisiones totales del país y a la vez se tiene la mayor cantidad de emisiones por kilómetro cuadrado. Las principales fuentes emisoras de contaminantes son las móviles (51 % del total de emisiones en esta área) (EUROLATINA-SENES 2006).

El AMSS es cruzado por las calles que tienen el mayor flujo vehicular del país; los datos más actualizados son de 2010 donde se reportaba que en los tramos con más carga circulaban entre 65000 y 85000 vehículos por día, mientras que en los tramos menos transitados se tenía flujos de menos de 15000 vehículos por día (VMT 2010). Para poder caracterizar si el sitio donde se realizará el monitoreo tiene flujo alto, mediano o bajo, se ha hecho la clasificación mostrada en la Tabla 4.3 en base a los datos de Tránsito Promedio Diario de los 10 ejes más transitados en el AMSS.

Tabla 4.3 Clasificación del Flujo vehicular

Automóviles/día	Clasificación del flujo vehicular
Más de 50000	Muy alto
De 30000 a 50000	Alto
De 15000 a 30000	Mediano
De 5000 a 15000	Bajo
Menos de 5000	Muy bajo

Adaptado de los datos del (VMT 2010)

Entre las fuentes fijas de mayor importancia dentro del Área Metropolitana se tiene tres plantas productoras de energía termoeléctrica (dos de ellas ubicadas en el Bulevar del Ejército Nacional y la tercera en Apopa-Nejapa), que en conjunto generan el 9 % del total de emisiones, el manejo y disposición final de desechos sólidos que genera el 13 % de emisiones y la cocción residencial de alimentos que produce el 10 % (EUROLATINA-SENEC 2006).

De acuerdo a los resultados del “Inventario de emisiones y del diagnóstico de la calidad del aire en el AMSS” llevado a cabo en 2006 (EUROLATINA-SENEC 2006), los parámetros realmente problemáticos eran las partículas totales suspendidas (PTS) y las partículas menores a 2.5 μm , ya que de acuerdo a las mediciones realizadas y a los análisis de modelado de dispersión, eran estas las que excedían los estándares de calidad aplicables: PTS 260 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio diario) y 75 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio anual) y $\text{PM}_{2.5}$ 65 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio diario) y 15 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio anual).

En ese momento, las Partículas menores a 10 μm también sobrepasaban los estándares de acuerdo a las mediciones realizadas, 150 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio diario), pero no excedían los valores anuales, 50 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio anual) de acuerdo al modelado de dispersión. Por lo tanto, la recomendación fue que los parámetros que constituían la prioridad de monitoreo en el AMSS eran las PTS, las $\text{PM}_{2.5}$ y las PM_{10} .

En segundo orden de prioridad se consideró el monitoreo del NO_2 , ya que tanto en mediciones como en la modelación, sus concentraciones se mantenían, en los casos más críticos, 30 % por debajo de la norma aplicable (150 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio diario) y 100 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ (promedio anual)). La recomendación era vigilar la evolución de sus tendencias en el mediano y largo plazo y poder así, dadas las circunstancias, tomar decisiones que evitaran que sus concentraciones alcanzaran los estándares

establecidos, asignando recursos para el monitoreo de este contaminante en segundo orden de prioridad después de haber suplido las necesidades de monitoreo de PTS, PM₁₀ y PM_{2.5}.

En tercer orden de prioridad se consideró el O₃ y el SO₂, los cuales no fueron considerados como potenciales problemas de calidad del aire ni en el corto ni en el mediano plazo. En el caso del SO₂, la modelación de sus dispersiones arrojó datos máximos de 76 µg/m³ (promedio diario) y 23 µg/m³ (promedio anual), muy por debajo de los estándares de calidad (365 µm/m³ (promedio diario) y 80 µm/m³ (promedio anual)). Se recomendó medir la concentración de SO₂ en al menos en un punto de la ciudad para darle seguimiento a su tendencia a largo plazo.

De acuerdo al mencionado estudio, las áreas identificadas como de mayor contaminación en el AMSS fueron:

- Zonas circundantes al centro geográfico del AMSS que corresponden a un radio aproximado de tres kilómetros del centro de San Salvador, abarcando gran parte de los municipios de San Salvador y Mejicanos, y extendiéndose un poco más dicho radio hacia el oeste abarcando parte del municipio de Antigua Cuscatlán.
- Área correspondiente a los municipios de Soyapango e Ilopango.
- Zona norte del AMSS desde Cuscatancingo hasta Apopa.
- Santa Tecla.

El estudio recomendaba que las primeras dos zonas tuvieran mayor prioridad en los recursos que se asignaran para el monitoreo de calidad del aire, y en segundo lugar de prioridad se dejaran las otras dos zonas. En la Figura 4.13 se muestra la localización de las áreas mencionadas.

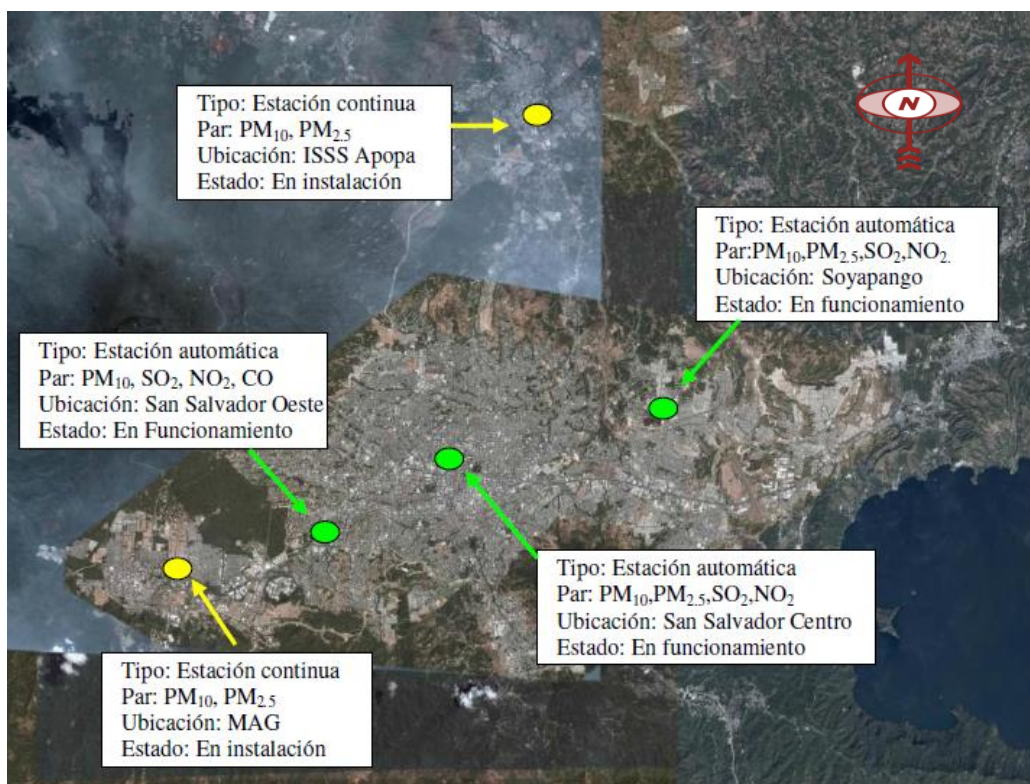
Para dar continuidad al estudio de 2006, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MARN, implementó en 2008 la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, REDCA, para el Área Metropolitana de San Salvador.



Figura 4.13 Áreas identificadas como las de mayor contaminación en el AMSS
Adaptado de (Google Earth 2015)

Para 2008 se hallaba en funcionamiento tres estaciones de monitoreo automático en las zonas de San Salvador Centro (Centro de Gobierno), en San Salvador Este (Universidad Don Bosco) y en San Salvador Oeste (Comando de Doctrina y Educación Militar), monitoreando PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 y CO , pero los informes de 2008 a 2012 sólo presentan datos de material particulado, ya que los resultados del monitoreo de gases no fueron validados. En esa época se tenía programado instalar dos estaciones para monitorear PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Apopa y Santa Tecla (Fabián y Ayala Montenegro 2009). La ubicación y el detalle de las cinco estaciones mencionadas es mostrada en la Figura 4.14.

Desde 2013 sólo se haya en funcionamiento dos estaciones de calidad del aire, la ubicada en San Salvador Centro y la ubicada en Soyapango (San Salvador Este) y monitorean en línea únicamente $PM_{2.5}$ que es el parámetro utilizado para definir el índice de calidad del aire.



Par: parámetro monitoreado
 Figura 4.14 Red de Monitoreo de Calidad del Aire, REDCA, en diciembre 2009
 (Fabián y Ayala Montenegro 2009)

En la Figura 4.15 se muestra los promedios anuales de $PM_{2.5}$ medidas en las dos estaciones desde 2009 hasta 2014. Los datos de 2009 a 2012 fueron proporcionados por la Unidad de Gestión de Datos e Información del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN-Datos de Calidad del Aire 2009-2012) y los de 2013 y 2014 fueron obtenidos del Informe Anual sobre Calidad del Aire 2014 (MARN-Informe de la Calidad del Aire 2014). De este Informe se obtuvo además la definición de la calidad del aire que también es mostrada en la Figura 4.15.

Para el caso de la estación San Salvador Centro, los valores promedio de $PM_{2.5}$ para 2012, 2013 y 2014 clasifican a la atmósfera como de calidad “moderada”, es decir con valores entre 15.3 y $40.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la estación de San Salvador Este, los valores de $PM_{2.5}$ permiten clasificar a la atmósfera como de calidad “dañina a la salud de los grupos sensibles”, es decir, con valores entre 40.2 y $65.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

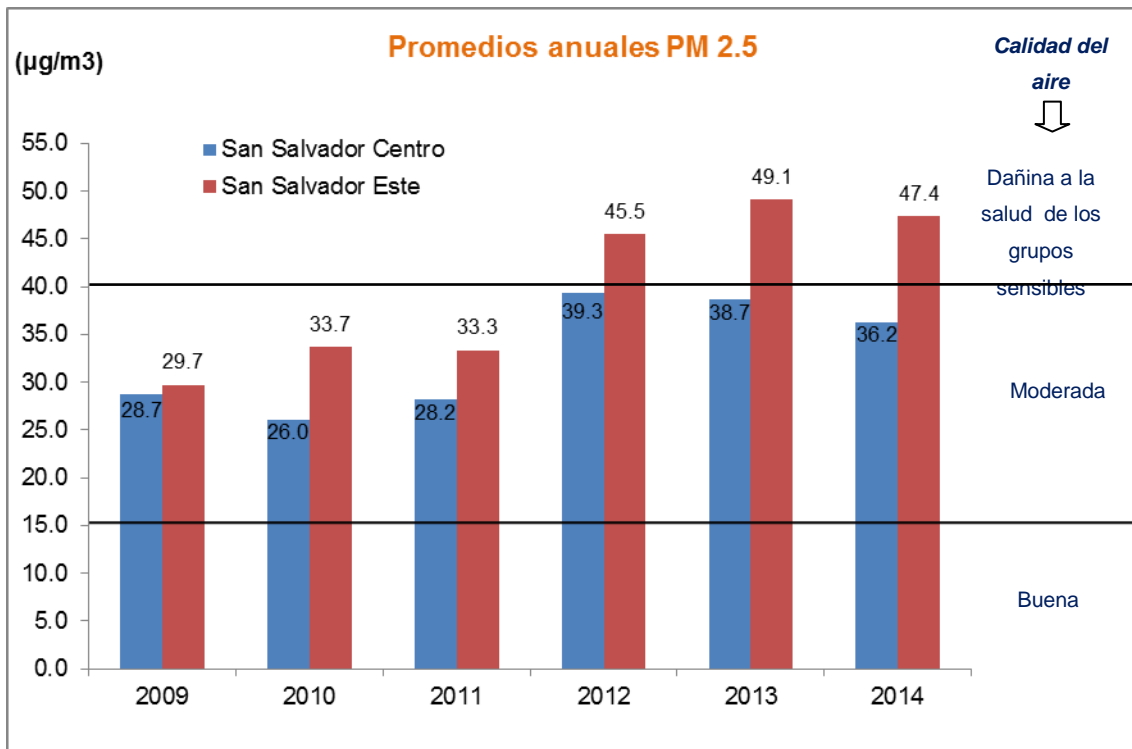


Figura 4.15 Promedios anuales de PM 2.5
Adaptado de (MARN-Informe de la Calidad del Aire 2014)

En cuanto a la cobertura vegetal del AMSS, de acuerdo al análisis realizado por Escalante y Grande, el 45.93 % del territorio tiene espacios con predominio de vegetación arbórea y el 6.60 % corresponde a espacios con vegetación de tipo pasto y arbustiva (Escalante y Grande 2014).

Como se ha visto, en el AMSS se tiene predominantemente un territorio urbano, con tres zonas industriales ubicadas en tres de las áreas consideradas como de mayor contaminación. La costa marina se encuentra a 30 km del centro geográfico del AMSS y el sitio más cercano a la misma es el municipio de Santa Tecla, a una distancia de 20 km. El monitoreo de corrosión realizado en el AMSS, permite por lo tanto, recoger datos del comportamiento de atmósferas de tipo urbano e industrial del territorio salvadoreño.

Inicialmente se esperaba monitorear los doce puntos del Área Metropolitana que son mostrados en la Figura 4.16 los cuales incluían cinco puntos para estudiar las tres principales zonas industriales del AMSS (marcadores en rojo), cinco puntos urbanos donde se tiene la mayor contaminación atmosférica y altos flujos vehiculares

(marcadores azules) y dos puntos donde hay menor contaminación (marcadores verdes).

El primer sitio elegido fue la Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, ubicada en los municipios de San Salvador y Antigua Cuscatlán, que es desde donde se está llevando a cabo la presente investigación y que corresponde al marcador azul “Bulevar Los Próceres” de la Figura 4.16.



Figura 4.16 Sitios inicialmente propuestos para realizar el monitoreo de corrosión atmosférica en el AMSS
Adaptado de (Google Earth 2015)

Para lograr el resto de sitios se hizo gestiones en empresas ubicadas en dos zonas industriales (Bulevar del Ejército y Apopa – Nejapa), universidades y escuelas secundarias de las zonas que se pretendía monitorear. Se logró el apoyo de dos universidades, una situada en el municipio de Soyapango y la otra en el Centro de San Salvador, el de una empresa del extremo oriente del Bulevar del Ejército Nacional y el del parque más grande del municipio de San Salvador (Parque del Bicentenario), ubicado en las cercanías de las zonas industriales de Antigua Cuscatlán. Lastimosamente no hubo acuerdo favorable en la zona industrial Apopa-Nejapa, en el centro y extremo oeste del Bulevar del Ejército y en las zonas norte y noreste de San Salvador.

Para completar los sitios de monitoreo se eligió tres casas particulares, la primera en el municipio de Soyapango a 0.25 km al norte de la parte central del Bulevar del Ejército y 0.70 km al este de una planta termoeléctrica; la segunda, en el municipio de Santa Tecla a 1.50 km al noreste del centro de esta ciudad; la tercera casa, en el municipio de San Marcos, a 0.60 km al noroeste del centro de dicha ciudad.

Lo anterior hizo un total de ocho sitios para llevar a cabo el monitoreo del Área Metropolitana de San Salvador, los cuales son presentados en la Figura 4.17, con lo que se lograría recolectar datos del comportamiento de lugares con atmósferas industriales, urbanas de alto flujo vehicular y urbanas de bajo flujo vehicular.

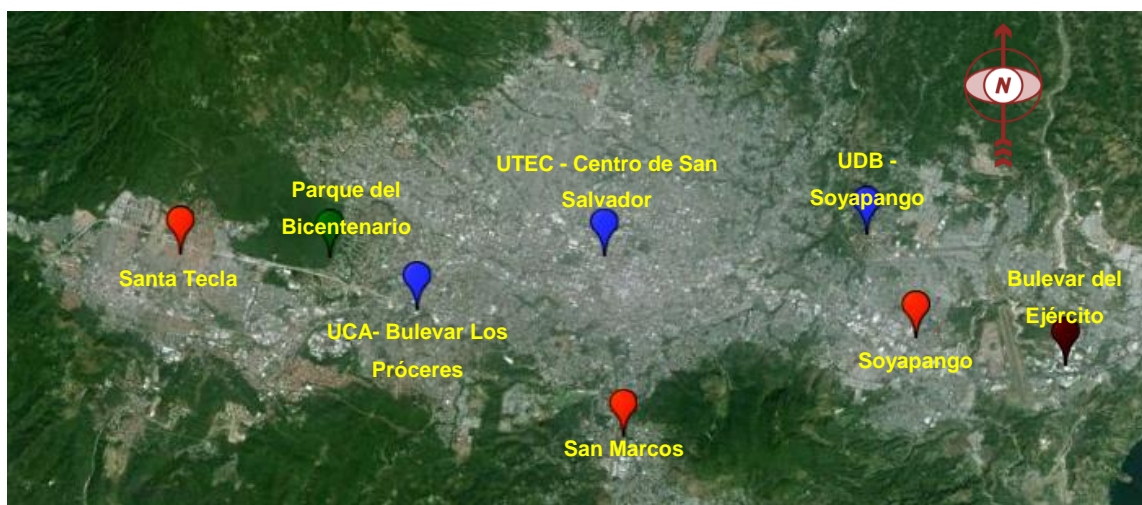


Figura 4.17 Localización de los sitios de monitoreo del Área Metropolitana de San Salvador
Adaptado de (Google Earth 2015)

Atmósferas rurales o poco contaminadas en las afueras del AMSS

Para monitorear sitios rurales o de poca contaminación ambiental debida a actividad industrial y con un flujo vehicular bajo o muy bajo, se eligió tres sitios que resultaron ser accesibles y seguros:

Las afueras de la Villa de Comasagua, Departamento de La Libertad: La Villa de Comasagua se ubica en la Cordillera del Bálsamo a 1070 msnm y a una distancia de 29.4 km al suroeste de San Salvador; tiene una población de 12800 habitantes y cubre un área de 75.05 km² de los cuales, 0.30 km² corresponden al área urbana y 74.75 km² corresponden al área rural. Sus principales actividades económicas son la agricultura, específicamente el cultivo de café y el turismo.

Cantón “Los Planes de Renderos” en el municipio de Panchimalco, Departamento de San Salvador: Se encuentra a 1070 msnm a una distancia de 9.5 kilómetros al sureste de San Salvador. Tiene una extensión aproximada de 45 km² y sus principales actividades productivas son la agricultura, especialmente el cultivo de café y cítricos, y el turismo.

Pueblo de San José Villanueva en el Departamento de La Libertad: Se encuentra ubicado a 11 km al sureste de la ciudad de Santa Tecla, a 23 km al suroeste de San Salvador y a 13 km al norte de la costa de La Libertad; tiene una elevación promedio de 530 mm y una extensión de 34 km², con una población estimada para 2014 de 17503 habitantes (DIGESTYC). Desde el año 2002 San José Villanueva comenzó a ser urbanizado intensivamente por encontrarse cerca de Santa Tecla y San Salvador y poseer una mejor calidad ambiental en comparación con estas ciudades, lo cual lo volvió un lugar muy atractivo para la vivienda. Su principal actividad económica es la agricultura, destacándose el cultivo de maíz, maicillo, frijoles, hortalizas, entre otros (Alcaldía de San José Villanueva).

En la Figura 4.18 se muestra la ubicación de los tres sitios descritos anteriormente.



Figura 4.18 Sitios para realizar el monitoreo de la corrosión en atmósferas rurales o poco contaminadas en las afueras del AMSS: Comasagua, San José Villanueva y Los Planes de Renderos
Adaptado de (Google Earth 2015)

Las estaciones meteorológicas de la Red Automática de la Dirección General del Observatorio Ambiental que se hallan más cerca de estos tres sitios son mostradas en la Figura 4.19 con puntos rojos y texto amarillo; como puede verse, la estación más cercana a Comasagua y San José Villanueva es Procafé, mientras que para Los Planes de Renderos se tiene la estación de Ilopango.

Como ya se mencionó, las estaciones de monitoreo de calidad del aire del país se encuentran en San Salvador (Centro y Este), por lo que para estos sitios no se tiene ningún dato que pueda guiar en cuanto a la calidad del aire. Tampoco se cuenta con datos de flujo vehicular.

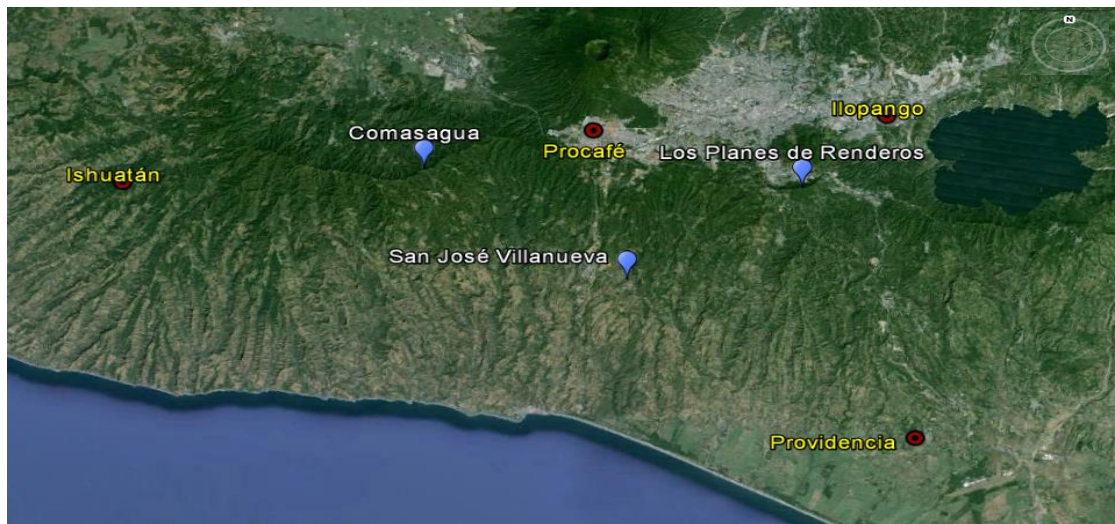


Figura 4.19 Estaciones meteorológicas cercanas a Comasagua, San José Villanueva y Los Planes de Renderos
Adaptado de (Google Earth 2015)

Atmósferas marinas: Costa de El Salvador

La Ley de Medio Ambiente de la República de El Salvador en su Artículo 5 define a la Zona Costero- Marina como: “La franja costera comprendida dentro de los primeros 20 kilómetros que va desde la línea costera tierra adentro y la zona marina en el área que comprende al mar abierto, desde cero a 100 metros de profundidad, y en donde se distribuyen las especies de organismos del fondo marino” (Ley del Medio Ambiente de El Salvador 1998).

La línea de costa de El Salvador tiene una longitud de 321 kilómetros desde el Río Paz frontera con Guatemala hasta el Golfo de Fonseca compartido con Honduras y Nicaragua. La cordillera del Bálsamo, la sierra de Jucuarán, y el volcán de Conchagua,

dividen el paisaje costero en seis secciones de oeste a este (DGOA-Oceanografía).

Estas son:

1. La planicie costera de Occidente se extiende entre el estuario del Río Paz y Punta Remedios.
2. La costa acantilada asociada a la cordillera del Bálsamo se extiende entre Acajutla y La Libertad.
3. La planicie costera Central se extiende entre La Libertad y Playa El Espino.
4. La costa acantilada asociada a la sierra de Jucuarán se extiende entre Playa El Espino y Playa el Cuco.
5. La planicie costera Oriental entre playa el Cuco y Punta Amapala.
6. La costa del golfo de Fonseca entre punta Amapala y el estuario del Río Goascorán.

Las secciones de la línea de costa de El Salvador descritas anteriormente son mostradas en la Figura 4.20.



Figura 4.20 Línea de Costa de El Salvador
Adaptado de (Google Earth 2015)

Para realizar el monitoreo de corrosión atmosférica en la costa salvadoreña, se buscaron sitios que fueran accesibles, representativos y seguros. Para ello se buscó un lugar donde se llevaran a cabo procesos industriales, un lugar donde se tuviera asentamiento urbano sin actividad industrial y un tercer sitio costero con actividad rural.

Se obtuvo el apoyo en una empresa de fertilizantes ubicada en el Puerto de Acajutla, municipio de Acajutla en el Departamento de Sonsonate, al occidente del país, que es

la puerta de entrada de la mayor cantidad de mercancía que circula en el territorio nacional y donde se llevan a cabo actividades industriales como generación de energía termoeléctrica, almacenamiento y distribución de combustible e industria química y agroquímica. Se estima que en 2014, la población del municipio de Acajutla era de 57235 habitantes (DIGESTYC).

La atmósfera marina urbana fue monitoreada en el complejo residencial “San Blas” que se encuentra en el Departamento de La Libertad en la zona central del país, a 5 km al oeste de la ciudad de La Libertad, con una población estimada para 2014 de 40251 habitantes (DIGESTYC) y cuya principal actividad productiva es el turismo y la agricultura. El complejo se sitúa sobre la Carretera “El Litoral” (CA-2) que es una de las vías primarias, turística y comercial, más importantes del país, ya que atraviesa todo el litoral salvadoreño y es una ruta para el transporte de mercancías desde el Puerto de Acajutla hacia la zona central, paracentral y oriental del país.

Para realizar el monitoreo en una atmósfera marina de tipo rural, la estación de ensayo fue colocada en un terreno privado en la Playa “La Puntilla” localizada en el Departamento de La Paz, en la zona paracentral del país. La playa se encuentra a unos 2 kilómetros al oeste de la desembocadura del Río Lempa, el más caudaloso de El Salvador, a 9 km al sureste de la ciudad San Luis La Herradura, con una población estimada de 22964 habitantes en 2014 (DIGESTYC) y cuya principal actividad productiva es la agricultura. La playa es recorrida por el Bulevar Costa del sol, que es una carretera secundaria de ruta turística.

Los tres sitios para realizar el ensayo de corrosión en atmósfera marina, descritos anteriormente, son mostrados en el mapa presentado en la Figura 4.21.

Las estaciones meteorológicas más cercanas a estos tres sitios son mostradas en la Figura 4.22 con puntos rojos y texto amarillo; la estación más cercana a Acajutla es la estación Acajutla, a San Blas es Procafé y a La Puntilla la estación Providencia. No se cuenta con datos de calidad del aire ni de flujo vehicular.



Figura 4.21 Sitios para realizar el monitoreo de la corrosión en atmósferas marinas: Puerto de Acajutla, Complejo residencial San Blas, Playa La Puntilla.
Adaptado de (Google Earth 2015)

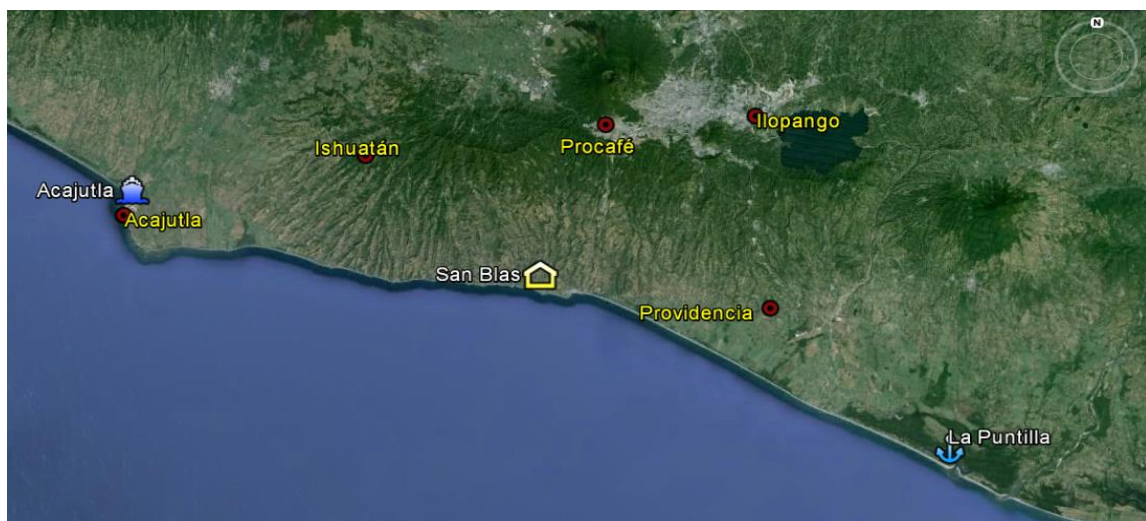


Figura 4.22 Estaciones meteorológicas cercanas a Acajutla, San Blas y La Puntilla
Adaptado de (Google Earth 2015)

Los catorce sitios, previamente descritos, donde se ubicaron estaciones de ensayo para realizar el monitoreo de corrosión atmosférica en El Salvador son mostrados en la Figura 4.23.

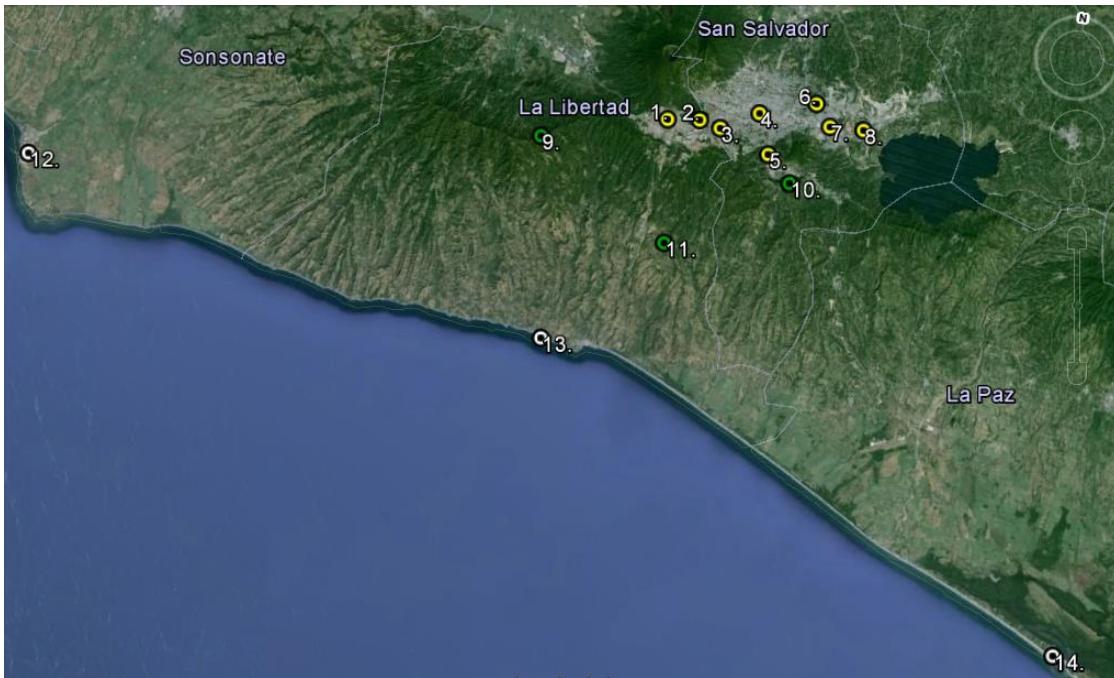


Figura 4.23 Sitios de monitoreo de la Corrosión Atmosférica en El Salvador
Adaptado de (Google Earth 2015)

En la Tabla 4.4 Sitios de monitoreo de corrosión atmosférica en El Salvador se identifican los sitios de monitoreo presentados en la Figura 4.23 y en el Anexo I se presenta la descripción de cada sitio de exposición.

Tabla 4.4 Sitios de monitoreo de corrosión atmosférica en El Salvador

Número en la Figura 4.23	Lugar	Tipo de atmósfera
1.	Santa Tecla	Urbana
2.	Parque del Bicentenario	Urbana
3.	UCA	Urbana
4.	UTEC	Urbana
5.	San Marcos	Urbana
6.	UDB	Urbana
7.	Soyapango	Industrial
8.	Bulevar del Ejército	Industrial
9.	Comasagua	Rural
10.	Los Planes	Rural
11.	Villanueva	Urbana
12.	Acajutla	Marina – Industrial
13.	San Blas	Marina - Urbana
14	La Puntilla	Marina (rural)

4.3 Montaje del experimento de monitoreo

El experimento de monitoreo consiste en exponer al ambiente láminas metálicas de masa y dimensiones conocidas, durante un tiempo determinado, permitiendo que estas sufran corrosión debido a su reacción con la atmósfera. Una vez transcurrido el tiempo de exposición, las láminas son retiradas, lavadas para eliminar el óxido formado y pesadas nuevamente, para calcular la masa que se ha perdido debido a la corrosión del metal.

La masa perdida por unidad de área expuesta y por el tiempo total que dura la exposición, se presenta como la tasa o velocidad de corrosión que sufre el metal por su exposición a determinado ambiente, la cual es expresada en $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$, es decir, los gramos de metal perdidos por metros cuadrados de superficie expuesta por cada año de exposición al ambiente; también puede expresarse en mmy^{-1} , es decir los milímetros de espesor perdidos por el metal (se emplea la densidad del material para hacer el cálculo) por año de exposición al ambiente.

Es deseable evaluar el comportamiento de la corrosión a lo largo del tiempo que dura el experimento, por lo cual desde un inicio se expone suficientes láminas al ambiente y va retirándose un número determinado de especímenes en períodos regulares de tiempo para evaluar la tasa de corrosión durante cada período. Al finalizar el experimento, se tiene datos de velocidad de corrosión, tanto de tiempos intermedios del experimento, como del tiempo total de exposición.

Para el montaje del experimento de monitoreo, se siguieron los lineamientos establecidos en las normas ASTM G1-03 "*Standard Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens*" y ASTM G50-10 "*Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals*", los cuales son descritos en las secciones siguientes:

Metales empleados

La norma ASTM G50 puede aplicarse para diferentes materiales metálicos que se deseen exponerse a una atmósfera en estudio. Para la presente investigación se empleó acero de bajo carbono laminado en frío y aluminio; para encontrar la composición de cada metal, estos fueron analizados por espectrometría de emisión óptica, método que permite determinar el porcentaje de cada elemento presente en

una muestra metálica y que consiste en detectar las longitudes de onda características emitidas por cada elemento cuando sus electrones son excitados mediante una chispa. Las composiciones de ambos metales son detalladas a continuación:

Acero al carbono

El análisis fue realizado por una empresa salvadoreña que se dedica a fundir metales ferrosos para su reutilización y que lleva a cabo esta técnica para el control de calidad de sus productos.

El análisis fue llevado a cabo en la muestra sin pulir y en la muestra pulida; los resultados de cada caso son presentados en la Tabla 4.5, así como el promedio de ambos análisis.

Como puede verse, el contenido de carbono en la muestra es 0.0619%, por lo que se trata de acero de bajo carbono, de acuerdo a lo presentado en la sección 1.2.3.

Tabla 4.5 Composición de la lámina de acero al carbono empleada en la investigación*

Elemento	Lámina sin pulir	Lámina pulida	% Promedio
Hierro	99.4800	99.4900	99.4850
Carbono	0.0634	0.0603	0.0619
Carbono equivalente	0.1210	0.1170	0.1190
Manganeso	0.3320	0.3310	0.3315
Fósforo	0.0166	0.0153	0.0160
Azufre	0.0103	0.0077	0.0090
Silicio	0.0134	0.0107	0.0121
Cobre	0.0107	0.0104	0.0106
Niobio	0.0000	0.0000	0.0000
Vanadio	0.0000	0.0000	0.0000
Molibdeno	0.0034	0.0035	0.0035
Aluminio	0.0272	0.0265	0.0269
Níquel	0.0118	0.0112	0.0115
Estaño	0.0064	0.0028	0.0046
Cromo	0.0124	0.0121	0.0123
Cobalto	0.0020	0.0023	0.0022
Titanio	0.0025	0.0023	0.0024
Wolframio	0.0092	0.0105	0.0099
Plomo	0.0000	0.000	0.0000

*Adaptada del Análisis realizado por espectrometría de emisión óptica por la empresa CORINCA S.A. de C.V.

Aluminio

El metal fue analizado en el laboratorio de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Los resultados de cada una de las seis réplicas analizadas, así como el promedio de los mismos, son mostrados en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Composición de la lámina de aluminio empleada en la investigación*

Elemento	% réplica 1	% réplica 2	% réplica 3	% réplica 4	% réplica 5	% réplica 6	% Promedio
Aluminio	99.000	99.100	99.100	99.100	99.000	99.000	99.050
Magnesio	0.030	0.031	0.032	0.031	0.030	0.030	0.031
Cinc	0.048	0.034	0.030	0.029	0.038	0.039	0.036
Silicio	0.199	0.189	0.191	0.180	0.201	0.214	0.196
Hierro	0.278	0.237	0.246	0.228	0.280	0.292	0.260
Cobre	0.087	0.098	0.098	0.097	0.099	0.095	0.096
Manganeso	0.181	0.174	0.173	0.177	0.177	0.170	0.175
Niobio	0.016	0.009	0.011	0.009	0.011	0.011	0.011
Vanadio	0.017	0.020	0.020	0.020	0.018	0.017	0.019
Cromo	0.014	0.015	0.015	0.015	0.014	0.014	0.015
Titanio	0.026	0.027	0.026	0.026	0.024	0.024	0.026
Estaño	0.028	0.056	0.059	0.046	0.039	0.024	0.042
Plomo	0.024	0.020	0.022	0.023	0.027	0.026	0.024

*Adaptada del Análisis realizado por espectrometría de emisión óptica por la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El aluminio empleado en la investigación contiene más de 99 % de aluminio, por lo que se clasifica como aluminio serie 1000, de acuerdo a lo presentado en la sección 1.2.3.

Tiempo para realizar el ensayo

La norma ASTM G50 recomienda tiempos de exposición de los especímenes a la atmósfera de 1, 2, 4, 8 y hasta 16 años, sugiriendo realizar evaluaciones del avance de la corrosión en períodos regulares de tiempo. La norma también sugiere que a menos que quiera obtenerse datos de las etapas tempranas del monitoreo, los especímenes no deberían retirarse hasta completarse un año de exposición. Debido a que la presente investigación fue programada para evaluar la corrosión durante un año, se optó por retirar especímenes cada tres meses y evaluar el avance del fenómeno en ese período de tiempo.

Número de réplicas

Para lograr resultados confiables, la Norma ASTM G50 sugiere que se exponga como mínimo tres réplicas por cada una de las remociones programadas. En el presente estudio se optó por exponer cuatro réplicas, tres para evaluar la tasa de corrosión y dejar una de ellas para realizar otras evaluaciones, hacer fotografías y para comparaciones posteriores.

Cabe mencionar que de las láminas retiradas a los tres meses se calculó la tasa de corrosión de las cuatro réplicas, mientras que de las láminas retiradas a los seis, nueve y doce meses se calculó la tasa de corrosión de tres réplicas y se dejó la cuarta réplica para hacer otras evaluaciones.

Número de especímenes

El número total de especímenes a exponer depende del tiempo que dure el monitoreo, de los tiempos programados para la remoción y del número de réplicas que se empleará. Como la exposición fue de doce meses, con tiempo de remoción de tres meses y cuatro réplicas en cada oportunidad, el número total de especímenes fue 16 por cada uno de los metales en estudio.

Dimensiones de los especímenes

Tal como lo sugiere la norma, los especímenes eran láminas del metal correspondiente con dimensiones de 100 mm x 150 mm (10 cm x 15 cm) con un espesor de 1.15 mm (0.115 cm) para el acero al carbono y 1.75 mm (0.175 cm) para el aluminio.

Racks de monitoreo

Los racks de monitoreo o estaciones de ensayo fueron construidos de acuerdo a lo sugerido por la Norma ASTM G50. Como material se empleó madera de cedro curada y barnizada para protegerla de la intemperie. Las estructuras de madera estaban conformadas por un panel donde iban sujetos los especímenes metálicos y la base para sujetar el panel. Las dimensiones del panel son mostradas en la Figura 4.24.

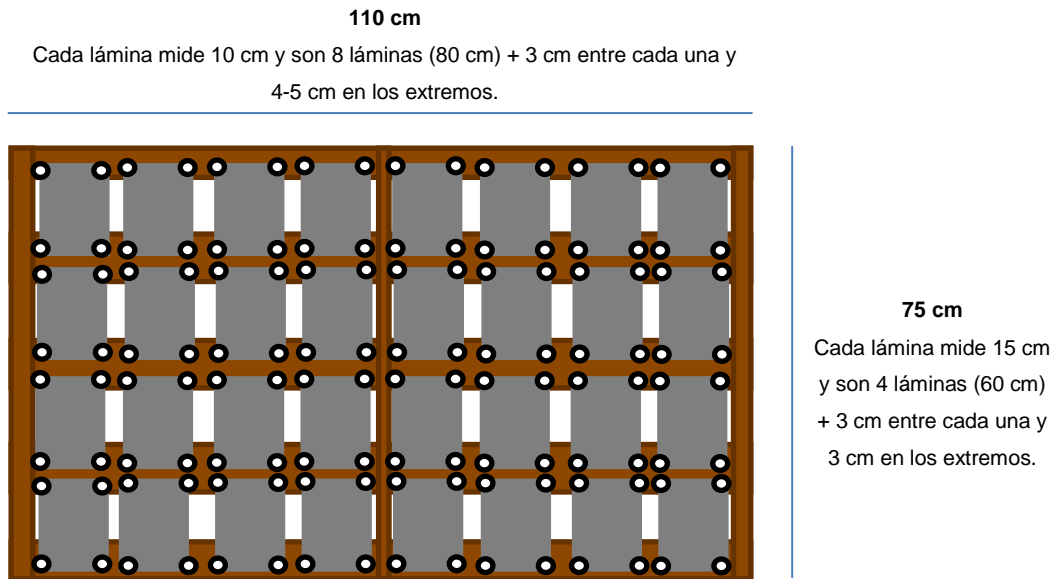


Figura 4.25 Dimensiones del panel para sujetar los especímenes

La base para sujetar el panel debía construirse de tal manera que los especímenes que quedarán a menor altura estuvieran a 80 cm del suelo (la norma sugiere al menos 76 cm) y que el panel fuera expuesto a un ángulo de 30° de la horizontal, ya que la mayoría de datos sobre corrosión atmosférica publicados lo hacen a dicho ángulo. Las dimensiones de la base se muestran en la Figura 4.25.

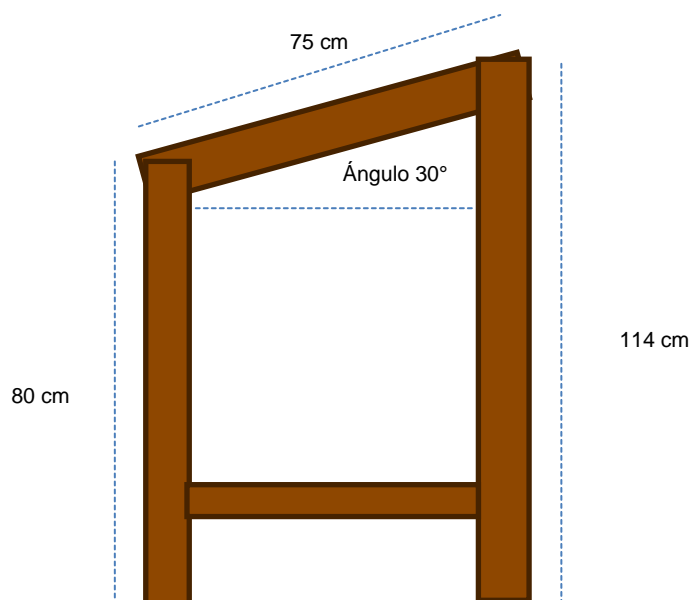


Figura 4.26 Dimensiones de la base de madera para sujetar el panel

En la Figura 4.27 se muestra un rack de monitoreo ya montado en uno de los sitio de exposición.



Figura 4.27 Rack de monitoreo montado

4.4 Preparación de los especímenes para el ensayo

Previo a la exposición de los especímenes en el campo, fue necesario realizar la preparación de las láminas, lo cual consistió en los pasos descritos a continuación:

Corte

Los materiales adquiridos para llevar a cabo el experimento de monitoreo fueron:

Láminas de acero de bajo carbono laminado en frío de 2.0 x 1.0 x 0.001 m (200 x 100 x 0.11 cm)

Láminas de aluminio de 0.91 x 1.83 x 0.0017 m (91 x 183 x 0.17 cm)

Debido a que los especímenes para la exposición debían tener dimensiones de 10 x 15 cm, las láminas fueron cortadas con el tamaño requerido. Para ello se utilizó:

Pulidora angular para cortar metal, marca Black and Decker

Discos de corte de 22.86 x 0.32 cm (9" x 1/8")

Cizalla para cortar láminas metálicas, marca Somar

No. 5 Modular con capacidad de 5 mm para corte

Pulido

Las láminas fueron pulidas para eliminar suciedad o rastros de óxido, empleando una lijadora eléctrica y dos tipos de abrasivos (papel lija) hasta obtener una superficie lisa y libre de óxido, mientras que el aluminio por ser un material más delicado y susceptible de rayarse con facilidad, fue pulido empleando un abrasivo líquido (rubbing), el cual

fue removido empleando toallas de papel que no dejaban mota en la superficie de la lámina.

El equipo y materiales empleados en el pulido de los especímenes fueron:

Láminas de acero al carbono

Lijadora orbital ¼", marca Skil

Lija 320 grits

Lija 600 grit

Guantes de poliuretano

Respirador para partículas 3M VFlex™ 9105

Gafas de protección

Láminas de aluminio

Rubbing (abrasivo líquido) corriente

Toallas de papel lavables

Guantes de látex

Obtención de dimensiones

Las láminas pulidas fueron medidas para obtener las dimensiones exactas y precisas de largo, ancho y espesor, que serían luego utilizadas para calcular la superficie de la lámina expuesta al ambiente. El equipo empleado para medir las dimensiones de cada espécimen fue un calibrador, vernier o pie de rey con un rango de medición de 0 a 20 cm y escala mínima de 0.005 cm o 0.05 mm.

Desengrase

Una vez se tenían las láminas libres de polvo y óxido, se procedió a lavarlas con acetona calidad industrial para eliminar rastros de grasa antes de proceder a pesarlas.

Los detalles del reactivo empleado son los siguientes:

Acetona Industrial ((CH₃)₂CO)

Importada por Droguería y Laboratorios Falmar (www.falmar.biz)

Preparada en mayo 2013, con fecha de vencimiento en mayo 2016

Identificación de las láminas

Los especímenes fueron reconocidos con una designación única durante todo el experimento. Las láminas no fueron marcadas o grabadas, sino que la identificación correspondía a la ubicación de la misma en el marco del rack.

Esta identificación constaba de dos números, separados por un punto (por ejemplo, 1.1), que iban acorde con la fila y la columna en que se ubicaría la lámina en el marco del rack, el cual estaba dividido en cuatro filas y ocho columnas; en las primeras cuatro columnas se situaría a las láminas de acero al carbono y en las siguientes cuatro, las de aluminio.

El primer número correspondía a la fila e indicaba también si la lámina se retiraría en 3 meses (1), en seis meses (2), en nueve meses (3) o en doce meses (4). El segundo dígito correspondía al número de réplica correspondiente.

Por ejemplo, la lámina del lado izquierdo identificada como 2.3 era de acero al carbono, sería retirada luego de seis meses de exposición y correspondía a la réplica número tres. La lámina del lado derecho identificada como 2.3 era de aluminio, sería retirada luego de seis meses de exposición y era la tercera réplica de ese set. En la Figura 4.28 se muestra como fueron identificadas cada una de las láminas en los racks.

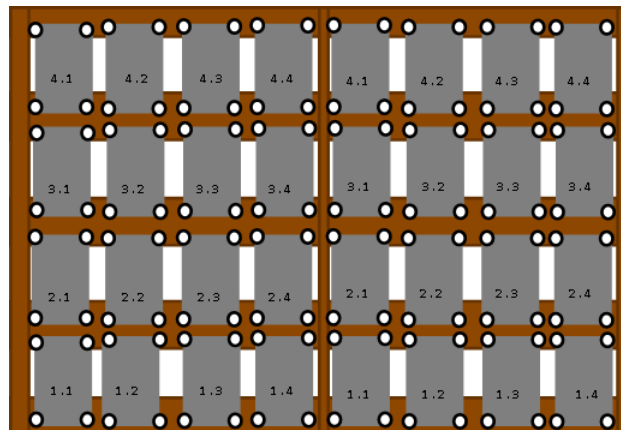


Figura 4.28 Identificación de las láminas en los racks

Pesado de las láminas

Una vez limpias, medidas y desengrasadas, las láminas fueron pesadas antes de proceder a ubicarlas en el rack de monitoreo, siguiendo la identificación descrita anteriormente; para realizar la pesada se empleó la balanza analítica digital que se muestra y describe en la Figura 4.28. En la misma figura puede verse la manera como eran pesadas las láminas.



Balanza Analítica Digital Marca AND
Modelo HR-300i, No. de serie 15202493
Rango de medición de 0-320 g
Escala mínima 0.0001 g
Calibrada el 31 de enero de 2014
A 24°C y HR 45 %
Con patrones: Juego de masas con
certificado SMM-004e/13

Figura 4.29 Balanza Analítica Digital empleada en la investigación

4.5 Montaje de las láminas en los racks

Las probetas limpias, medidas y pesadas fueron colocadas en los racks de monitoreo, siendo sujetadas con deslizadores de cabeza plástica de 2.00 cm de diámetro con clavo de acero inoxidable, los cuales eran ensamblados a una pieza circular de poliuretano de 2.20 cm de diámetro x 0.20 cm de espesor, que funciona como aislante cuando la lámina es sujeta al marco, tal como se muestran en la Figura 4.30.



Figura 4.30 Deslizadores con cabeza de plástico y piezas de poliuretano

Las láminas fueron clavadas al marco empleando un martillo con cabeza de goma y dispuestas en el rack según el orden explicado en la sección “identificación de las láminas”. En la Figura 4.31 se muestra como fueron dispuestas las láminas en los racks.



Figura 4.31 Disposición de las láminas en los racks

4.6 Ubicación de los racks en los sitios de monitoreo

La ubicación de los racks en el sitio de exposición se realizó fijando en el suelo, cuando era posible, barras de acero para sujetar la estructura de madera o atando la misma a una base existente en el lugar; luego, los racks eran sujetos con cuerdas para evitar que fueran derribados por el viento. Debido a que El Salvador se encuentra en el hemisferio norte, los racks se ubicaron viendo al sur y así recibiría, a lo largo del año, más tiempo de luz solar. La forma de fijar los racks en los sitios de monitoreo es mostrada en la Figura 4.32.



Figura 4.32 Racks siendo sujetos y asegurados en los sitios de monitoreo

4.7 Retiro de los especímenes

Como ya se había mencionado en la sección “Diseño del experimento”, debían retirarse cuatro láminas de hierro y cuatro láminas de aluminio cada tres meses, para ser analizadas en el laboratorio y evaluar el comportamiento de la corrosión cada tres meses.

Para retirar las láminas se empujaba el sujetador y una vez liberados los especímenes, estas eran envueltas en papel e identificadas. En la Figura 4.33 puede verse la forma de retirar las láminas del rack.

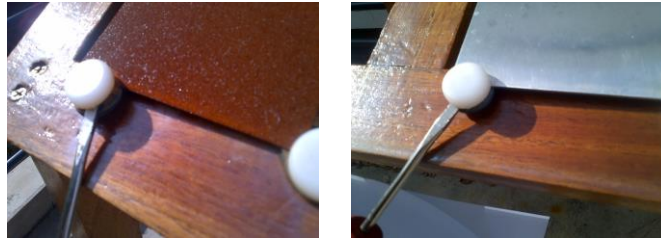


Figura 4.33 Retiro de las láminas

El orden seguido para el retiro de las láminas es mostrado en la Figura 4.34.



Especímenes al inicio del monitoreo



Primera remoción de especímenes (tres meses)



Segunda remoción de especímenes (seis meses)



Tercera remoción de especímenes (nueve meses)

Figura 4.34 Orden en que fueron retiradas las láminas durante el monitoreo

4.8 Limpieza de los especímenes posterior a la exposición

De acuerdo a la Norma ASTM G1-03, la limpieza de los especímenes posterior a la exposición puede hacerse de forma mecánica, química y electrolítica. Para la presente investigación, las láminas de acero al carbono fueron sometidas a una limpieza mecánica para eliminar el óxido superficial y más voluminoso, seguido por sucesivos

lavados químicos para eliminar el óxido adherido a la superficie; las láminas de aluminio fueron inicialmente lavadas con agua y jabón para eliminar el polvo y la suciedad y posteriormente sometidas a lavados químicos para eliminar el óxido adherido a la superficie.

A continuación se describe el procedimiento llevado a cabo:

Limpieza mecánica de las láminas de acero al carbono

El lijado de las láminas para la eliminación del óxido superficial, previo al lavado químico, se realizó utilizando el siguiente equipo y materiales:

- Lijadora orbital ¼", marca Skil
- Lija 50 grits
- Lija 100 grit
- Guantes de poliuretano
- Respirador para partículas 3M VFlex™ 9105
- Gafas de protección

Las láminas corroídas se pesaban para encontrar la cantidad de óxido que adherido a la superficie, luego se lijaban para eliminar el óxido superficial y eran nuevamente pesadas antes de ser sometidas a la limpieza química. En la Figura 4.35 se muestra la apariencia de una lámina cubierta de óxido, luego de una exposición de tres meses al ambiente y esta misma lámina después de haber sido pulida.

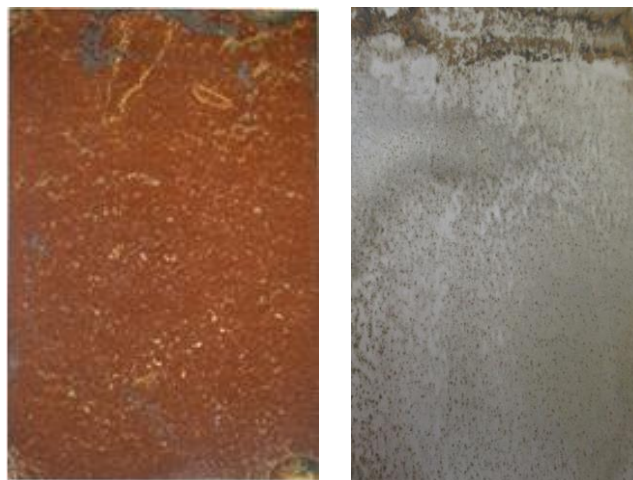


Figura 4.35 Lámina antes y después de ser sometida a limpieza mecánica (pulido)

Limpieza química de las láminas

Para lavar el óxido adherido a la superficie de las láminas se les realizó lavados químicos empleando los siguientes reactivos:

Agua Calidad reactivo Tipo IV: Conductividad 1.90 -2.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ - pH 7.00 -7.15

Preparada por destilación en la Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas

Para el lavado químico del acero al carbono se utilizó la “solución de limpieza química” que es el reactivo con la designación C.3.1 para hierro y acero (ASTM G1-03 Reaprobada en 2011), que se prepara como sigue:

1000 mL de Ácido Clorhídrico, gravedad específica 1.19

20 g de óxido de antimonio (III)

50 g de cloruro de estaño (II)

Para la preparación de la solución de limpieza química mencionada, se usó los siguientes reactivos:

Ácido clorhídrico (HCl) AR, Marca Fisher Scientific

Certificado por la American Chemical Society (Certified ACS Plus)

Gravedad específica 1.19; pureza 37.1 % m/m o 12.1 N

Cloruro de estaño (II) (SnCl_2) AR, Marca JT Baker

Certificado por la American Chemical Society (Certified ACS Plus)

Pureza 98.0-103.0%

Óxido de antimonio (III) (Sb_2O_3) AR, Marca JT Baker

Certificado por la American Chemical Society (Certified ACS Plus)

Para el lavado químico del aluminio se empleó el reactivo con la designación C.1.2 para aluminio y aleaciones de aluminio (ASTM G1-03 Reaprobada en 2011), que consiste en ácido nítrico de gravedad específica 1.42. Las especificaciones del reactivo empleado son las siguientes:

Ácido nítrico (HNO_3) AR Marca Fisher Scientific

Certificado por la American Chemical Society (Certified ACS Plus)

Gravedad específica 1.42; pureza 69.3 % m/m o 15.8 N

El equipo empleado realizar la pesada y observación de los especímenes después de cada lavado fue el siguiente:

Balanza Analítica digital, marca AND, modelo HR-300i, No. de serie 15202493

Rango de medición de 0 a 320 gramos, con escala mínima 0.0001 g

Calibrada el 31 de enero de 2014 a 24°C y HR 45 %

Con patrones: Juego de masas con certificado SMM-004e/13

Microscopio estereoscópico, marca American Optical

Resolución 0.7x a 3.0x

Cámara digital de 16 mega pixeles, marca Canon

Horno de convección, marca Blue M

Secador de aire caliente

Desecadores

Láminas de acero al carbono

Con el fin de validar el procedimiento de limpieza, los lavados realizados a las láminas de acero al carbono expuestas a tres y seis meses fueron realizados de la siguiente manera:

Las láminas eran sumergidas en la solución de limpieza química durante un minuto, luego eran lavadas con agua de grifo y enjuagadas con agua destilada caliente. Posteriormente eran secadas con aire caliente o en la estufa de convección a 105°C, se dejaban enfriar, eran observadas al microscopio estereoscópico y finalmente pesadas en la balanza analítica digital. Esto constituía un “ciclo de limpieza química”.

Los “ciclos de limpieza química” eran repetidos tantas veces como fuera necesario, hasta que, al ser observadas al microscopio estereoscópico, ya no se tenían rastros de óxido en las láminas. En la Figura 4.36 se observa como los productos de corrosión van desapareciendo a medida que se realizan los lavados químicos; las imágenes de la izquierda son fotografías de primer plano de las láminas y las de la derecha son vistas al microscopio estereoscópico. El ejemplo mostrado es para una lámina que requirió de cinco ciclos de lavado químico para eliminar todos los productos de corrosión.

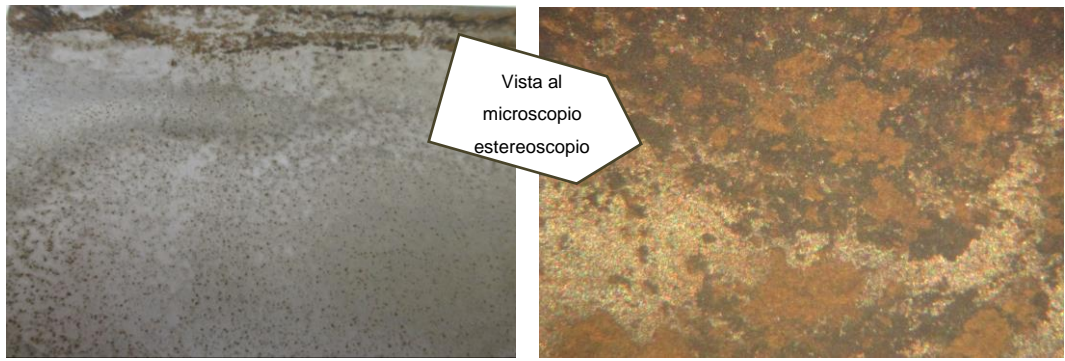


Lámina antes del primer lavado químico

Resolución: 3.0x +8.0x (cámara digital)

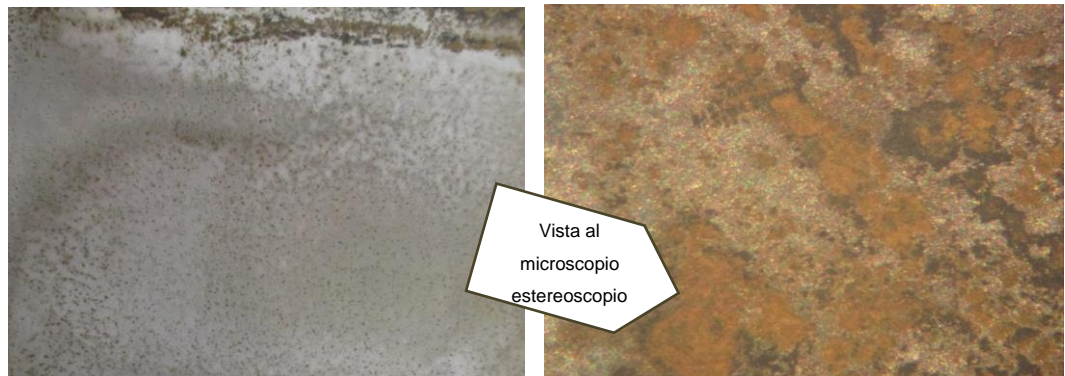


Lámina después del primer lavado químico

Resolución: 3.0x +8.0x (cámara digital)

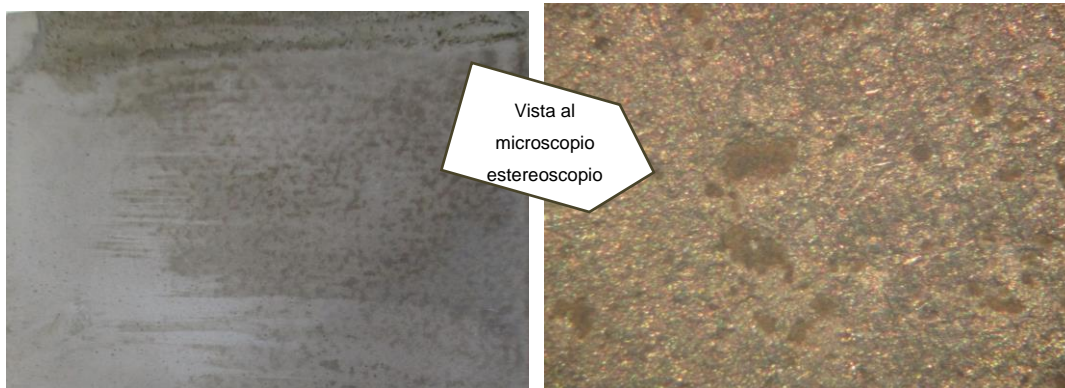


Lámina después del tercer lavado químico

Resolución: 3.0x +8.0x (cámara digital)

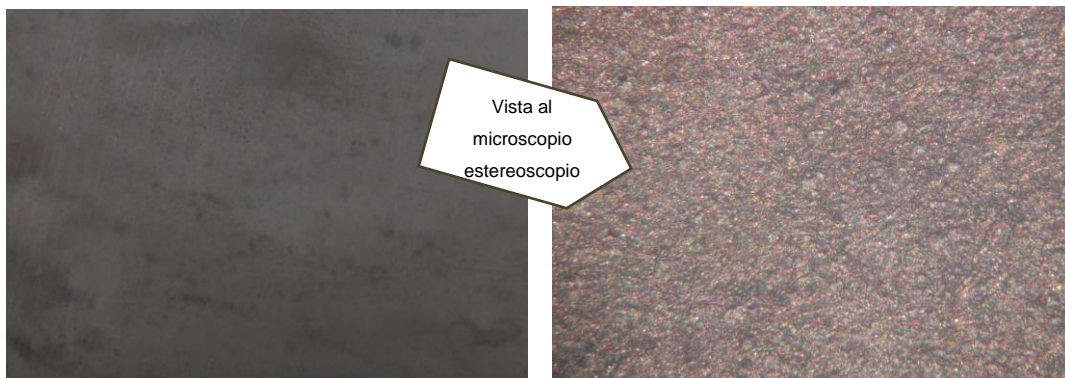


Lámina después del quinto lavado químico

Resolución: 3.0x +8.0x (cámara digital)

Figura 4.36 Vista de los productos de corrosión antes y después del lavado químico

Es necesario aclarar que mientras algunas láminas requerían de dos ciclos de lavado, hubo algunas que requirieron hasta de veintiséis ciclos antes de quedar limpias de productos de corrosión; esto dependía del tipo de ambiente al que habían estado expuestas (rural, urbano, industrial o marino). Incluso hubo réplicas de una misma muestra que requirieron de diferente número de ciclos de lavado.

Después de cada ciclo de lavado se registraba la masa de cada espécimen, para poder así calcular la pérdida de masa de la lámina; este último dato se calculaba restando la masa inicial (antes de la exposición) menos la masa registrada después de cada ciclo de lavado.

En la Tabla 4.7 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos en réplicas que requirieron de cinco ciclos de lavado químico para eliminar todos los productos de corrosión, aunque siempre se realizaba un ciclo adicional de limpieza. En la misma tabla se observa que también se calculaba la diferencia de masa entre cada ciclo de lavado.

Se graficó la pérdida de masa sufrida por cada espécimen (masa antes de la exposición – masa después de cada ciclo de lavado) como una función de cada ciclo de lavado. Se observó que a medida que se realizaban los ciclos de lavado, la pendiente (diferencia de masa entre cada ciclo de lavado) iba acercándose cada vez más a la horizontal. En la Figura 4.37 se presenta como ejemplo la gráfica con los datos de la Tabla 4.7 se muestra el comportamiento de pérdida de masa de cada una de las réplicas y el promedio de las mismas.

Como ya se ha dicho, una vez ya no se observaba productos de corrosión en las láminas, se realizaba un ciclo adicional de lavado; la diferencia de masa obtenida entre el mencionado ciclo adicional y el ciclo anterior, siempre era menor a 0.015 g, tal como se observa en la Tabla 4.7 (valores resaltados en naranja) y corresponde a la pendiente entre ambos ciclos de lavado.

Como “masa final” de la réplica se toma el penúltimo valor obtenido, es decir, cuando además de no haber productos de corrosión, la pendiente entre este y el siguiente valor es menor a 0.015. En el Anexo II se presenta las gráficas de los lavados

químicos realizados a las láminas de acero al carbono expuestas durante tres y seis meses en cada sitio de monitoreo.

Tabla 4.7 Datos de los ciclos de lavado químico de las láminas de acero al carbono

réplica	masa inicial (g) (antes de la exposición)	masa de lámina pulida (g)	masa después de 1er lavado (g)	masa después de 2do lavado (g)	masa después de 3er lavado (g)	masa después de 4to lavado (g)	masa después de 5to lavado (g)	masa después de 6to lavado (g)
1.1	124.8383	122.9402	122.3755	122.1982	122.1201	122.0784	122.0526	122.0402
1.2	126.3211	124.8442	124.0865	123.8093	123.7216	123.6670	123.6380	123.6242
1.3	128.0677	126.7216	125.8807	125.6265	125.5263	125.4754	125.4478	125.4346
1.4	127.8482	126.4032	125.5152	125.2483	125.1114	125.0591	125.0410	125.0283
réplica	masa inicial (g) (antes de la exposición)	Pérdida de masa (g) después de cada ciclo de lavado (masa inicial – masa después de cada ciclo de lavado)						
		0	1	2	3	4	5	6
		por pulido	1er lavado	2do lavado	3er lavado	4to lavado	5to lavado	6to lavado
1.1	124.8383	1.8981	2.4628	2.6401	2.7182	2.7599	2.7857	2.7981
1.2	126.3211	1.4769	2.2346	2.5118	2.5995	2.6541	2.6831	2.6969
1.3	128.0677	1.3461	2.1870	2.4412	2.5414	2.5923	2.6199	2.6331
1.4	127.8482	1.4450	2.3330	2.5999	2.7368	2.7891	2.8072	2.8199
Promedio de pérdida de masa (g)		1.5415	2.3044	2.5483	2.6490	2.6989	2.7240	2.7370
réplica	Diferencia de masa entre cada ciclo de lavado (pendiente)							
	Entre pulido y 1er lavado	Entre 1er y 2do lavado	Entre 2do y 3er lavado	Entre 3er y 4to lavado	Entre 4to y 5to lavado	Entre 5to y 6to lavado		
	1.1	0.5647	0.1773	0.0781	0.0417	0.0258	0.0124	
	1.2	0.7577	0.2772	0.0877	0.0546	0.0290	0.0138	
	1.3	0.8409	0.2542	0.1002	0.0509	0.0276	0.0132	
	1.4	0.8880	0.2669	0.1369	0.0523	0.0181	0.0127	

Debido a que con cada ciclo de limpieza se pierde además algo del metal base, fue necesario llevar blancos. Para ello se trabajó con cuatro láminas que no fueron expuestas al ambiente y a las cuales se les realizó cinco ciclos de limpieza química de un minuto cada uno, obteniéndose los datos mostrados en la Tabla 4.8.

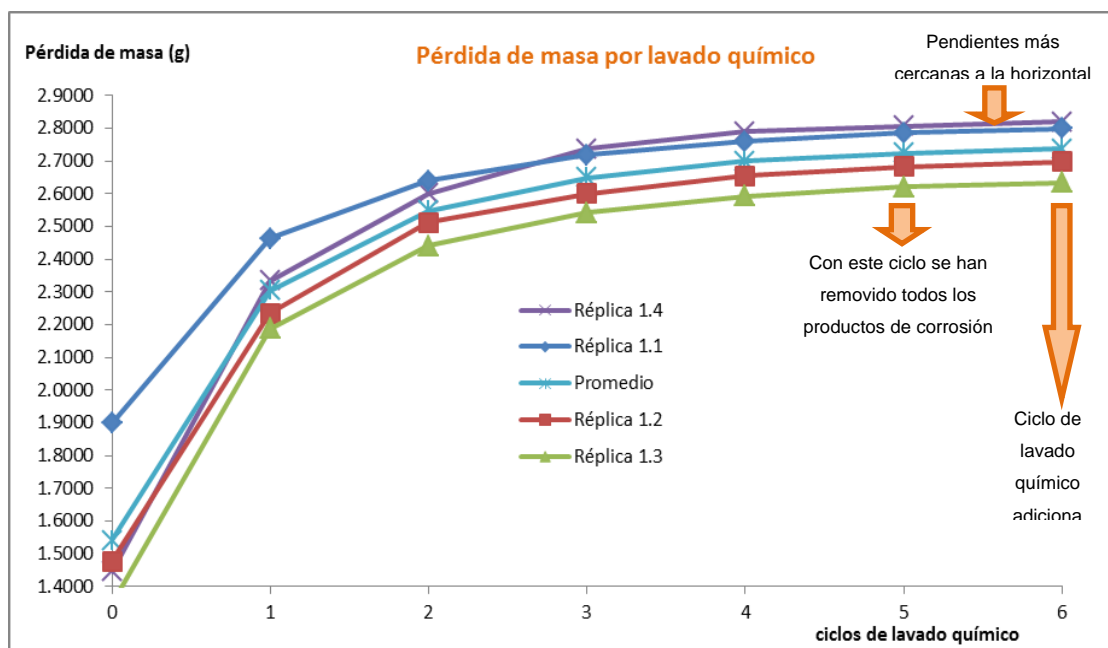


Figura 4.37 Ciclos de limpieza química versus pérdida de masa sufrida por los especímenes

Tabla 4.8 Datos obtenidos en los ciclos de lavado químico de los blancos

réplica	masa inicial (g)	masa después de 1er lavado (g)	masa después de 2do lavado (g)	masa después de 3er lavado (g)	masa después de 4to lavado (g)	masa después de 5to lavado (g)
1.1	127.9246	127.9200	127.9157	127.9122	127.9097	127.9080
1.2	127.4344	127.4302	127.4269	127.4241	127.4215	127.4201
1.3	125.7820	125.7766	125.7740	125.7714	125.7680	125.7641
1.4	127.2382	127.2355	127.2319	127.2282	127.2246	127.2212
		pérdida de masa (g) después de cada ciclo de lavado				
réplica		Entre masa inicial y 1er lavado	Entre 1er y 2do lavado	Entre 2do y 3er lavado	Entre 3er y 4to lavado	Entre 4to y 5to lavado
1.1		0.0046	0.0043	0.0035	0.0025	0.0017
1.2		0.0042	0.0033	0.0028	0.0026	0.0014
1.3		0.0054	0.0026	0.0026	0.0034	0.0039
1.4		0.0027	0.0036	0.0037	0.0036	0.0034
Promedio de pérdida de masa (g)		0.0042	0.0035	0.0032	0.0030	0.0026

De acuerdo a estos datos, se calculó que por cada ciclo de limpieza química de un minuto se pierde en promedio 0.0033 g de metal base, dato que fue posteriormente utilizado para realizar ajustes en el cálculo de la tasa de corrosión.

Una vez comprobada la tendencia seguida por la pérdida de masa durante el lavado químico, las láminas expuestas a nueve y doce meses fueron pesadas cada cinco ciclos si tenían poco óxido y cada diez ciclos para las más oxidadas, lo cual permitió realizar el procedimiento con mayor rapidez.

Láminas de aluminio

Las láminas de aluminio retiradas de campo fueron lavadas con agua de grifo y jabón con el fin de eliminar el polvo y la suciedad acumulada durante la exposición al ambiente. Luego fueron enjuagadas con agua destilada y secadas en el horno.

Al observar las láminas lavadas, podía notarse a simple vista el óxido de aluminio formado, el cual tiene aspecto blanquecino, dando a la superficie una apariencia opaca. En la Figura 4.37 puede verse la diferencia en el aspecto de una lámina de aluminio sin exponer al ambiente y láminas que fueron expuestas a la atmósfera marina de San Blas durante tres, seis, nueve y doce meses respectivamente. Puede notarse la pérdida de brillo sufrida por las láminas debido a la formación de óxido en la superficie.

Además de ser observadas, las láminas eran palpadas para identificar la formación del óxido, ya que este se halla adherido a la superficie y proporciona textura áspera a la lámina. Es importante mencionar que hubo sitios de monitoreo donde las láminas no sufrieron oxidación y su superficie se mantenía brillante y su textura seguía estando lisa.

Todas las láminas lavadas fueron pesadas para corroborar el aumento de masa debido a la oxidación, encontrándose que aquellas láminas que se mantenían brillantes y lisas habían sufrido aumentos no detectables de masa (menores a 0.0009 g, de acuerdo a la balanza utilizada). Aunque debe mencionarse que incluso en aquellas láminas donde la formación de óxido era notable a la vista y al tacto, el mayor aumento de masa encontrado fue de 0.3781 g, lo que representaba una ganancia de masa del 0.5609 % con respecto a la masa inicial de la lámina.



Figura 4.38 Comparación de lámina de aluminio sin exponer y láminas de aluminio expuestas a atmósfera marina durante tres, seis, nueve y doce meses respectivamente

El lavado químico consistía en sumergir las láminas en ácido nítrico durante un minuto, luego eran lavadas con agua de grifo y enjuagadas con agua destilada caliente. Posteriormente eran secadas con aire caliente o en la estufa de convección, se dejaban enfriar y eran pesadas en la balanza analítica digital. Al igual que con el acero al carbono, esto constituía un “ciclo de limpieza química”.

Los ciclos de limpieza eran repetidos hasta que la diferencia de masa entre el penúltimo y último lavado era menor o igual a 0.0010 g (menor masa que la balanza analítica puede medir confiablemente). En el caso de las láminas de aluminio, se requirió entre uno y siete lavados para limpiar las láminas. Al igual que con el acero al carbono, la “masa final” utilizada para realizar los cálculos posteriores, fue la masa obtenida con el penúltimo lavado. Debido a la pasivación que sufre el aluminio al reaccionar con el ácido nítrico, no se consideró la masa perdida por los lavados químicos.

4.9 Obtención de la Velocidad de Corrosión

La velocidad de corrosión fue obtenida como la pérdida de masa sufrida por el metal dividida entre el producto del área expuesta por el tiempo de exposición al ambiente (gramos x metros⁻² x año⁻¹) y como el espesor de material perdido entre el tiempo de exposición (milímetros x año⁻¹ y micrómetros x año⁻¹).

La pérdida de masa se calculó empleando la siguiente ecuación:

Dónde:

M = Pérdida de masa sufrida por la lámina debido a su exposición al ambiente en g

mi = Masa de la lámina antes de su exposición al ambiente en g

mf = Masa de la lámina después de los lavados químicos en g

mp = Masa de metal que se pierde debido a los lavados químicos en g (para acero al carbono)

mp se calcula:

$$mp: 0.0033 \text{ g} \times \text{No. de lavados}$$

El valor de 0.0033 g se debe a que en cada ciclo de lavado de un minuto se perdía esa masa de metal base, tal como se explicó en la sección 4.8.

El área expuesta fue calculada sumando las áreas de las seis caras de la lámina, y luego restando el área de las porciones de lámina no expuestas al ambiente las cuales se muestran en la Figura 4.39.

$$At = 2(l \times a) + 2(a \times e) + 2(l \times e)$$

Dónde:

At = Área total de las seis caras de la lámina en cm²

l = Largo (cm) a = Ancho (cm) e = Espesor (cm)

$$Ae = (At - Ane)$$

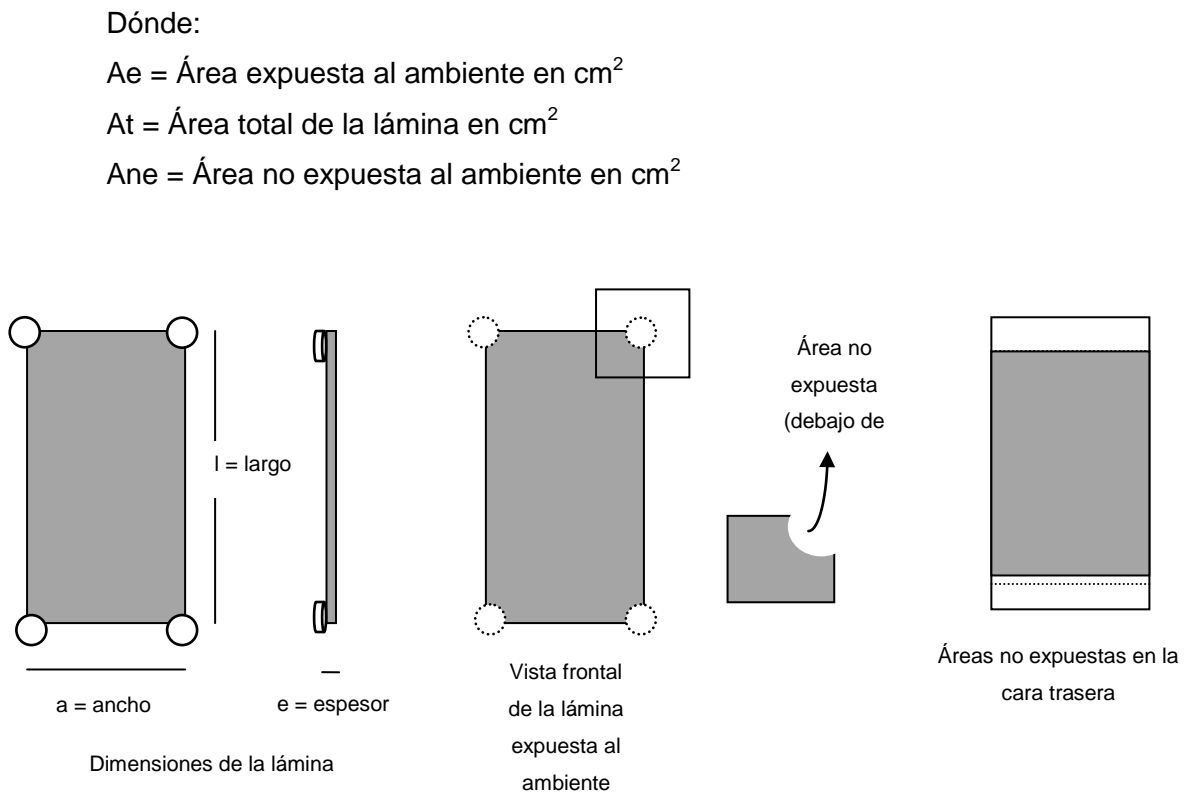


Figura 4.39 Dimensiones de las láminas y áreas no expuestas al ambiente

La tasa o velocidad de corrosión en masa por área por tiempo de exposición se calcula de acuerdo a lo siguiente:

$$v_c = \frac{M \times 10000}{A_e \times t}$$

Dónde:

v_c = Velocidad de corrosión en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$

M = Pérdida de masa sufrida por la lámina debido a su exposición al ambiente en g

A_e = Área de la lámina expuesta al ambiente en cm^2

t = Tiempo de exposición al ambiente en años

Se multiplica por 10000 para convertir cm^2 a m^2

La velocidad de corrosión como la pérdida de espesor por año de exposición se calcula teniendo en cuenta la densidad del metal, de acuerdo a:

$$v_c = \frac{M \times 10}{A_e \times D \times t}$$

Dónde:

v_c = Velocidad de corrosión en mm.año⁻¹ o mmy⁻¹

M = Pérdida de masa sufrida por la lámina debido a su exposición al ambiente en g

Ae = Área de la lámina expuesta al ambiente en cm²

D = Densidad del metal en g.cm⁻³

t = Tiempo de exposición al ambiente en años

Se multiplica por 10 para convertir cm a mm

Las densidades de los metales empleados fueron calculadas experimentalmente. La densidad del acero al carbono fue de **7.206 g/cm³** y para el aluminio se obtuvo **2.560 g/cm³**.

La velocidad de corrosión expresada en $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ se calcula de acuerdo a:

$$v_c = \frac{M \times 10000}{Ae \times D \times t}$$

Dónde:

v_c = Velocidad de corrosión en $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ o $\mu\text{m}\cdot\text{y}^{-1}$

M = Pérdida de masa sufrida por la lámina debido a su exposición al ambiente en g

Ae = Área de la lámina expuesta al ambiente en cm²

D = Densidad del metal en g.cm⁻³

t = Tiempo de exposición al ambiente en años

Se multiplica por 10000 para convertir cm a μm

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente apartado se presenta y discute los resultados obtenidos en el monitoreo de la corrosión del acero al carbono y el aluminio durante doce meses en diferentes tipos de atmósferas en El Salvador.

Para el acero al carbono se analizó las 4 réplicas en cada sitio a los tres meses de exposición, ya que se estaba comprobando el método de limpieza. Para seis meses, nueve y doce meses se analizó 3 réplicas en cada sitio.

Para cada resultado de las láminas de acero al carbono, se obtuvo el promedio de las 3 o 4 réplicas analizadas, la desviación estándar de los resultados y el coeficiente de variación. Si el coeficiente de variación era mayor que 10%, se optó por emplear la prueba de Q para decidir si aceptar o rechazar el dato.

Para el caso del aluminio se analizó tres réplicas a tres, seis, nueve y doce meses. Debido a que estos resultados presentaban una mayor dispersión que los del acero al carbono, se realizó la prueba de Q si el coeficiente de variación era mayor que 15 %. Lo anterior es presentado en el Anexo III.

5.1 Resultados del Acero al Carbono

Los resultados de velocidad de corrosión obtenidas a los tres, seis, nueve y doce meses en cada sitio de monitoreo son presentadas en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ en la Tabla 5.1 y en mmy^{-1} en la Tabla 5.2 mostradas a continuación.

Tabla 5.1 Velocidades de corrosión del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Santa Tecla	Urbana	88.1 ± 19.9	64.8 ± 8.3	52.8 ± 6.1	47.9 ± 4.5
Bicentenario*	Urbana	298.5 ± 10.4	193.3 ± 4.9**	-	-
UCA	Urbana	383.0 ± 12.4	338.1 ± 2.2	234.3 ± 2.6	193.4 ± 5.0
UTEC	Urbana	417.0 ± 17.4	301.2 ± 14.3	216.3 ± 6.6	175.7 ± 5.9
San Marcos	Urbana	260.5 ± 17.0	195.6 ± 17.2	122.0 ± 6.3	145.8 ± 5.5
UDB	Urbana	284.8 ± 39.3	217.0 ± 6.8	163.9 ± 5.3	110.4 ± 4.4

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en g.m ⁻² .año ⁻¹			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Soyapango	Industrial	443.7 ± 7.5	343.3 ± 14.8	242.8 ± 4.6	165.9 ± 5.0
Bulevar del Ejército	Industrial	378.4 ± 10.4	302.1 ± 7.2	214.8 ± 9.8	159.6 ± 2.9
Comasagua	Rural	133.4 ± 5.6	122.1 ± 11.9	106.9 ± 0.8	94.6 ± 3.4
Los Planes	Rural	205.2 ± 16.2	169.8 ± 7.3	129.5 ± 5.9	91.2 ± 2.1
Villanueva	Urbana	143.4 ± 11.6	127.4 ± 5.6	106.6 ± 8.0	87.9 ± 4.3
Acajutla	Industrial - marina	1250.9 ± 17.3	1050.2 ± 21.0	737.8 ± 19.3	573.8 ± 28.0
San Blas	Marina - Urbana	1575.9 ± 49.9	1457.0 ± 59.6	950.8 ± 3.2	716.5 ± 23.9
La Puntilla	Marina (rural)	394.4 ± 31.0	263.6 ± 21.2	212.8 ± 2.2	208.7 ± 4.4

Tabla 5.2 Velocidades de corrosión del acero al carbono en mmy⁻¹

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en mmy-1			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Santa Tecla	Urbana	0.012 ± 0.003	0.009 ± 0.001	0.007 ± 0.001	0.007 ± 0.001
Bicentenario*	Urbana	0.041 ± 0.001	0.027 ± 0.001	-	-
UCA	Urbana	0.053 ± 0.002	0.047 ± 0.000	0.033 ± 0.001	0.027 ± 0.001
UTEC	Urbana	0.058 ± 0.002	0.042 ± 0.002	0.030 ± 0.001	0.024 ± 0.001
San Marcos	Urbana	0.036 ± 0.002	0.027 ± 0.002	0.017 ± 0.001	0.020 ± 0.001
UDB	Urbana	0.040 ± 0.005	0.030 ± 0.001	0.023 ± 0.001	0.015 ± 0.001
Soyapango	Industrial	0.062 ± 0.001	0.048 ± 0.002	0.034 ± 0.001	0.023 ± 0.001
Bulevar del Ejército	Industrial	0.053 ± 0.001	0.042 ± 0.001	0.030 ± 0.001	0.022 ± 0.000
Comasagua	Rural	0.019 ± 0.001	0.017 ± 0.002	0.015 ± 0.000	0.013 ± 0.000
Los Planes	Rural	0.028 ± 0.002	0.024 ± 0.001	0.018 ± 0.001	0.013 ± 0.000
Villanueva	Urbana	0.020 ± 0.002	0.018 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.012 ± 0.001
Acajutla	Industrial - marina	0.174 ± 0.002	0.146 ± 0.003	0.102 ± 0.003	0.080 ± 0.004
San Blas	Marina - Urbana	0.219 ± 0.007	0.202 ± 0.008	0.132 ± 0.000	0.099 ± 0.003

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en mmy-1			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
La Puntilla	Marina (rural)	0.055 ± 0.004	0.037 ± 0.003	0.030 ± 0.000	0.029 ± 0.001

*En el caso del Parque del Bicentenario sólo logró monitorearse durante cinco meses, ya que las láminas fueron extraídas del rack por los visitantes al parque. ** Resultado a cinco meses de exposición.

En la Figura 5.1 se presenta graficada en barras las velocidades de corrosión del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$. Como puede verse, la tasa o velocidad de corrosión disminuye con el tiempo en trece de los catorce sitios, lo cual es debido a la capa de óxido que se forma en la superficie de las láminas y hace que la corrosión ocurra más lentamente, aunque no se detiene. Sólo en San Marcos se observa un aumento en la velocidad de corrosión del noveno al decimosegundo mes de exposición, lo cual puede deberse a un error aleatorio ocurrido durante el desarrollo del experimento.

5.1.1 Velocidades de corrosión en el AMSS (acero al carbono)

Para el análisis de las velocidades de corrosión en el AMSS se omitió el “Parque del Bicentenario”, ya que sólo logró monitorearse durante cinco meses, por lo que no puede realizarse la comparación con el resto de sitios.

Al evaluar el comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en el tiempo para cada sitio del AMSS, mostrado en la Figura 5.2, se observa que la corrosión disminuye en el tiempo para seis de los siete sitios, ya que en San Marcos se presentó un aumento en la tasa de corrosión de nueve a doce meses. En los gráficos se incluye la pendiente y el coeficiente de determinación con el fin de explicar más fácilmente el comportamiento de la corrosión durante el tiempo que duró el experimento, pero no se pretende buscar la forma de pronosticar valores de velocidad de corrosión.

El coeficiente de determinación R^2 representa la linealidad con la que se comporta la corrosión en el tiempo. Puede verse una tendencia prácticamente lineal, especialmente en la UDB, Soyapango y el Bulevar del Ejército, cuyos coeficientes de determinación son mayores a 0.990; en la UCA y la UTEC la tendencia es a disminuir, aunque no se observa la misma linealidad de los anteriores, teniéndose coeficientes de determinación de 0.968 y 0.958 respectivamente.

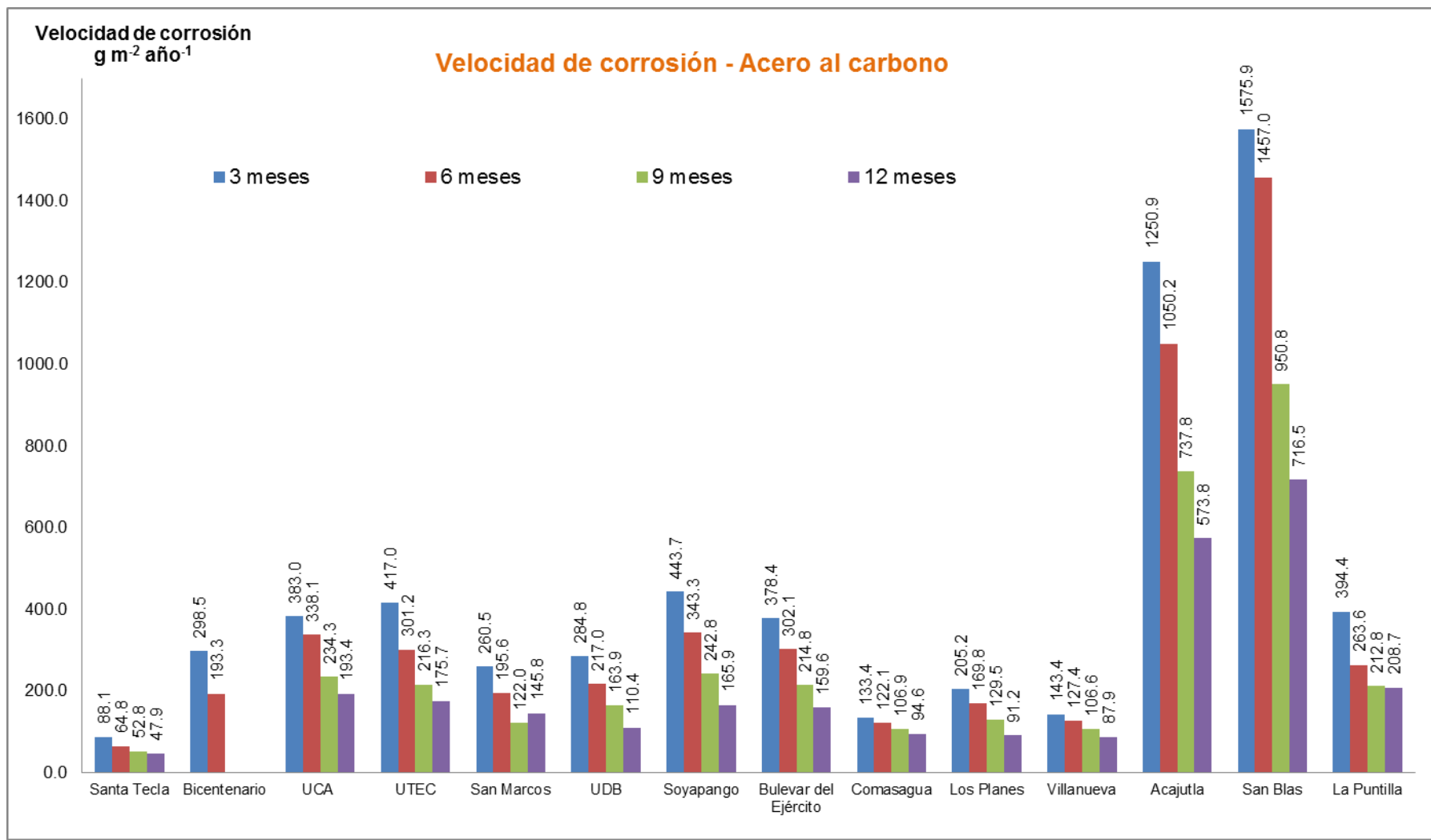


Figura 5.1 Velocidades de corrosión del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$

Santa Tecla presenta una linealidad de 0.921, mientras que San Marcos presenta un coeficiente de 0.775, ya que el comportamiento de este sitio difiere de lo esperado, puesto que de nueve a doce meses la tasa de corrosión presenta un aumento.

La pendiente representa la velocidad de desaceleración del fenómeno, lo cual puede interpretarse como la rapidez con la que se forma la capa de óxido que permite que la corrosión ocurra más lentamente. Puede verse que es Soyapango donde se tiene una mayor desaceleración, seguido de la UTEC, el Bulevar del Ejército y la UCA que son los sitios que presentan velocidades de corrosión mayores para el AMSS; Santa Tecla que es el sitio con la menor agresividad tiene la pendiente más suave de los siete sitios.

En la Figura 5.3 se presenta, en orden descendente, las velocidades de corrosión del AMSS para tres, seis, nueve y doce meses, donde puede verse que el sitio que presentó los valores mayores de corrosión fue Soyapango para tres, seis y nueve meses, mientras que la UCA tiene el valor más alto para doce meses ($193.4 \text{ gm}^{-2}\text{año}^{-1}$ o 0.0027 mmy^{-1}).

En segundo lugar se tiene la UTEC para tres y doce meses de exposición, siendo este valor de $175.7 \text{ gm}^{-2}\text{año}^{-1}$ o 0.0024 mmy^{-1} ; la UCA ocupa el segundo lugar para seis y nueve meses. La tercera tasa de corrosión corresponde a la UCA para tres meses, Bulevar del Ejército para seis meses, la UTEC para nueve meses y Soyapango para doce meses, con una velocidad de $165.9 \text{ g.m}^{-2}\text{.año}^{-1}$ o 0.023 mmy^{-1} . La cuarta posición corresponde al Bulevar del Ejército para tres y nueve meses, mientras que a seis meses esta posición la ocupa la UTEC; a doce meses se tiene al Bulevar del Ejército en la cuarta posición con $159.6 \text{ g.m}^{-2}\text{.año}^{-1}$ o 0.022 mmy^{-1} .

Los resultados de la UDB ocupan la quinta posición para tres, seis y nueve meses, mientras que para doce meses la ocupa San Marcos con valores de $145.8 \text{ g.m}^{-2}\text{.año}^{-1}$ o 0.020 mmy^{-1} .

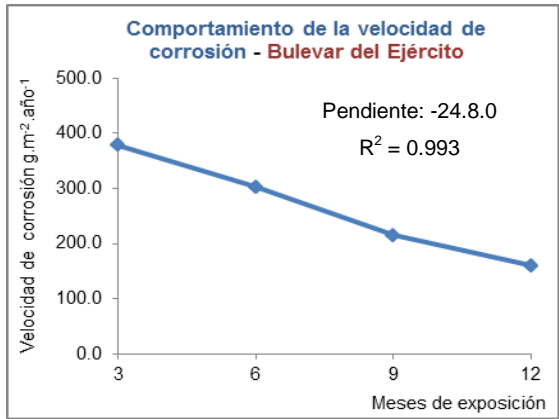
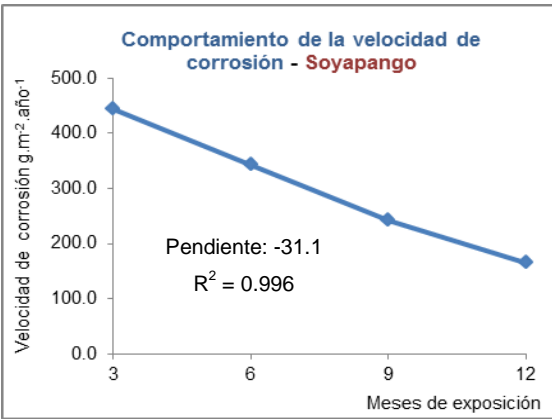
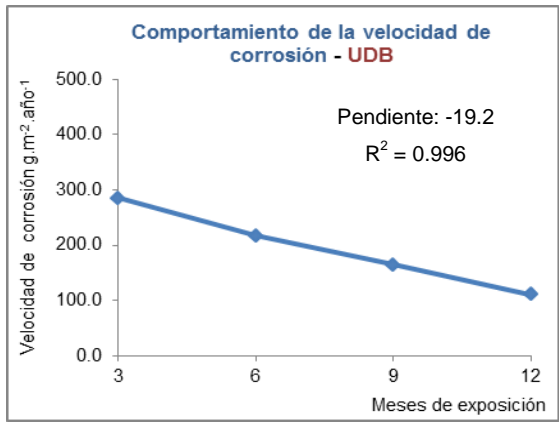
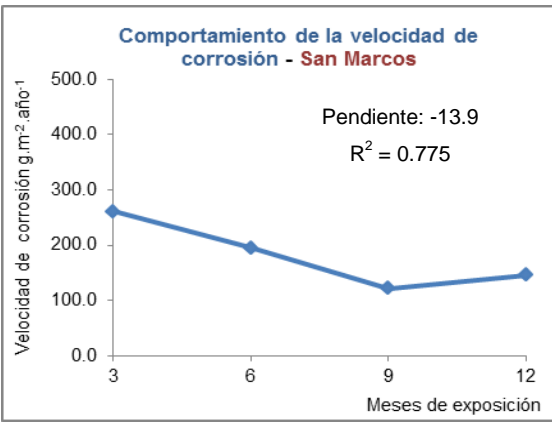
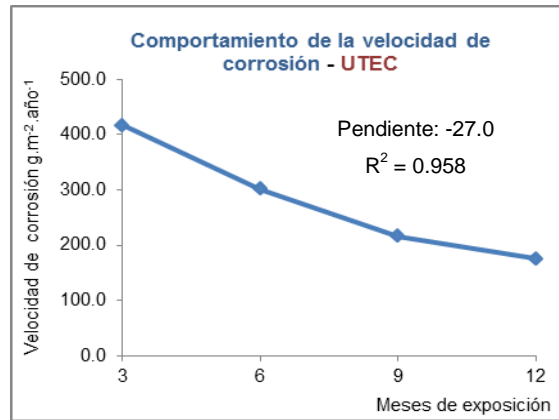
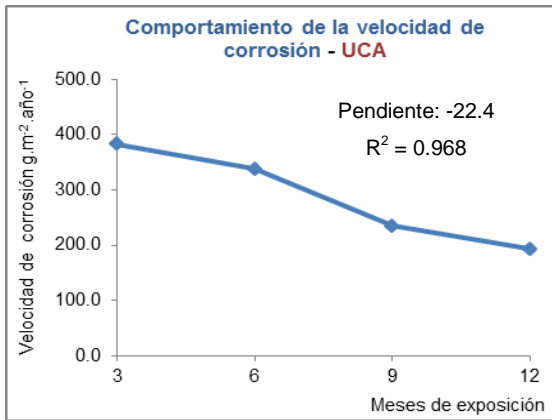
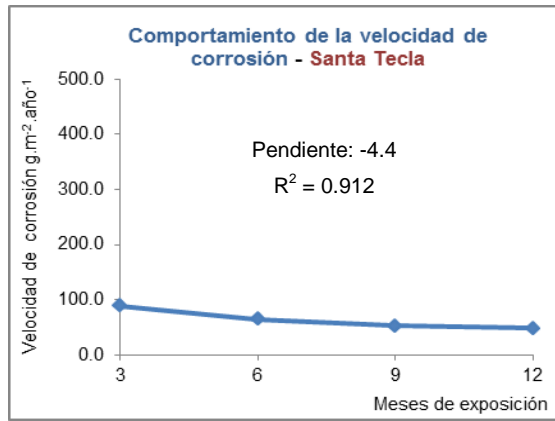


Figura 5.2 Comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en los siete sitios del AMSS

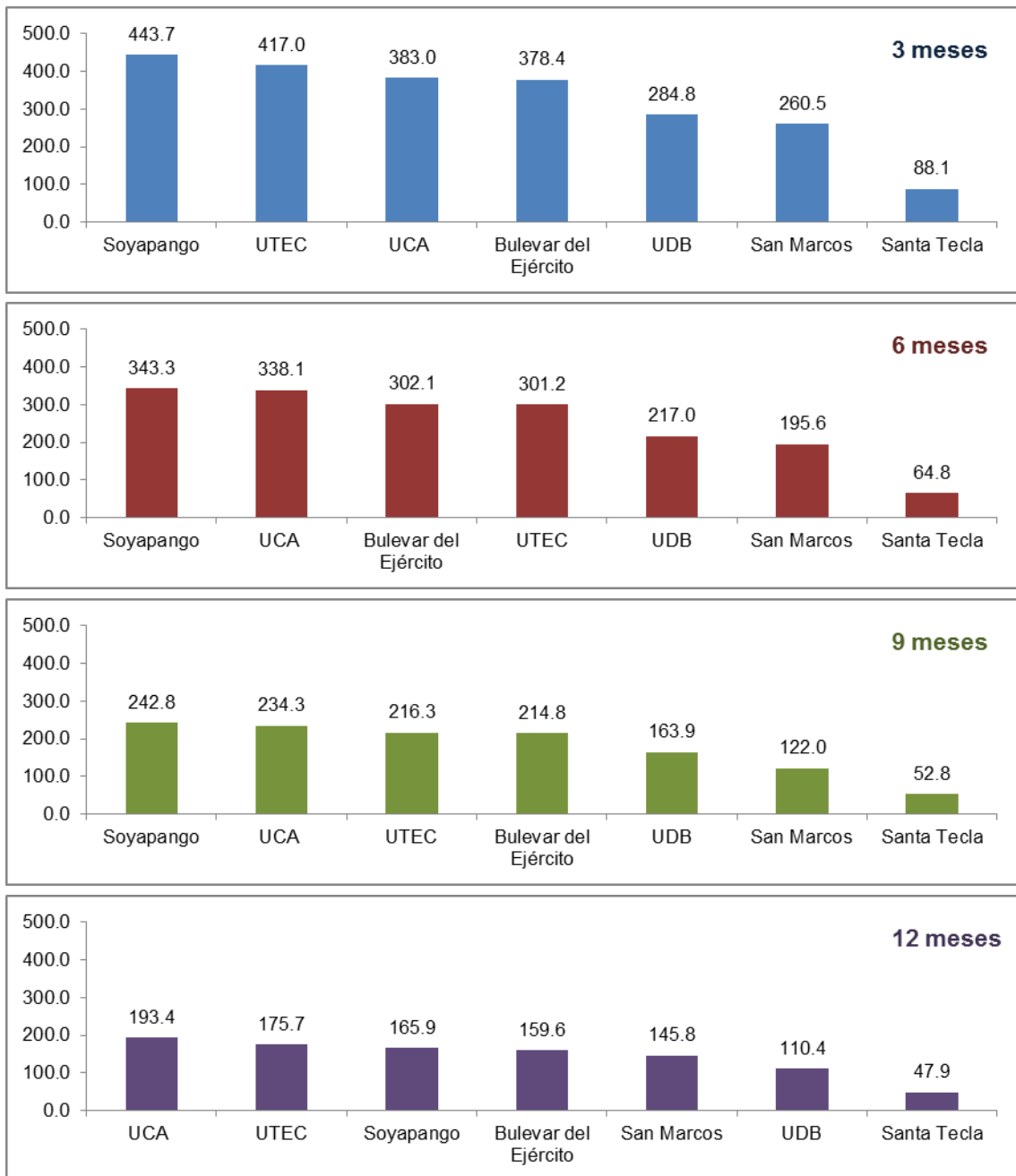


Figura 5.3 Velocidades de corrosión del acero al carbono (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) del AMSS ordenadas descendientemente

San Marcos ocupa la sexta posición para tres, seis y nueve meses y la UDB tiene esta posición para doce meses, con un valor de $110.4 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ o 0.015 mmy^{-1} . Los resultados de San Marcos a tres, seis y nueve meses son menores que los de la UDB, a los doce meses, en cambio, la tasa de corrosión de San Marcos es mayor a la de la UDB. De acuerdo a la tendencia observada a tres, seis y nueve meses entre estos dos sitios, se esperaba que el resultado de San Marcos a los doce meses fuera menor a $110.4 \text{ gm}^{-2}.\text{año}^{-1}$ (0.015 mmy^{-1}).

Las menores tasas de corrosión en los cuatro períodos evaluados se tienen en Santa Tecla, donde el mayor valor obtenido es $88.1 \text{ gm}^{-2}\text{año}^{-1}$ o 0.012 mmy^{-1} para tres meses, bajando a $47.9 \text{ gm}^{-2}\text{año}^{-1}$ o 0.007 mmy^{-1} a los doce meses.

Como se comentó previamente, los resultados de velocidad de corrosión presentados, corresponden a los promedios de 4 réplicas a tres meses y 3 réplicas a seis, nueve y doce meses, donde el coeficiente de variación entre las réplicas es menor a 10 % o se realizó la prueba de Q para decidir si aceptar o rechazar los datos.

Como puede verse en el Anexo III, en el caso de acero al carbono, todos los resultados obtenidos cumplen con los criterios para ser aceptados. Las velocidades de corrosión de cada réplica en cada sitio para cada período se muestran en la Tabla 5.3, donde los sitios se presentan en el mismo orden de las barras de doce meses de la Figura 5.3.

Tabla 5.3 Resultados de velocidad del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en el AMSS

Sitio	Réplica	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
UCA	1	392.4	340.2	234.1	195.3
UCA	2	378.3	335.9	231.8	187.7
UCA	3	367.7	338.1	236.9	197.2
UCA	4	393.7	-	-	-
UTEC	1	405.3	296.7	208.8	169.9
UTEC	2	406.5	289.7	221.4	175.5
UTEC	3	413.6	317.2	218.7	181.8
UTEC	4	442.5	-	-	-
Soyapango	1	432.9	340.9	237.5	160.1
Soyapango	2	445.5	359.2	246.0	169.1
Soyapango	3	446.3	329.8	244.9	168.4
Soyapango	4	450.2	-	-	-
Bulevar Ejército	1	374.3	294.1	206.4	158.7
Bulevar Ejército	2	368.2	308.0	212.4	162.8
Bulevar Ejército	3	392.7	304.3	225.6	157.3
Bulevar Ejército	4	378.3	-	-	-
San Marcos	1	237.19	214.8	129	151.3
San Marcos	2	273.08	190.3	116.7	140.2
San Marcos	3	258.33	181.7	120.2	145.7

Sitio	Réplica	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
San Marcos	4	273.35	-	-	-
UDB	1	223.3	211.2	160.2	108.1
UDB	2	284.82	215.2	170	115.4
UDB	3	284.74	224.5	161.6	107.7
UDB	4	317.41	-	-	-
Santa Tecla	1	114.8	71.7	57.7	48.1
Santa Tecla	2	86.3	55.2	45.5	52.3
Santa Tecla	3	66.3	64.8	52.8	43.3
Santa Tecla	4	89.9	-	-	-

Al observar los resultados de la UCA, la UTEC, Soyapango y Bulevar del Ejército, puede verse que tienen valores de velocidad de corrosión bastante cercanos entre sí para los cuatro períodos estudiados. El coeficiente de variación de los resultados de todas las réplicas para los cuatro sitios para cada período (tres, seis, nueve y doce meses) es de 7.3 % para tres meses, 7.0 % para seis meses, 6.0 % para nueve meses y 8.0 % para doce meses, tal como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono para la UCA, la UTEC, Soyapango y el Bulevar del Ejército

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio de todas las réplicas	405.5	321.2	227.0	173.7
Desviación estándar	29.7	22.5	13.6	14.0
Coeficiente de variación (%)	7.3	7.0	6.0	8.0

Recordando que el criterio inicial para evaluar los datos era un coeficiente de variación menor a 10 %, las diferencias entre las velocidades de corrosión de los cuatro sitios para cada período pueden deberse a la variabilidad propia del método, es decir, que los cuatro sitios tienen un comportamiento similar en cuanto a la velocidad de corrosión.

Los datos de San Marcos y la UDB muestran similitud entre sí; al comparar los datos de la San Marcos y la UDB, se tiene que el coeficiente de variación es menor a 10% únicamente para seis meses; mientras que para tres meses es 11 %, para nueve meses, 16.5 % y para doce meses, 15.5 % tal como se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono para San Marcos y la UDB

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio de todas las réplicas	269.0	206.3	143.0	128.1
Desviación estándar	29.5	16.6	23.6	19.9
Coeficiente de variación (%)	11.0	8.0	16.5	15.5

Por lo que puede inferirse que las variaciones en los resultados entre estos dos sitios son debidas a las características propias de cada ambiente y no a la variabilidad del método.

Al encontrar el coeficiente de variación entre los seis sitios mencionados (la UCA, la UTEC, Soyapango, Bulevar del Ejército, San Marcos y la UDB) se encontró que para tres meses es 19.9 %, para seis meses, 21.0 %, para nueve meses, 22.2 % y para doce meses, 17.1 %, tal como se muestra en la Tabla 5.6

Tabla 5.6 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono para la UCA, la UTEC, Soyapango, Bulevar del Ejército, San Marcos y la UDB

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio de todas las réplicas	360.0	282.9	199.0	158.5
Desviación estándar	71.8	59.3	44.1	27.0
Coeficiente de variación	19.9	21.0	22.2	17.1

De acuerdo a este resultado, las variaciones en los resultados entre los seis sitios son debidas a las características de cada ambiente y no a la variabilidad del método.

Al incluir los resultados de Santa Tecla los coeficientes de variación de los siete sitios del AMSS aumentan a 36.5 % para tres meses, 38.0 % para seis meses, 37.4 % para nueve meses y 32.8 % para doce meses, tal como se presenta en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono en los siete sitios del AMSS

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio de todas las réplicas	321.4	251.6	178.0	142.7
Desviación estándar	117.2	95.7	66.6	46.9
Coeficiente de variación	36.5	38.0	37.4	32.8

De acuerdo al criterio analítico del 10 %, las variaciones entre resultados de los siete sitios del AMSS se deben a las características de cada atmósfera y no pueden asociarse a la variabilidad del método.

Para determinar si estadísticamente hay diferencia significativa entre los valores de velocidad de corrosión para los sitios del AMSS, se llevó a cabo el análisis de varianza (ANOVA), empleando el programa IBM SPSS Statistics versión 22.

Como hipótesis nula (H_0) se planteó que las medias de los datos en un mismo período eran iguales, es decir, que los resultados de los siete sitios a tres meses no tienen diferencia significativa entre ellos; que los resultados de los siete sitios a seis meses no tienen diferencia significativa entre sí; que los resultados de los siete sitios a nueve meses no tienen diferencia significativa entre ellos y que los resultados de los siete sitios a doce meses no tienen diferencia significativa entre sí.

Como hipótesis alternativa (H_a) se planteó que al menos una de las medias de los datos de los siete sitios en un mismo período varía con respecto a las otras. Se trabajó con un nivel de significancia de 0.05, es decir, se acepta un 5% de probabilidad de concluir que al menos una media sea diferente cuando en realidad son iguales.

Si una vez se realiza el análisis de la varianza se obtiene una significancia menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula, mientras que si la significancia es mayor a 0.05, se mantiene la hipótesis nula.

Para ello, las velocidades de corrosión en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ se ordenaron en columnas para cada período (tres, seis, nueve y doce meses), tal como se presentó en la Tabla 5.3; en la primera columna se ubicó el sitio identificándose como 1 (UCA), 2 (UTEC), 3 (Soyapango), 4 (Bulevar del Ejército), 5 (San Marcos), 6 (UDB) y 7 (Santa Tecla). Al realizar el análisis de varianza de un factor (velocidad de corrosión) se obtuvo los resultados que se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Análisis de varianza (ANOVA) de los sitios del AMSS

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tres meses	Entre grupos	362528.757	6	60421.459	148.253	.000
	Dentro de grupos	8558.691	21	407.557		
	Total	371087.447	27			
Seis meses	Entre grupos	181397.730	6	30232.955	237.438	.000
	Dentro de grupos	1782.620	14	127.330		
	Total	183180.350	20			
Nueve meses	Entre grupos	88199.138	6	14699.856	375.092	.000
	Dentro de grupos	548.660	14	39.190		
	Total	88747.798	20			
Doce meses	Entre grupos	43570.550	6	7261.758	310.294	.000
	Dentro de grupos	327.640	14	23.403		
	Total	43898.190	20			

De acuerdo al análisis de varianza, la significancia es 0.000 (menor a 0.05) para los cuatro períodos, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta que al menos una de las medias tiene diferencia significativa entre sí.

Como se desconocía cuáles eran las medias que diferían significativamente entre sí y cuáles no, se realizó la prueba de comparaciones múltiples, cuyo resultado se muestra en la Tabla 5.9, donde los sitios están identificados con números del 1 al 7 como ya se comentó.

Para realizar la comparación se contrasta el dato de la columna (I) Sitio con cada número en la columna (J) Sitio. Por ejemplo: A tres meses el sitio 1 (UCA) tiene un valor de significancia de 0.486 (mayor a 0.05) al compararse con el sitio 2 (UTEC), es decir que para tres meses no hay diferencia significativa entre los resultados obtenidos en la UCA y la UTEC. Por el contrario el sitio 1 (UCA) presenta un valor de significancia de 0.028 (menor a 0.05) al compararse con el sitio 3 (Soyapango), es decir, que para tres meses sí hay diferencia significativa entre los resultados de la UCA y Soyapango.

Tabla 5.9 Comparaciones múltiples del análisis de varianza de los resultados del AMSS

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
Tres meses	1	2	-33.95000	14.27510	.486	-90.0354	22.1354
		3	-60.70000*	14.27510	.028	-116.7854	-4.6146
		4	4.65000	14.27510	1.000	-51.4354	60.7354
		5	122.53750*	14.27510	.000	66.4521	178.6229
		6	105.45750*	14.27510	.000	49.3721	161.5429
		7	293.70000*	14.27510	.000	237.6146	349.7854
		2	1	33.95000	14.27510	.486	-22.1354
	3		-26.75000	14.27510	.738	-82.8354	29.3354
	4		38.60000	14.27510	.336	-17.4854	94.6854
	5		156.48750*	14.27510	.000	100.4021	212.5729
	6		139.40750*	14.27510	.000	83.3221	195.4929
	7		327.65000*	14.27510	.000	271.5646	383.7354
	3		1	60.70000*	14.27510	.028	4.6146
		2	26.75000	14.27510	.738	-29.3354	82.8354
		4	65.35000*	14.27510	.015	9.2646	121.4354
		5	183.23750*	14.27510	.000	127.1521	239.3229
		6	166.15750*	14.27510	.000	110.0721	222.2429
		7	354.40000*	14.27510	.000	298.3146	410.4854
		4	1	-4.65000	14.27510	1.000	-60.7354
	2		-38.60000	14.27510	.336	-94.6854	17.4854
	3		-65.35000*	14.27510	.015	-121.4354	-9.2646
	5		117.88750*	14.27510	.000	61.8021	173.9729
	6		100.80750*	14.27510	.000	44.7221	156.8929
	7		289.05000*	14.27510	.000	232.9646	345.1354
	5		1	-122.53750*	14.27510	.000	-178.6229
		2	-156.48750*	14.27510	.000	-212.5729	-100.4021
		3	-183.23750*	14.27510	.000	-239.3229	-127.1521
		4	-117.88750*	14.27510	.000	-173.9729	-61.8021
		6	-17.08000	14.27510	.959	-73.1654	39.0054
		7	171.16250*	14.27510	.000	115.0771	227.2479
		6	1	-105.45750*	14.27510	.000	-161.5429
	2		-139.40750*	14.27510	.000	-195.4929	-83.3221
	3		-166.15750*	14.27510	.000	-222.2429	-110.0721
	4		-100.80750*	14.27510	.000	-156.8929	-44.7221
	5		17.08000	14.27510	.959	-39.0054	73.1654
	7		188.24250*	14.27510	.000	132.1571	244.3279

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
	7	1	-293.70000 [*]	14.27510	.000	-349.7854	-237.6146
		2	-327.65000 [*]	14.27510	.000	-383.7354	-271.5646
		3	-354.40000 [*]	14.27510	.000	-410.4854	-298.3146
		4	-289.05000 [*]	14.27510	.000	-345.1354	-232.9646
		5	-171.16250 [*]	14.27510	.000	-227.2479	-115.0771
		6	-188.24250 [*]	14.27510	.000	-244.3279	-132.1571
Seis meses	1	2	36.86667	9.21340	.061	-1.2175	74.9508
		3	-5.23333	9.21340	.999	-43.3175	32.8508
		4	35.93333	9.21340	.071	-2.1508	74.0175
		5	142.46667 [*]	9.21340	.000	104.3825	180.5508
		6	121.10000 [*]	9.21340	.000	83.0158	159.1842
		7	274.16667 [*]	9.21340	.000	236.0825	312.2508
		2	1	-36.86667	9.21340	.061	-74.9508
	3	-42.10000 [*]	9.21340	.026	-80.1842	-4.0158	
	4	-.93333	9.21340	1.000	-39.0175	37.1508	
	5	105.60000 [*]	9.21340	.000	67.5158	143.6842	
	6	84.23333 [*]	9.21340	.000	46.1492	122.3175	
	7	237.30000 [*]	9.21340	.000	199.2158	275.3842	
	3	1	5.23333	9.21340	.999	-32.8508	43.3175
	2	42.10000 [*]	9.21340	.026	4.0158	80.1842	
	4	41.16667 [*]	9.21340	.030	3.0825	79.2508	
	5	147.70000 [*]	9.21340	.000	109.6158	185.7842	
	6	126.33333 [*]	9.21340	.000	88.2492	164.4175	
	7	279.40000 [*]	9.21340	.000	241.3158	317.4842	
	4	1	-35.93333	9.21340	.071	-74.0175	2.1508
	2	.93333	9.21340	1.000	-37.1508	39.0175	
	3	-41.16667 [*]	9.21340	.030	-79.2508	-3.0825	
	5	106.53333 [*]	9.21340	.000	68.4492	144.6175	
	6	85.16667 [*]	9.21340	.000	47.0825	123.2508	
	7	238.23333 [*]	9.21340	.000	200.1492	276.3175	
5	1	-142.46667 [*]	9.21340	.000	-180.5508	-104.3825	
2	-105.60000 [*]	9.21340	.000	-143.6842	-67.5158		
3	-147.70000 [*]	9.21340	.000	-185.7842	-109.6158		
4	-106.53333 [*]	9.21340	.000	-144.6175	-68.4492		
6	-21.36667	9.21340	.524	-59.4508	16.7175		
7	131.70000 [*]	9.21340	.000	93.6158	169.7842		
6	1	-121.10000 [*]	9.21340	.000	-159.1842	-83.0158	

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza		
						Límite inferior	Límite superior	
	7	2	-84.23333 [*]	9.21340	.000	-122.3175	-46.1492	
		3	-126.33333 [*]	9.21340	.000	-164.4175	-88.2492	
		4	-85.16667 [*]	9.21340	.000	-123.2508	-47.0825	
		5	21.36667	9.21340	.524	-16.7175	59.4508	
		7	153.06667 [*]	9.21340	.000	114.9825	191.1508	
		1	-274.16667 [*]	9.21340	.000	-312.2508	-236.0825	
		2	-237.30000 [*]	9.21340	.000	-275.3842	-199.2158	
		3	-279.40000 [*]	9.21340	.000	-317.4842	-241.3158	
		4	-238.23333 [*]	9.21340	.000	-276.3175	-200.1492	
		5	-131.70000 [*]	9.21340	.000	-169.7842	-93.6158	
		6	-153.06667 [*]	9.21340	.000	-191.1508	-114.9825	
Nueve meses	1	2	17.96667	5.11143	.125	-3.1617	39.0951	
		3	-8.53333	5.11143	.823	-29.6617	12.5951	
		4	19.46667	5.11143	.081	-1.6617	40.5951	
		5	112.30000 [*]	5.11143	.000	91.1716	133.4284	
		6	70.33333 [*]	5.11143	.000	49.2049	91.4617	
		7	182.26667 [*]	5.11143	.000	161.1383	203.3951	
		2	1	-17.96667	5.11143	.125	-39.0951	3.1617
	2	3	-26.50000 [*]	5.11143	.010	-47.6284	-5.3716	
		4	1.50000	5.11143	1.000	-19.6284	22.6284	
		5	94.33333 [*]	5.11143	.000	73.2049	115.4617	
		6	52.36667 [*]	5.11143	.000	31.2383	73.4951	
		7	164.30000 [*]	5.11143	.000	143.1716	185.4284	
		3	1	8.53333	5.11143	.823	-12.5951	29.6617
			2	26.50000 [*]	5.11143	.010	5.3716	47.6284
	4		28.00000 [*]	5.11143	.006	6.8716	49.1284	
	5		120.83333 [*]	5.11143	.000	99.7049	141.9617	
	6		78.86667 [*]	5.11143	.000	57.7383	99.9951	
	7		190.80000 [*]	5.11143	.000	169.6716	211.9284	
	4		1	-19.46667	5.11143	.081	-40.5951	1.6617
		2	-1.50000	5.11143	1.000	-22.6284	19.6284	
3		-28.00000 [*]	5.11143	.006	-49.1284	-6.8716		
5		92.83333 [*]	5.11143	.000	71.7049	113.9617		
6		50.86667 [*]	5.11143	.000	29.7383	71.9951		
7		162.80000 [*]	5.11143	.000	141.6716	183.9284		
5		1	-112.30000 [*]	5.11143	.000	-133.4284	-91.1716	
	2	-94.33333 [*]	5.11143	.000	-115.4617	-73.2049		

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza			
						Límite inferior	Límite superior		
	6	3	-120.83333 [*]	5.11143	.000	-141.9617	-99.7049		
		4	-92.83333 [*]	5.11143	.000	-113.9617	-71.7049		
		6	-41.96667 [*]	5.11143	.000	-63.0951	-20.8383		
		7	69.96667 [*]	5.11143	.000	48.8383	91.0951		
		1	-70.33333 [*]	5.11143	.000	-91.4617	-49.2049		
		2	-52.36667 [*]	5.11143	.000	-73.4951	-31.2383		
		3	-78.86667 [*]	5.11143	.000	-99.9951	-57.7383		
		4	-50.86667 [*]	5.11143	.000	-71.9951	-29.7383		
		5	41.96667 [*]	5.11143	.000	20.8383	63.0951		
	7	7	111.93333 [*]	5.11143	.000	90.8049	133.0617		
		1	-182.26667 [*]	5.11143	.000	-203.3951	-161.1383		
		2	-164.30000 [*]	5.11143	.000	-185.4284	-143.1716		
		3	-190.80000 [*]	5.11143	.000	-211.9284	-169.6716		
		4	-162.80000 [*]	5.11143	.000	-183.9284	-141.6716		
		5	-69.96667 [*]	5.11143	.000	-91.0951	-48.8383		
		6	-111.93333 [*]	5.11143	.000	-133.0617	-90.8049		
		Doce meses	1	2	17.66667 [*]	3.94992	.030	1.3394	33.9939
				3	27.53333 [*]	3.94992	.001	11.2061	43.8606
4	33.80000 [*]			3.94992	.000	17.4727	50.1273		
5	47.66667 [*]			3.94992	.000	31.3394	63.9939		
6	83.00000 [*]			3.94992	.000	66.6727	99.3273		
7	145.50000 [*]			3.94992	.000	129.1727	161.8273		
2	1			-17.66667 [*]	3.94992	.030	-33.9939	-1.3394	
	3		9.86667	3.94992	.441	-6.4606	26.1939		
	4		16.13333	3.94992	.054	-.1939	32.4606		
	5		30.00000 [*]	3.94992	.000	13.6727	46.3273		
	6		65.33333 [*]	3.94992	.000	49.0061	81.6606		
	7		127.83333 [*]	3.94992	.000	111.5061	144.1606		
	3		1	-27.53333 [*]	3.94992	.001	-43.8606	-11.2061	
2			-9.86667	3.94992	.441	-26.1939	6.4606		
4			6.26667	3.94992	.854	-10.0606	22.5939		
5			20.13333 [*]	3.94992	.011	3.8061	36.4606		
6			55.46667 [*]	3.94992	.000	39.1394	71.7939		
7			117.96667 [*]	3.94992	.000	101.6394	134.2939		
4		1	-33.80000 [*]	3.94992	.000	-50.1273	-17.4727		
	2	-16.13333	3.94992	.054	-32.4606	.1939			
	3	-6.26667	3.94992	.854	-22.5939	10.0606			

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
		5	13.86667	3.94992	.125	-2.4606	30.1939
		6	49.20000*	3.94992	.000	32.8727	65.5273
		7	111.70000*	3.94992	.000	95.3727	128.0273
	5	1	-47.66667*	3.94992	.000	-63.9939	-31.3394
		2	-30.00000*	3.94992	.000	-46.3273	-13.6727
		3	-20.13333*	3.94992	.011	-36.4606	-3.8061
		4	-13.86667	3.94992	.125	-30.1939	2.4606
		6	35.33333*	3.94992	.000	19.0061	51.6606
		7	97.83333*	3.94992	.000	81.5061	114.1606
	6	1	-83.00000*	3.94992	.000	-99.3273	-66.6727
		2	-65.33333*	3.94992	.000	-81.6606	-49.0061
		3	-55.46667*	3.94992	.000	-71.7939	-39.1394
		4	-49.20000*	3.94992	.000	-65.5273	-32.8727
		5	-35.33333*	3.94992	.000	-51.6606	-19.0061
		7	62.50000*	3.94992	.000	46.1727	78.8273
	7	1	-145.50000*	3.94992	.000	-161.8273	-129.1727
		2	-127.83333*	3.94992	.000	-144.1606	-111.5061
		3	-117.96667*	3.94992	.000	-134.2939	-101.6394
		4	-111.70000*	3.94992	.000	-128.0273	-95.3727
		5	-97.83333*	3.94992	.000	-114.1606	-81.5061
		6	-62.50000*	3.94992	.000	-78.8273	-46.1727

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Como los resultados que difieren significativamente entre sí son muy numerosos, se optó por presentar aquellos sitios entre los cuales no hay diferencia significativa. A tres meses se tiene los sitios que se presentan en la Tabla 5.10:

Tabla 5.10 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a tres meses y su respectiva significancia

No hay diferencia significativa entre	Significancia
UCA (1) y UTEC (2)	0.486
UCA (1) y Bulevar del Ejército (4)	1.000
UTEC (2) y Soyapango (3)	0.738
UTEC (2) y Bulevar del Ejército (4)	0.336
San Marcos (5) y UDB (6)	0.959

Las comparaciones múltiples permiten contrastar los resultados de dos sitios a la vez, pero al observar los resultados puede encontrarse una correlación entre tres o más sitios. Para el caso de tres meses puede verse que la UCA y la UTEC no difieren significativamente entre sí, que la UCA y el Bulevar del Ejército no difieren entre sí y que la UTEC y el Bulevar del Ejército tampoco difieren; por lo que puede inferirse que entre los tres sitios no hay diferencia significativa en los primeros tres meses de exposición.

Con la Figura 5.4 se pretende mostrar más claramente la relación entre los tres sitios; en el primer gráfico se ve la relación entre la UCA y el Bulevar del Ejército cuya significancia es 1.000, lo que indica que prácticamente ambos sitios tienen un mismo valor de velocidad de corrosión; en el segundo gráfico se presenta la relación entre la UCA y la UTEC que tienen una significancia de 0.486, lo cual indica que los valores de velocidad de corrosión entre estos dos puntos no difieren significativamente entre ellos; el tercer gráfico muestra los resultados de la UTEC y el Bulevar del Ejército, cuya significancia es 0.336, por lo que tampoco hay diferencia significativa entre sí.

Como puede verse los tres sitios se correlacionan, por lo que se deduce que estas tres atmósferas tienen agresividad similar sobre el acero al carbono durante los primeros tres meses de exposición.

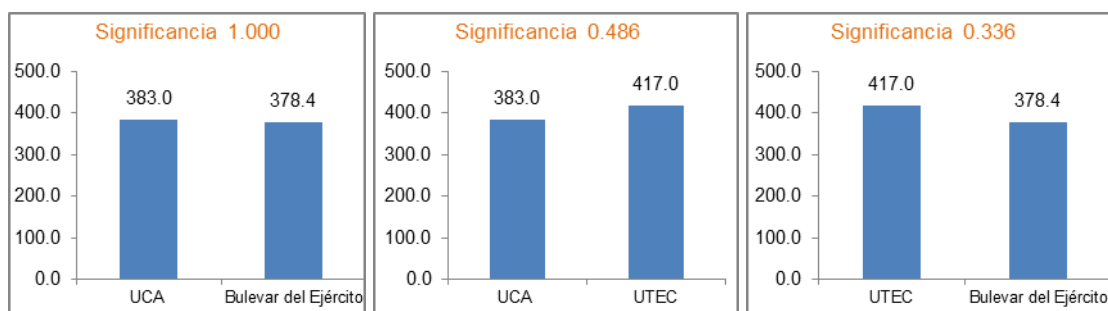


Figura 5.4 Relación entre los resultados de la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército a tres meses

Al realizar el análisis para seis meses, no se encuentra diferencia significativa entre los sitios mostrados en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a seis meses y su respectiva significancia

No hay diferencia significativa entre	Significancia
UCA (1) y UTEC (2)	0.061
UCA (1) y Soyapango (3)	0.999
UCA (1) y Bulevar del Ejército (4)	0.071
UTEC (2) y Bulevar del Ejército (4)	1.000
San Marcos (5) y UDB (6)	0.524

Al correlacionar más de dos sitios, puede verse que entre la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército no tienen diferencia significativa entre ellos en los primeros seis meses de exposición. La relación entre los resultados de los tres lugares se muestra en la Figura 5.5.

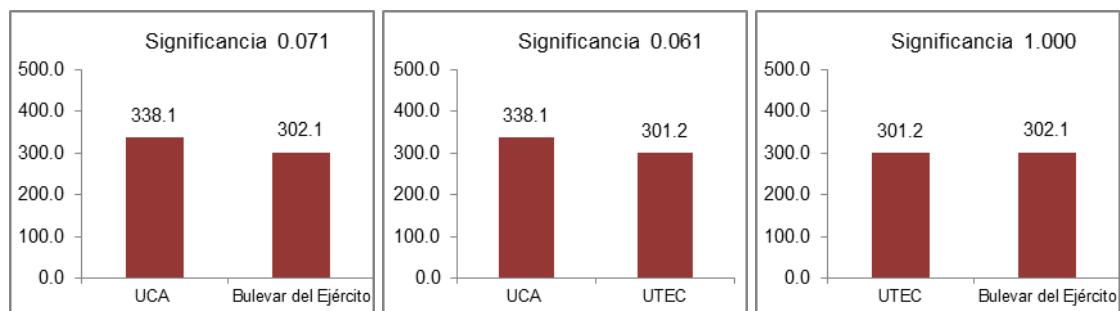


Figura 5.5 Relación entre los resultados de la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército a seis meses

A nueve meses los sitios que no presentan diferencia significativa entre sí son los mostrados en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a nueve meses y su respectiva significancia

No hay diferencia significativa entre	Significancia
UCA (1) y UTEC (2)	0.125
UCA (1) y Soyapango (3)	0.823
UCA (1) y Bulevar del Ejército (4)	0.081
UTEC (2) y Bulevar del Ejército (4)	1.000

Nuevamente son la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército los tres sitios que al relacionarse entre sí no presentan diferencia significativa entre ellos, lo cual se ve más claramente en la Figura 5.6.

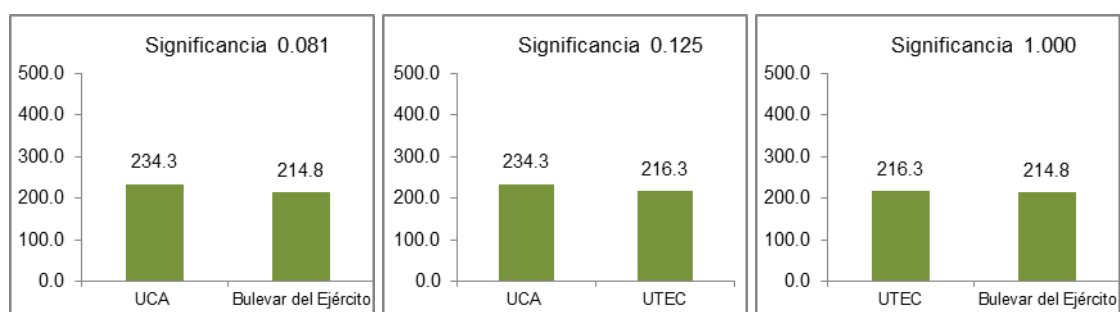


Figura 5.6 Relación entre los resultados de la UCA, la UTEC y el Bulevar del Ejército a nueve meses

Finalmente, los sitios entre los que no hay diferencia significativa a doce meses son mostrados en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13 Sitios del AMSS en los que no hay diferencia significativa a doce meses y su respectiva significancia

No hay diferencia significativa entre	Significancia
UTEC (2) y Soyapango (3)	0.441
UTEC (2) y Bulevar del Ejército (4)	0.054
Soyapango (3) y Bulevar del Ejército (4)	0.854
Bulevar del Ejército (4) y San Marcos (5)	0.125

En este caso, los tres sitios que pueden correlacionarse entre sí, son la UTEC, Soyapango y Bulevar del Ejército, lo cual se muestra en la Figura 5.7, de donde se deduce que entre estos tres sitios no hay diferencia significativa a doce meses de exposición.

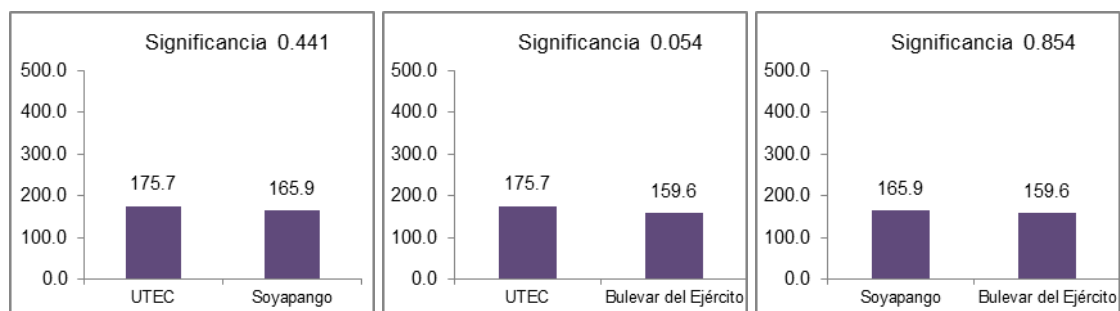


Figura 5.7 Relación entre los resultados de UTEC, Soyapango y el Bulevar del Ejército a doce meses

Debido a que los resultados a doce meses son los empleados para caracterizar la agresividad de la atmósfera, son las relaciones en este período las que se considerarán válidas para realizar las comparaciones entre todos los sitios.

Los resultados de doce meses de cada sitio se compararon con los valores mostrados en la Tabla 1.4 “Categorización de la agresividad de la atmósfera según la norma ISO 9223”. Los valores de velocidad de corrosión para el acero al carbono en los siete sitios a doce meses oscilan entre $47.9 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ o 0.007 mmy^{-1} y $193.4 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ o 0.027 mmy^{-1} , es decir, se encuentran entre 10 y 200 $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$, por lo tanto, los siete sitios tienen Agresividad Baja.

5.1.2 Velocidades de corrosión en atmósferas rurales o poco contaminadas fuera del AMSS (acero al carbono)

Al evaluar el comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en el tiempo, para las atmósferas rurales o poco contaminadas fuera del AMSS, mostrado en la Figura 5.8, se observa que la corrosión disminuye en forma prácticamente lineal para los tres sitios, con coeficientes de determinación mayores que 0.997.

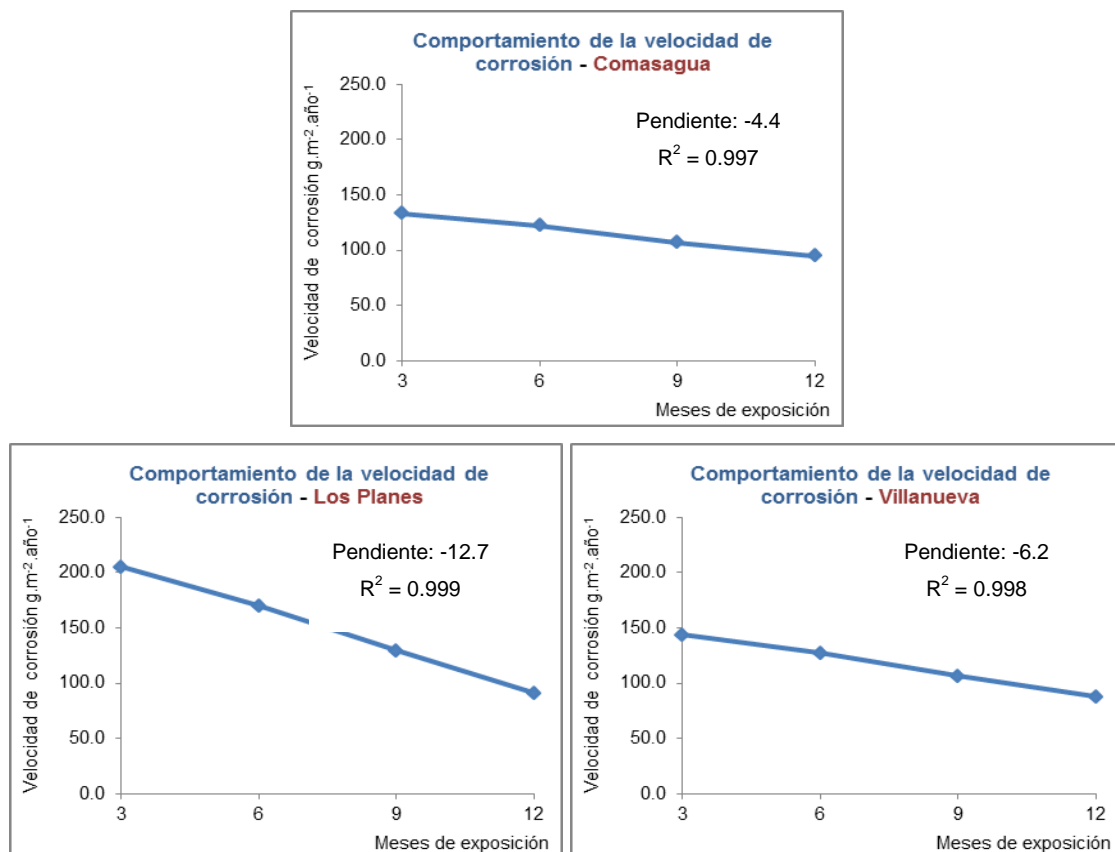


Figura 5.8 Comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en las atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS

En cuanto a la desaceleración del fenómeno, puede verse que en Los Planes donde aparentemente se forma más rápido la capa de óxido y es en Comasagua donde la desaceleración es menor.

En la Figura 5.9 se presenta las velocidades de corrosión en orden descendente de cada uno de los cuatro períodos (tres, seis, nueve y doce meses) de las atmósferas rurales (Comasagua y Los Planes) y de Villanueva.

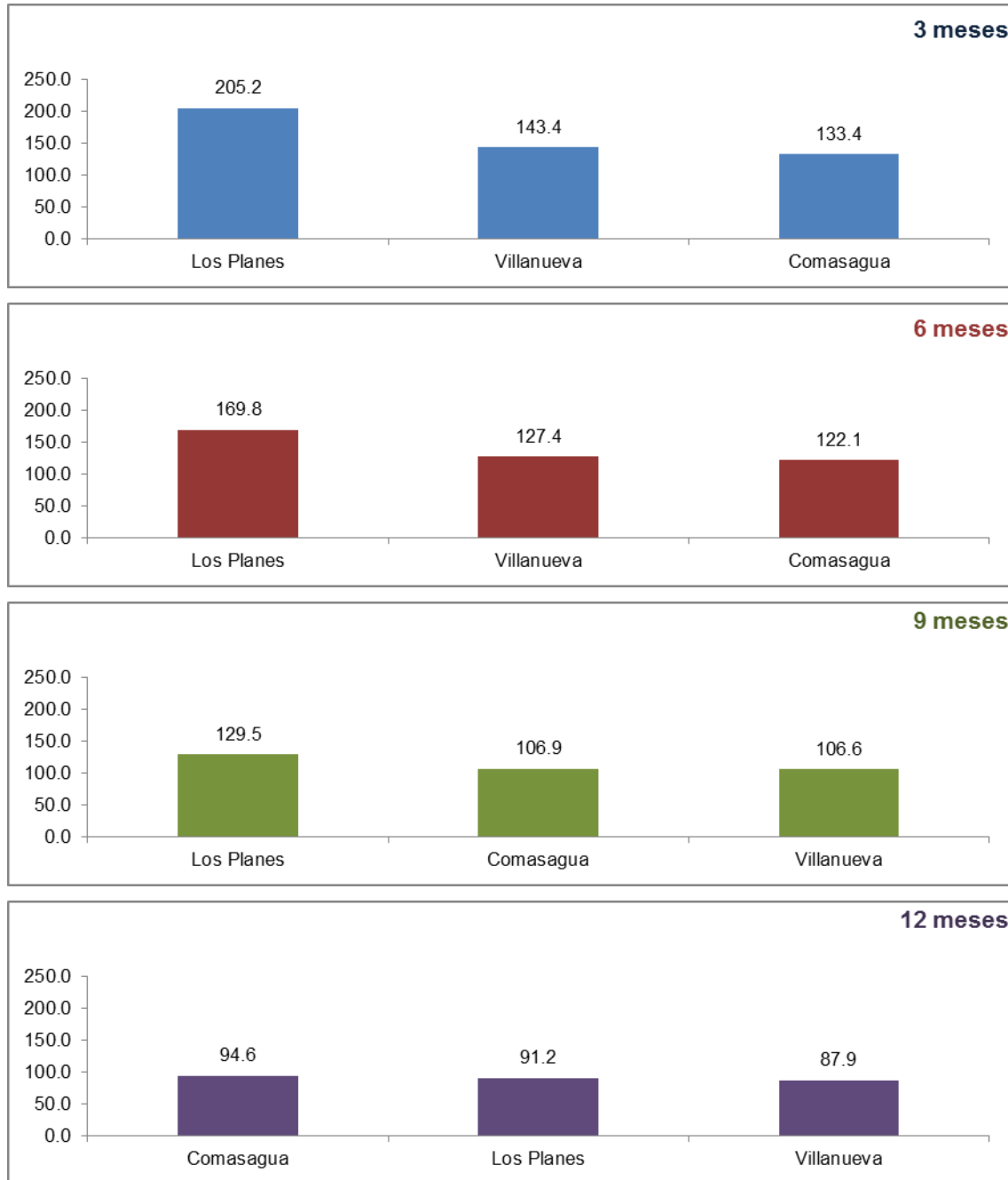


Figura 5.9 Velocidades de corrosión del acero al carbono (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS ordenadas descendientemente

Como puede verse, es la atmósfera de Los Planes la que presenta la mayor velocidad de corrosión a los tres, seis y nueve meses; a doce meses es Comasagua la que presenta la mayor velocidad de corrosión.

A los doce meses, los tres sitios tienen valores de velocidad de corrosión bastante cercanos entre sí, en cambio, para tres, seis y nueve meses hay mayor diferencia entre ellos. En la Tabla 5.14 se presenta el valor de corrosión de cada réplica para Comasagua, Los Planes y Villanueva.

Tabla 5.14 Resultados de velocidad del acero al carbono en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en Comasagua, Los Planes y Villanueva

Sitio	Réplica	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Comasagua	1	130.4	134.3	106.0	95.4
Comasagua	2	140.5	121.2	107.2	90.8
Comasagua	3	127.8	110.7	107.5	97.5
Comasagua	4	135.0	-	-	-
Los Planes	1	191.3	165.0	134.0	89.5
Los Planes	2	207.0	178.1	122.8	90.5
Los Planes	3	195.2	166.2	131.8	93.5
Los Planes	4	227.3	-	-	-
Villanueva	1	150.5	131.9	102.0	85.5
Villanueva	2	136.4	121.2	102.0	85.3
Villanueva	3	155.7	129.3	115.8	92.9
Villanueva	4	131.0	-	-	-

El coeficiente de variación de los tres sitios para cada período es de 21.7 % para tres meses, 17.1 % para seis meses, 19.9 % para nueve meses y 4.5 % para doce meses, tal como se muestra en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono en Comasagua, Los Planes y Villanueva.

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio de todas las réplicas	160.7	139.8	114.3	91.2
Desviación estándar	34.9	23.8	12.4	4.1
Coeficiente de variación	21.7	17.1	10.9	4.5

De acuerdo al criterio comentado anteriormente, solamente a doce meses puede decirse que los tres sitios se comportan de manera similar y que la variación entre los resultados es debida a la variabilidad del método de análisis.

Para establecer si existe diferencia significativa entre los tres sitios se realizó también el análisis de varianza, con las mismas hipótesis y el valor de significancia empleados en el análisis de los sitios del AMSS, el cual es mostrado en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16 Análisis de varianza (ANOVA) de Comasagua, Los Planes y Villanueva

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tres meses	Entre grupos	12093.855	2	6046.927	42.430	.000
	Dentro de grupos	1282.647	9	142.516		
	Total	13376.502	11			
Seis meses	Entre grupos	4093.740	2	2046.870	27.488	.001
	Dentro de grupos	446.780	6	74.463		
	Total	4540.520	8			
Nueve meses	Entre grupos	1038.296	2	519.148	15.681	.004
	Dentro de grupos	198.647	6	33.108		
	Total	1236.942	8			
Doce meses	Entre grupos	66.676	2	33.338	2.871	.133
	Dentro de grupos	69.673	6	11.612		
	Total	136.349	8			

Como puede verse, a tres, seis y nueve meses, al menos una de las media presenta diferencia significativa con las otras, mientras que en los resultados a doce meses no hay diferencia significativa entre las medias.

Para encontrar cuales son las medias que difieren entre si y cuáles no lo hacen, se realizó el análisis de comparaciones múltiples mostrado en la Tabla 5.17. Los sitios fueron identificados como 8 (Comasagua), 9 (Los Planes) y 10 (Villanueva).

Puede verse que tanto a tres como a seis y nueve meses, los resultados entre Comasagua (8) y Los Planes (9) difieren significativamente, mientras que entre Comasagua (8) y Villanueva (10) no se tiene diferencia significativa y Los Planes (9) difiere significativamente de Villanueva (10).

A doce meses no hay diferencia significativa entre los tres sitios, por lo que puede decirse que las tres atmósferas tienen un comportamiento similar sobre el acero al carbono. De acuerdo a lo presentado en la Tabla 1.4, tanto la atmósfera de

Comasagua, como la de Los Planes y la de Villanueva se clasifican como de Agresividad baja, con valores a doce meses de 94.6, 91.2 y 87.9 g.m⁻².año⁻¹ respectivamente.

Tabla 5.17 Comparaciones múltiples del análisis de varianza de los resultados de Comasagua, Los Planes y Villanueva

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
Tres meses	8	9	-71.77500*	8.44146	.000	-96.4047	-47.1453
		10	-9.97500	8.44146	.523	-34.6047	14.6547
	9	8	71.77500*	8.44146	.000	47.1453	96.4047
		10	61.80000*	8.44146	.000	37.1703	86.4297
	10	8	9.97500	8.44146	.523	-14.6547	34.6047
		9	-61.80000*	8.44146	.000	-86.4297	-37.1703
Seis meses	8	9	-47.70000*	7.04572	.002	-70.2975	-25.1025
		10	-5.40000	7.04572	.756	-27.9975	17.1975
	9	8	47.70000*	7.04572	.002	25.1025	70.2975
		10	42.30000*	7.04572	.003	19.7025	64.8975
	10	8	5.40000	7.04572	.756	-17.1975	27.9975
		9	-42.30000*	7.04572	.003	-64.8975	-19.7025
Nueve meses	8	9	-22.63333*	4.69807	.009	-37.7013	-7.5654
		10	.30000	4.69807	.998	-14.7679	15.3679
	9	8	22.63333*	4.69807	.009	7.5654	37.7013
		10	22.93333*	4.69807	.008	7.8654	38.0013
	10	8	-.30000	4.69807	.998	-15.3679	14.7679
		9	-22.93333*	4.69807	.008	-38.0013	-7.8654
Doce meses	8	9	3.40000	2.78235	.513	-5.5237	12.3237
		10	6.66667	2.78235	.133	-2.2571	15.5904
	9	8	-3.40000	2.78235	.513	-12.3237	5.5237
		10	3.26667	2.78235	.538	-5.6571	12.1904
	10	8	-6.66667	2.78235	.133	-15.5904	2.2571
		9	-3.26667	2.78235	.538	-12.1904	5.6571

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

5.1.3 Velocidades de corrosión en atmósferas marinas (acero al carbono)

Al evaluar el comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en el tiempo, para las atmósferas marinas, mostrado en la Figura 5.10, se observa que la corrosión disminuye en el tiempo para los tres sitios.

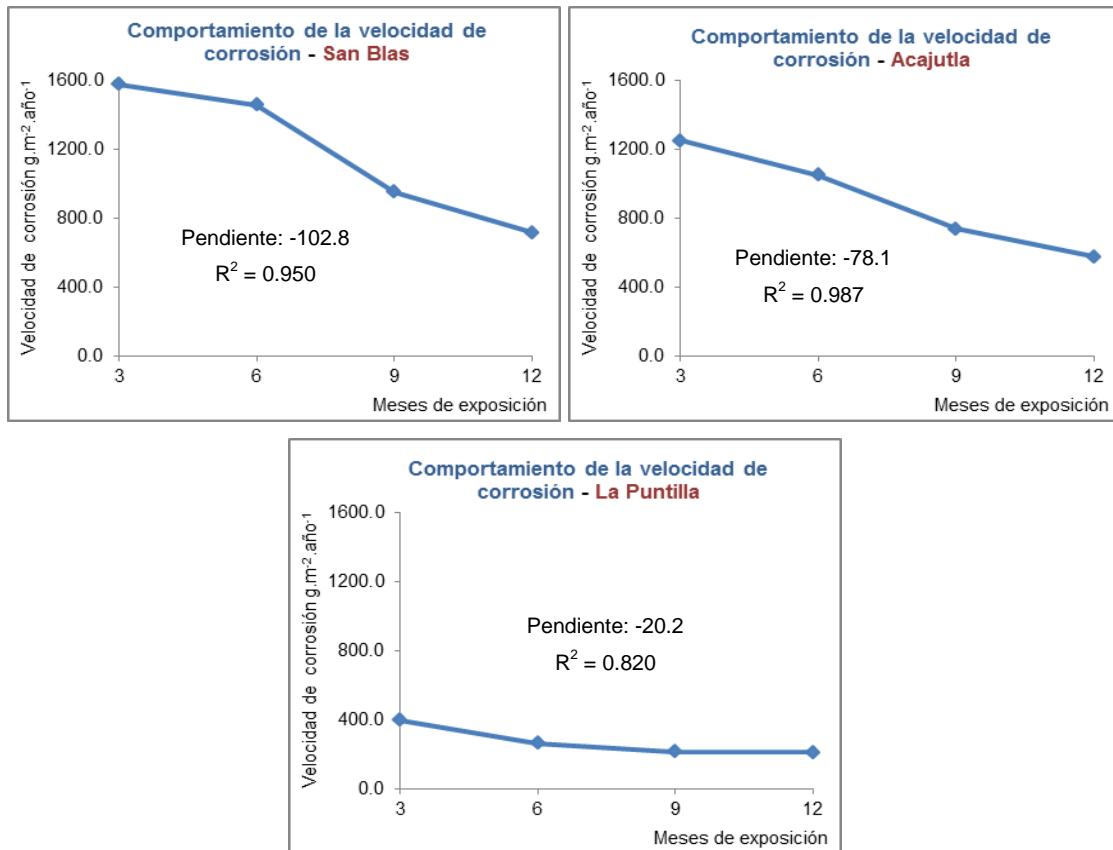


Figura 5.10 Comportamiento de la velocidad de corrosión del acero al carbono en las atmósferas marinas

En la atmósfera de Acajutla se tiene una linealidad de 0.987, mientras que en San Blas se tiene 0.950. En La Puntilla el comportamiento es un tanto diferente a los otros dos sitios, ya que al inicio la velocidad disminuye y luego de seis meses disminuye muy lentamente, tanto que de nueve a doce meses prácticamente se mantiene constante.

En la Figura 5.11 se presenta las velocidades de corrosión de las atmósferas marinas. Como puede verse para los cuatro períodos es la atmósfera de San Blas la que presenta la mayor velocidad de corrosión seguida por Acajutla y en tercer lugar, La Puntilla.

Los resultados de cada réplica en las tres atmósferas marinas son presentados en la Tabla 5.18. Si se compara los datos de San Blas, Acajutla y La Puntilla, puede verse que los coeficientes de variación son mayores a 45 % para los cuatro períodos analizados, tal como se muestra en la Tabla 5.19. Teniendo en cuenta este criterio, los tres sitios tienen un comportamiento diferente entre sí.

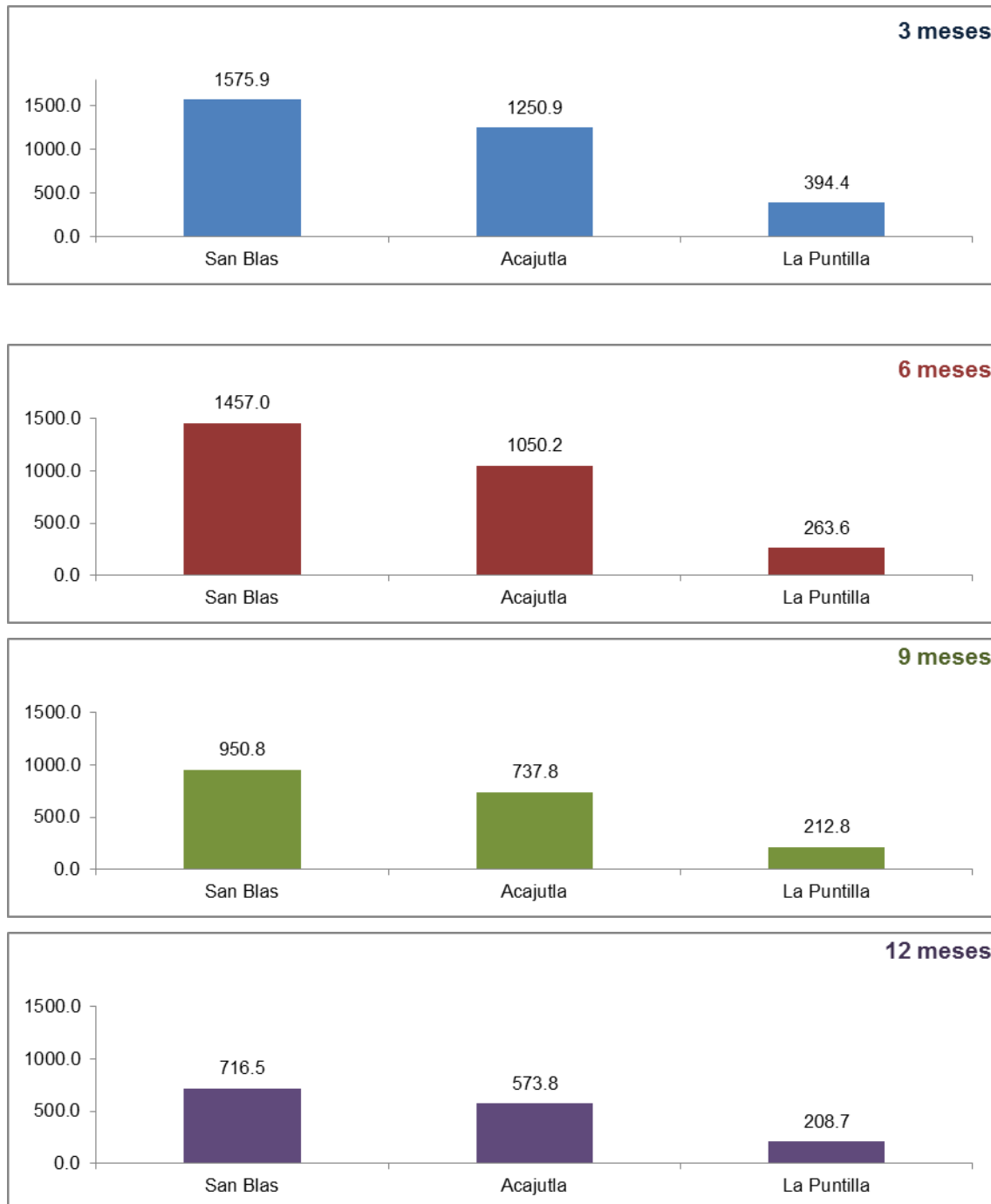


Figura 5.11 Velocidades de corrosión del acero al carbono (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas marinas ordenadas descendientemente

Tabla 5.18 Resultados de velocidad del acero al carbono en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en San Blas, Acajutla y La Puntilla

Sitio	Réplica	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
San Blas	1	1585.6	1525.8	950.8	724.6
San Blas	2	1587.6	1420.7	954.0	689.6
San Blas	3	1506.1	1424.6	947.6	735.4
San Blas	4	1624.6	-	-	-
Acajutla	1	1231.0	1074.4	736.4	553.2
Acajutla	2	1252.9	1036.6	757.6	562.5
Acajutla	3	1272.8	1039.5	719.2	605.7
Acajutla	4	1246.8	-	-	-
La Puntilla	1	435.2	283.3	210.4	205.7
La Puntilla	2	359.9	241.2	189.3	213.7
La Puntilla	3	390.2	266.3	213.1	206.7
La Puntilla	4	392.3	-	-	-

Tabla 5.19 Coeficientes de variación entre los resultados del acero al carbono en San Blas, Acajutla y La Puntilla

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio	1073.7	923.6	630.9	499.7
Desviación estándar	521.5	526.5	333.2	227.6
Coeficiente de variación (%)	48.6	57.0	52.8	45.5

Los datos de San Blas y Acajutla tienen valores aparentemente cercanos entre sí, por lo que se calculó el coeficiente de variación, mostrado en la Tabla 5.20, entre estos dos sitios, el cual resultó mayor a 12 % para los cuatro períodos, por lo que los dos sitios se comportan de manera diferente entre sí.

Tabla 5.20 Coeficiente de variación entre los resultados del acero al carbono para San Blas y Acajutla

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio	1413.4	1253.6	844.3	645.2
Desviación estándar	177.2	226.4	117.4	81.6
Coeficiente de variación (%)	12.5	18.1	13.9	12.6

Para establecer si existe diferencia significativa entre los tres sitios marinos, se realizó también el análisis de varianza, con las mismas hipótesis y el valor de significancia empleados en el análisis de los sitios del AMSS, el cual es mostrado en la Tabla 5.21.

Como puede verse, la significancia para los tres sitios en los cuatro períodos es 0.000, por lo tanto al menos una de las medias difieren significativamente entre sí. El análisis de comparaciones múltiples realizado para San Blas (11), Acajutla (12) y La Puntilla (13) es presentado en la Tabla 5.22

Tabla 5.21 Análisis de varianza (ANOVA) de San Blas, Acajutla y La Puntilla

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tres meses	Entre grupos	2980478.555	2	1490239.277	1192.398	.000
	Dentro de grupos	11248.055	9	1249.784		
	Total	2991726.610	11			
Seis meses	Entre grupos	2208510.727	2	1104255.363	745.857	.000
	Dentro de grupos	8883.113	6	1480.519		
	Total	2217393.840	8			
Nueve meses	Entre grupos	887296.107	2	443648.053	2419.737	.000
	Dentro de grupos	1100.073	6	183.346		
	Total	888396.180	8			
Doce meses	Entre grupos	411565.509	2	205782.754	448.314	.000
	Dentro de grupos	2754.087	6	459.014		
	Total	414319.596	8			

Tabla 5.22 Comparaciones múltiples del análisis de varianza de los resultados de San Blas, Acajutla y La Puntilla

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
Tres meses	11	12	325.10000 [*]	24.99784	.000	252.1637	398.0363
		13	1181.57500 [*]	24.99784	.000	1108.638	1254.5113
		7					
	12	11	-325.10000 [*]	24.99784	.000	-	-252.1637
		13	856.47500 [*]	24.99784	.000	398.0363	783.5387
		3					
13	11	-1181.57500 [*]	24.99784	.000	-	-1108.6387	
	12	-856.47500 [*]	24.99784	.000	-	-783.5387	
Seis meses	11	12	406.86667 [*]	31.41676	.000	306.1050	507.6283

Variable dependiente	(I) Sitio	(J) Sitio	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
						Límite inferior	Límite superior
		13	1193.43333 [*]	31.41676	.000	1092.6717	1294.1950
	12	11	-406.86667 [*]	31.41676	.000	-507.6283	-306.1050
		13	786.56667 [*]	31.41676	.000	685.8050	887.3283
	13	11	-1193.43333 [*]	31.41676	.000	-1294.1950	-1092.6717
		12	-786.56667 [*]	31.41676	.000	-887.3283	-685.8050
Nueve meses	11	12	213.06667 [*]	11.05578	.000	177.6079	248.5254
		13	746.53333 [*]	11.05578	.000	711.0746	781.9921
	12	11	-213.06667 [*]	11.05578	.000	-248.5254	-177.6079
		13	533.46667 [*]	11.05578	.000	498.0079	568.9254
	13	11	-746.53333 [*]	11.05578	.000	-781.9921	-711.0746
		12	-533.46667 [*]	11.05578	.000	-568.9254	-498.0079
Doce meses	11	12	142.73333 [*]	17.49313	.001	86.6283	198.8383
		13	507.83333 [*]	17.49313	.000	451.7283	563.9383
	12	11	-142.73333 [*]	17.49313	.001	-198.8383	-86.6283
		13	365.10000 [*]	17.49313	.000	308.9950	421.2050
	13	11	-507.83333 [*]	17.49313	.000	-563.9383	-451.7283
		12	-365.10000 [*]	17.49313	.000	-421.2050	-308.9950

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Al analizar los resultados de las comparaciones múltiples, puede verse que todas las medias difieren significativamente entre ellas. De acuerdo a lo presentado en la Tabla 1.4 San Blas se clasifica como de agresividad muy alta, Acajutla tiene agresividad alta y La Puntilla, agresividad media.

5.1.4 Mapa de Corrosión Atmosférica de El Salvador en base al acero al carbono

Con los datos a doce meses de monitoreo se construyó el mapa de corrosión de puntos presentado en la

Figura 5.12, empleando el Software ArcMap de ArcGis; inicialmente se georrefenció cada uno de los sitios, los cuales fueron asociados a la velocidad de corrosión a los doce meses y graficados en el mapa.

Como puede verse en el mapa, toda el Área Metropolitana de San Salvador tiene agresividad baja, con valores que oscilan entre 47.9 y 193.4 $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$, mientras que las zonas rurales presentan agresividad baja, con valores que no sobrepasan 100 $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$. Las atmósferas marinas varían entre agresividad media en La Puntilla (208.7 $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$), alta en Acajutla (573.8 $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) y muy alta en San Blas (716.5 $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$).

5.1.5 Productos de corrosión del acero al carbono

Para encontrar la estructura cristalina (arreglo molecular) de los productos de corrosión se analizó por Difracción de Rayos X los óxidos de una atmósfera urbana (UCA), una atmósfera rural (Los Planes) y una atmósfera marina (San Blas).

Las muestras se analizaron por medio de la técnica de Difracción de Rayos X, utilizando un difractómetro marca Siemens, modelo D5000, con radiación de ánodo de Cobre monocromado ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) en el Laboratorio de Geología de la empresa LaGeo.

Además se analizó los mismos óxidos por la técnica de Microscopio Electrónico de Barrido, realizándose además el análisis elemental de los óxidos por Espectroscopia de Energía Dispersada de Rayos X. Ambas técnicas fueron realizadas en el IQS de Barcelona.

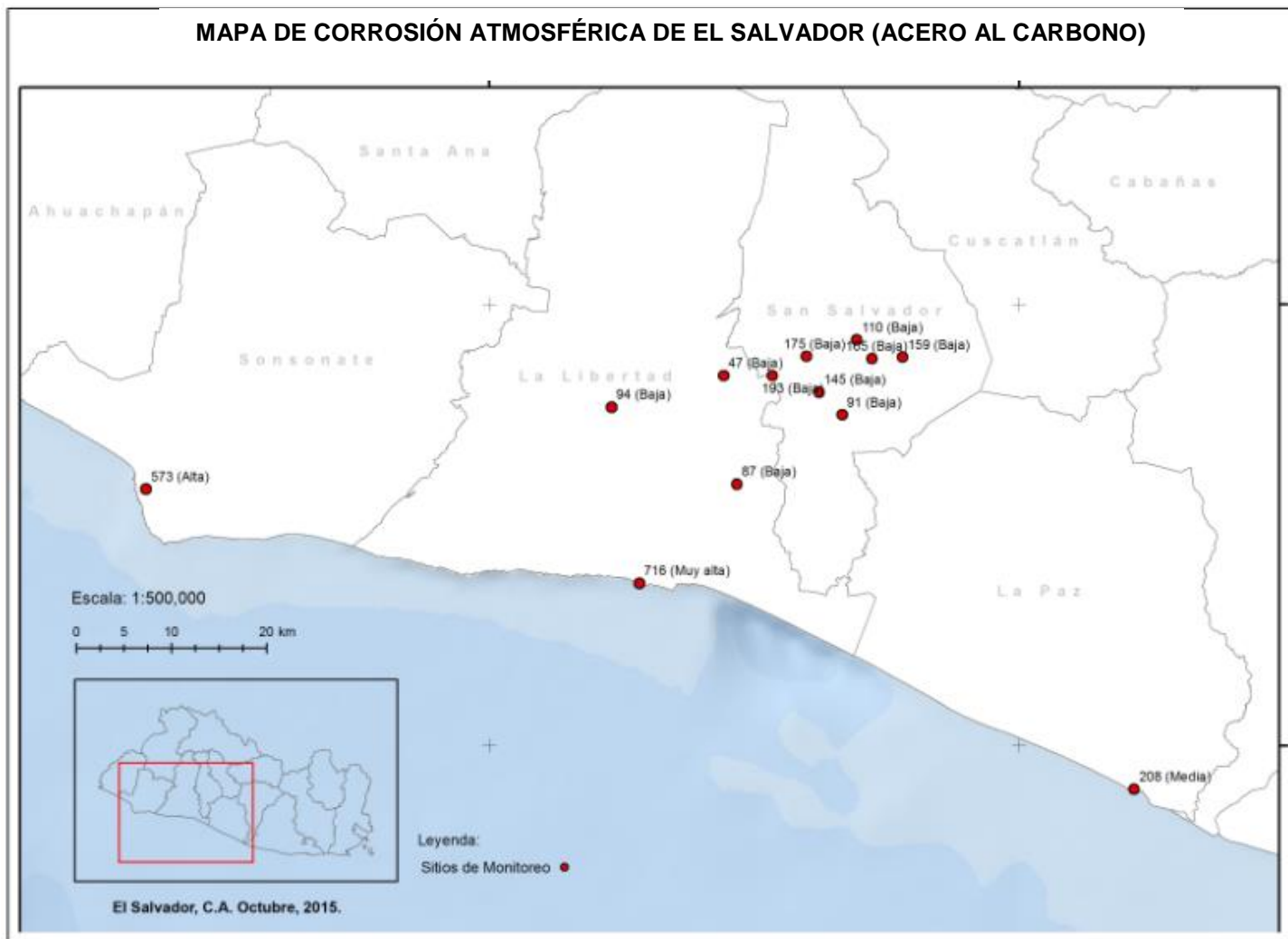


Figura 5.12 Mapa de Corrosión Atmosférica de El Salvador en base a los resultados en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ del acero al carbono

Resultados en atmósferas urbanas

El resultado del análisis por Difracción de rayos X del óxido obtenido en las láminas expuestas en la UCA se presenta en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23 Resultados de DRX para la atmósfera urbana de la UCA

Sitio / Tipo de atmósfera	Composición Mineralógica (DRX)	%	Descripción macroscópica
UCA Bulevar Los Próceres / Urbana	Lepidocrocita (FeO(OH))	35	Muestra café rojizo, formada por partículas finas café, magnéticas, laminillas metálicas gris oscuro y plateadas, con pátina de oxidación. Fragmentos traslúcidos con brillo vítreo y de forma irregular (10%), dureza alta. Abundantes fibras aciculares color amarillo-café. No hay reacción al HCl (al 10%)
	Hematita (Fe ₂ O ₃)	22	
	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	22	
	Goetita (Fe ₂ O ₃ .H ₂ O)	21	

Las micrografías y el análisis elemental del óxido de la UCA se presentan en la Figura 5.13.

El resultado del análisis por Difracción de rayos X del óxido obtenido en las láminas expuestas en Los Planes se presenta en la Tabla 5.24.

Tabla 5.24 Resultados de DRX para la atmósfera rural de Los Planes

Sitio / Tipo de atmósfera	Composición Mineralógica (DRX)	%	Descripción macroscópica
Los Planes de Renderos / Rural	Lepidocrocita (FeO(OH))	37	Muestra café rojizo, formada por partículas finas café, magnéticas. Fragmentos traslúcidos de brillo vítreo, dureza alta, forma irregular (30%). Abundantes fibras aciculares amarillo-café. No hay reacción al HCl (al 10%)
	Hematita (Fe ₂ O ₃)	34	
	Magnetita (Fe ₃ O ₄)	29	

Las micrografías y el análisis elemental del óxido de Los Planes se presentan en la Figura 5.14.

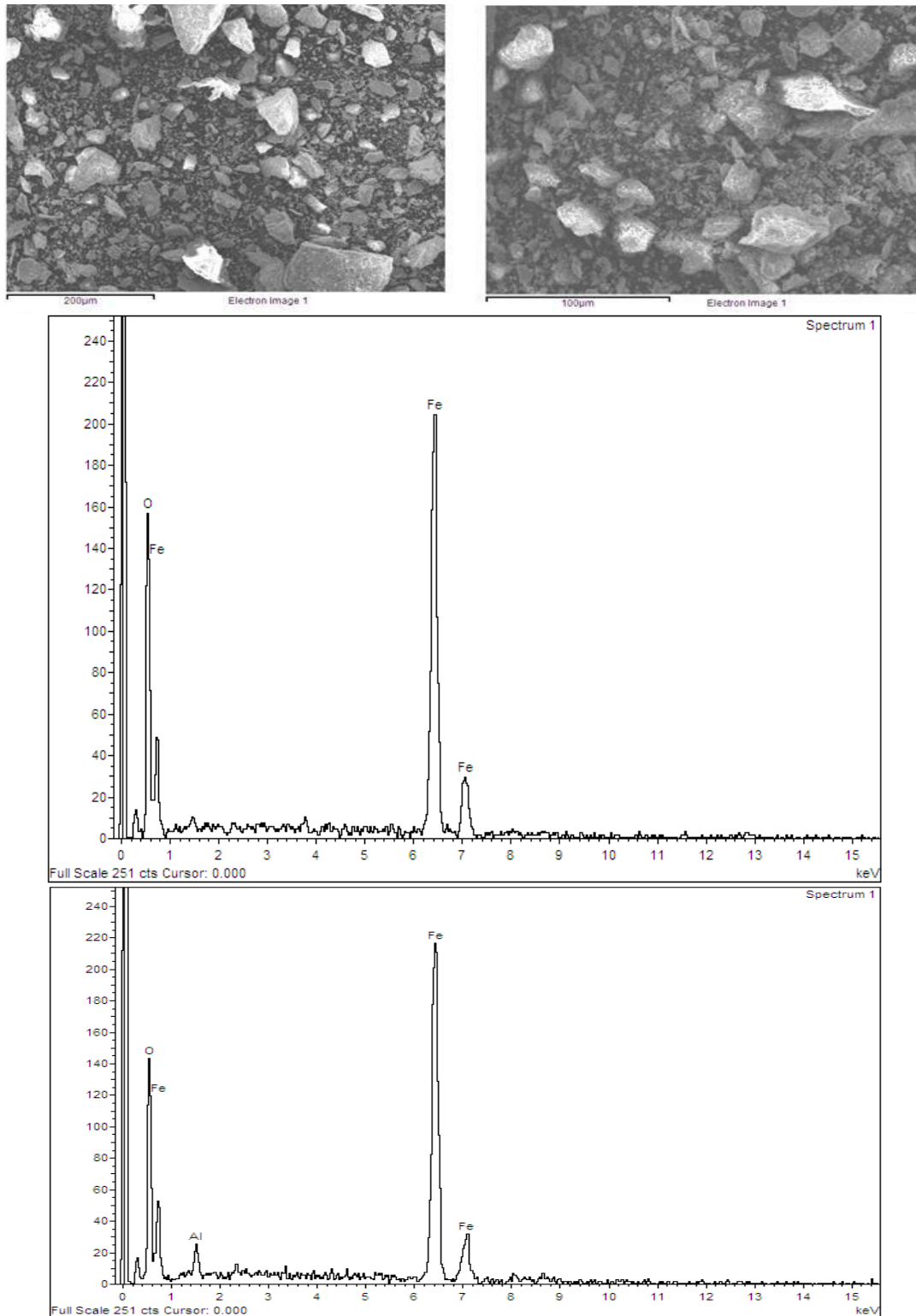


Figura 5.13 Micrografías y análisis elemental del óxido obtenido en la UCA

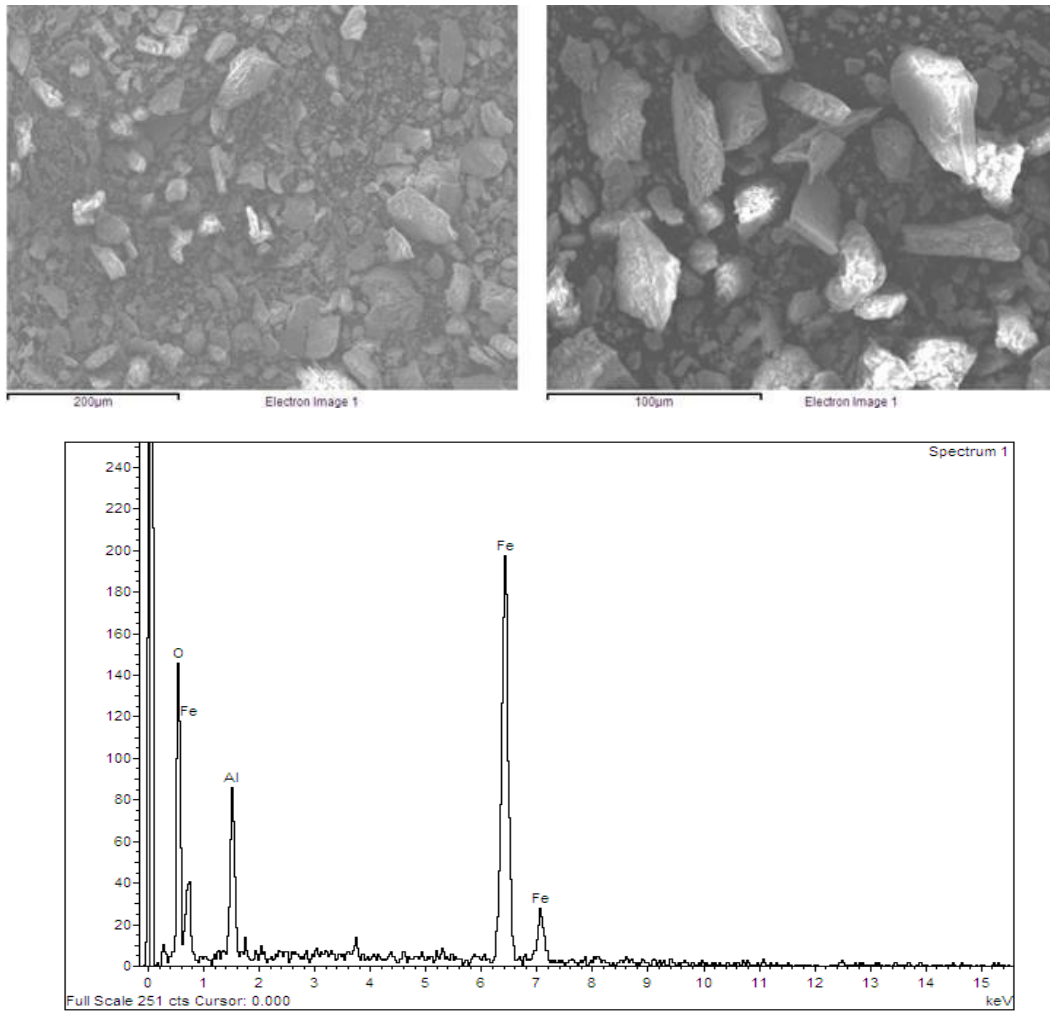


Figura 5.14 Micrografías y análisis elemental del óxido obtenido en Los Planes

El resultado del análisis por Difracción de rayos X del óxido obtenido en las láminas expuestas en San Blas se presenta en la Tabla 5.25.

Tabla 5.25 Resultados de DRX para la atmósfera rural de Los Planes

Sitio / Tipo de atmósfera	Composición Mineralógica (DRX)	%	Descripción macroscópica
San Blas / Marina	Magnetita (Fe_3O_4)	35	Muestra café rojizo, conformada por partículas amarillo-naranja y café y láminas metálicas angulares con superficie irregular. Se observan láminas con pátina de oxidación color amarillo-naranja, algunas magnéticas. Pocas láminas plateadas de dureza media (no magnéticas). Fragmentos traslúcidos, angulares, dureza alta, tamaño arena gruesa (10%). No hay reacción al HCl (al 10%) Longitud máxima láminas: 1.0 cm, espesor máximo: 0.1 cm.
	Lepidocrocita ($\text{FeO}(\text{OH})$)	35	
	Hematita (Fe_2O_3)	30	

Las micrografías y el análisis elemental del óxido de San Blas se presentan en la Figura 5.15.

En los tres sitios se tiene presencia de lepidocrocita, hematita y magnetita. El sitio marino es el que presenta una mayor presencia de magnetita, la cual está asociada a la presencia de cloruros. En el análisis elemental de los óxidos se ha encontrado la presencia de oxígeno y hierro como era de esperarse, así como aluminio.

En el análisis de DRX se encontró fragmentos traslúcidos y en Los Planes se detectó un pico de óxido de aluminio, lo que asociado al análisis elemental señalan una posible contaminación debida a la lija que se empleó para pulir las láminas.

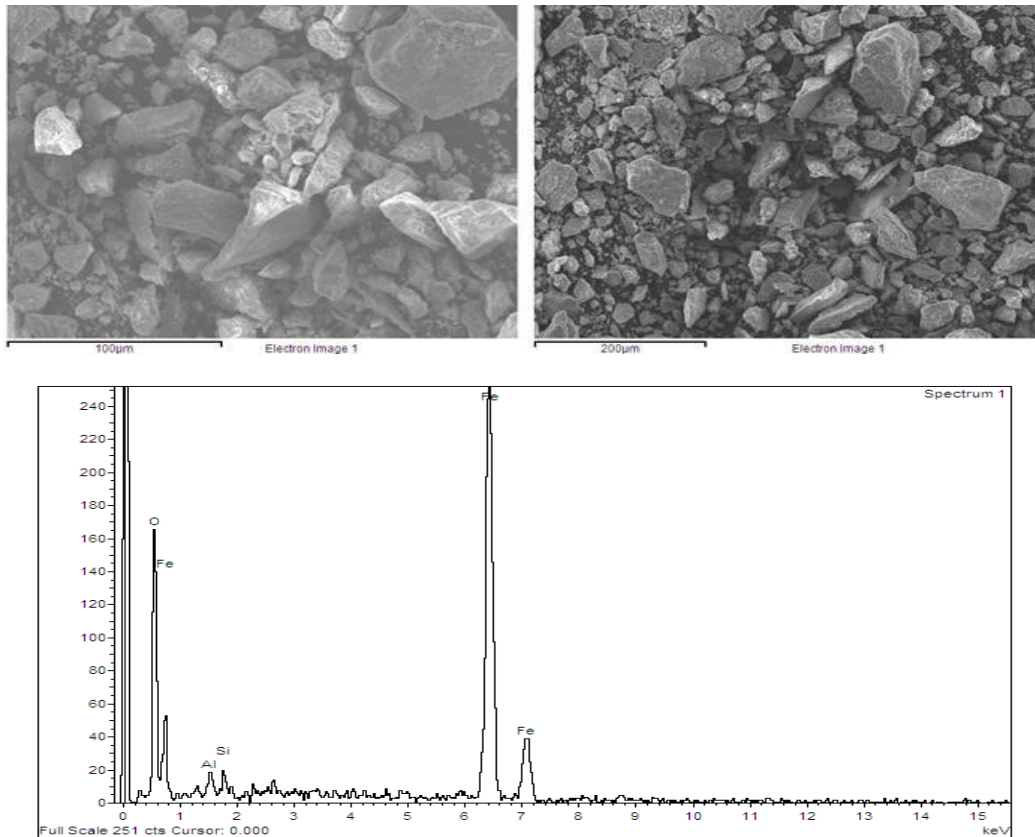


Figura 5.15 Micrografías y análisis elemental del óxido obtenido en San Blas

5.2 Resultados del Aluminio

En la Tabla 5.26 se presenta los resultados de las velocidades de corrosión para el aluminio en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ y en la Tabla 5.27, estos resultados en $\mu\text{m}\cdot\text{y}^{-1}$:

Tabla 5.26 Velocidades de corrosión del aluminio en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Santa Tecla	Urbana	0.070 ± 0.035	0.043 ± 0.015	0.066 ± 0.000	0.071 ± 0.003
Bicentenario	Urbana	0.674 ± 0.015	0.262 ± 0.220	-	-
UCA	Urbana	0.112 ± 0.027	0.117 ± 0.000	0.069 ± 0.007	0.042 ± 0.025
UTEC	Urbana	0.347 ± 0.114	0.388 ± 0.118	0.104 ± 0.001	0.236 ± 0.090
San Marcos	Urbana	0.206 ± 0.037	0.174 ± 0.058	0.173 ± 0.034	0.062 ± 0.015

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en g.m ⁻² .año ⁻¹			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
UDB	Urbana	0.920 ± 0.327	0.445 ± 0.088	0.460 ± 0.082	0.482 ± 0.115
Soyapango	Industrial	0.227 ± 0.038	0.021 ± 0.000	0.047 ± 0.029	0.183 ± 0.042
Bulevar del Ejército	Industrial	0.185 ± 0.024	0.149 ± 0.024	0.074 ± 0.025	0.174 ± 0.032
Comasagua	Rural	0.101 ± 0.042	0.270 ± 0.080	0.311 ± 0.017	0.457 ± 0.102
Los Planes	Rural	0.547 ± 0.064	0.626 ± 0.068	0.145 ± 0.000	0.147 ± 0.051
Villanueva	Urbana	0.131 ± 0.011	0.056 ± 0.009	0.030 ± 0.005	0.279 ± 0.019
Acajutla	Marina – Industrial	1.036 ± 0.050	0.680 ± 0.072	0.410 ± 0.070	0.278 ± 0.017
San Blas	Marina - Urbana	2.228 ± 0.296	1.119 ± 0.100	0.891 ± 0.046	1.063 ± 0.149
La Puntilla	Marina (rural)	0.798 ± 0.082	0.477 ± 0.028	0.351 ± 0.014	0.877 ± 0.045

Tabla 5.27 Velocidades de corrosión del aluminio en $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Santa Tecla	Urbana	0.027 ± 0.014	0.017 ± .006	0.026 ± 0.000	0.028 ± 0.001
Bicentenario	Urbana	0.263 ± 0.006	0.102 ± 0.086	-	-
UCA	Urbana	0.044 ± 0.011	0.046 ± 0.000	0.027 ± 0.003	0.016 ± 0.010
UTEC	Urbana	0.136 ± 0.045	0.152 ± 0.046	0.041 ± 0.000	0.092 ± 0.035
San Marcos	Urbana	0.080 ± 0.014	0.068 ± 0.023	0.068 ± 0.013	0.024 ± 0.006
UDB	Urbana	0.359 ± 0.128	0.174 ± 0.034	0.180 ± 0.032	0.188 ± 0.045
Soyapango	Industrial	0.089 ± 0.015	0.008 ± 0.000	0.018 ± 0.011	0.071 ± 0.016
Bulevar del Ejército	Industrial	0.072 ± 0.009	0.058 ± 0.009	0.029 ± 0.010	0.068 ± 0.013

Sitio de monitoreo	Tipo de atmósfera	Velocidad de corrosión en $\mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$			
		3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Comasagua	Rural	0.039 ± 0.016	0.105 ± 0.031	0.121 ± 0.007	0.179 ± 0.040
Los Planes	Rural	0.214 ± 0.025	0.245 ± 0.027	0.057 ± 0.000	0.057 ± 0.020
Villanueva	Urbana	0.051 ± 0.004	0.022 ± 0.004	0.012 ± 0.002	0.109 ± 0.007
Acajutla	Marina – Industrial	0.405 ± 0.020	0.266 ± 0.028	0.160 ± 0.027	0.109 ± 0.007
San Blas	Marina - Urbana	0.870 ± 0.116	0.437 ± 0.039	0.348 ± 0.018	0.415 ± 0.058
La Puntilla	Marina (rural)	0.312 ± 0.032	0.186 ± 0.011	0.137 ± 0.005	0.343 ± 0.018

En la Figura 5.16 se representa con gráficos de barra las velocidades de corrosión de cada sitio en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$, donde puede verse que las tasas de corrosión del aluminio no presentan una tendencia particular para todos los sitios monitoreados. Por ejemplo, en Acajutla las velocidades disminuyen en los cuatro períodos del estudio, por el contrario, en Comasagua, las tasas de corrosión aumentan en el tiempo.

El resto de puntos presenta un comportamiento totalmente aleatorio durante los períodos estudiados. Por ejemplo: en Santa Tecla, la velocidad disminuye de tres a seis meses y luego aumenta en los otros dos períodos; en la UCA la velocidad de corrosión aumenta de tres a seis meses y luego disminuye en los otros dos períodos; en la UTEC se tiene que la velocidad de corrosión aumenta de tres a seis meses, mientras que de seis a nueve meses disminuye, volviendo a aumentar de nueve a doce meses. En la UDB la velocidad de corrosión disminuye de tres a seis meses y luego aumenta de seis a nueve y de nueve a doce meses.

Estos resultados presentan similitud con los obtenidos en Chile (Vera, y otros 2012) y también se coincide con el proyecto MICAT donde el aluminio no presentó un ataque significativo, siendo más representativo el deterioro del metal por ensuciamiento, pérdida de brillo, moteado y picaduras (Chico, y otros).

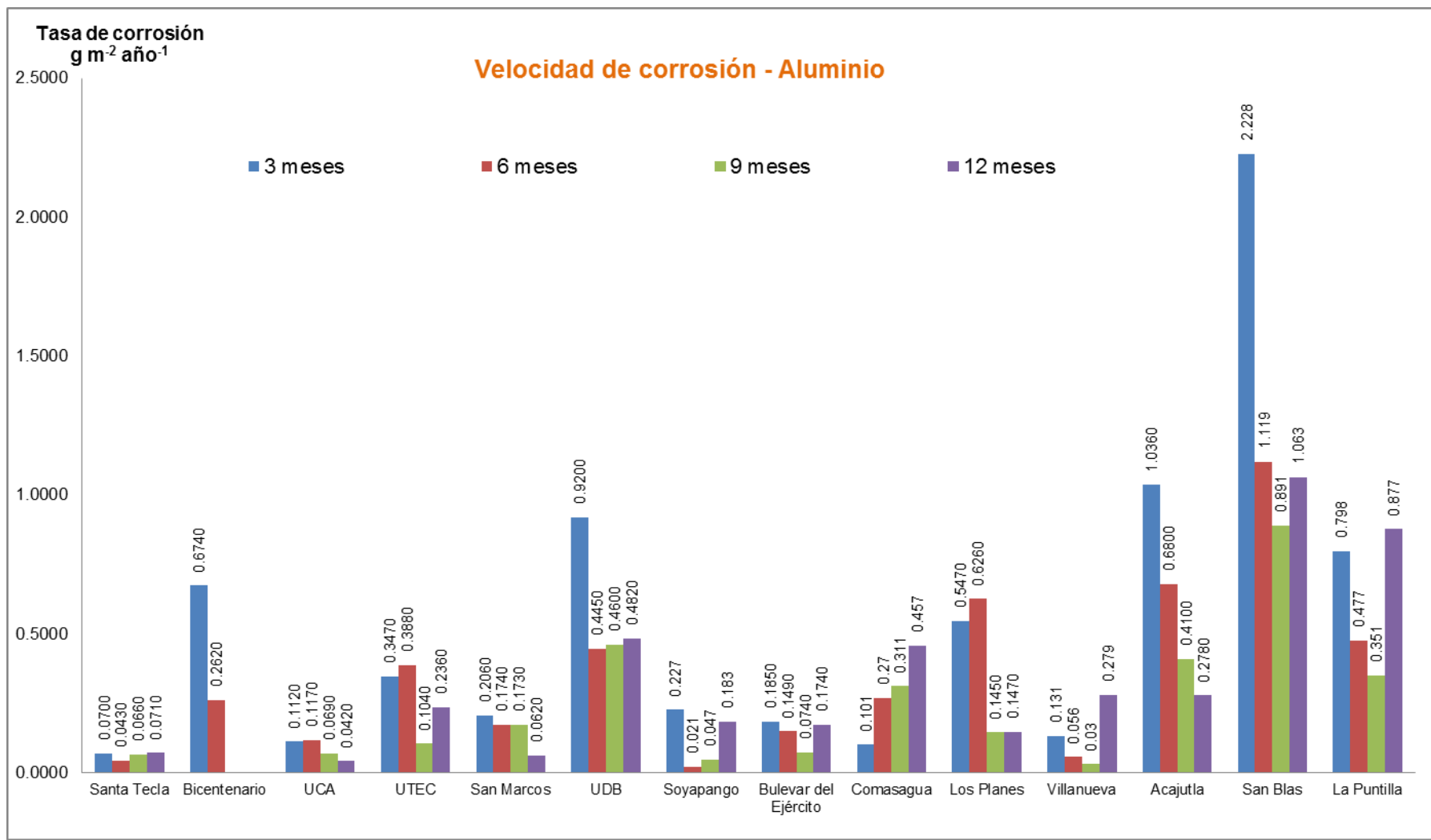
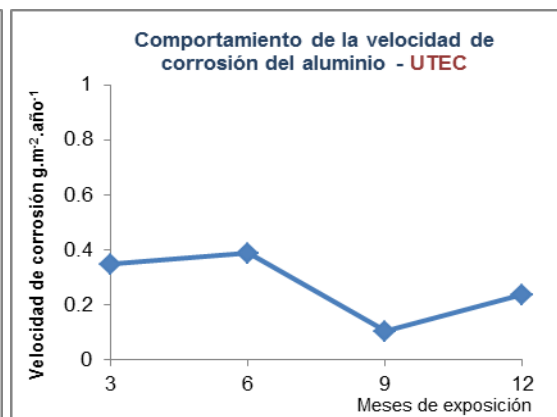
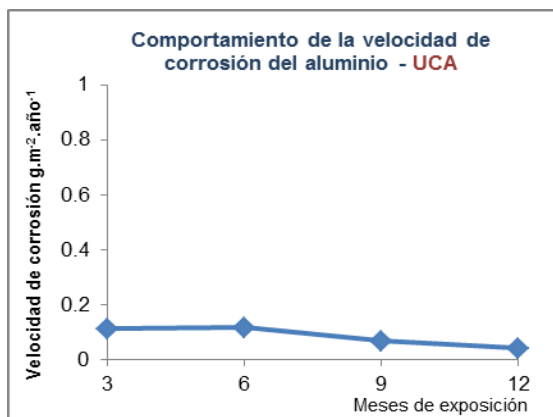
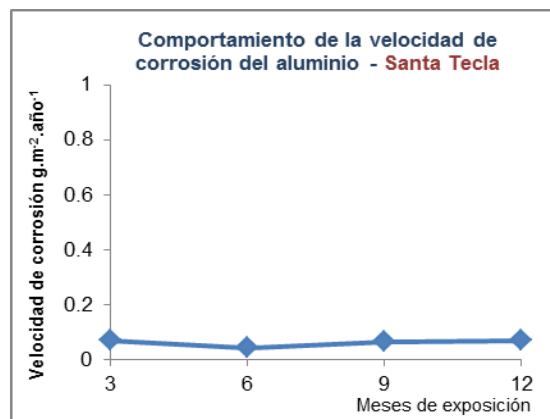


Figura 5.16 Velocidades de corrosión del aluminio en $\text{g m}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$

5.2.1 Velocidades de corrosión en el AMSS (aluminio)

Al evaluar el comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en el tiempo en cada sitio del AMSS, tal como se muestra en la Figura 5.19, se observa que en ninguno de los siete puntos evaluados hay una tendencia única (a disminuir o a aumentar), como la observada para el acero al carbono.

En Santa Tecla disminuye de tres a seis meses y luego se mantiene prácticamente constante, mientras que en la UCA disminuye en todos los períodos, pero no lo hace de forma lineal. En la UTEC de tres a seis meses la velocidad aumenta, luego disminuye bruscamente de seis a nueve meses, para volver a aumentar de nueve a doce meses. En San Marcos, la corrosión disminuye para los cuatro períodos, pero no lo hace linealmente. En la UDB de tres a seis meses se observa una disminución brusca y luego la corrosión aumenta con lentitud. En Soyapango la corrosión disminuye bruscamente de tres a seis meses, aumenta levemente de seis a nueve meses y aumenta bruscamente de nueve a doce meses.



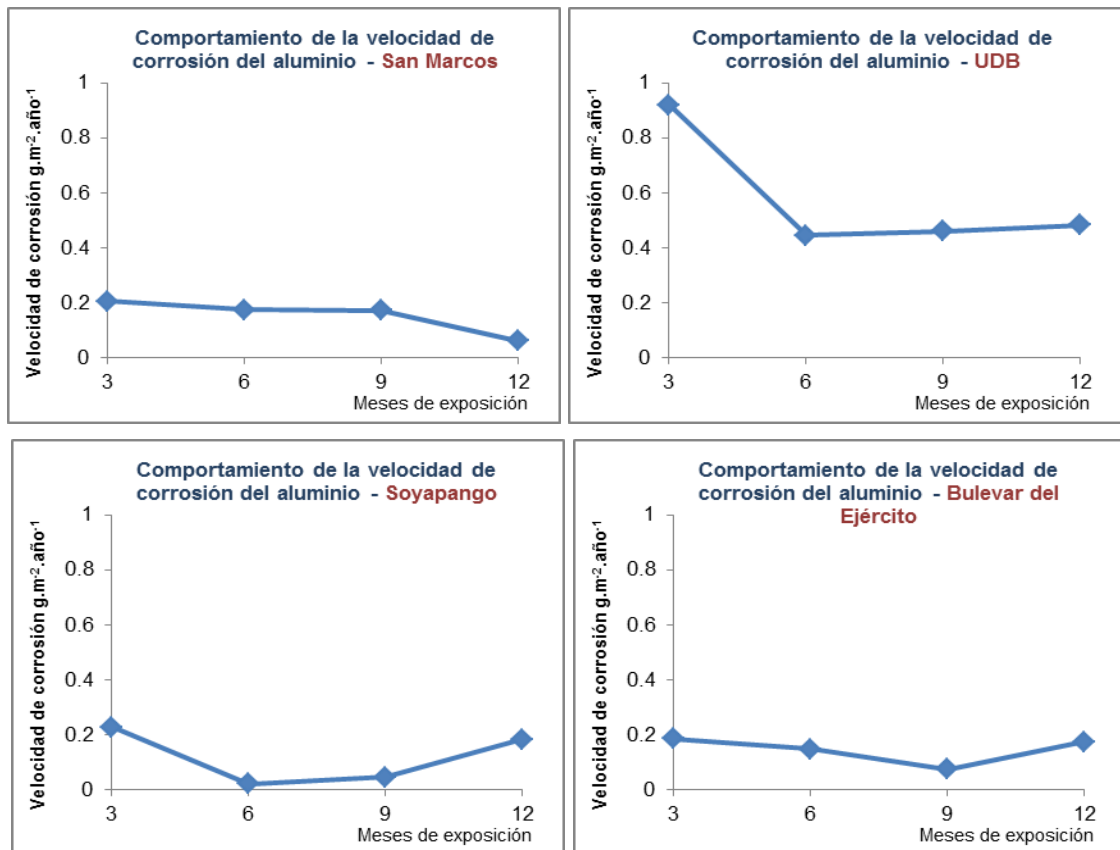


Figura 5.17 Comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en los sitios del AMSS

En el Bulevar del Ejército la velocidad disminuye de tres a seis y de seis a nueve meses y presenta un brusco aumento de nueve a doce meses. En la Figura 5.18 se presenta, en orden descendente, las velocidades de corrosión del aluminio en el AMSS para los cuatro períodos.

Puede verse que el sitio que tiene las mayores tasas para los cuatro períodos es la UDB, seguido de la UTEC, Soyapango, y San Marcos. En quinto lugar se tiene al Bulevar del Ejército, seguido por la UCA y Santa Tecla.

Puede verse que el sitio que tiene las mayores tasas para los cuatro períodos es la UDB, seguido de la UTEC, Soyapango, y San Marcos. En quinto lugar se tiene al Bulevar del Ejército, seguido por la UCA y Santa Tecla.

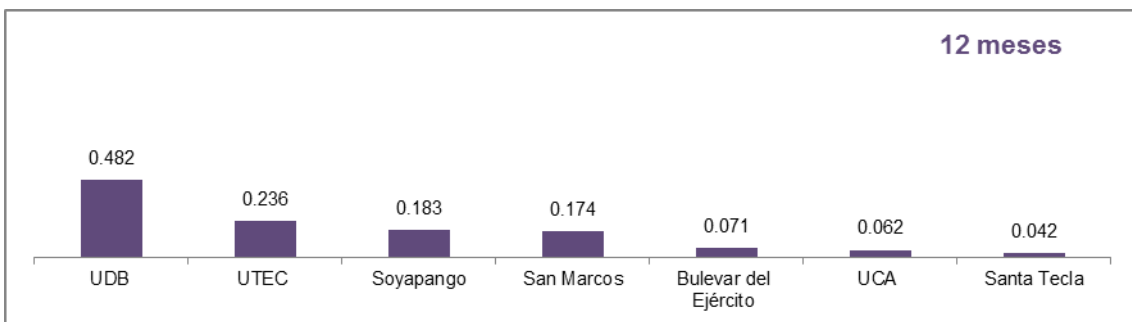
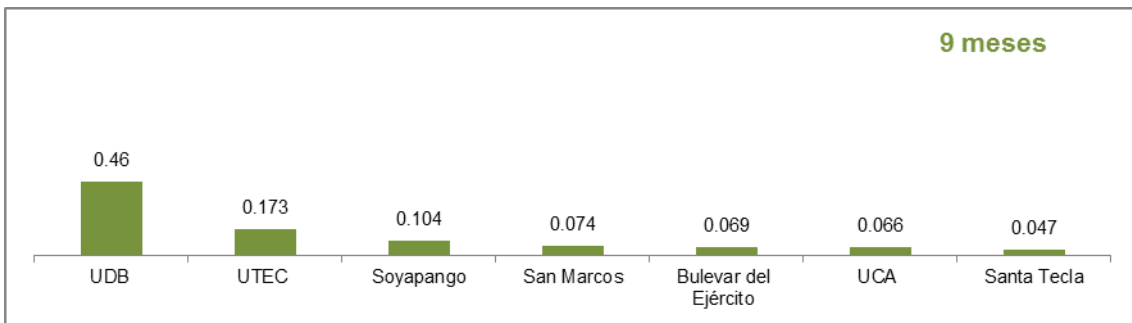
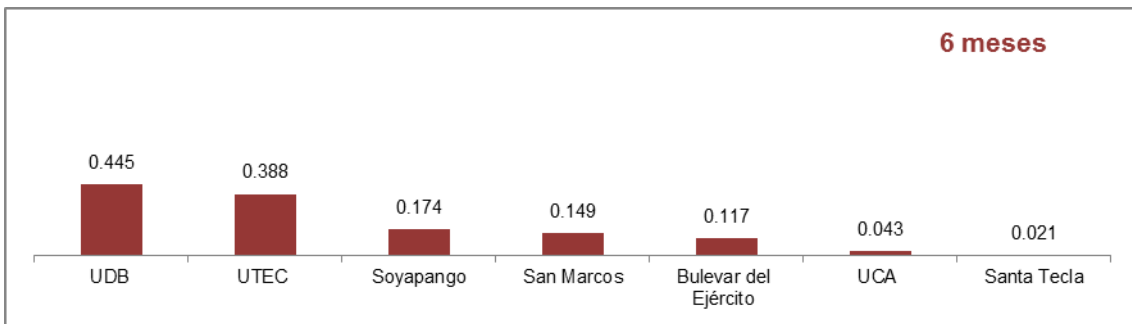
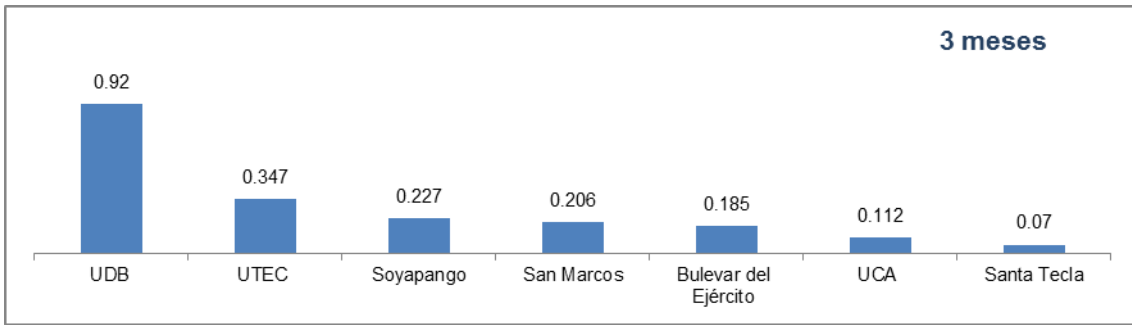


Figura 5.18 Velocidades de corrosión del aluminio (en g.m⁻².año⁻¹) del AMSS ordenadas descendientemente

En la Tabla 5.28 se muestra los resultados obtenidos para cada réplica en los siete sitios del AMSS y en la Tabla 5.29 se presenta el coeficiente de variación entre los siete sitios del AMSS; puede verse que para tres meses se tiene un valor de 87.7%, para seis meses, 81.3%, para nueve meses, 94.2% y para doce meses, 79.1%, es decir, que los resultados son totalmente diferentes entre sí.

Tabla 5.28 Resultados de velocidad del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en el AMSS

Sitio	Réplica	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
UDB	1	0.391	0.516	0.460	0.503
UDB	2	0.920	0.472	0.330	0.294
UDB	3	0.989	0.346	0.482	0.482
Utec	1	0.292	0.460	0.103	0.221
Utec	2	0.347	0.230	0.104	0.236
Utec	3	0.512	0.388	-	0.384
Soyapango	1	0.213	0.021	0.005	0.207
Soyapango	2	0.285	0.021	0.061	0.183
Soyapango	3	0.227	-	0.047	0.125
San Marcos	1	0.150	0.195	0.206	0.062
San Marcos	2	0.220	0.174	0.173	0.063
San Marcos	3	0.206	0.086	0.138	0.037
Bulevar del Ejército	1	0.172	0.127	0.065	0.124
Bulevar del Ejército	2	0.171	0.176	0.111	0.174
Bulevar del Ejército	3	0.213	0.149	0.074	0.183
UCA	1	0.139	0.117	0.061	0.007
UCA	2	0.112	0.117	0.070	0.056
UCA	3	0.085	-	0.075	0.042
Santa Tecla	1	0.112	0.050	0.067	0.071
Santa Tecla	2	0.042	0.043	0.066	0.067
Santa Tecla	3	0.070	0.021	0.066	0.141

Tabla 5.29 Coeficientes de variación entre los resultados del aluminio en los siete sitios del AMSS

Período	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Promedio	0.279	0.195	0.138	0.174
Desviación estándar	0.245	0.159	0.130	0.138
Coeficiente de variación	87.7	81.3	94.2	79.1

5.2.2 Velocidades de corrosión en atmósferas rurales o poco contaminadas fuera del AMSS (aluminio)

El comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en el tiempo es mostrada en la Figura 5.19.

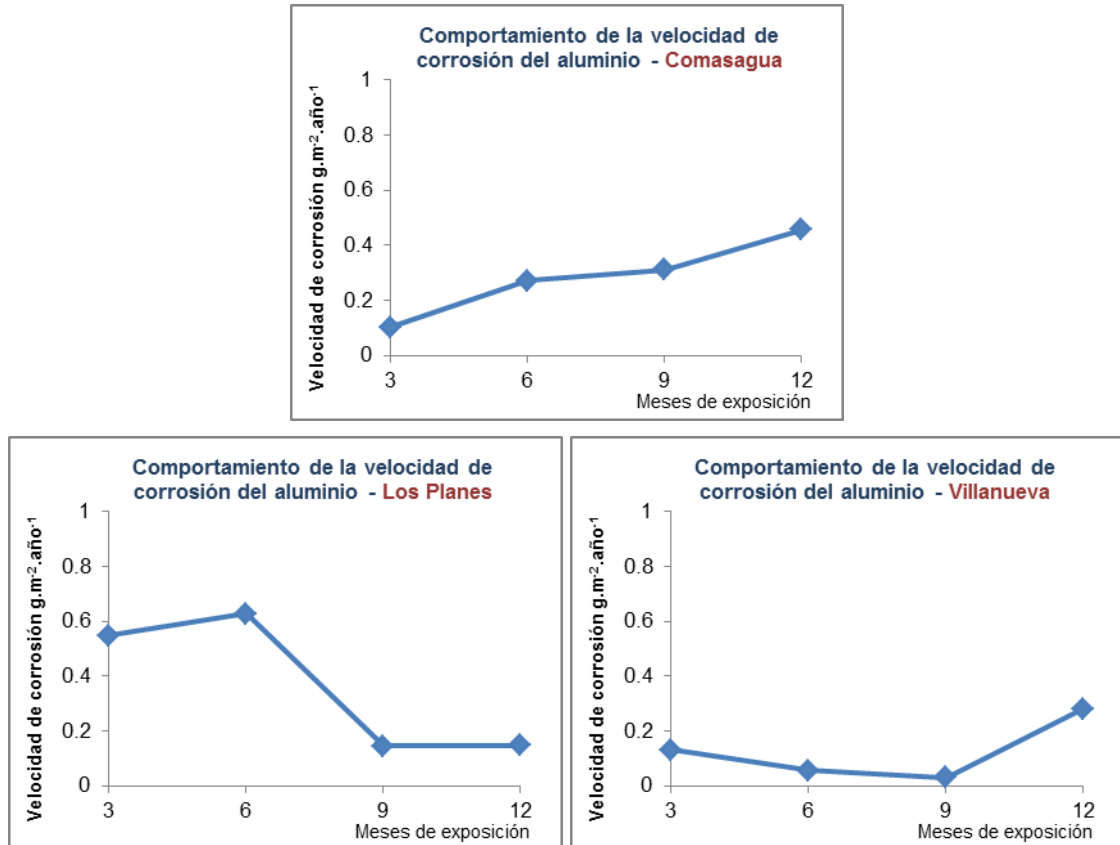


Figura 5.19 Comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS

Se observa que en Comasagua la velocidad de corrosión aumenta de tres a seis meses, luego se mantiene prácticamente constante de seis a nueve meses y luego aumenta de nueve a doce meses. En Los Planes, de tres a seis meses la tasa de corrosión aumenta levemente, mientras que de seis a nueve meses, disminuye bruscamente y de nueve a doce meses prácticamente se mantiene constante. En Villanueva de tres a seis meses y de seis a nueve meses, la tasa de corrosión disminuye suavemente, mientras que de nueve a doce meses aumenta bruscamente. Como se muestra en la Figura 5.20, a tres y seis meses es la atmósfera de Los Planes la que presenta la mayor velocidad de corrosión, mientras que a nueve y doce meses es Comasagua el sitio con la mayor tasa de corrosión para el aluminio.

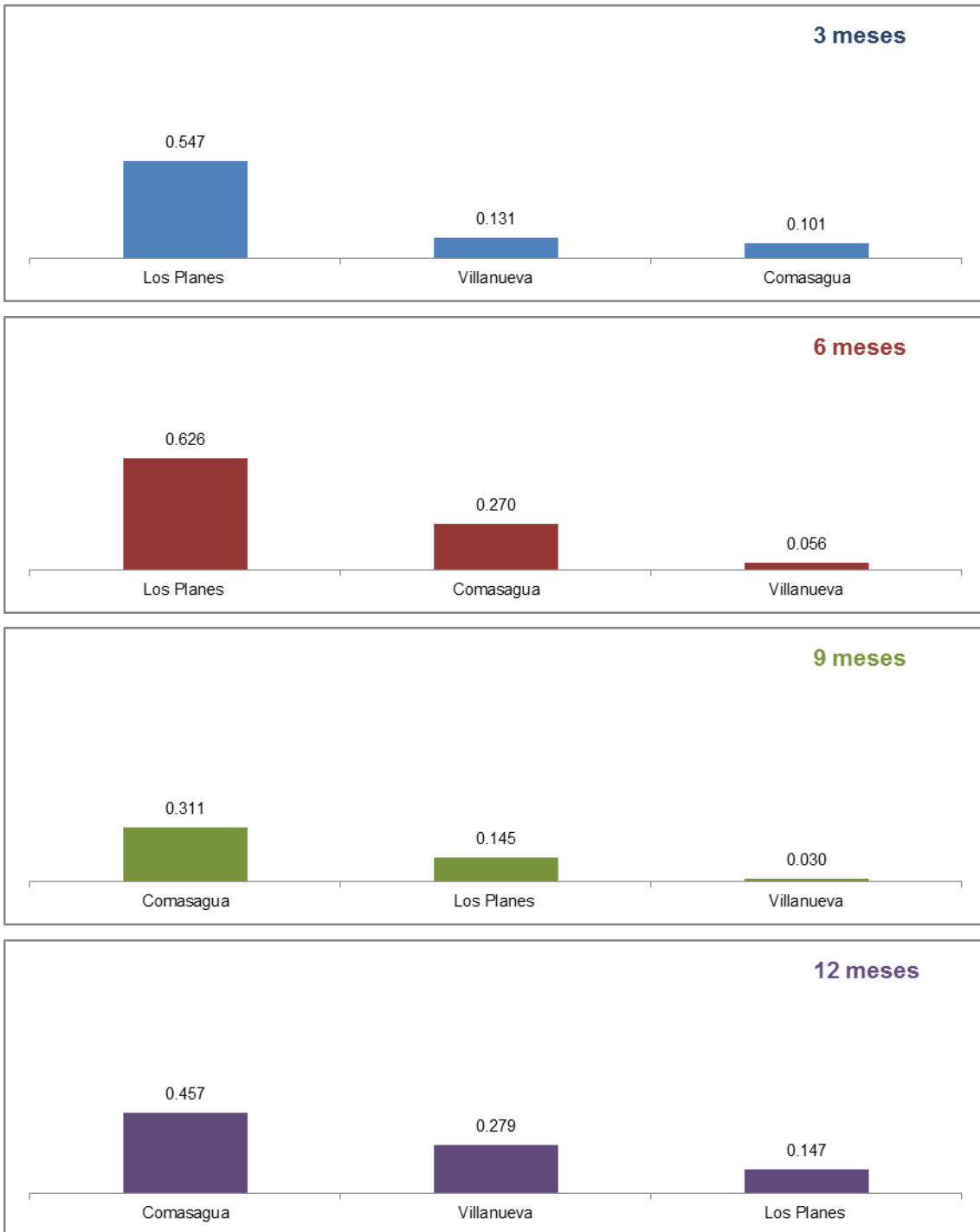


Figura 5.20 Velocidades de corrosión del aluminio (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas rurales y poco contaminadas fuera del AMSS ordenadas descendientemente

La menor velocidad de corrosión a tres meses se tiene en Comasagua, mientras que a seis y nueve meses es Villanueva y a doce meses es en Los Planes donde se tuvo menor tasa de corrosión para el aluminio.

Los resultados para cada réplica en cada sitio para cada período son mostrados en la Tabla 5.30.

Tabla 5.30 Resultados de velocidad del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en Los Planes, Villanueva y Comasagua

Sitio	Réplica	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Comasagua	1	0.172	0.292	0.292	0.331
Comasagua	2	0.101	0.143	0.322	0.533
Comasagua	3	0.097	0.27	0.319	0.457
Los Planes	1	0.502	0.673	0.145	0.232
Los Planes	2	0.592	0.658	0.145	0.147
Los Planes	3	0.548	-	-	0.141
Villanueva	1	0.123	0.062	0.031	0.292
Villanueva	2	0.139	0.049	0.03	0.265
Villanueva	3	-	-	0.022	-

El coeficiente de variación para estos tres sitios se presenta en la Tabla 5.31, donde puede verse que a tres meses es 77.54%, a seis meses, 85.46%, a nueve meses, 80.83 y a doce meses, 46.24%, lo cual indica que los resultados son totalmente diferentes entre sí.

Tabla 5.31 Coeficientes de variación entre los resultados del aluminio de Comasagua, Los Planes y Villanueva

Sitio	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$
Valor promedio	0.284	0.307	0.163	0.300
Desviación estándar	0.220	0.262	0.132	0.139
Coeficiente de variación	77.54	85.46	80.83	46.24

5.2.3 Velocidades de corrosión en atmósferas marinas (aluminio)

El comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en el tiempo es mostrada en la Figura 5.21, donde se observa que en Acajutla la velocidad de corrosión disminuye en los cuatro períodos y es el único de los trece sitios que presenta cierta linealidad con un coeficiente de determinación de 0.962, por ello es el único sitio donde se presenta este dato en el gráfico. En San Blas la corrosión disminuye bruscamente de tres seis meses y luego disminuye suavemente de seis a nueve meses, para aumentar lentamente en el último período. En La Puntilla, la velocidad

disminuye de tres a seis meses y de seis a nueve meses, pero de nueve a doce meses aumenta bruscamente.

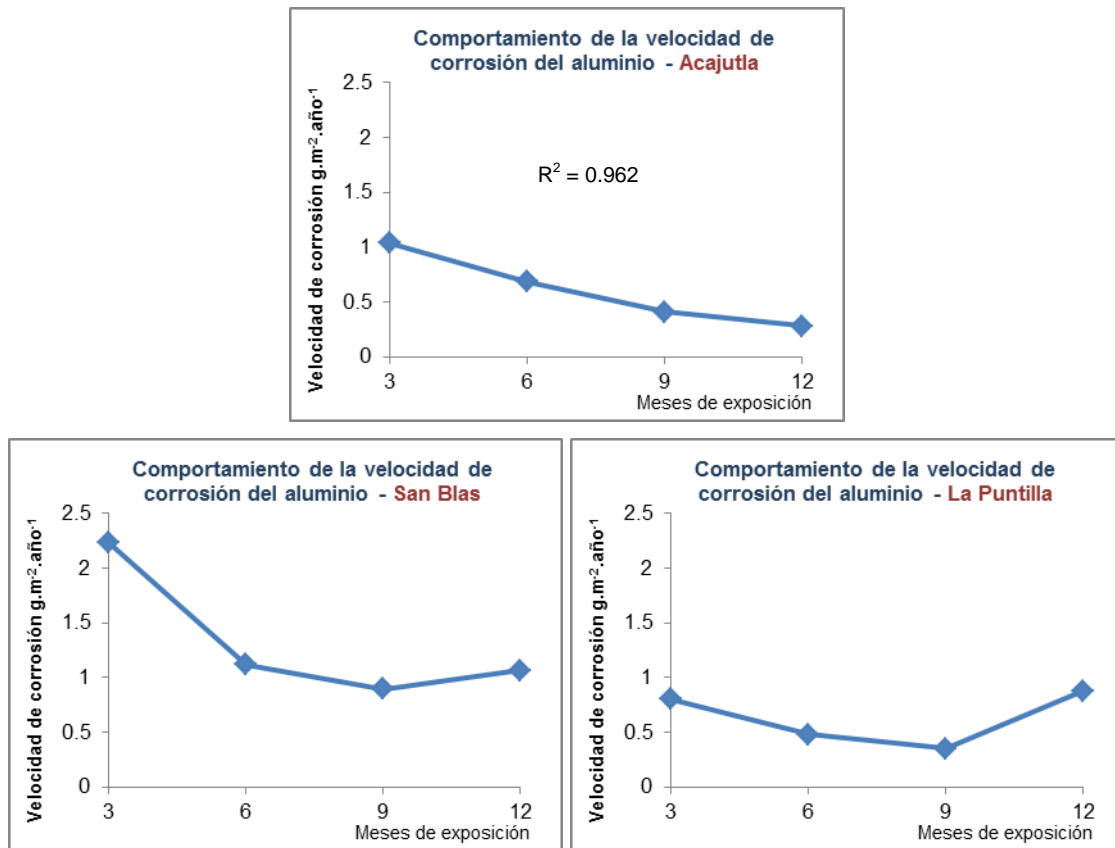


Figura 5.21 Comportamiento de la velocidad de corrosión del aluminio en atmósferas marinas

En la Figura 5.22 se presenta las velocidades de corrosión para las tres atmósferas marinas, donde puede verse que San Blas tiene la mayor tasa de corrosión para los cuatro períodos evaluados. Acajutla ocupa el segundo lugar para tres, seis y nueve meses y es la de menor velocidad de corrosión para doce meses. La Puntilla tiene la menor tasa de corrosión para tres, seis y nueve meses y ocupa el segundo lugar a doce meses.

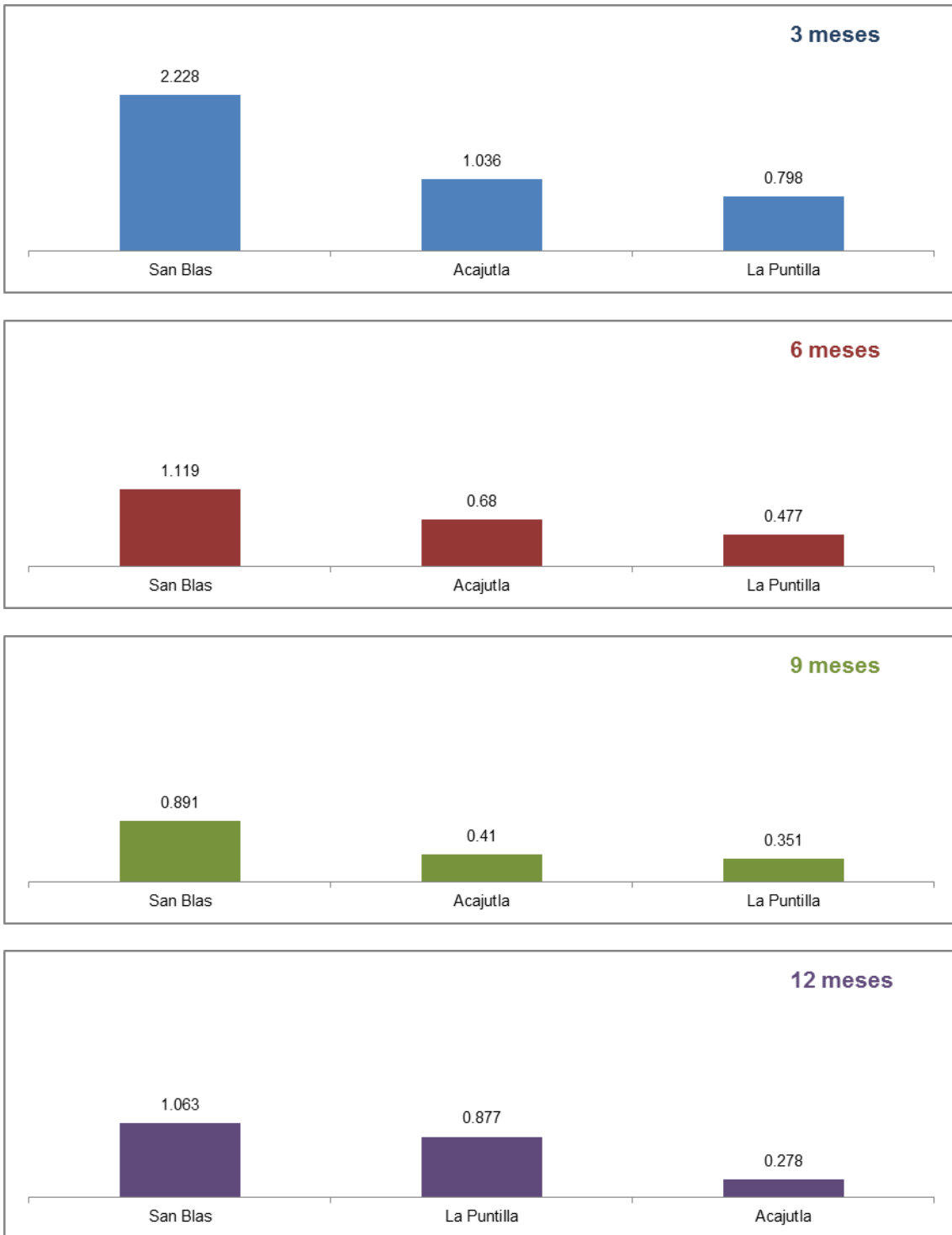


Figura 5.22 Velocidades de corrosión del aluminio (en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$) de las atmósferas marinas ordenadas descendientemente

En la Tabla 5.32 se muestra los resultados para cada réplica en cada período para Acajutla, San Blas y La Puntilla y en la Tabla 5.33, los coeficientes de variación para las atmósferas marinas; puede verse que es 50.33% para tres meses, 38.38% para

seis meses, 47.73% para nueve meses y 47.72% para doce meses, lo cual indica que los tres sitios se comportan de manera diferente entre sí para los cuatro períodos estudiados.

Tabla 5.32 Resultados de velocidad del aluminio en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ obtenidos para cada réplica en Acajutla, San Blas y La Puntilla

Sitio	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$
Acajutla	1.082	0.633	0.329	0.277
Acajutla	1.043	0.644	0.469	0.261
Acajutla	0.983	0.763	0.41	0.295
San Blas	2.568	1.23	0.886	1.085
San Blas	2.084	1.037	0.848	1.063
San Blas	2.032	1.091	0.939	0.817
La Puntilla	0.809	0.495	0.339	0.929
La Puntilla	0.711	0.445	0.347	0.849
La Puntilla	0.874	0.491	0.366	0.854

Tabla 5.33 Coeficientes de variación entre los resultados del aluminio de Acajutla, San Blas, La Puntilla

Sitio	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$	$\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$
Valor promedio	1.354	0.759	0.548	0.714
Desviación estándar	0.682	0.291	0.262	0.340
Coeficiente de variación	50.33	38.38	47.73	47.62

Con los datos obtenidos para el aluminio a doce meses, se construyó el mapa de corrosión que se presenta en la Figura 5.23.

Se muestra cada uno de los puntos monitoreados con el respectivo valor obtenido a doce meses. Las unidades son $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$, que son las empleadas en la Norma ISO 9223 para clasificar la agresividad de las atmósferas, tal como se mostró en la Tabla 1.4.

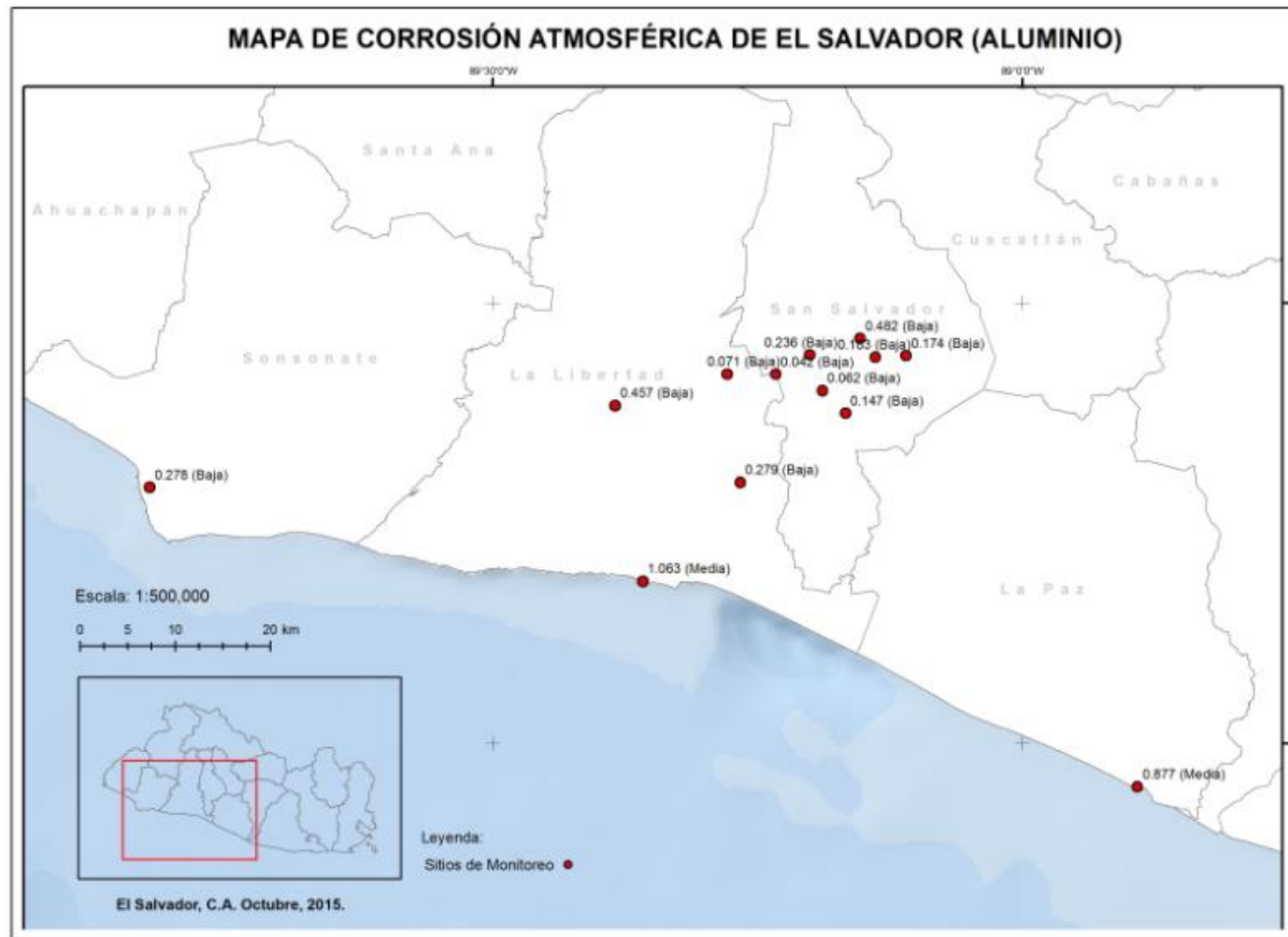


Figura 5.23 Mapa de Corrosión Atmosférica de El Salvador en base a los resultados en $\text{g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ del aluminio

Como puede verse, el Área Metropolitana de San Salvador y las atmósferas rurales tienen agresividad baja, con valores que mayoritariamente oscilan entre 0.05 y 0.50 g.m⁻².año⁻¹. Las atmósferas marinas varían entre agresividad baja a media con valores que no sobrepasan 1.0 g.m⁻².año⁻¹.

Como se ha visto en esta sección, los resultados del aluminio denotan que la corrosión en este metal no es generalizada como en el caso del acero al carbono, ya que no se ha encontrado una tendencia clara en el comportamiento del fenómeno al emplear aluminio.

Se intentó realizar una relación del aspecto presentado por las láminas después de la exposición con los resultados obtenidos. En la Tabla 5.34 se describe el aspecto de las láminas después de la exposición.

Tabla 5.34 Resultados de cada sitio y descripción del aspecto de las láminas después de la exposición

Sitio	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Santa Tecla	0.070	0.043	0.066	0.071
	Ambas caras lisas al tacto y con brillo.	Ambas caras lisas al tacto y con brillo.	Ambas caras lisas al tacto y con brillo.	Ambas caras lisas al tacto y con brillo.
UCA	0.112	0.117	0.069	0.042
	Cara delantera ligeramente áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.	Cara delantera ligeramente áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.	Cara delantera ligeramente áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.	Cara delantera ligeramente áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.
UTEC	0.347	0.388	0.104	0.236
	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.
San Marcos	0.206	0.174	0.173	0.062
	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.
UDB	0.92	0.445	0.46	0.482
	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.
Soyapango	0.227	0.021	0.047	0.183
	Cara delantera ligeramente	Cara delantera ligeramente	Cara delantera ligeramente	Cara delantera ligeramente

Sitio	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
	áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.	áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.	áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.	áspera y sin brillo. Cara trasera: lisa sin brillo.
Bulevar del Ejército	0.185	0.149	0.074	0.174
	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.
Comasagua	0.101	0.270	0.311	0.457
	Ambas caras lisas y sin brillo.	Ambas caras lisas y sin brillo.	Ambas caras lisas y sin brillo.	Ambas caras lisas y sin brillo.
Los Planes	0.547	0.626	0.145	0.147
	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.	Ambas caras lisas y con brillo.
Villanueva	0.131	0.056	0.03	0.279
	Ambas caras lisas y sin brillo.	Ambas caras lisas y sin brillo.	Ambas caras lisas y sin brillo.	Ambas caras lisas y sin brillo.
Acajutla	1.036	0.680	0.410	0.278
	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: Lisa y sin brillo.	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: Lisa y sin brillo.	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: Lisa y sin brillo.	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: Lisa y sin brillo.
San Blas	2.228	1.119	0.891	1.063
	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: con partes ásperas y el resto con brillo.	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: con partes ásperas y el resto con brillo.	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: con partes ásperas y el resto con brillo.	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo. Cara trasera: con partes ásperas y el resto con brillo.
La Puntilla	0.798	0.477	0.351	0.877
	Cara frontal: Áspera al tacto y sin brillo Cara trasera: lisa y sin brillo.	Cara frontal: Áspera al tacto y sin brillo Cara trasera: lisa y sin brillo.	Cara frontal: Áspera al tacto y sin brillo Cara trasera: lisa y sin brillo.	Cara frontal: Áspera al tacto y sin brillo Cara trasera: lisa y sin brillo.

Para correlacionar el aspecto de la lámina con la velocidad de corrosión, se asignó un valor nominal al aspecto de las láminas, tal como se muestra en la Tabla 5.35 y en la Tabla 5.36 se presenta el valor asignado a cada sitio.

Tabla 5.35 Valor nominal asignado al aspecto de las láminas de aluminio después de la exposición

Valor	Aspecto
0	Ambas caras lisas y con brillo.
1	Cara frontal: con manchas y sin brillo, ligeramente áspera.
	Cara trasera: lisa y sin brillo.
2	Cara frontal: Áspera al tacto y sin brillo
	Cara trasera: lisa y sin brillo.
3	Cara frontal: Muy áspera al tacto y sin brillo.
	Cara trasera: Lisa y sin brillo / con partes ásperas y el resto con brillo

Tabla 5.36 Valor nominal del aspecto de las láminas de aluminio de cada sitio

Sitio	Aspecto de las láminas (valor nominal)
Santa Tecla	0
UCA	1
UTEC	0
San Marcos	0
UDB	0
Soyapango	1
Bulevar del Ejército	0
Comasagua	0
Los Planes	0
Villanueva	0
Acajutla	3
San Blas	3
La Puntilla	2

En la Figura 5.24 se muestra una lámina expuesta durante doce meses en el Bulevar del Ejército, junto con una lámina sin exponer; en la Figura 5.25 se muestra las láminas de aluminio expuestas durante doce meses a las atmósferas marinas.

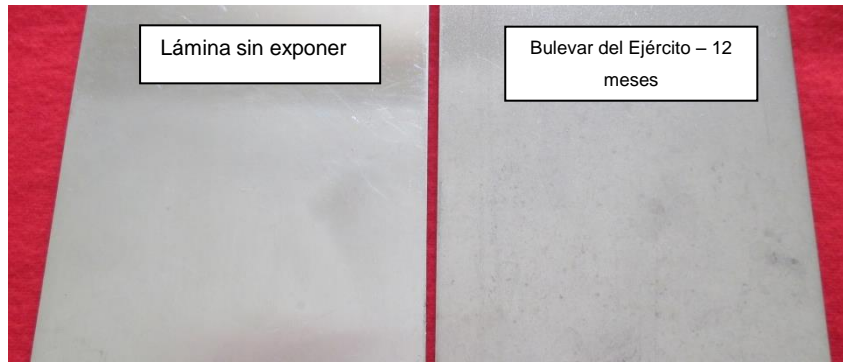


Figura 5.24 Aspecto de una lámina sin exponer y de una lámina del Bulevar del Ejército expuesta durante 12 meses

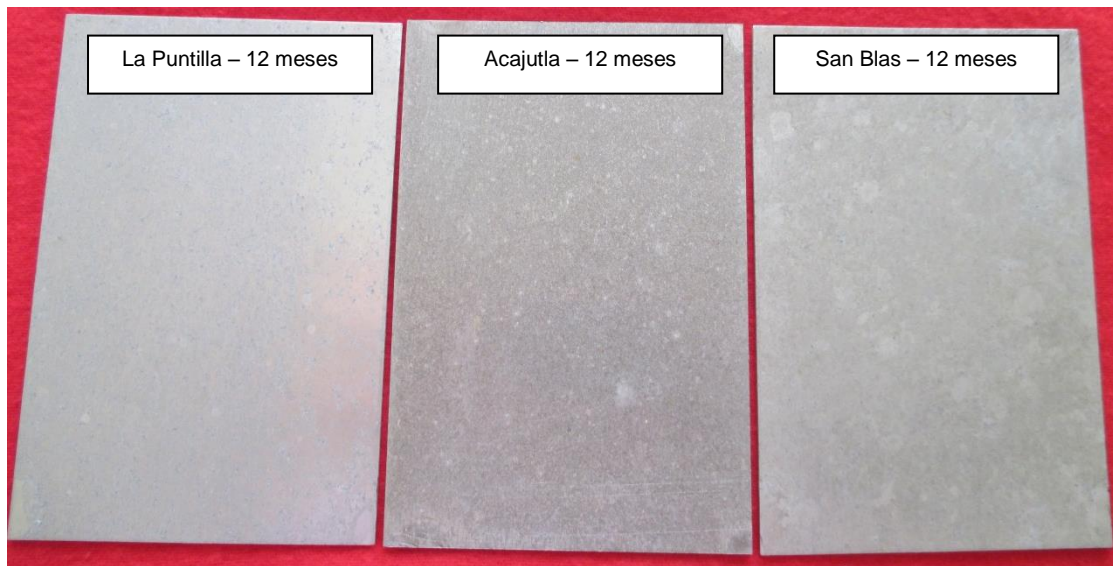


Figura 5.25 Aspecto de las láminas expuestas durante doce meses a las atmósferas marinas: La Puntilla, Acajutla y San Blas

El valor nominal de cada sitio fue graficado contra la velocidad de corrosión como se muestra en la Figura 5.26. En el eje x se graficó el valor asignado al aspecto de la lámina y en el eje y, la velocidad de corrosión, con el fin de observar si los sitios donde las láminas tuvieron un ataque aparente mayor son los sitios con mayor velocidad de corrosión.

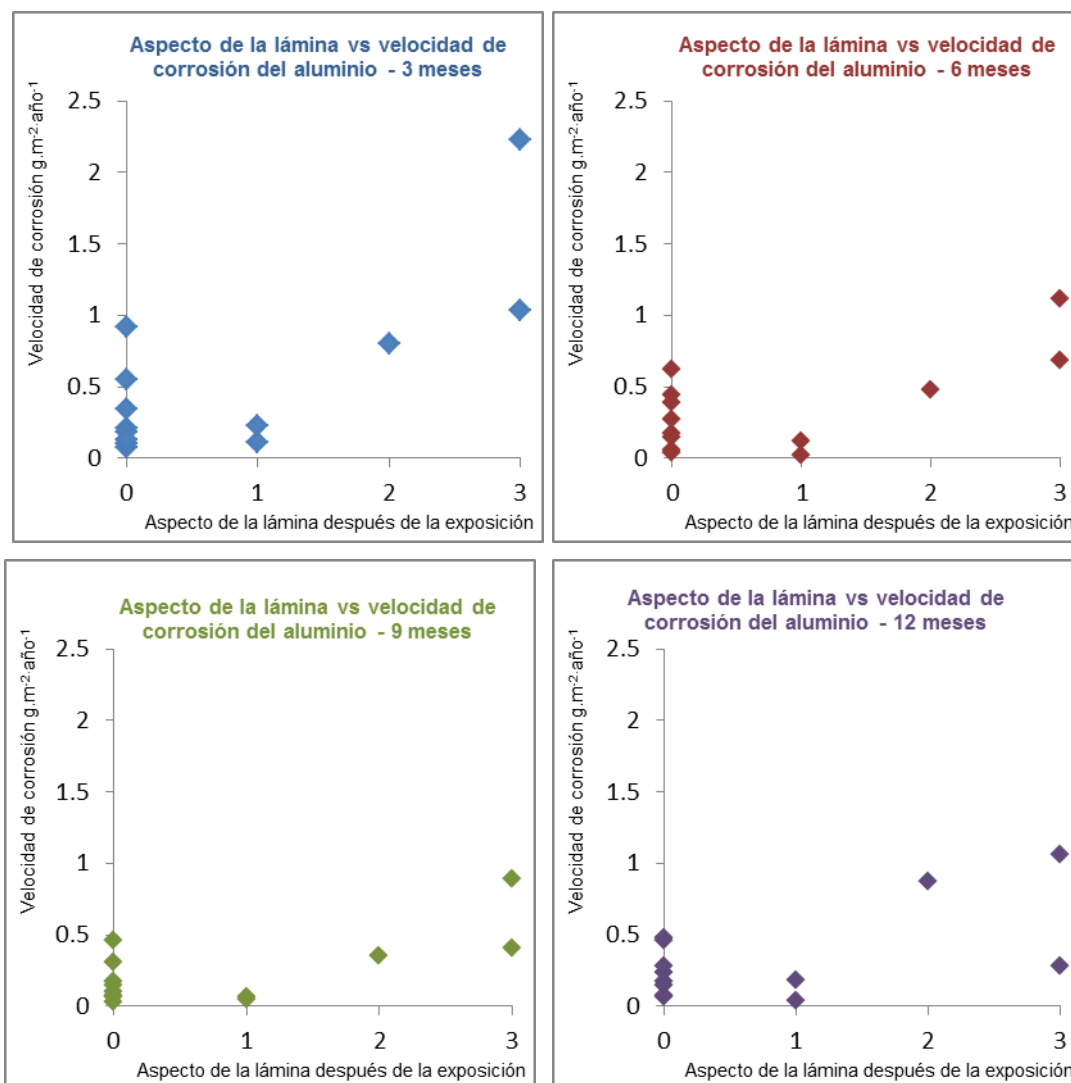


Figura 5.26 Aspecto de las láminas de aluminio después de la exposición vs velocidad de corrosión

Como puede verse en los gráficos, a tres, seis y nueve meses las láminas de aspecto “3” son las que presentan mayor velocidad de corrosión, mientras que las de aspecto “0”, “1” y “2” tienen valores de velocidad de corrosión similares entre sí. A doce meses, no se encontró una correlación clara, ya que algunos sitios de aspecto “0” presentan mayores velocidades que los de aspecto “1”, “2” e incluso que “3”.

5.3 Condiciones meteorológicas y de composición de la atmósfera de cada sitio de monitoreo

Las condiciones meteorológicas y la composición de cada sitio se presentan en el Anexo IV. La tasa de corrosión del acero al carbono y las condiciones de cada sitio del AMSS son presentadas en la Tabla 5.37. Se ha obviado la distancia a la costa, ya que

todos los sitios se hallan a más de 23 kilómetros de distancia, por lo que este parámetro resulta poco significativo.

Tabla 5.37 Velocidad de corrosión de las atmósferas del AMSS y las condiciones de cada sitio

Sitio	Veloc de corrosión g.m ⁻² .año ⁻¹	Temp amb °C	Humedad relativa %	Lluvia acumulada mm	Veloc viento km/h	Dirección del viento	Flujo vehicular veh/día	Cobertura vegetal
UCA	193.4	23.8	68.0	1307.0	2.69	-	71988	Arbustiva
UTEC	175.7	23.8	68.0	1307.0	2.69	-	41470	Poca o ninguna
Soyapango	165.9	24.4	75.7	2106.1	1.65	-	42102	Poca o ninguna
Bulevar del Ejército	159.6	24.4	75.6	2023.1	1.65	-	42102	Arbustiva
San Marcos	145.8	23.8	68.0	1307.0	2.69	-	-	Arbustiva
UDB	110.4	24.4	75.6	2023.1	1.65	-	-	Árborea
Santa Tecla	47.9	22.1	85.0	1886.8	0.88	O / OSO	26610	Árborea

De acuerdo a los análisis de varianza realizados, los sitios que no tienen diferencia significativa entre ellos son la UTEC, Soyapango y Bulevar del Ejército. Estos sitios coinciden en el flujo vehicular.

Santa Tecla presenta resultados atípicos para el tipo de atmósfera evaluado, ya que se trata de uno de los puntos más contaminados del AMSS, además de tener condiciones meteorológicas similares al resto de puntos del Área Metropolitana; en este sentido, este punto puede considerarse para caracterizar sitios que se encuentran protegidos de la contaminación por la presencia de vegetación arbórea, a la vez puede verse que en este sitio el viento sopla con dirección oeste y oeste suroeste; si se considera la ubicación del sitio (Ver anexo I) se verá que el viento sopla en dirección de alejar los contaminantes del lugar de monitoreo.

Las condiciones de las atmósferas rurales y poco contaminadas son presentadas en la Tabla 5.38; los resultados de estos sitios no presentan diferencia significativa entre sí.

Tabla 5.38 Velocidad de corrosión de las atmósferas rurales o poco contaminadas y las condiciones de cada sitio

Sitio	Velocde corrosión g.m ² .año ⁻¹	Temp amb °C	Humedad relativa %	Lluvia acumulada mm	Veloc viento km/h	Dirección del viento	Distancia a la costa (km)	Cobertura vegetal
Comasagua	94.6	20.0	84.8	1833.4	0.89	O / OSO	18.500	Arbórea
Los Planes	91.2	20.0	75.6	2023.1	1.65	-	21.600	Arbórea
Villanueva	87.9	22.1	84.8	1833.4	0.89	O / OSO	11.500	Arbustiva

Los resultados en las atmósferas marinas son los que presentan mayor diferencia entre sí; al contrastar el valor de velocidad de corrosión con las condiciones de cada sitio, tal como se muestra en la Tabla 5.39 puede verse que lo que aparentemente tuvo una mayor influencia en la velocidad de corrosión es el tipo de cobertura vegetal, ya que el sitio con menor tasa de corrosión tiene una vegetación arbórea, mientras que los sitios con mayores tasas de corrosión tienen poca o ninguna vegetación.

Tabla 5.39 Velocidad de corrosión de las atmósferas marinas y las condiciones de cada sitio

Sitio	Veloc de corrosión g.m ² .año ⁻¹	Temp amb °C	Humedad relativa %	Lluvia acumulada mm	Veloc viento km/h	Dirección del viento	Distancia a la costa (km)	Cobertura vegetal
San Blas	716.5	27.0	72.0	1397.1	1.98	O / OSO	0.035	Poca o ninguna
Acajutla	573.8	28.7	84.9	1947.4	0.88	-	1.000	Poca o ninguna
La Puntilla	208.7	27.0	74.9	1850.0	-		0.170	Arbórea

6.- CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan de la presente investigación son:

- 1) La velocidad de corrosión del acero de bajo carbono presenta una tendencia clara a disminuir en el tiempo, esto debido a la formación de una capa de óxido en la superficie que hace que su oxidación ocurra cada vez más lentamente.
- 2) De acuerdo a las tasas de corrosión del acero al carbono, la atmósfera más agresiva del Área Metropolitana de San Salvador es la de la UCA con una tasa de $193.4 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$, que es una atmósfera urbana que presenta el flujo vehicular más elevado de todos los sitios; las atmósferas de la UTEC, Soyapango y Bulevar del Ejército tienen prácticamente la misma agresividad, con valores de 175.7, 165.9 y $159.6 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ respectivamente; estos sitios coinciden en el flujo vehicular. Santa Tecla con una tasa de corrosión de $47.9 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ presenta un comportamiento diferente al esperado, por tratarse de un sitio de elevada contaminación atmosférica; al parecer, la ubicación del rack dentro de un condominio urbano de poco flujo vehicular tuvo una mayor influencia que la alta contaminación que existe en la ciudad de Santa Tecla que se ubica a dos kilómetros al suroeste del sitio de monitoreo. De acuerdo a los datos de la estación meteorológica de Procafé, el viento sopla predominantemente hacia el oeste y oeste suroeste, lo que en este caso parece alejar los contaminantes del sitio de monitoreo haciendo que la tasa de corrosión sea muy baja.
- 3) Las atmósferas rurales evaluadas, Comasagua y Los Planes, y la atmósfera de Villanueva tienen una agresividad prácticamente similar entre sí con valores de 94.6, 91.2 y $87.9 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ respectivamente; puede esperarse que las atmósferas rurales cuyas condiciones climatológicas y antropogénicas sean similares a estas, presenten tasas de corrosión parecidas. Las atmósferas marinas evaluadas varían significativamente en la agresividad, siendo San Blas la más corrosiva con $716.5 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$, seguida de Acajutla con $573.8 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$ y en tercer lugar La Puntilla con $208.7 \text{ g.m}^{-2}.\text{año}^{-1}$. El factor que parece tener más influencia sobre el ambiente es la cobertura vegetal, ya que La Puntilla tiene abundante vegetación arbórea, mientras que San Blas y Acajutla tienen poca vegetación. El rack de San Blas fue ubicado de frente a la costa, lo cual permitió que los metales recibieran

directamente las nieblas salinas, mientras que el rack de La Puntilla estaba separado de la costa por una barrera natural de árboles.

- 4) Los óxidos de hierro que se forman en las atmósferas urbanas, rurales y marinas de El Salvador son lepidocrocita, hematita y magnetita. En las tres atmósferas se tiene proporciones similares de lepidocrocita (35%-37%-35% respectivamente); la hematita se encuentra en mayor proporción en la atmósfera rural (34%), en menor proporción en la atmósfera urbana (22%) y en proporción intermedia en la atmósfera marina (30%). La magnetita, asociada a la presencia de cloruros, se encuentra en mayor proporción en la atmósfera marina (35%), en menor proporción en la atmósfera urbana (22%) y en proporción intermedia en la atmósfera rural (29%). La goetita tiene presencia únicamente en los productos de corrosión de la atmósfera urbana. De acuerdo a los resultados obtenidos en otras investigaciones, la goetita, la magnetita y la lepidocrocita fueron identificados como productos de corrosión en atmósferas rurales, industriales y marinas.
- 5) La corrosión que sufre el aluminio expuesto durante doce meses en las atmósferas salvadoreñas no presenta una tendencia regular en el tiempo, observándose que solamente en dos atmósferas marinas, San Blas y Acajutla, coincidía que las láminas con mayor cantidad de óxido en la superficie tenían las tasas de corrosión más altas. En las atmósferas urbanas las láminas con más presencia de óxido en la superficie (Soyapango y la UCA) no son las que presentaron las mayores tasas de corrosión, mientras que la UDB y la UTEC que presentan las mayores tasas de corrosión, no tuvieron formación de óxido en la superficie.
- 6) Los resultados del aluminio coinciden con los del acero al carbono en las atmósferas rurales, urbanas e industriales que se han caracterizado de acuerdo a la Norma ISO 9223, como de agresividad baja, pero varía para las atmósferas marinas, cuyas agresividades varían de baja a media de acuerdo al aluminio y como media, alta y muy alta para el acero al carbono.
- 7) De acuerdo al comportamiento del acero al carbono y del aluminio, es el primero el que tiene un comportamiento más predecible, por lo que la caracterización de las atmósferas de El Salvador debería hacerse en base a este metal.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de San José Villanueva. «Plan Estratégico Participativo de Desarrollo e Inversión. San José Villanueva. 2005-2007. .»
- Altobeli Antunes, Renato, Rodrigo Uchida Ichikawa, Luis Gallego Martínez, y Isolda Costa. «Characterization of Corrosion Products on Carbon Steel Exposed to Natural Weathering and to Accelerated Corrosion Tests.» *International Journal of Corrosion*, 2014.
- Arana, Christopher, Manuel Guillén, y Javier Hernández. «Evaluación del CNSL (Cashew Nut Shell Liquid) como Protección Anticorrosiva del Acero al Carbono expuesto a la Atmósfera del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Trabajo de graduación para optar al Grado de Ingeniero Químico.» Antiguo Cuscatlán, La Libertad: Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas, 2012.
- ASM International. *Corrosion: Understanding the Basics*. Materials Park, Ohio: Edited by J.R. Davis: Davis & Associates, 2000.
- «ASTM G1-03.» *Standar Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens*. West Conshohocken, Pensilvania, EEUU: American Society for Testing and Materials (ASTM International), Reaprobada en 2011.
- «ASTM G33-99.» *Standard Practice for Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests of Metallic-Coated Steel Specimens*. West Conshohocken, Pensilvania, EEUU: American Society for Testing and Materials (ASTM International), Reaprobada en 2010.

«ASTM G50-10.» *Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals*. West Conshohocken, Pensilvania, EEUU: American Society for Testing and Materials (ASTM International), 2010.

«ASTM G92-86.» *Standard Practice for Characterization of Atmospheric Test Sites*. West Conshohocken, Pensilvania, EEUU: American Society for Testing and Materials (ASTM International), 2010.

Barton, K. *Protection Against Atmospheric Corrosion*. London: John Wiley and Sons, 1976.

Boletín Climatológico Anual. Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, 2012.

Capital Steel & Wire INC. *Hot rolled vs Cold rolled steel*.

<http://www.capitalsteel.net/news/blog/hot-rolled-vs-cold-rolled-steel> (último acceso: 10 de junio de 2015).

Chico, B., D. De la Fuente, J. Simancas, y M. Morcillo. «Corrosión atmosférica de metales. Efecto de parámetros meteorológicos y de contaminación.»

Departamento de Ingeniería de Materiales. Degradación y Durabilidad Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM/CSIC). Madrid.

http://digital.csic.es/bitstream/10261/75874/4/Corrosi%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica_metales_par%C3%A1metros.....pdf (último acceso: 28 de octubre de 2015).

Claros, María, y Genaro Portillo. «Diseño de una Red de Monitoreo de Corrosión Atmosférica en el Área Metropolitana de San Salvador. Trabajo de graduación para optar al Grado de Ingeniero Químico.» Antiguo Cuscatlán, La Libertad: Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas, 2011.

COAMSS-OPAMSS. *Consejo de Alcaldes y Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador. Mapas temáticos.*

http://www.opamss.org.sv/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=22&Itemid=167 (último acceso: 01 de marzo de 2015).

Cordero, Víctor, y César Espinal. «Alcance del Efecto de los Vectores Industriales y vehiculares en el Potencial de Corrosión Atmosférica. Trabajo de graduación para optar al Grado de Ingeniero Químico.» Antiguo Cuscatlán, La Libertad: Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas, 2014.

Corrosion Doctors-Corrosion in Argentina. s.f. <http://corrosion-doctors.org/AtmCorros/mapArgentina.htm> (último acceso: 10 de junio de 2015).

DGOA - Red Automática de Monitoreo. *Sistema de Referencia Territorial.*

www.snet.gob.sv/Geologia/pcbbase2/parametros-mapa.php (último acceso: 02 de marzo de 2015).

DGOA-Geología-Vulcanología. *Dirección General del Observatorio Ambiental.*

Volcanes de El Salvador. <http://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/> (último acceso: 01 de marzo de 2015).

DGOA-Meteorología. *Comportamiento Típico (normal) de la lluvia en El Salvador.*

<http://www.snet.gob.sv/meteorologia/ell20052.htm> (último acceso: 28 de febrero de 2015).

DGOA-Oceanografía. s.f. <http://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia> (último acceso: 03 de marzo de 2015).

Díaz, Kryssia, Roque Góchez, y Zicri Montiel. «Diseño Preliminar de un Mapa de Corrosión Atmosférica en El Salvador. Trabajo de graduación para optar al

Grado de Ingeniero Químico.» Antiguo Cuscatlán, La Libertad: Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas, 2010.

DIGESTYC. «Dirección General de Estadística y Censos de El Salvador.» *Datos demográficos*. <http://www.digestyc.gob.sv/index.php/servicios/descarga-de-documentos/category/48-demografia.html> (último acceso: 02 de marzo de 2015).

Dirección General del Observatorio Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://www.snet.gob.sv> (último acceso: 25 de febrero de 2015).

El Clima en El Salvador. <http://www.snet.gob.sv/meteorologia/climaelsal.htm> (último acceso: 26 de febrero de 2015).

EPRI. *Carbon Steel Handbook*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 2007.

Escalante, Arturo, y Carlos Grande. «Análisis de la cobertura vegetal del Área Metropolitana de San Salvador y determinación de índices de cobertura vegetal del municipio de Antiguo Cuscatlán.» *Artículos Científicos del IV Congreso de Ingeniería y Arquitectura de la UCA*, 2014: 15-30.

Espinal, Boris. «Efecto de las Emisiones Vehiculares en el Potencial de Corrosión Atmosférica del Área Metropolitana de San Salvador. Trabajo de graduación para optar al Grado de Ingeniero Químico.» Antiguo Cuscatlán, La Libertad: Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas, 2012.

EUROLATINA-SENES. *Diagnóstico de la Calidad de Aire, Levantamiento de Fuentes Contaminantes y Diseño de Red de Monitoreo*. Segundo informe de avance,

San Salvador: Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, Programa de descontaminación de áreas críticas, 2006.

Fabián, Alberto, y Pablo Ayala Montenegro. «Informe de calidad del aire del Área Metropolitana de San Salvador; Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.» 2009.

http://www.marn.gob.sv/phocadownload/informe_particulas_diciembre_2008_2009.pdf (último acceso: 02 de marzo de 2015).

Genescà, Joan. «Más allá de la herrumbre, III. Corrosión y Medio Ambiente: Corrosión Atmosférica.» *Biblioteca Digital ILCE*. 1995.

<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/masalla3.htm> (último acceso: 14 de marzo de 2010).

González Fernández, J.A. *Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, 1989.

González Fernández, José. *Teoría y Práctica de la lucha contra la Corrosión*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, 1984.

Google Earth. 2015.

Hatch, John E. *Aluminium: Properties and Physical Metallurgy*. Ohio: ASM: American Society for Metals, 1984.

Inzunza, Juan. «Curso de meteorología descriptiva; Capítulo 14 "Los Climas de La Tierra".» *Universidad de Concepción, Chile*. 2002.

http://nimbus.com.uy/weather/Cursos/Curso_2006/Textos%20complementarios

/Meteorologia%20descriptiva_Inzunza/cap14_Inzunza_Climas%20de%20la%20tierra.pdf (último acceso: 05 de junio de 2015).

ISO 9223. «Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification.» Technical Committee ISO/TC 156 Corrosion of metals and alloys, 1992.

Jaén, Juan A., y Lilibeth de Araque. «Caracterización de los Productos de Corrosión de Aceros al Carbono en el Clima Tropical Marino de Sherman (Provincia de Colón, Panamá).» *Tecnociencia*, 2006: Vol 8 No. 1.

Kamimura, T., K. Kashima, K. Sugae, H. Miyuki, y T. Kudo. «The role of chloride ion on the atmospheric corrosion of steel and corrosion resistance of Sn-bearing steel.» *Corrosion Science* *Corrosion Science* 62, 2012: 34–41.

Kirk, R. *Enciclopedia de tecnología química Vol. 1*. México: Limusa, 1996.

Laguna, Diana. *Propuesta de Clasificación de Cobertura Vegetal y Uso del Suelo 2012*. Panamá: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2012.

«Ley del Medio Ambiente de El Salvador.» Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, 1998.

Mapa de Pluviosidad de El Salvador. 2002.

http://www.zonu.com/mapas_el_salvador/Mapa_Pluviosidad_El_Salvador.htm
(último acceso: 27 de febrero de 2015).

Mapa de Temperatura de El Salvador. 2002.

http://www.zonu.com/mapas_el_salvador/Mapa_Temperatura_El_Salvador.htm
(último acceso: 27 de febrero de 2015).

Mariaca Rodríguez, Liboria, Joan Genescà Llongueras, Jorge Uruchurtu Chavarin, y Luis Salvador Hernández. *Corrosividad Atmosférica (MICAT - México)*. México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V., 1999.

MARN-Datos de Calidad del Aire 2009-2012. «Propocionados por la Unidad de Gestión de Datos e Información del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.»

MARN-Datos de Estaciones Meteorológicas 2014-2105. *Datos proporcionados por la Unidad de Gestión de Datos e Información del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.*

MARN-Informe de la Calidad del Aire 2014. «Monitoreo de la Calidad del Aire en el AMSS.» 2015. <http://www.marn.gob.sv/phocadownload/planes-estrategias/Informe%20de%20Monitoreo%20de%20Calidad%20del%20Aire%202014%204Junio.pdf> (último acceso: 12 de octubre de 2015).

MARN-Perfiles Climatológicos. «Perfiles Climatológicos de las Estaciones Meteorológicas de El Salvador. Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.» s.f. <http://www.marn.sv/documentos/clima/perfiles-climatologicos.pdf> (último acceso: 28 de febrero de 2015).

Morales, J., J. Hernández-Borges, S. Martínn-Krijer, F. Díaz, y S. González. «Atmospheric corrosion in subtropical areas: influences of time of wetness and deficiency of the ISO 9223 norm.» *Corrosion Science* (Elsevier) 47 (2005): 2005-2019.

Muñoz Ledo, Ramón, y Jorge Uruchurtu Chavarin. «Caracterización de la agresividad atmosférica sobre los materiales metálicos estructurales en la zona

-
- metropolitana de la Ciudad de México .» *Rev. Int. Contam. Ambient.* 18 (1) ,
2002: 2732.
- Rayner - Canham, Geoff. *Química Inorgánica Descriptiva*. Naucalpan de Juárez,
Estado de México: Pearson Education, 2000.
- Revie, R. Winston, y Herbert H. Uhlig. *Corrosion and Corrosion Control. An
Introduction to Corrosion Science and Engineering*. United States of America:
4ta. Edición; John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- Roberge, Pierre R. *Handbook of Corrosion Engineering*. New York: Mac Graw Hill,
2000.
- Sapa profiles UK. *Aluminium Design net. - Aluminium alloys*.
<http://www.aluminiumdesign.net/design-support/aluminium-alloys/> (último
acceso: 11 de junio de 2015).
- Sei J., Oha, D.C. Cookb, y H.E. Townsendc. «Atmospheric Corrosion of Different
Steels in Marine, Rural and Industrial Environments.» *Corrosion Science Vol.*
41, 1999: 1687-1702.
- Sistema de Referencia Territorial para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres*.
<http://srt.snet.gob.sv> (último acceso: 28 de diciembre de 2014).
- Skoog, Douglas, Donald West, James Holler, y Stanley Cronch. *Química Analítica*.
México: McGraw Hill, 2001.
- Syed, S. «Atmospheric corrosion of materials.» *Emirates Journal for Engineering
Research* 11 (1), 2006: 1-24.

Total Materia. *Introduction to the SAE-AISI Designation System.*

<http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=EN&NM=333> (último acceso: 10 de junio de 2015).

Tullmin, M., y P.R. Roberge. «Atmospheric Corrosion.» 2000.

<http://labcorr.net/publicaciones/AtmosphericCorrosion.pdf>.

UCA-DCEF. *Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas. Condiciones meteorológicas del campus UCA en tiempo real.* 2014.

<http://cef.uca.edu.sv/index.php?rutina=wtalive> (último acceso: 10-31 de agosto de 2015).

Vera, R., M. Puentes, R. Araya, P. Rojas, y A. Carvajal . «Mapa de Corrosión

atmosférica de Chile: Resultados a un año de exposición.» *Revista de la Construcción*, 2012: Volumen 12.

Victori, Lluís, y Jordi Abellà. *Curso de Corrosión para ingenieros.* Barcelona: IQS

VMT. *Tránsito Promedio Diario Anual de los diez ejes con mayor flujo vehicular del Área Metropolitana de San Salvador.* San Salvador: Viceministerio de Transporte, 2010.

ANEXOS

Anexo I. Descripción de los Sitios de Monitoreo

A continuación se presenta la descripción de los sitios elegidos para realizar el monitoreo de corrosión atmosférica en El Salvador. En la Figura I.1 se muestra los catorce sitios en los cuales se llevó a cabo el monitoreo y en la Tabla I.1 se especifica el tipo de atmósfera que corresponde a cada sitio.

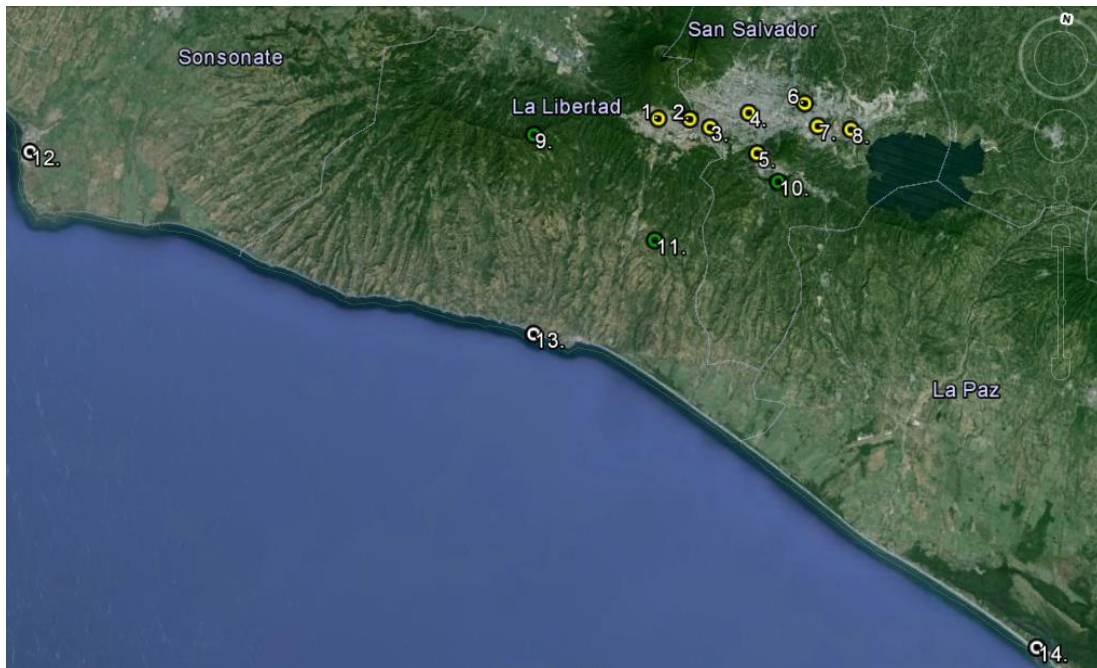


Figura I.1 Sitios de monitoreo de corrosión atmosférica en El Salvador
Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.1 Tipos de atmósferas monitoreadas

Número en la Figura I.1	Lugar	Tipo de atmósfera
1.	Santa Tecla	Urbana
2.	Bicentenario	Urbana
3.	UCA	Urbana
4.	UTEC	Urbana
5.	San Marcos	Urbana
6.	UDB	Urbana
7.	Soyapango	Industrial
8.	Bulevar del Ejército	Industrial
9.	Comasagua	Rural
10.	Los Planes	Rural
11.	Villanueva	Urbana
12.	Acajutla	Marina – Industrial

Número en la Figura I.1	Lugar	Tipo de atmósfera
13.	San Blas	Marina - Urbana
14	La Puntilla	Marina (rural)

SITIO 1. SANTA TECLA

La ciudad de Santa Tecla se ubica en la parte occidental del Área Metropolitana de San Salvador, siendo la cabecera del departamento de La Libertad; se encuentra totalmente urbanizada y no se tiene zonas industriales dentro del territorio, aunque está considerada como una de los sitios más contaminados del AMSS, ya que tiene un alto flujo vehicular de entrada y salida con respecto a la zona occidental del país hacia la ciudad de San Salvador, tanto de transporte público como privado.

Las vías donde se concentra el mayor tránsito en Santa Tecla son el Bulevar Monseñor Romero, la Calle Chiltiupán, la Carretera Panamericana-Carretera San Salvador-Santa Tecla, el Bulevar Sur y la 7ª avenida norte, las cuales son mostradas en la Figura I.2 donde además se muestra la ubicación del sitio, marcado como "1".



Figura I.2 Vías con mayor flujo vehicular en Santa Tecla
Adaptado de (Google Earth 2015)

El rack de monitoreo para el presente estudio fue ubicado a 180 metros al sur del Bulevar Monseñor Romero y a 400 metros al norte de la Calle Chiltiupán. En 2010, sobre el tramo correspondiente de la Calle Chiltiupán, representado por una línea roja

en la Figura I.2, circulaban 26610 vehículos diarios (VMT 2010). No se cuenta con datos del Bulevar Monseñor Romero.

La estación meteorológica más cercana es “Procafé” a 872 metros al noroeste, la cual se muestra en la Figura I.3, junto con una fotografía del rack. Las coordenadas geográficas y altura específicas del sitio de monitoreo son mostradas en la Tabla I.2.



Figura I.3 Rack de monitoreo, ubicación del Sitio (1) Santa Tecla y de la estación Procafé
Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.2 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 1 (Santa Tecla)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Santa Tecla	13°40'58.92"N 13.683033°	89°16'44.64"O -89.279066°	945

Sitio 2. Parque del Bicentenario

El Parque del Bicentenario es un área natural protegida de 91 hectáreas que se encuentra en los municipios de Antigua Cuscatlán y San Salvador. Forma parte de la Reserva Forestal El Espino y fue inaugurado el 5 de noviembre de 2011, día de la celebración del Bicentenario del Primer Movimiento Independentista de Centroamérica.

Se encuentra ubicado sobre dos importantes arterias: La Avenida Jerusalén, cuyo flujo vehicular en 2010 era de 43163 vehículos diarios (VMT 2010), aunque a la fecha ha

incrementado considerablemente desde la apertura en 2012 del Bulevar Monseñor Romero, la otra arteria sobre la que se encuentra el parque, aunque no se tiene datos oficiales actualizados. El rack para el monitoreo en este sitio fue ubicado a 185 metros al norte del Bulevar Monseñor Romero, a 56 metros al noroeste de la Avenida Jerusalén y a 1600 m al norte de la Zona Industrial Plan de La Laguna y 1600 m al noreste de la Zona Industrial Merliot (aunque estas zonas no tienen influencia sobre la atmósfera del parque, ya que se alejan más de 1 km) (Cordero y Espinal 2014).

La estación meteorológica más cercana es la de la UCA, ubicada a 1.875 kilómetros al este. En la Figura I.4 se muestra detalles de la ubicación del parque, así como el rack colocado en este sitio. Las coordenadas geográficas del sitio y su elevación son presentadas en la Tabla I.3



Figura I.4 Ubicación del Sitio (2) Parque del Bicentenario, de la estación UCA y foto del rack de monitoreo Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.3 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 2 (Bicentenario)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Parque del Bicentenario	13°41'12.39"N 13.686774°	89°15'5.86"O -89.251628°	851

Sitio 3. Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas (UCA)

La Universidad Centroamericana de El Salvador José Simeón Cañas (UCA) se ubica sobre el Bulevar Los Próceres y la Avenida Albert Einstein en San Salvador y en la Colonia Jardines de Guadalupe en Antigua Cuscatlán, como se observa en la Figura I. 5. Sus coordenadas geográficas son 13°40'51.75"N y 89°14'8.61"O a una elevación de 788 msnm. El campus tiene una superficie de 148570.72 metros cuadrados m².

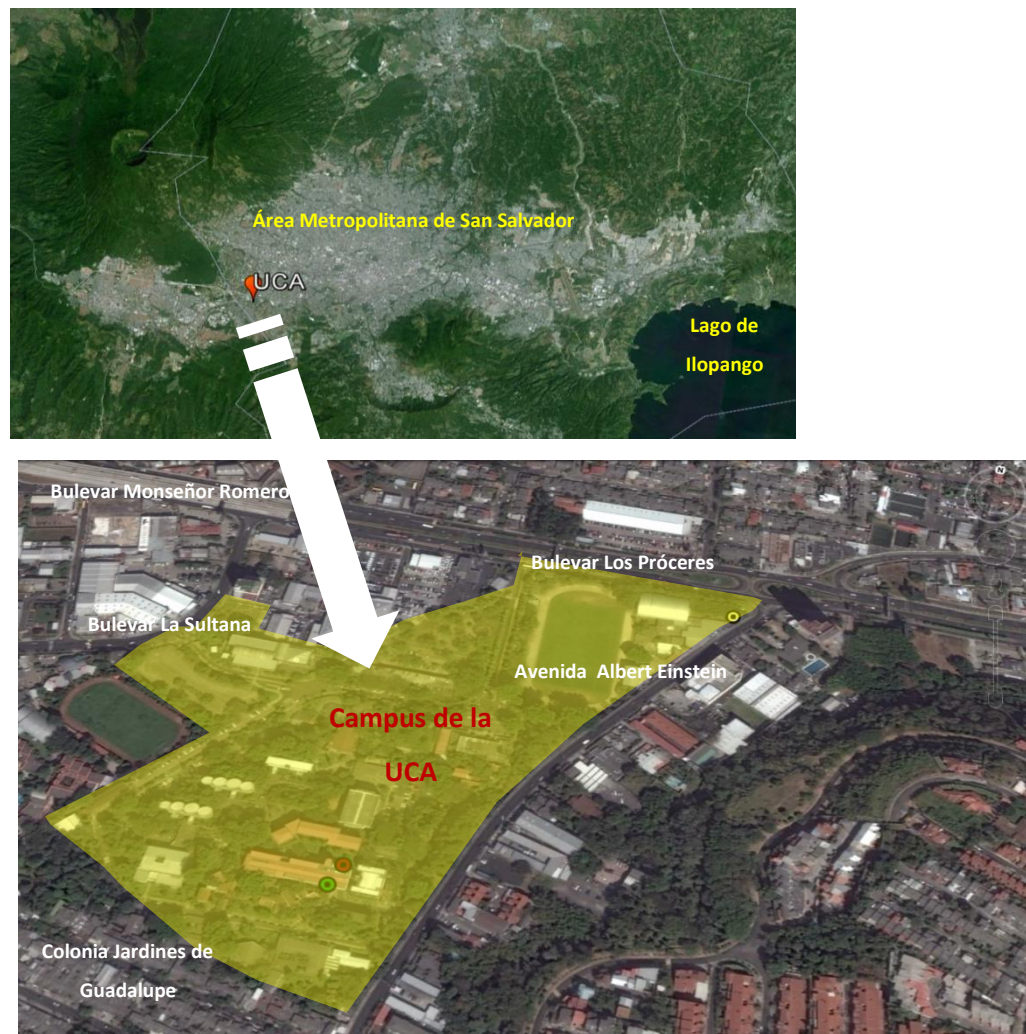


Figura I. 5 Ubicación de la UCA en el Área Metropolitana de San Salvador y detalle del Campus Adaptado de (Google Earth 2015)

El Bulevar Los Próceres es una de las arterias más transitadas del Área Metropolitana de San Salvador; de acuerdo a los datos más actualizados del Viceministerio de Transporte de El Salvador, en 2010, transitaban 71988 vehículos por día a lo largo del tramo donde se halla ubicada la UCA. Con la puesta en funcionamiento del Bulevar Monseñor Romero en noviembre de 2012 que es una vía alterna de San Salvador a Santa Tecla y viceversa, la carga vehicular aumentó considerablemente, pero no se tienen datos oficiales de dicho flujo.

El rack de monitoreo fue ubicado sobre la Avenida Albert Einstein y a 35 metros al sur del Bulevar Los Próceres, tal como puede observarse en la Figura I.6.



Figura I.6 Imagen satelital y fotografía del sitio (3) UCA

La UCA cuenta con su propia estación meteorológica dentro del campus. Las coordenadas geográficas del sitio, así como su altura son detalladas en la Tabla I.4

Tabla I.4 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 3 (UCA)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
UCA	13°40'57.96"N 13.682767	89°13'58.75"O -89.232987	780

Sitio 4. Universidad Tecnológica de El Salvador UTEC

La Universidad Tecnológica se ubica en el Centro Histórico de San Salvador. El edificio Gabriela Mistral en donde se ubicó el rack de monitoreo se ubica sobre la 1ª. Calle poniente, que tiene un flujo vehicular alto, aunque no se cuenta con datos oficiales del mismo.

Las carreteras más cercanas de las que se tienen datos (VMT 2010) son la Alameda Juan Pablo II ubicada a 250 metros al norte, donde por el tramo correspondiente en 2010 circulaban 41470 vehículos diarios y la 25ª. Avenida Norte donde en ese mismo año circulaban 22642 vehículos diarios. La ubicación del sitio es mostrada en la Figura I.7.



Figura I.7 Detalles de la ubicación de la UTEC en el AMSS y del Sitio (4) de monitoreo
Adaptado de (Google Earth 2015)

Estrictamente no se trata de una atmósfera urbana, ya que en sus alrededores se tiene mucha actividad comercial y alta circulación de autobuses del sistema público de transporte. No ha sido clasificada como atmósfera industrial, ya que no se tiene industrias productoras en los alrededores.

El rack fue ubicado a diez metros sobre el nivel del suelo, en el techo del Edificio Gabriela Mistral, tal como se muestra en la Figura I.8. La estación meteorológica más cercana es la de la UCA. Las coordenadas geográficas y la elevación del sitio se muestran en la Tabla I.5.



Figura I.8 Rack de monitoreo ubicado en la UTEC

Tabla I.5 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 4 (UTEC)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
UTEC	13°42'3.29"N 13.700915°	89°12'3.60"O -89.200999°	691 Techo del Edificio Gabriela Mistral

Sitio 5. San Marcos

El municipio de San Marcos se ubica en el sur del Área Metropolitana de San Salvador. La vía más cercana al sitio de monitoreo es la Carretera al Aeropuerto Internacional de El Salvador, pero no se tiene datos del flujo vehicular de esta vía.

El rack fue ubicado a 180 m al este de la mencionada Carretera, a 480 metros al norte de la terminal de buses “Del Sur” y a 575 metros al norte de la Zona Franca San Marcos, donde se tiene maquilas textileras. La estación meteorológica más cercana es la de la UCA; el detalle de la ubicación de este sitio de monitoreo así como de la estación meteorológica, es mostrado en la Figura I.9. Las coordenadas y la elevación del sitio se presentan en la Tabla I.6.



Figura I.10 Ubicación de San Marcos en el AMSS y ubicación del Sitio (5)
Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.6 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 5 (San Marcos)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
San Marcos	13°40'2.23"N 13.667285°	89°11'19.66"O -89.188795°	695

Sitio 6. Universidad Don Bosco (UDB)

La Universidad Don Bosco se ubica sobre la Autopista Este- Oeste y a 1.7 km al norte del centro de Soyapango. No se cuenta con datos de flujo vehicular, aunque se estima que es alto. La estación meteorológica más cercana a la UDB es Ilopango y dentro del campus de esta universidad se tiene la estación de monitoreo de calidad del aire de San Salvador Este. Los detalles de la ubicación del sitio de monitoreo son mostrados en la Figura I.11; las coordenadas geográficas y la altura es mostrada en la Tabla I.7.

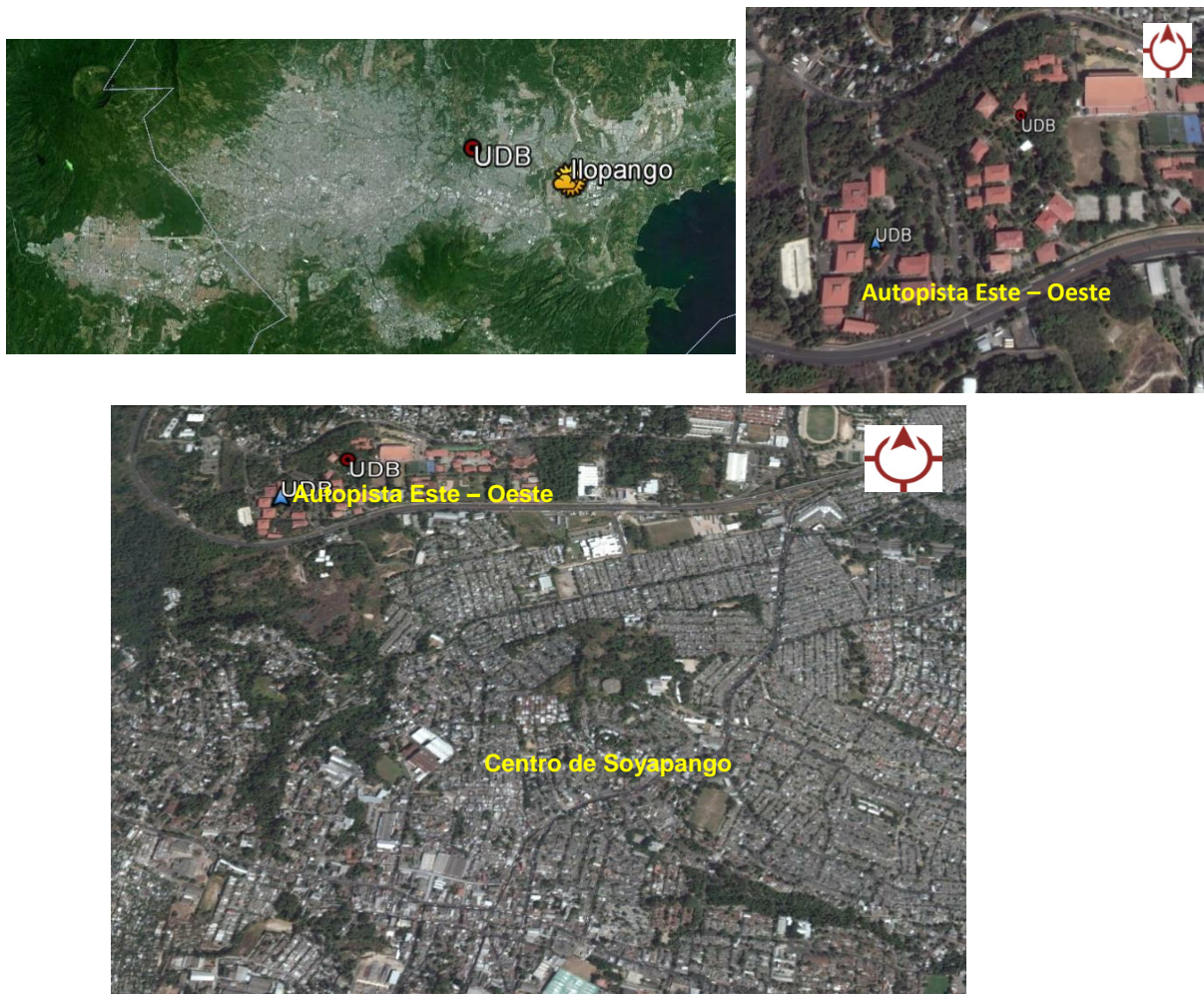


Figura I.11 Ubicación de la UDB en el AMSS y detalles del Sitio (6)
Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.7 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 6 (UDB)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
UDB	13°42'59.89"N 13.716636°	89° 9'11.29"O -89.153135°	656

Sitio 7. Soyapango

El municipio de Soyapango se ubica en el este del AMSS. El rack de monitoreo fue ubicado a 0.25 km al norte de la parte central del Bulevar del Ejército y 0.70 km al este de una planta de generación termoeléctrica, siendo esta es una de las atmósferas industriales evaluadas en el AMSS. En 2010 circulaban 42102 vehículos diariamente sobre el Bulevar del Ejército (VMT 2010). La estación meteorológica más cercana es la de Ilopango. En la Figura I.12 se muestra en detalle la ubicación de Soyapango, cuyas coordenadas geográficas y elevación son mostradas en la Tabla I.8

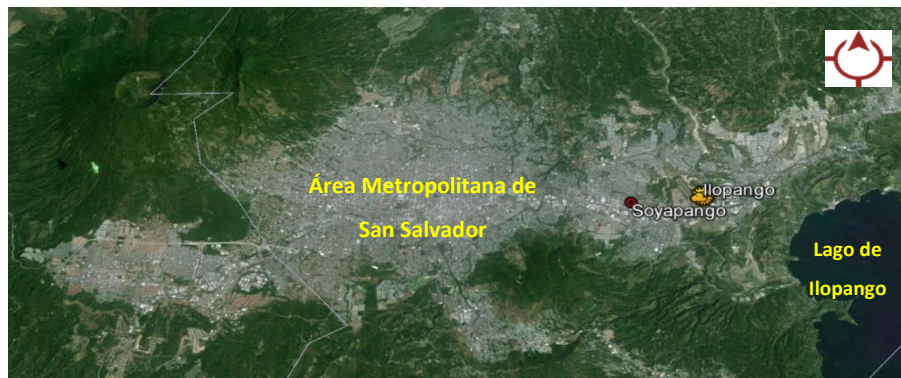


Figura I.12 Ubicación de Soyapango en el AMSS y del sitio (7)
Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.8 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 7 (Soyapango)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Soyapango	13°41'55.89"N 13.698859°	89° 8'20.22"O -89.138950°	622

Sitio 8. Bulevar del Ejército Nacional

El sitio elegido para monitorear la segunda atmósfera industrial del AMSS se localiza a 760 metros al este del Aeropuerto Internacional de Ilopango, que actualmente es usado para la aviación militar y vuelos chárter y para espectáculos aéreos. El flujo vehicular en 2010 era de 42102 vehículos diarios (VMT 2010).

El rack fue ubicado en la central de distribución de una empresa de pinturas ubicada al extremo oriente del Bulevar del Ejército Nacional, a 910 metros al este de la estación meteorológica de Ilopango. Los detalles de la ubicación de este sitio son mostrados en la Figura I.12 y las coordenadas geográficas en la Tabla I.9.

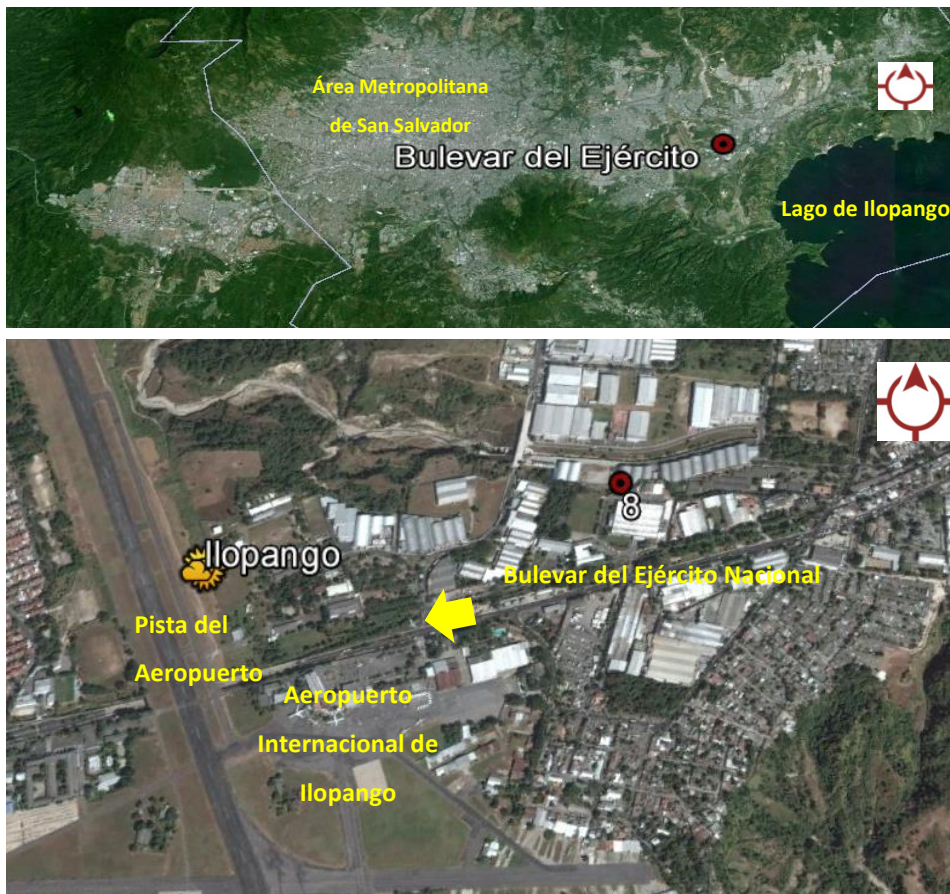


Figura I.13 Ubicación del sitio (8) en el AMSS y de la estación meteorológica de Ilopango
Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.9 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 8 (Bulevar del Ejército)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Bulevar del Ejército Nacional	13°42'1.01"N 13.700280°	89° 6'35.03"O -89.109730°	628

En la Figura I.14 se presenta dos fotografías del rack de monitoreo del Bulevar del Ejército.



Figura I.14 Racks de monitoreo en el Sitio (8) Bulevar del Ejército

Sitio 9. Comasagua

El municipio de Comasagua se encuentra al oeste del AMSS. Esta es una de las atmósferas rurales evaluadas en la presente investigación. La estación meteorológica más cercana al sitio de monitoreo es Procafé, lo cual se muestra en la Figura I.15.



Figura I.15 Ubicación del Sitio (9) Comasagua y de la estación meteorológica Procafé
Adaptado de (Google Earth 2015)

En este sitio se tiene abundante vegetación; el rack se ubicó en una propiedad frente a la cual circula una calle rural, de la cual no se tiene datos de flujo vehicular. Los detalles de la ubicación del Sitio (9) son mostrados en la Figura I.16 y las coordenadas geográficas y elevación del sitio se muestran en la Tabla I.10



Figura I.16 Detalles de la ubicación del Sitio (9) Comasagua y foto del rack de monitoreo
Adaptado de (Google Earth 2015)

Tabla I.10 Coordenadas geográficas y elevación del sitio 9 (Comasagua)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Comasagua	13°39'11.69"N 13.653247°	89°23'4.74"O -89.384650°	1230

Sitio 10. Los Planes

Los Planes y Comasagua son atmósferas típicamente rurales siendo la humedad ambiental el factor que predominantemente influye sobre la corrosión. En Los Planes se tiene abundante vegetación y hay neblina durante casi todo el año, teniéndose un ambiente con abundante humedad; el sitio donde se ubicó el rack es una finca cuyo acceso es muy accidentado por lo que prácticamente no hay afluencia de vehículos. La carretera hacia el Aeropuerto Internacional se ubica a 800 m del sitio de monitoreo. Los detalles de la ubicación del sitio (10) Los Planes y dos fotografías del rack de monitoreo son presentados en la Figura I.17.



Figura I.17 Detalles de la ubicación del sitio 10 (Los Planes) y rack de monitoreo
Adaptado de (Google Earth 2015)

Las coordenadas geográficas y la elevación del Sitio 10 (Los Planes) se presentan en la Tabla I.11.

Tabla I.11 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 10 (Los Planes)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Los Planes de Renderos	13°38'45.31"N 13.645920°	89°10'1.27"O -89.167020°	1090

Sitio 11. Villanueva

El municipio de San José Villanueva se encuentra en el departamento de La Libertad, al sur oeste del Área Metropolitana de San Salvador. Tiene una atmósfera urbana, pero no se tiene datos del flujo vehicular. El sitio donde se ubicó el rack se localiza a 11.5 km de la costa de La Libertad. La estación meteorológica más cercana es Procafé. Los detalles de la ubicación del sitio 11 (Villanueva) se presentan en la Figura I.17



Figura I.18 Detalles de la ubicación del sitio 11 (Villanueva)
Adaptado de (Google Earth 2015)

Las coordenadas geográficas y la elevación del sitio de monitoreo se presentan en la Tabla I.12.

Tabla I.12 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 11 (Villanueva)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Villanueva	13°34'49.91"N 13.580530°	89°15'58.61"O -89.266280°	577

Sitio 12. Acajutla

El monitoreo de corrosión atmosférica se realizó a 1 km al este de la costa de Acajutla; el puerto de Acajutla es una zona industrial y el rack de monitoreo fue ubicado dentro de una planta productora de fertilizantes a 475 metros al sur de una planta de generación termoeléctrica. La estación meteorológica más cercana es Acajutla. No se cuenta con datos de flujo vehicular. Los detalles de la ubicación del sitio de monitoreo se presentan en la Figura I.18 y el rack de monitoreo se muestra en la Figura I.20.



Figura I.19 Ubicación del Sitio 12 (Acajutla)
Adaptado de (Google Earth 2015)



Figura I.20 Rack de monitoreo ubicado en el Sitio 12 (Acajutla)

Las coordenadas geográficas y la elevación de Acajutla se muestran en la Tabla I.13.

Tabla I.13 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 11 (Villanueva)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
Acajutla	13°34'32.81"N 13.575780°	89°49'27.72"O -89.824368°	24

Sitio 13. San Blas

La playa de San Blas tiene actividad urbana y se ubica 5 km al oeste de la ciudad de La Libertad. En la Figura I.21 se muestra la ubicación del Sitio 13.



Figura I.21 Ubicación del Sitio 13 (San Blas)
Adaptado de (Google Earth 2015)

En este sitio, el rack fue ubicado a 35 metros de la costa. La estación meteorológica más cercana es Procafé, tal como puede verse en la Figura I. 22.



Figura I. 22 Detalle de la ubicación del Sitio 13 (San Blas) y de las estaciones meteorológicas
Adaptado de (Google Earth 2015)

El rack ubicado en San Blas es mostrado en la Figura I.23. Las coordenadas geográficas y elevación del sitio son presentadas en Tabla I.14.



Figura I.23 Rack de monitoreo en San Blas

Tabla I.14 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 13 (San Blas)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
San Blas	13°29'12.12"N 13.486699°	89°21'30.64"O -89.358510°	1

Sitio 14. La Puntilla

La Playa La Puntilla tiene actividad de tipo rural con abundante vegetación arbórea. Se ubica a 9 km de San Luis La Herradura, tal como se observa en la Figura I.24.



Figura I.24 Ubicación del Sitio 14 (La Puntilla)
Adaptado de (Google Earth 2015)

Los datos meteorológicos de este sitio se toman de los promedios históricos y de la estación de Providencia ubicada en Zacatecoluca. Las coordenadas geográficas y la elevación del sitio son presentadas en la Tabla I.15

Tabla I.15 Coordenadas geográficas y elevación del Sitio 14 (La Puntilla)

Sitio	Coordenadas geográficas		Elevación (msnm)
	Latitud	Longitud	
La Puntilla	13°17'32.40"N 13.292332°	88°53'28.24"O -88.891177°	4

Anexo II. Lavados Químicos del acero al carbono

En este anexo se presenta las gráficas de pérdida de masa por los lavados químicos hechos al acero al carbono a tres y seis meses.

Pérdida de masa de las réplicas de Santa Tecla

En la Tabla II.1 puede verse la masa inicial de cada una de las láminas antes de ser expuestas al ambiente y en las siguientes columnas, la masa de cada réplica después de cada lavado químico. El dato de “pérdida de masa” se calculó restando la masa inicial de la lámina menos la masa de la lámina después de cada lavado químico. Como puede verse, este valor aumenta con cada lavado.

Tabla II.1 Datos de pérdida de masa de las láminas de acero al carbono durante el lavado químico (Santa Tecla)

lámina	masa inicial (g) de la lámina	masa de lámina pulida (g)	masa después de 1er lavado (g)	masa después de 2do lavado	masa después de 3er lavado	masa después de 4to lavado	masa después de 5to lavado	masa después de 6to lavado	masa después de 7mo lavado
1.1	126.0599	125.5410	125.4411	125.3797	125.3337	125.2794	125.2487	125.2277	125.2129
1.2	126.2029	125.8781	125.7495	125.7117	125.6782	125.6285	125.5986	125.5741	125.5593
1.3	127.6823	127.4509	127.3300	127.2904	127.2711	127.2318	127.2122	127.1921	127.1784
1.4	127.4009	127.0078	126.8623	126.8225	126.8058	126.7806	126.7634	126.7463	126.7338
lámina	masa inicial (g) de la lámina	Pérdida de masa (g)							
		0	1	2	3	4	5	6	7
		por pulido	1er lavado	2do lavado	3er lavado	4to lavado	5to lavado	6to lavado	7mo lavado
1.1	126.0599	0.5189	0.6188	0.6802	0.7262	0.7805	0.8112	0.8322	0.8470
1.2	126.2029	0.3248	0.4534	0.4912	0.5247	0.5744	0.6043	0.6288	0.6436
1.3	127.6823	0.2314	0.3523	0.3919	0.4112	0.4505	0.4701	0.4902	0.5039
1.4	127.4009	0.3931	0.5386	0.5784	0.5951	0.6203	0.6375	0.6546	0.6671

Para definir el número de lavados químicos necesarios para cada réplica, se observaba las láminas al microscopio y una vez se había eliminado todos los productos de corrosión se paraba de lavar. La diferencia de masa entre el último y penúltimo lavado químico siempre

era menor que 0.015 g. En la Tabla II.2 se muestra la diferencia de masa entre cada lavado químico en las láminas expuestas en Santa Tecla durante tres meses.

Tabla II.2 Diferencia de masa entre cada lavado químico en las láminas de Santa Tecla expuestas durante tres meses

lámina	Diferencia de masa entre cada lavado químico (g)						
	1er lavado	2do lavado	3er lavado	4to lavado	5to lavado	6to lavado	7mo lavado
1.1	0.0999	0.0614	0.0460	0.0543	0.0307	0.0210	0.0148
1.2	0.1286	0.0378	0.0335	0.0497	0.0299	0.0245	0.0148
1.3	0.1209	0.0396	0.0193	0.0393	0.0196	0.0201	0.0137
1.4	0.1455	0.0398	0.0167	0.0252	0.0172	0.0171	0.0125

Como puede verse, fue necesario realizar siete lavados a cada réplica para tener una diferencia de masa menor a 0.015 g. Se graficó el número de lavados químicos vs la pérdida de masa de cada réplica, observándose que en los primeros lavados la pérdida de masa aumenta rápidamente y poco a poco el valor va acercándose a la horizontal, hasta lograr una pendiente menor a 0.015, como se muestra en la Figura II.1.

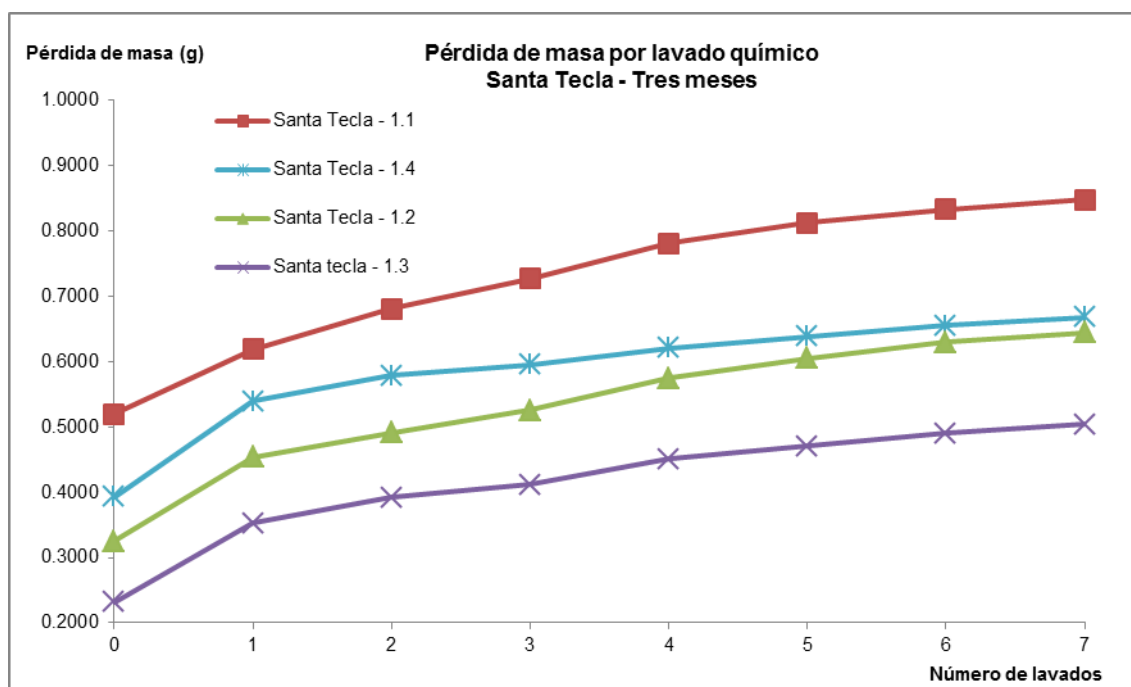


Figura II.1 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Santa Tecla durante tres meses

La gráfica de las láminas expuestas en Santa Tecla durante seis meses se presenta en la Figura II.2.

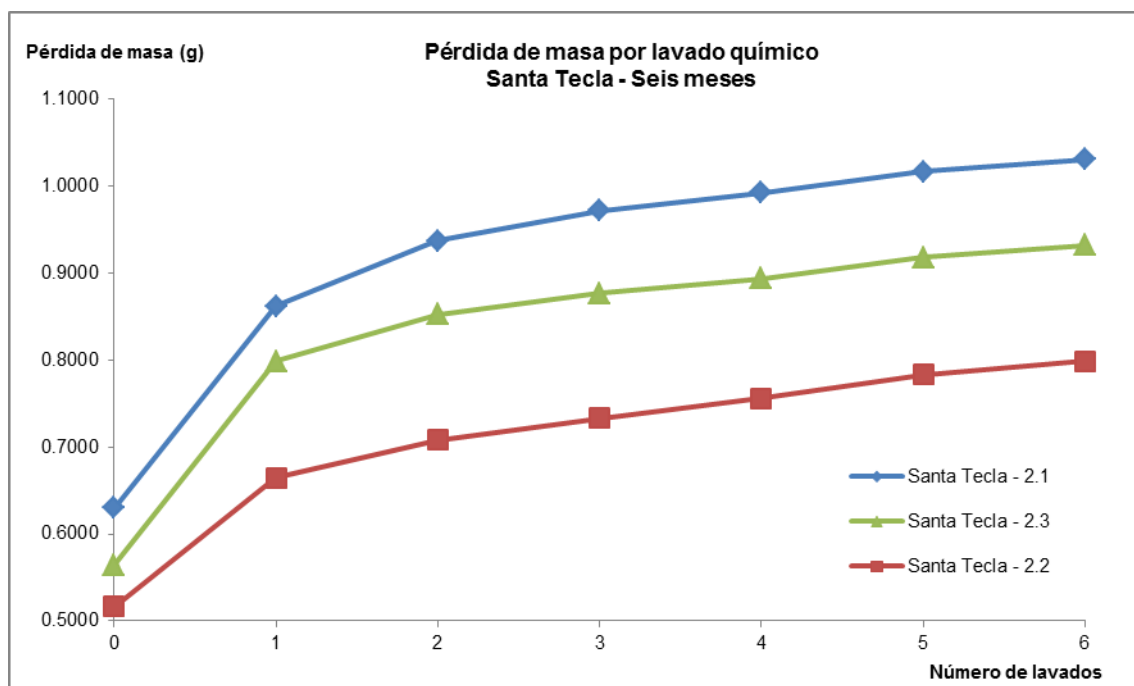


Figura II.2 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Santa Tecla durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de la UCA

En la Figura II.3 y en la Figura II.4 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas a en la UCA durante tres y seis meses respectivamente.

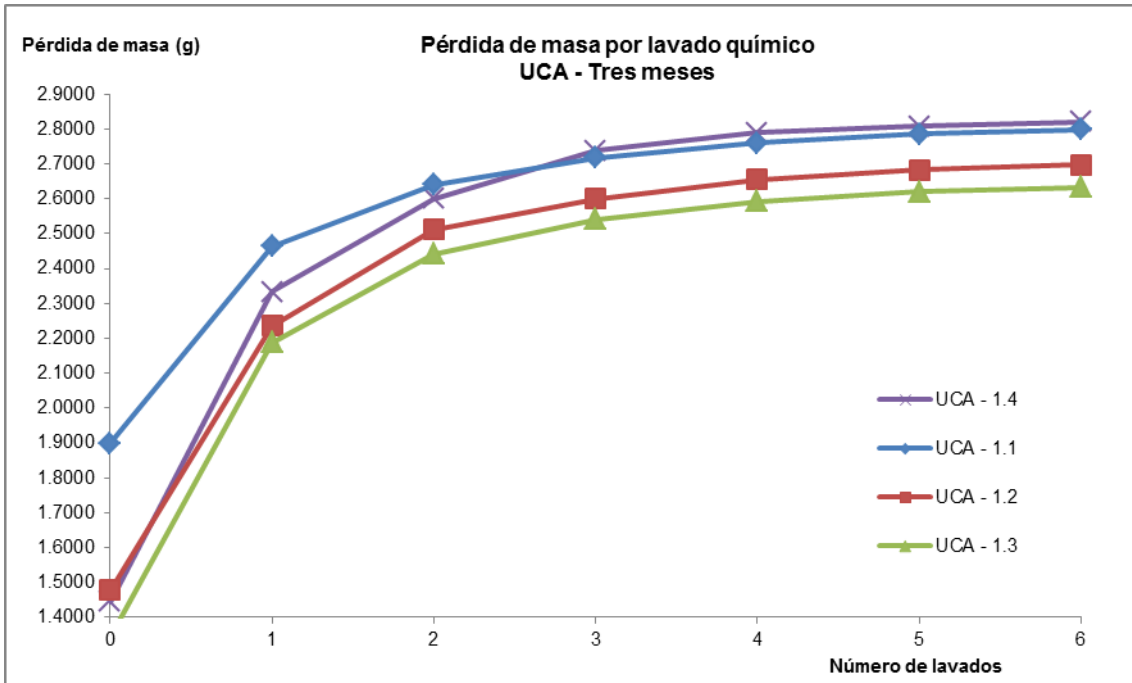


Figura II.3 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UCA durante tres meses

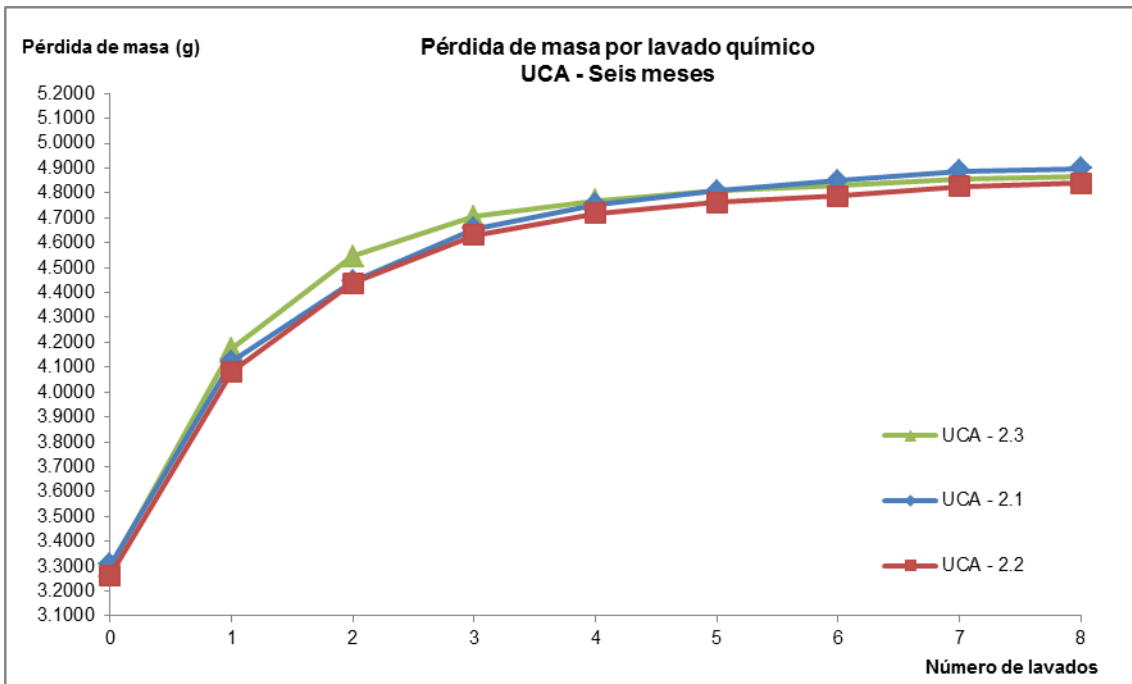


Figura II.4 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UCA durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de la UTEC

En la Figura II.5 y en la Figura II.6 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas a en la UTEC durante tres y seis meses respectivamente.

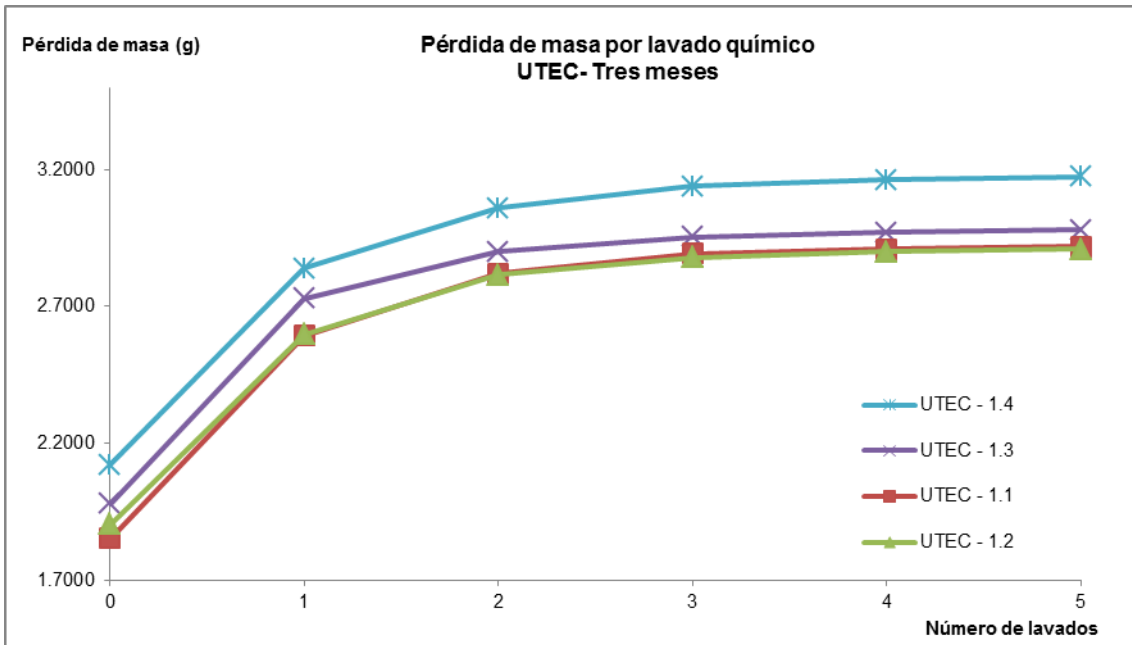


Figura II.5 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UTEC durante tres meses

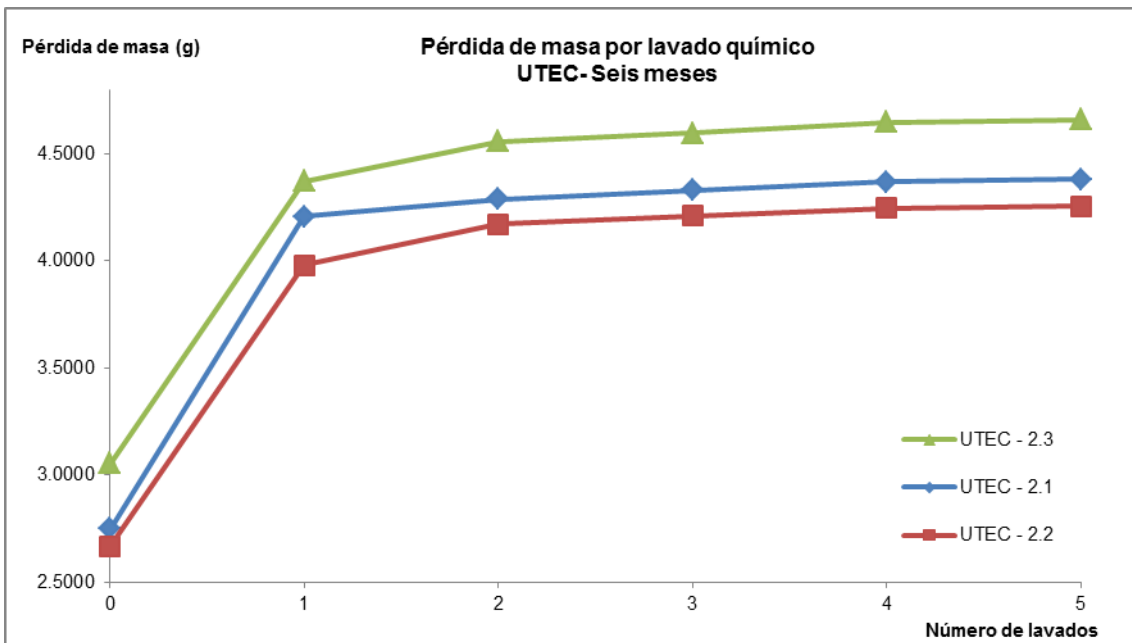


Figura II.6 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UTEC durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de San Marcos

En la Figura II.7 y en la Figura II.8 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas a en San Marcos durante tres y seis meses respectivamente.

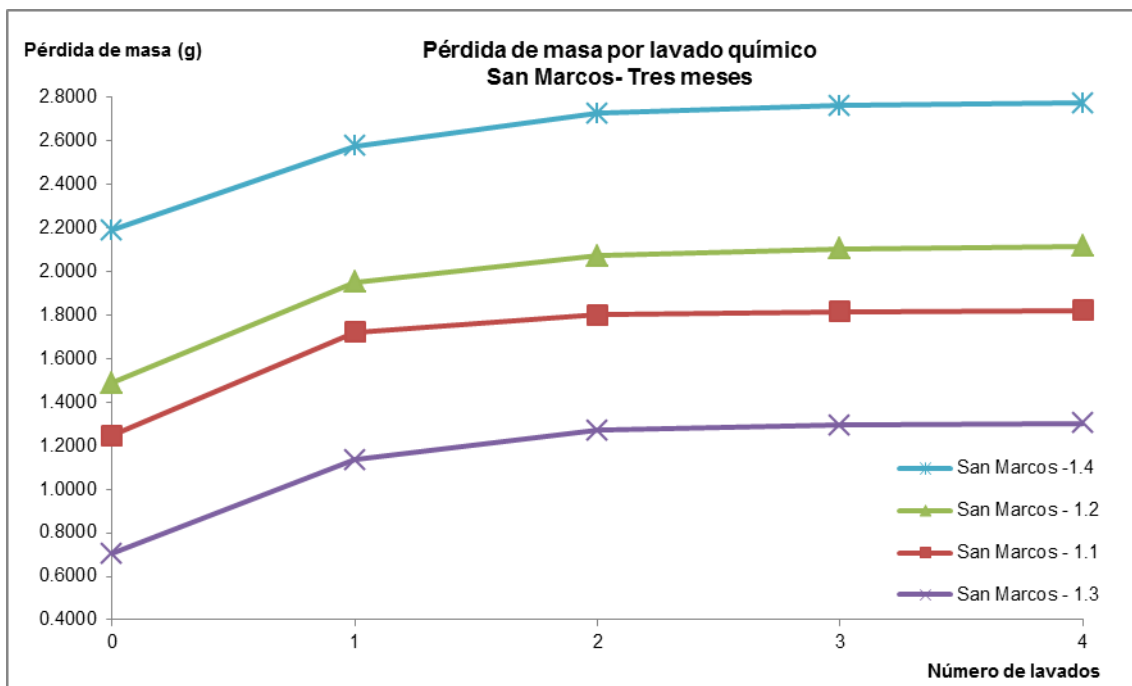


Figura II.7 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Marcos durante tres meses

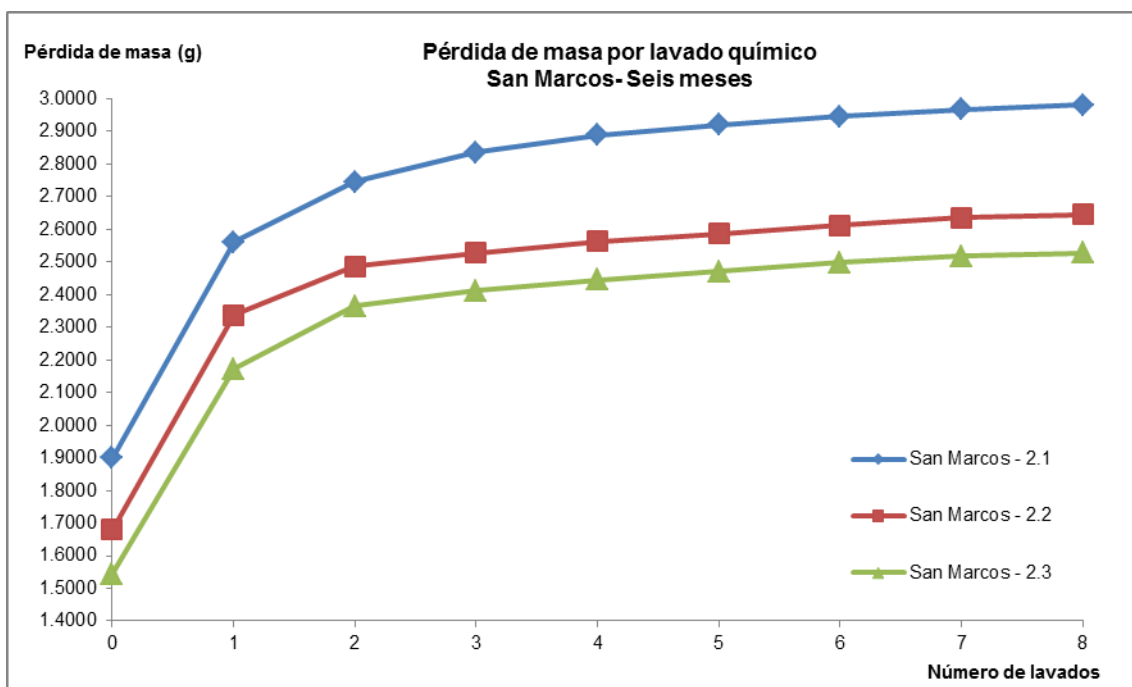


Figura II.8 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Marcos durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de la UDB

En la Figura II.9 y en la Figura II.10 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en la UDB durante tres y seis meses respectivamente.

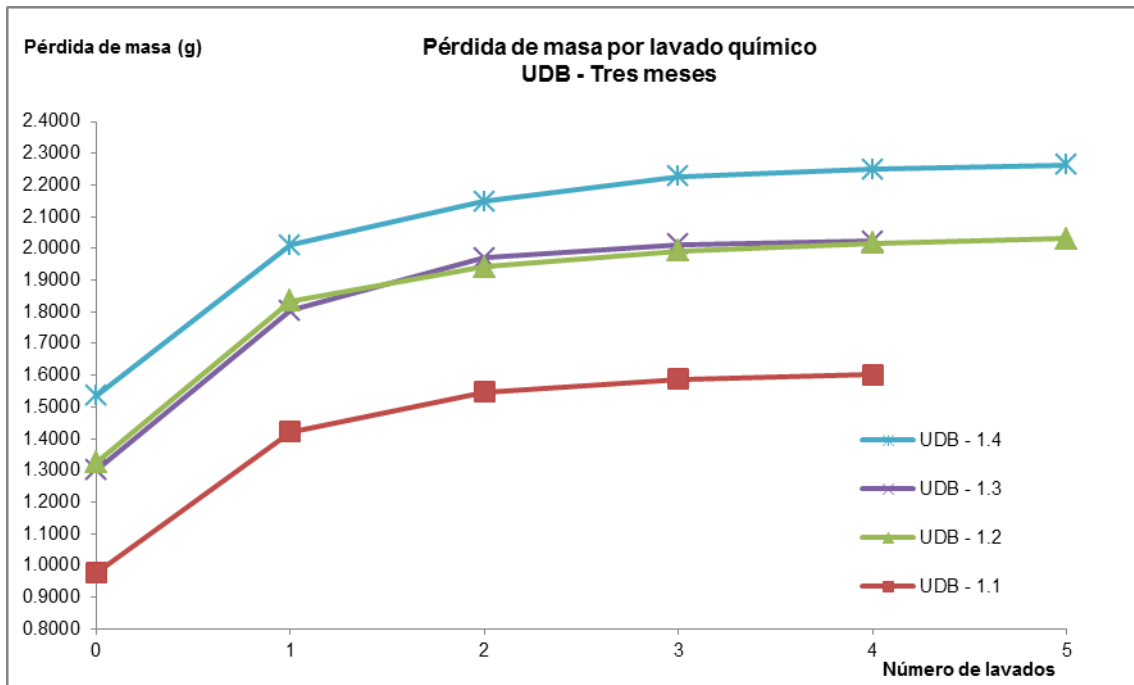


Figura II.9 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UDB durante tres meses

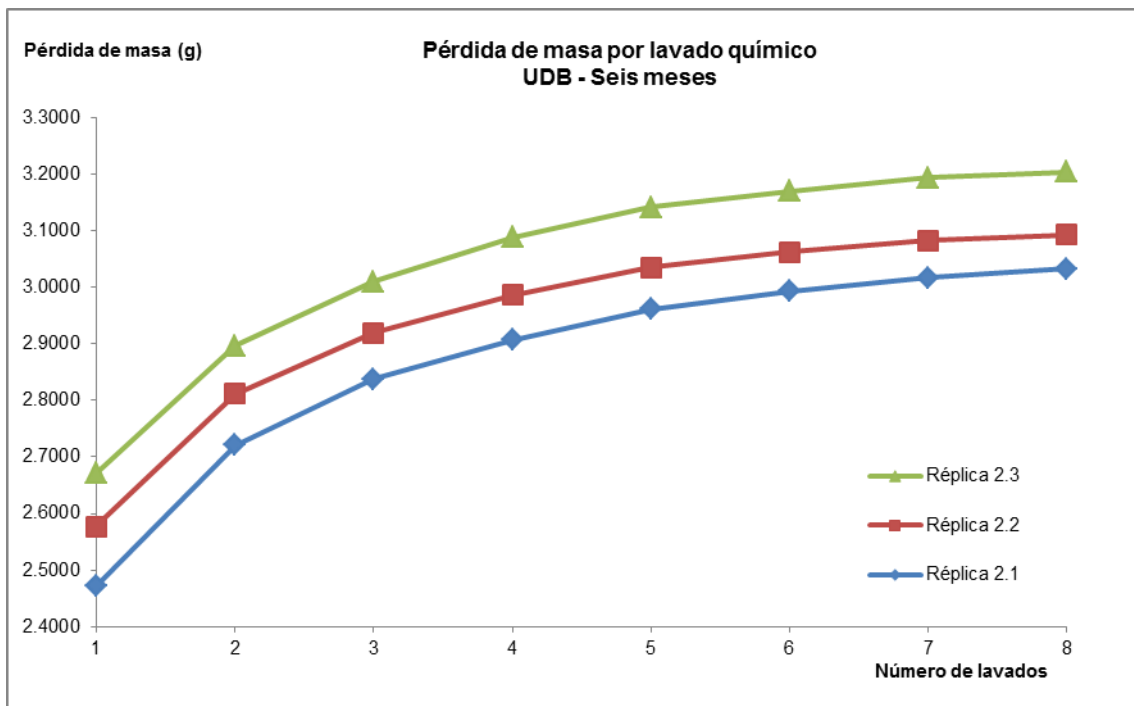


Figura II.10 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en la UDB durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de Soyapango

En la Figura II.11 y en la Figura II.12 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en Soyapango durante tres y seis meses respectivamente.

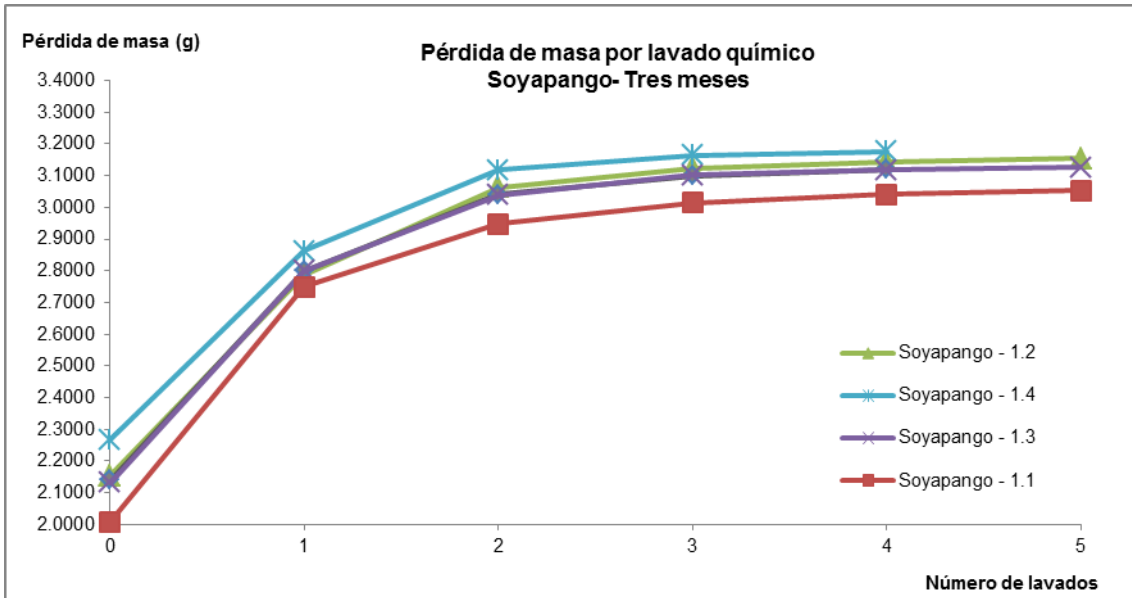


Figura II.11 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Soyapango durante tres meses

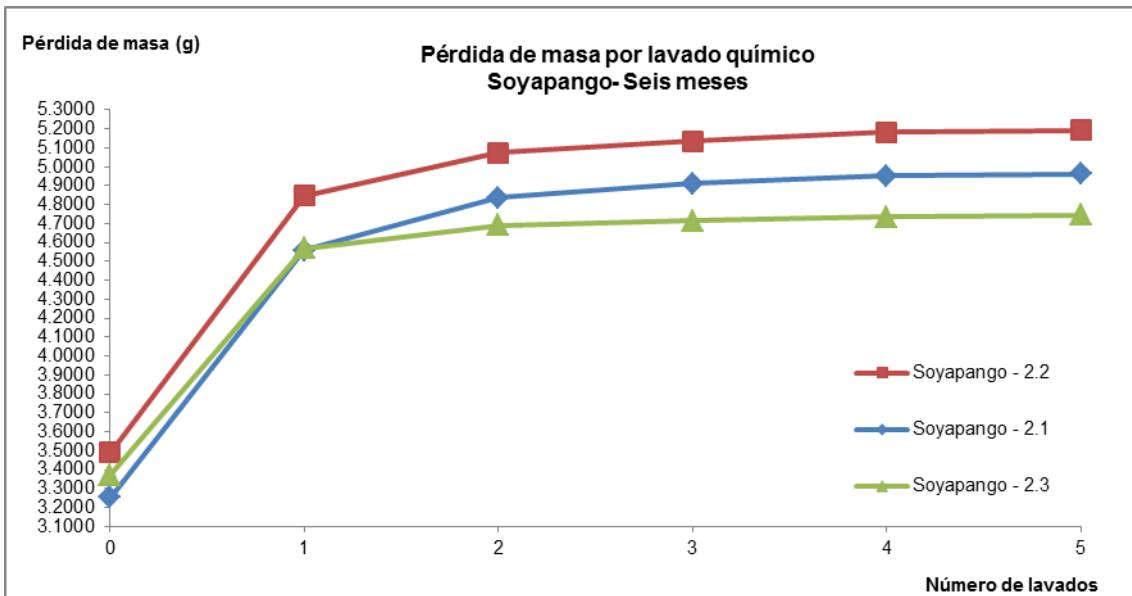


Figura II.12 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Soyapango durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas del Bulevar del Ejército

En la Figura II.13 y en la Figura II.14 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en el Bulevar del Ejército durante tres y seis meses respectivamente.

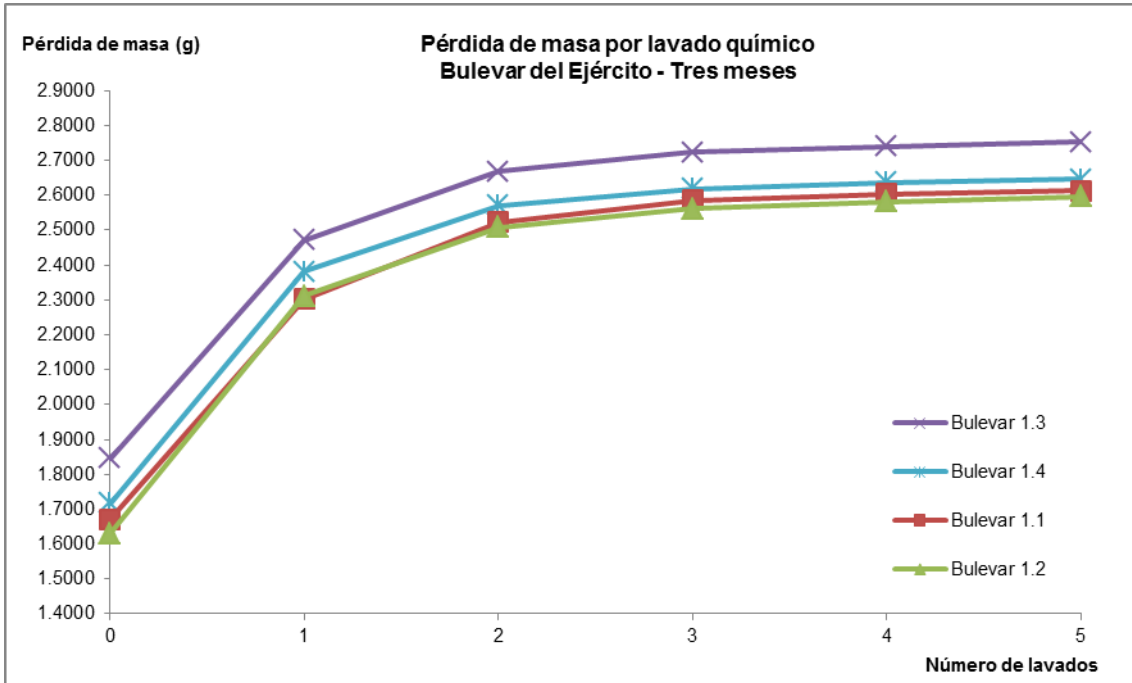


Figura II.13 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en el Bulevar del Ejército durante tres meses

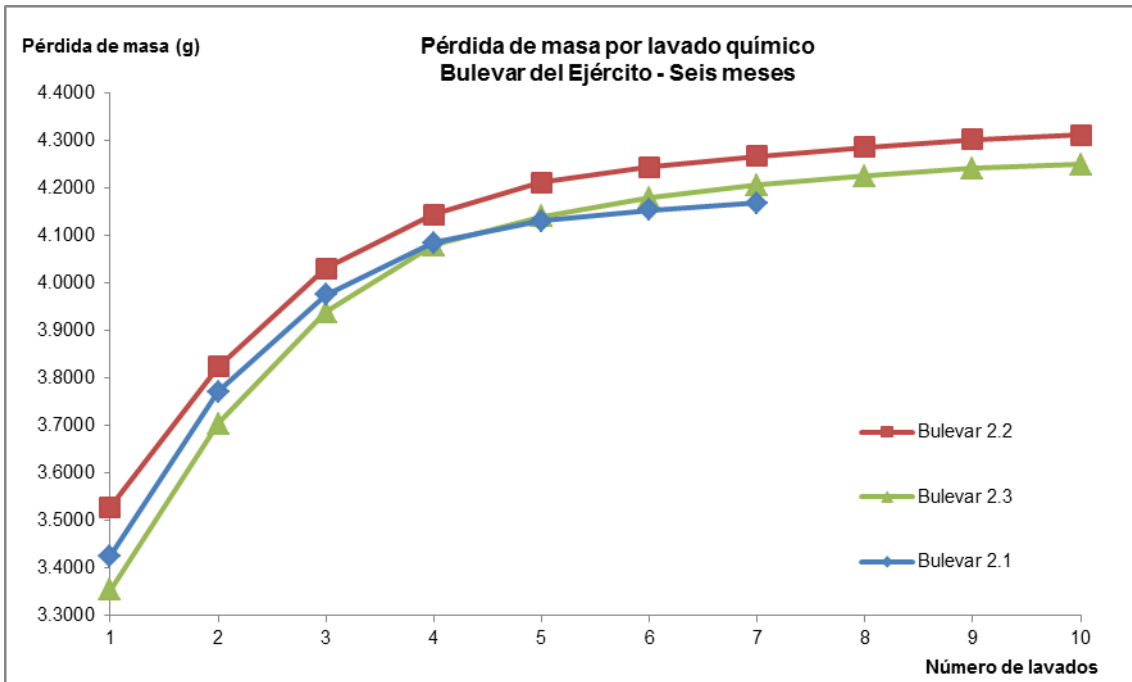


Figura II.14 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en el Bulevar del Ejército durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de Comasagua

En la Figura II.15 y en la Figura II.16 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en Comasagua durante tres y seis meses respectivamente.

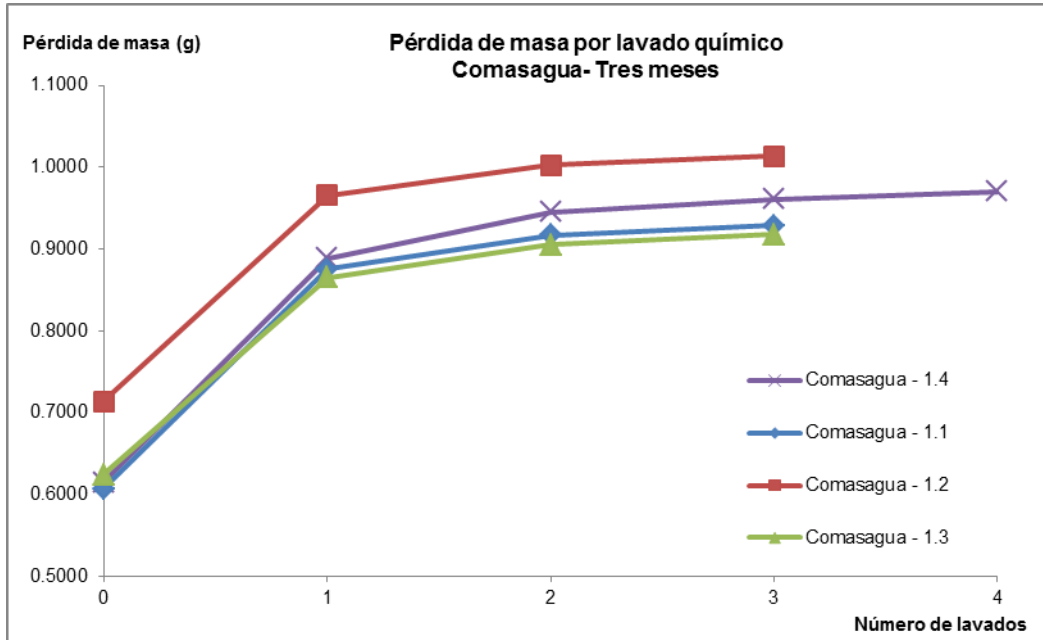


Figura II.15 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Comasagua durante tres meses

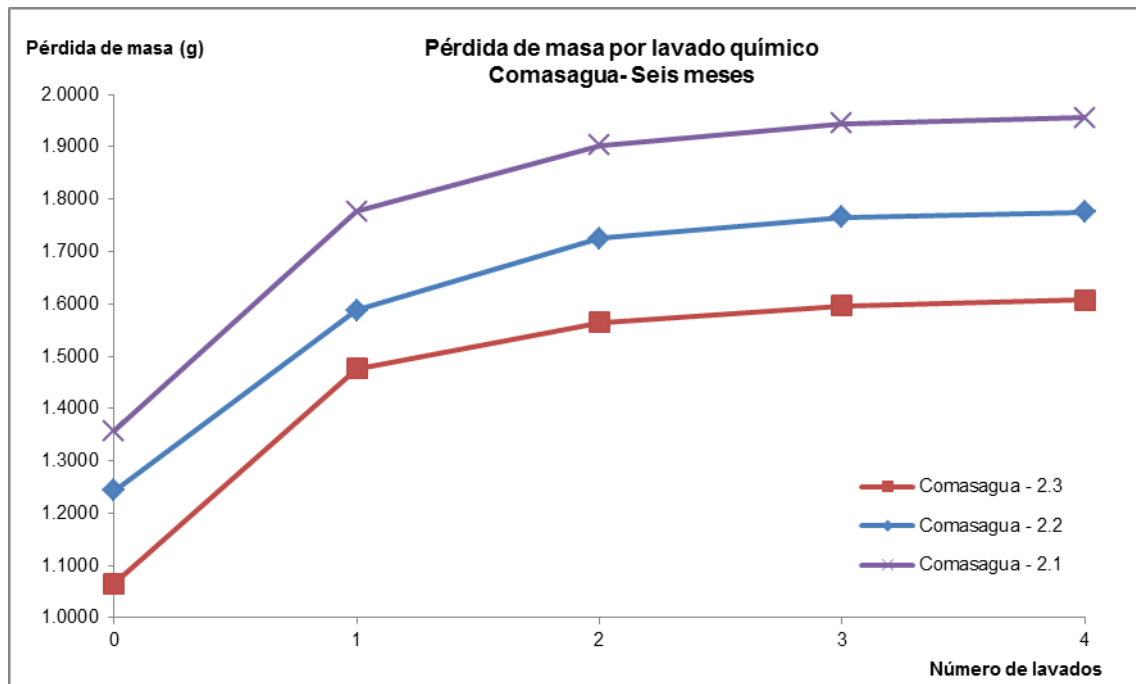


Figura II.16 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Comasagua durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de Los Planes

En la Figura II.17 y en la Figura II.18 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en Los Planes durante tres y seis meses respectivamente.

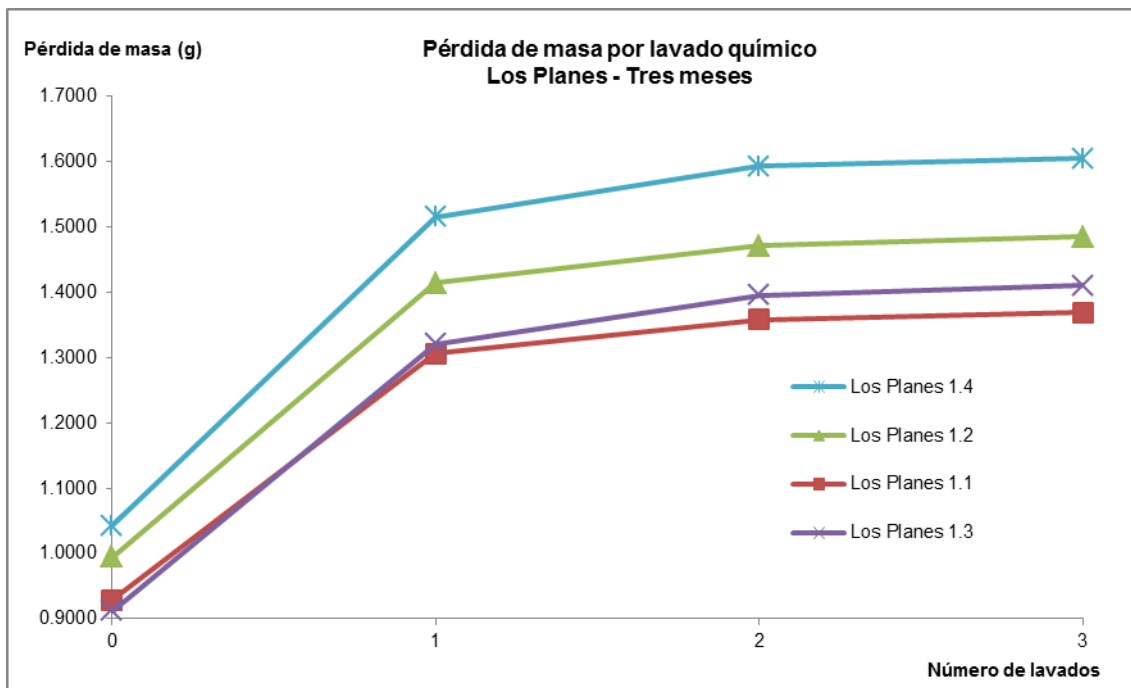


Figura II.17 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Los Planes durante tres meses

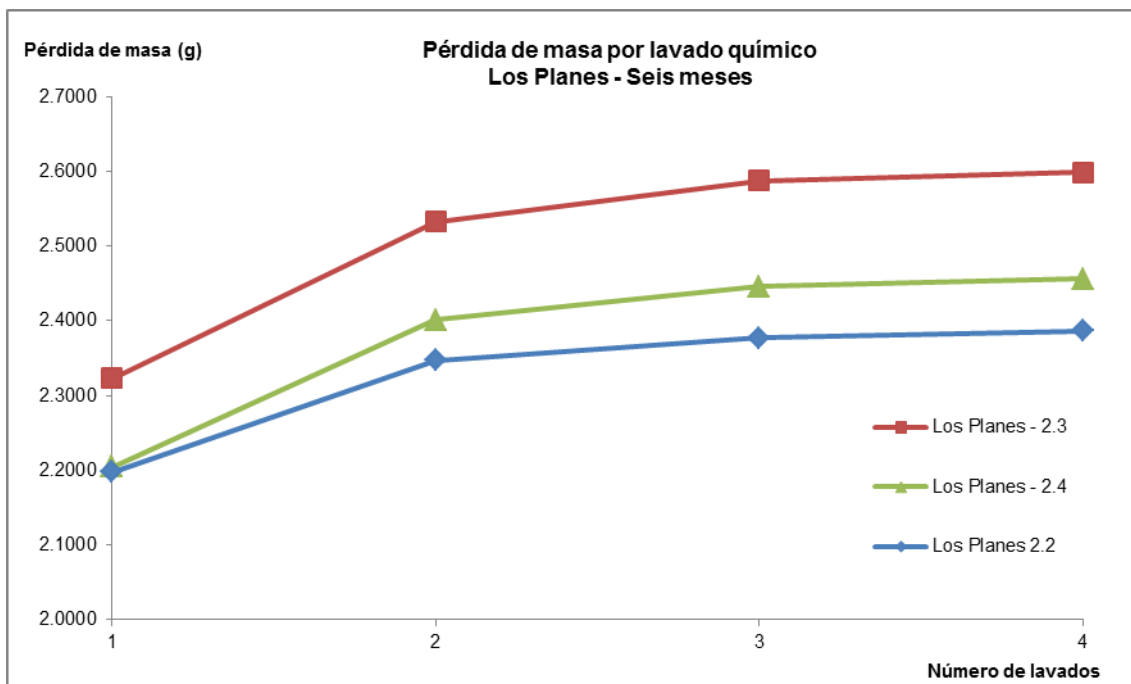


Figura II.18 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Los Planes durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de Villanueva

En la Figura II.19 y en la Figura II.20 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en Villanueva durante tres y seis meses respectivamente.

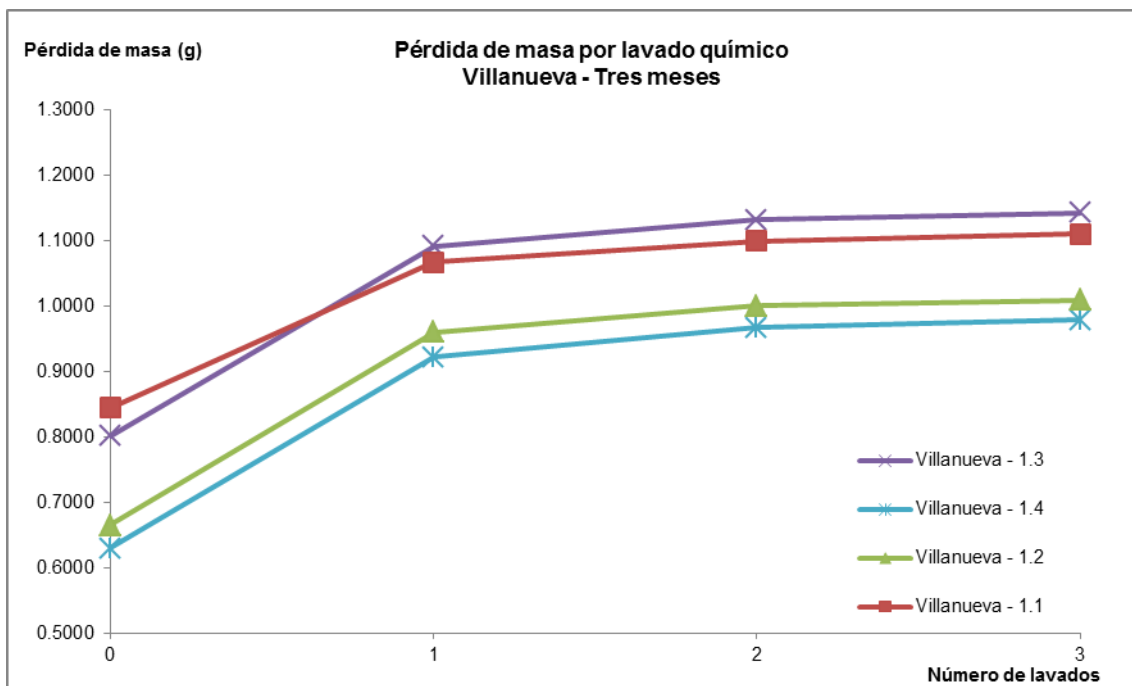


Figura II.19 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Villanueva durante tres meses

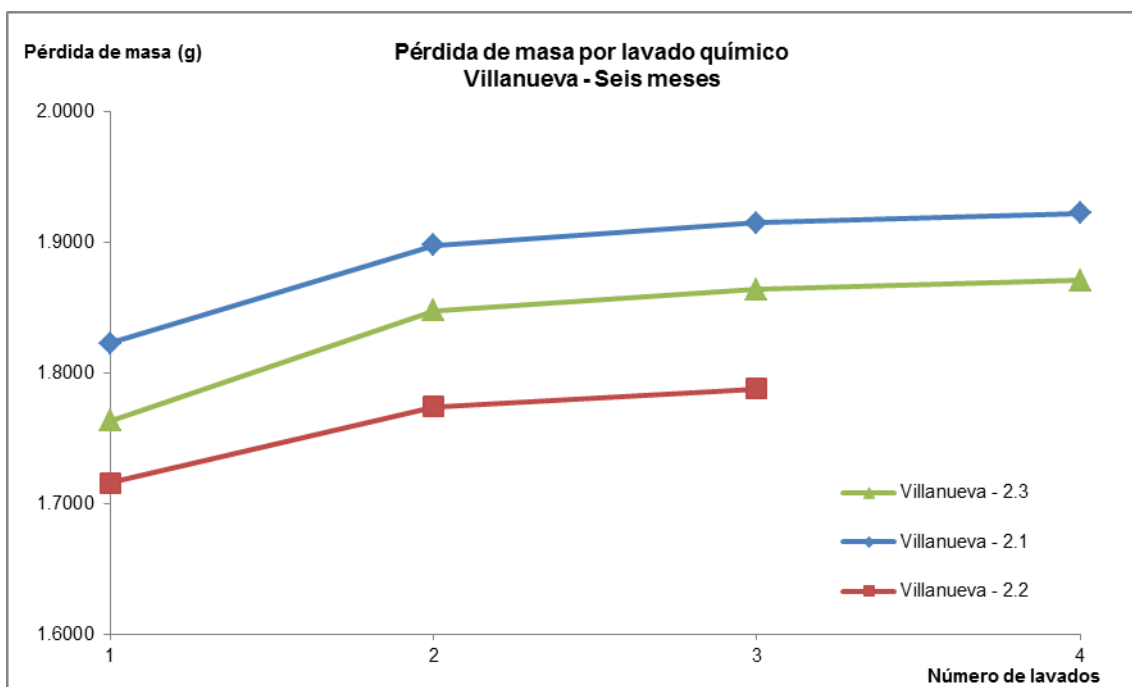


Figura II.20 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Villanueva durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de Acajutla

En la Figura II.21 y en la Figura II.22 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en Acajutla durante tres y seis meses respectivamente.

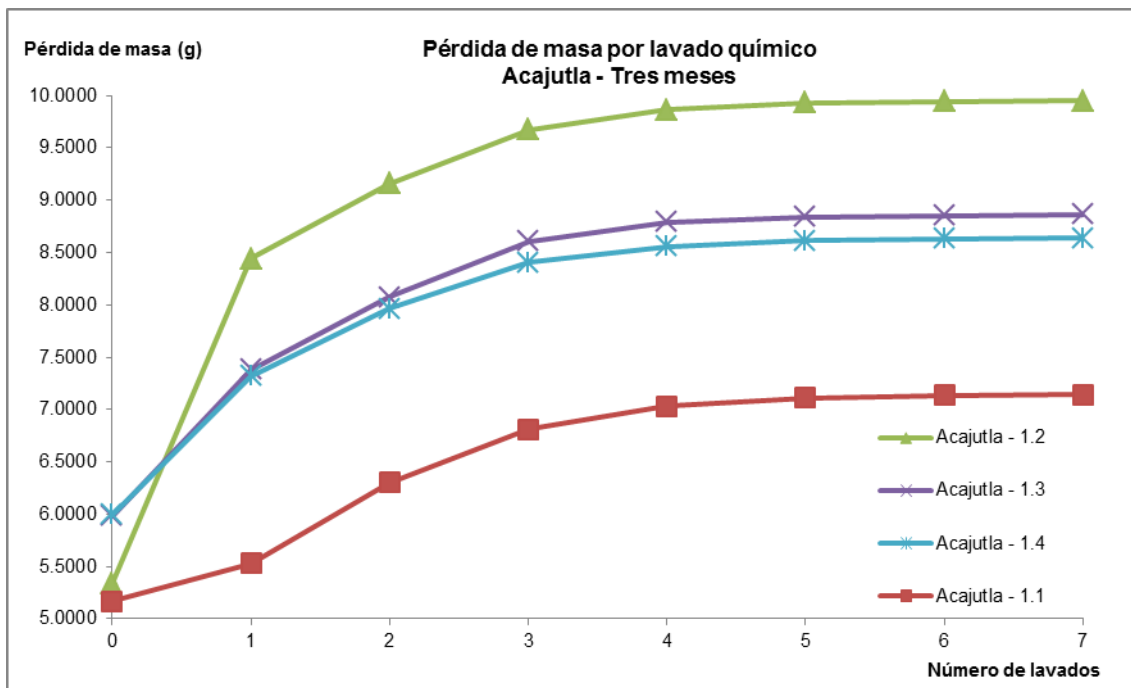


Figura II.21 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Acajutla durante tres meses

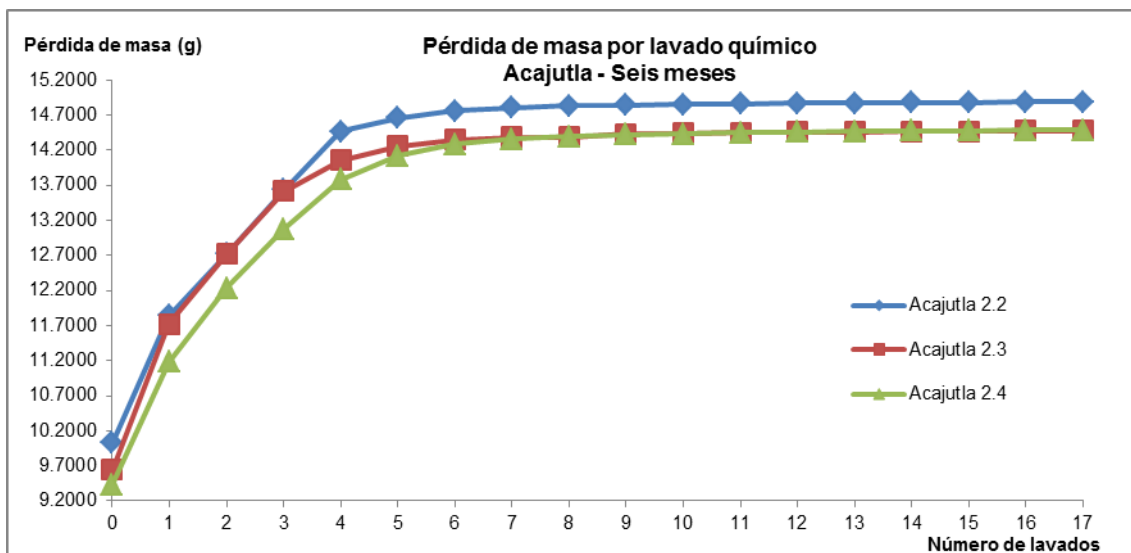


Figura II.22 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en Acajutla durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de San Blas

En la Figura II.23 y en la Figura II.24 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en San Blas durante tres y seis meses respectivamente.

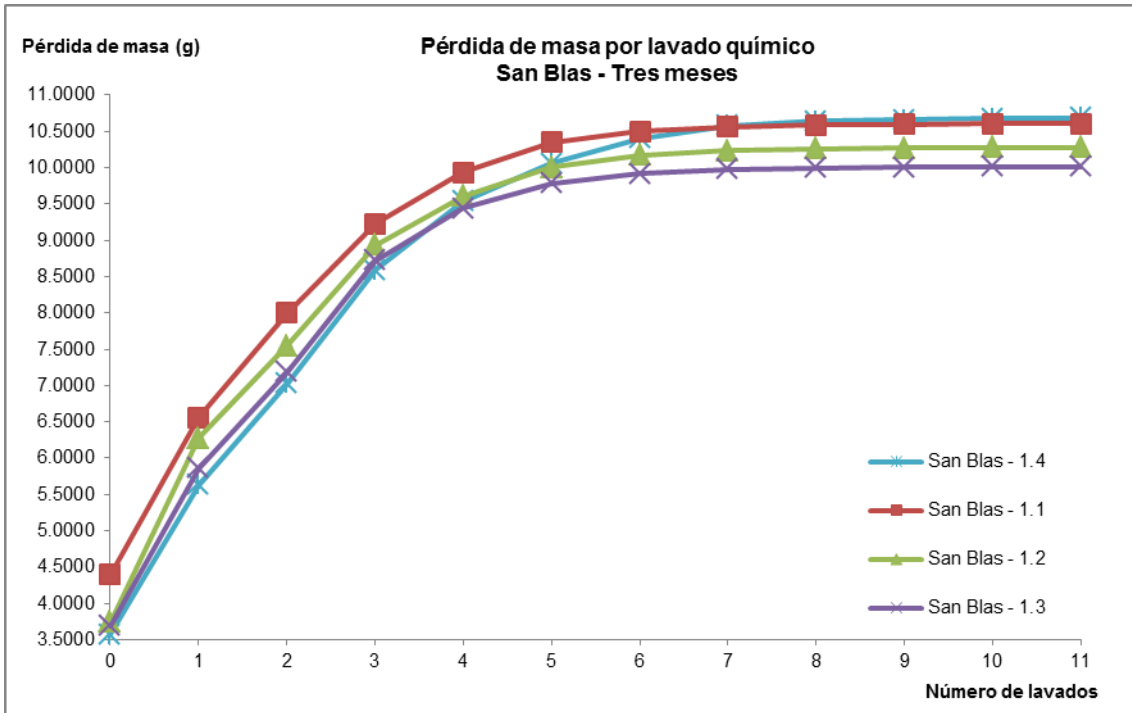


Figura II.23 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Blas durante tres meses

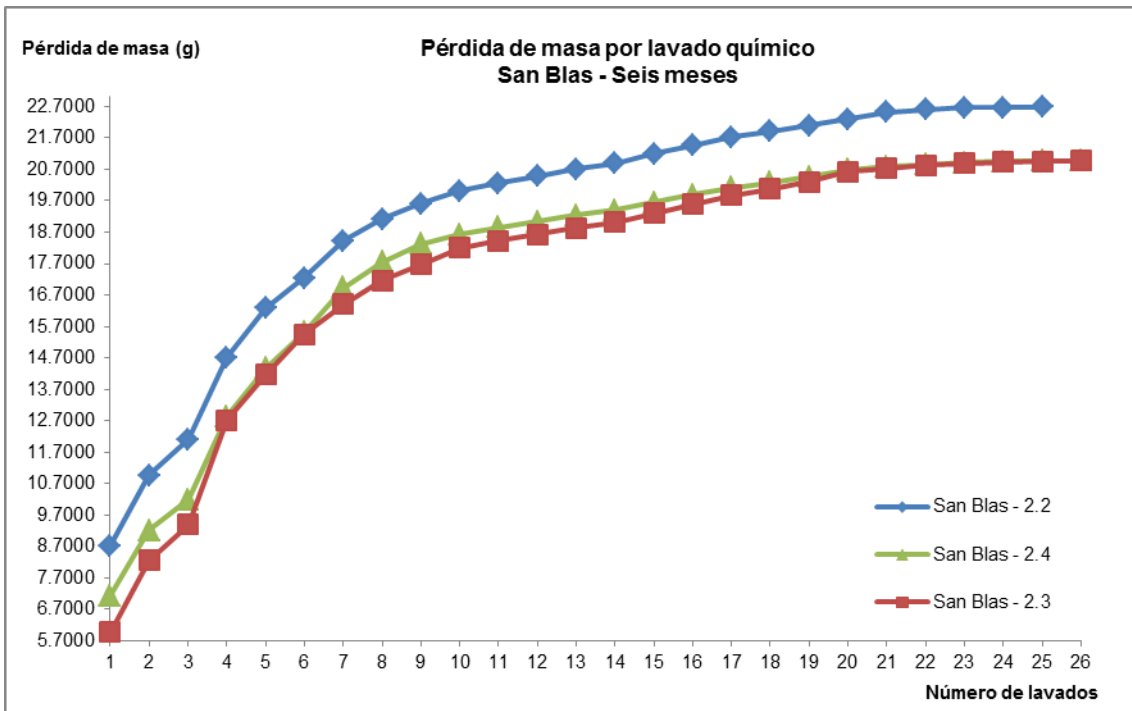


Figura II.24 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en San Blas durante seis meses

Pérdida de masa de las réplicas de La Puntilla

En la Figura II.25 y en la Figura II.26 se presenta los gráficos de lavado químico vs pérdida de masa de cada una de las láminas expuestas en La Puntilla durante tres y seis meses respectivamente.

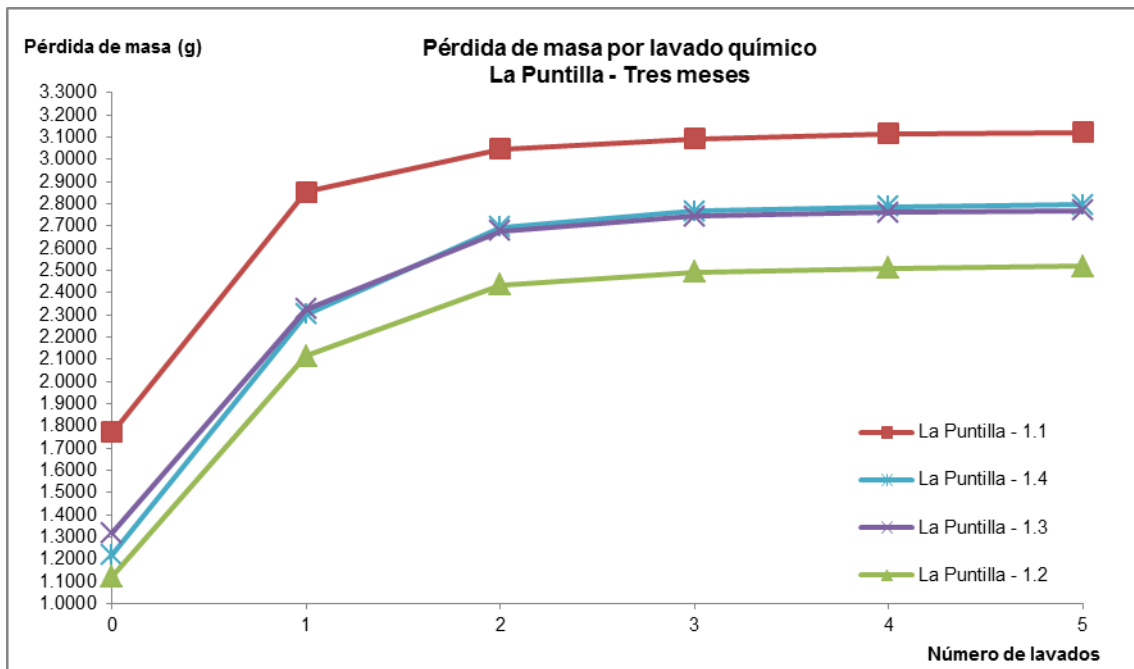


Figura II.25 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en La Puntilla durante tres meses

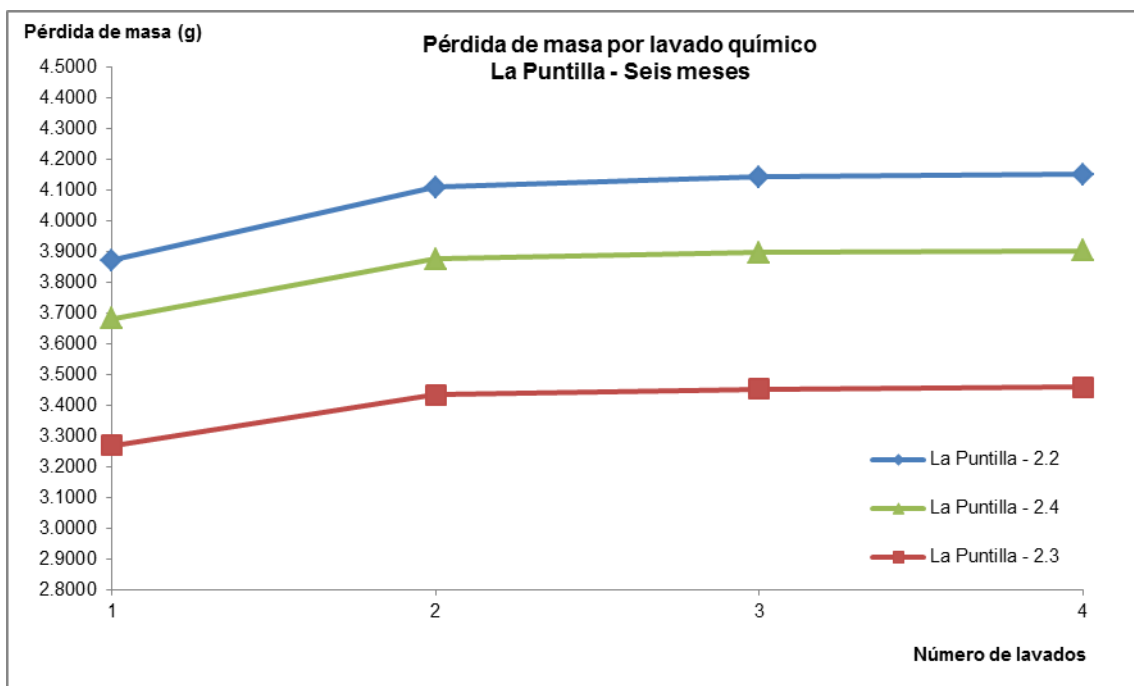


Figura II.26 Lavados químicos vs pérdida de masa por cada lavado en cada una de las láminas expuestas en La Puntilla durante seis meses



Anexo III. Cálculo de velocidades de corrosión

Como se explicó en la sección 4.1.7, la velocidad de corrosión fue obtenida como la pérdida de masa sufrida por el metal dividida entre el producto del área expuesta por el tiempo de exposición al ambiente (gramos x metros⁻² x año⁻¹) y como el espesor de material perdido en el tiempo de exposición (milímetros x año⁻¹ y micrómetros x año⁻¹).

Las fórmulas empleadas fueron:

$$v_c = \frac{M \times 10000}{A_e \times t}$$

Dónde:

v_c = Velocidad de corrosión en g.m⁻².año⁻¹

M = Pérdida de masa sufrida por la lámina debido a su exposición al ambiente

en g

A_e = Área de la lámina expuesta al ambiente en cm²

t = Tiempo de exposición al ambiente en años

(Se multiplica por 10000 para convertir cm² a m²)

$$v_c = \frac{M \times 10}{A_e \times D \times t}$$

Dónde:

v_c = Velocidad de corrosión en mm.año⁻¹ o mmy⁻¹

M = Pérdida de masa sufrida por la lámina debido a su exposición al ambiente

en g

A_e = Área de la lámina expuesta al ambiente en cm²

D = Densidad del metal en g.cm⁻³

t = Tiempo de exposición al ambiente en años

Se multiplica por 10 para convertir cm a mm

$$v_c = \frac{M \times 10000}{A_e \times D \times t}$$

Dónde:

v_c = Velocidad de corrosión en μm.año⁻¹ o μmy⁻¹

M = Pérdida de masa sufrida por la lámina debido a su exposición al ambiente en g

A_e = Área de la lámina expuesta al ambiente en cm²

D = Densidad del metal en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

t = Tiempo de exposición al ambiente en años

Se multiplica por 10000 para convertir cm a μm

Densidad del acero al carbono **7.206 g/cm^3**

Densidad del aluminio **2.560 g/cm^3**

Ejemplo de cálculo de velocidad de corrosión de la réplica 1.1 de acero al carbono correspondiente al sitio UCA

Pérdida de masa

Datos

Masa inicial: 124.8383 g

Masa final: 122.0526 g

No. de lavados requeridos: 5

Cálculos

Pérdida de masa por lavados $0.0033 \text{ g} \times 5 = 0.0165 \text{ g}$

Pérdida de masa $m_i - (m_f + m_p) = (124.8383 \text{ g} - (122.0526 \text{ g} + 0.0165 \text{ g})) = \mathbf{2.7692 \text{ g}}$

Área expuesta

Datos

Ancho de la lámina: 10.110 cm

Largo de la lámina: 14.940 cm

Grosor de la lámina: 0.115 cm

Área trasera (no expuesta): 24.260 cm^2

Área debajo de los pines (no expuesta): 3.60 cm^2

Cálculos

$$A_t = 2(l \times a) + 2(a \times e) + 2(l \times e) = 307.85 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área expuesta: } (307.85 \text{ cm}^2 - (24.260 \text{ cm}^2 + 3.60 \text{ cm}^2)) = 279.99 \text{ cm}^2$$

Tiempo de exposición

Datos

92 días = 0.252 año

Cálculo de la velocidad de corrosión

$$v_c = \frac{2.7692 \text{ g} \times 10000}{279.99 \text{ cm}^2 \times 0.252 \text{ año}} = 392.5 \text{ gm}^{-2} \text{ año}^{-1}$$

$$v_c = \frac{2.7692 \text{ g} \times 10}{279.99 \text{ cm}^2 \times 7.206 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 0.252 \text{ año}} = 0.054 \text{ mmy}^{-1}$$

Si al obtener los resultados para las réplicas se obtiene un coeficiente de variación superior al 10 %, se realizó la prueba de Q, que es utilizada para decidir si aceptar o rechazar un dato dudoso cuando no se dispone de muestra suficiente para repetir el análisis.

Para esta prueba el valor absoluto de la diferencia entre un resultado dudoso y el resultado más próximo se divide entre la dispersión del conjunto para encontrar el valor Q experimental (“Qexp”), el cual es comparado con el valor de rechazo “Qcrít”. Si Qexp es mayor que Qcrít el valor puede rechazarse con el correspondiente nivel de confianza (90 %, 95 % o 99 %), como se muestra en la Tabla III.1.

Tabla III.1 Valores críticos para el cociente de rechazo Q

Número de observaciones	Qcrít (rechazo si Qexp > Qcrít)		
	90 % de confianza	95 % de confianza	99 % de confianza
3	0.941	0.970	0.994
4	0.765	0.829	0.926

(Skoog, y otros 2001)

Si la prueba de Q indica que el valor se retiene debe considerarse expresar los resultados en términos de mediana y no como la media, ya que así se incluye todos los datos del conjunto sin que el valor discordante influya mucho (Skoog, y otros 2001).

Resultados para acero al carbono

Los resultados de Santa Tecla son mostrados en la Tabla III.2.

Tabla III.2 Resultados del acero al carbono en Santa Tecla (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Santa Tecla	1.1	114.8	89.3	19.9	22.3
Santa Tecla	1.2	86.3			
Santa Tecla	1.3	66.3			
Santa Tecla	1.4	89.9			
Santa Tecla	2.1	71.7	63.9	8.3	13.0
Santa Tecla	2.2	55.2			
Santa Tecla	2.3	64.8			
Santa Tecla	3.1	57.7	52.0	6.1	11.8
Santa Tecla	3.2	45.5			
Santa Tecla	3.3	52.8			
Santa Tecla	4.1	48.1	47.9	4.5	9.4
Santa Tecla	4.2	52.3			
Santa Tecla	4.3	43.3			

Como puede verse, los coeficientes de variación de los tres primeros períodos son superiores a 10%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

Se escriben los datos en orden descendente:

114.8 89.9 86.3 66.3

Se encuentra el rango de datos:

$$(114.8 - 66.3) = 48.5$$

Se encuentra la diferencia entre el valor extremo superior (dato dudoso) y el valor más cercano:

$$(114.8 - 89.9) = 29.9$$

Se divide este valor entre el rango de datos y se obtiene Q_{exp}:

$$(29.9 / 48.5) = 0.513$$

Se compara con el valor Q crítico, con 95 % de confianza, 0.970 para tres réplicas y 0.829 para cuatro réplicas, si $Q_{exp} > Q_{crit}$, el valor se rechaza.

Para este caso como 0.513 es menor que 0.829, el valor se acepta.

Al hacer el mismo procedimiento para 66.3 que es el valor extremo inferior (dato dudoso) se obtiene un Q_{exp} igual a 0.412 (menor que 0.829), por lo tanto el valor se acepta.

Seis meses

Se obtuvo valores de Q experimental de 0.582 para 55.2 (dato dudoso), como es menor que 0.970 (tres réplicas con 95 % de confianza), se acepta el resultado.

Nueve meses

Se obtuvo valores de Q experimental de 0.403 para 45.5 (dato dudoso), por lo que se acepta el resultado.

Tal como el método lo recomienda, para los tres períodos (tres, seis y nueve meses) se expresa el resultado en términos de la mediana y para doce meses en términos de la media (el coeficiente de variación es menor a 10 %), tal como se muestra en la Tabla III.3.

Tabla III.3 Resultados del acero al carbono en Santa Tecla para tres, seis y nueve meses (mediana y desviación estándar)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión (g/m ² .año)	Desviación estándar
Santa Tecla	1.1	114.8	88.1 (mediana)	19.9
Santa Tecla	1.2	86.3		
Santa Tecla	1.3	66.3		
Santa Tecla	1.4	89.9		
Santa Tecla	2.1	71.7	64.8 (mediana)	8.3
Santa Tecla	2.2	55.2		
Santa Tecla	2.3	64.8		
Santa Tecla	3.1	57.7	52.8 (mediana)	6.1
Santa Tecla	3.2	45.5		
Santa Tecla	3.3	52.8		

Los resultados de la UCA se muestran en la Tabla III.4.

Tabla III.4 Resultados del acero al carbono en la UCA (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
UCA	1.1	392.4	383.0	12.4	3.2
UCA	1.2	378.3			
UCA	1.3	367.7			
UCA	1.4	393.7			
UCA	2.1	340.2	338.1	2.2	0.6
UCA	2.2	335.9			
UCA	2.3	338.1			
UCA	3.1	234.1	234.3	2.6	1.1
UCA	3.2	231.8			
UCA	3.3	236.9			
UCA	4.1	195.3	193.4	5.0	2.6
UCA	4.2	187.7			
UCA	4.3	197.2			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de la UTEC se presentan en la Tabla III.5.

Tabla III.5 Resultados del acero al carbono en la UTEC (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
UTEC	1.1	405.28	417.0	17.4	4.2
UTEC	1.2	406.52			
UTEC	1.3	413.58			
UTEC	1.4	442.46			
UTEC	2.1	296.69	301.2	14.3	4.7
UTEC	2.2	289.73			
UTEC	2.3	317.20			
UTEC	3.1	208.84	216.3	6.6	3.0
UTEC	3.2	221.37			
UTEC	3.3	218.66			
UTEC	4.1	169.95	175.7	5.9	3.4

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
UTEC	4.2	175.53			
UTEC	4.3	181.77			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de San Marcos se muestran en la Tabla III.6.

Tabla III.6 Resultados del acero al carbono en San Marcos (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
San Marcos	1.1	237.2	260.5	17.0	6.5
San Marcos	1.2	273.1			
San Marcos	1.3	258.3			
San Marcos	1.4	273.3			
San Marcos	2.1	214.8	195.6	17.2	8.8
San Marcos	2.2	190.3			
San Marcos	2.3	181.7			
San Marcos	3.1	129.0	122.0	6.3	5.2
San Marcos	3.2	116.7			
San Marcos	3.3	120.2			
San Marcos	4.1	151.3	145.8	5.5	3.8
San Marcos	4.2	140.2			
San Marcos	4.3	145.7			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de la UDB se presentan en la Tabla III.7.

Tabla III.7 Resultados del acero al carbono en la UDB (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
UDB	1.1	223.3	277.6	39.3	14.2
UDB	1.2	284.8			
UDB	1.3	284.7			

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
UDB	1.4	317.4			
UDB	2.1	211.2	217.0	6.8	3.2
UDB	2.2	215.2			
UDB	2.3	224.5			
UDB	3.1	160.2	163.9	5.3	3.2
UDB	3.2	170.0			
UDB	3.3	161.6			
UDB	4.1	109.9	110.4	4.4	3.9
UDB	4.2	115.4			
UDB	4.3	107.7			

Para seis, nueve y doce meses el coeficiente de variación es menor que 10%, pero para tres meses es mayor que 10 %, por lo que para este período se realiza la prueba Q para los valores extremos.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	317.4	0.346
Valor más cercano	284.8	-
Valor dudoso	223.3	-
Valor más cercano	284.7	0.652
Rango	94.10	

En ambos casos se acepta los datos, por lo que para tres meses, el valor de corrosión se expresa en función de la mediana, como se muestra en la Tabla III.8.

Tabla III.8 Resultados del acero al carbono en la UDB a tres meses (mediana y desviación estándar)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión (g/m ² .año)	Desviación estándar
UDB	1.1	223.3	284.8 (mediana)	39.3
UDB	1.2	284.8		
UDB	1.3	284.7		
UDB	1.4	317.4		

Los resultados de Soyapango se muestran en la Tabla III.9.

Tabla III.9 Resultados del acero al carbono en Soyapango (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
Soyapango	1.1	432.9	443.7	7.5	1.7
Soyapango	1.2	445.5			
Soyapango	1.3	446.3			
Soyapango	1.4	450.2			
Soyapango	2.1	340.9	343.3	14.8	4.3
Soyapango	2.2	359.2			
Soyapango	2.3	329.8			
Soyapango	3.1	237.5	242.8	4.6	1.9
Soyapango	3.2	246.0			
Soyapango	3.3	244.9			
Soyapango	4.1	160.1	165.9	5.0	3.0
Soyapango	4.2	169.1			
Soyapango	4.3	168.4			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados del Bulevar del Ejército se muestran en la Tabla III.10.

Tabla III.10 Resultados del acero al carbono en el Bulevar del Ejército (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
Bulevar Ejército	1.1	374.3	378.4	10.4	2.8
Bulevar Ejército	1.2	368.2			
Bulevar Ejército	1.3	392.7			
Bulevar Ejército	1.4	378.3			
Bulevar Ejército	2.1	294.1	302.1	7.2	2.4
Bulevar Ejército	2.2	308.0			
Bulevar Ejército	2.3	304.3			
Bulevar Ejército	3.1	206.4	214.8	9.8	4.6
Bulevar Ejército	3.2	212.4			
Bulevar Ejército	3.3	225.6			
Bulevar Ejército	4.1	158.7	159.6	2.9	1.8

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Bulevar Ejército	4.2	162.8			
Bulevar Ejército	4.3	157.3			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de Comasagua se presentan en la Tabla III.11.

Tabla III.11 Resultados del acero al carbono en Comasagua (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Comasagua	1.1	130.4	133.4	5.6	4.2
Comasagua	1.2	113.3			
Comasagua	1.3	112.9			
Comasagua	1.4	135.0			
Comasagua	2.1	134.3	122.1	11.9	9.7
Comasagua	2.2	106.2			
Comasagua	2.3	110.7			
Comasagua	3.1	106.0	106.9	0.8	0.7
Comasagua	3.2	107.2			
Comasagua	3.3	116.8			
Comasagua	4.1	95.4	94.6	3.4	3.6
Comasagua	4.2	90.8			
Comasagua	4.3	97.5			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de Los Planes se presentan en la Tabla III.12.

Tabla III.12 Resultados del acero al carbono en Los Planes (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Los Planes	1.1	191.3	205.2	16.2	7.9
Los Planes	1.2	207.0			
Los Planes	1.3	195.2			
Los Planes	1.4	227.3			

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Los Planes	2.2	165.0	169.8	7.3	4.3
Los Planes	2.3	178.1			
Los Planes	2.4	166.2			
Los Planes	3.1	134.0	129.5	5.9	4.6
Los Planes	3.2	122.8			
Los Planes	3.3	131.8			
Los Planes	4.1	89.5	91.2	2.1	2.3
Los Planes	4.2	90.5			
Los Planes	4.3	93.5			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de Villanueva se presentan en la Tabla III.13.

Tabla III.13 Resultados del acero al carbono en Villanueva (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
Villanueva	1.1	150.5	143.4	11.6	8.1
Villanueva	1.2	136.4			
Villanueva	1.3	155.7			
Villanueva	1.4	131.0			
Villanueva	2.1	131.9	127.4	5.6	4.4
Villanueva	2.2	121.2			
Villanueva	2.3	129.3			
Villanueva	3.1	102.0	106.6	8.0	7.5
Villanueva	3.2	102.0			
Villanueva	3.3	115.8			
Villanueva	4.1	85.5	87.9	4.3	4.9
Villanueva	4.2	85.3			
Villanueva	4.3	92.9			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de Acajutla se muestran en la Tabla III.14

Tabla III.14 Resultados del acero al carbono en Acajutla (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
Acajutla	1.1	1231.0	1250.9	17.3	1.4
Acajutla	1.2	1252.9			
Acajutla	1.3	1272.8			
Acajutla	1.4	1246.8			
Acajutla	2.2	1074.4	1050.2	21.0	2.0
Acajutla	2.3	1036.6			
Acajutla	2.4	1039.5			
Acajutla	3.1	736.4	737.8	19.3	2.6
Acajutla	3.2	757.6			
Acajutla	3.3	719.2			
Acajutla	4.1	553.2	573.8	28.0	4.9
Acajutla	4.2	562.5			
Acajutla	4.3	605.7			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de San Blas se presentan en la Tabla III.15.

Tabla III.15 Resultados del acero al carbono en San Blas (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)
San Blas	1.1	1585.6	1575.9	49.9	3.2
San Blas	1.2	1587.6			
San Blas	1.3	1506.1			
San Blas	1.4	1624.6			
San Blas	2.2	1525.8	1457.0	59.6	4.1
San Blas	2.3	1420.7			
San Blas	2.4	1424.6			
San Blas	3.1	950.8	950.8	3.2	0.3
San Blas	3.2	954.0			
San Blas	3.3	947.6			
San Blas	4.1	724.6	716.5	23.9	3.3
San Blas	4.2	689.6			
San Blas	4.3	735.4			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media. Los resultados de La Puntilla se presentan en la Tabla III.16.

Tabla III.16 Resultados del acero al carbono La Puntilla (valor promedio y coeficiente de variación)

Sitio	Réplica	Velocidad de corrosión por réplica (g/m ² .año)	Velocidad de corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
La Puntilla	1.1	435.2	394.4	31.0	7.9
La Puntilla	1.2	359.9			
La Puntilla	1.3	390.2			
La Puntilla	1.4	392.3			
La Puntilla	2.2	283.3	263.6	21.2	8.0
La Puntilla	2.3	241.2			
La Puntilla	2.4	266.3			
La Puntilla	3.1	210.4	212.8	2.2	1.0
La Puntilla	3.2	214.8			
La Puntilla	3.3	213.1			
La Puntilla	4.1	205.7	208.7	4.4	2.1
La Puntilla	4.2	213.7			
La Puntilla	4.3	206.7			

Todos los coeficientes de variación son menores que 10 %, por lo que los resultados se dejan en función de la media.

Resultados para aluminio

Los resultados de velocidad de corrosión en aluminio para Santa Tecla se muestran en la Tabla III.17.

Tabla III.17 Resultados del aluminio en Santa Tecla antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Santa Tecla	1.2	0.112	0.075	0.035	46.7
Santa Tecla	1.3	0.042			
Santa Tecla	1.4	0.070			
Santa Tecla	2.1	0.050	0.038	0.015	39.5
Santa Tecla	2.2	0.043			
Santa Tecla	2.4	0.021			
Santa Tecla	3.1	0.067	0.066	0.000	0.6
Santa Tecla	3.2	0.066			
Santa Tecla	3.3	0.066			
Santa Tecla	4.1	0.071	0.093	0.042	44.9
Santa Tecla	4.2	0.067			
Santa Tecla	4.3	0.141			

Como puede verse, los coeficientes de variación para tres, seis y doce meses son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.112	0.600
Valor más cercano	0.070	-
Rango	0.070	

Como el Qexp es menor que el Qcrít, 0.970, se acepta el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.021	0.759
Valor más cercano	0.043	-
Rango	0.029	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.141	0.946
Valor más cercano	0.071	-
Rango	0.074	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para Santa Tecla son los mostrados en la Tabla III.18.:

Tabla III.18 Resultados del aluminio en Santa Tecla después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Santa Tecla	1.2	0.112	0.070 (mediana)	0.035
Santa Tecla	1.3	0.042		
Santa Tecla	1.4	0.070		
Santa Tecla	2.1	0.050	0.043 (mediana)	0.015
Santa Tecla	2.2	0.043		
Santa Tecla	2.4	0.021		
Santa Tecla	3.1	0.067	0.066 (promedio)	0.000
Santa Tecla	3.2	0.066		
Santa Tecla	3.3	0.066		
Santa Tecla	4.1	0.071	0.071 (mediana)	0.003
Santa Tecla	4.2	0.067		
Santa Tecla	4.2	0.141		

Los resultados de aluminio obtenidos para la UCA se presentan en la Tabla III.19.

Tabla III.19 Resultados del aluminio en la UCA antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
UCA	1.2	0.139	0.112	0.027	24.1
UCA	1.3	0.112			
UCA	1.4	0.085			
UCA	2.1	0.117	0.097	0.035	36.2
UCA	2.2	0.117			
UCA	2.3	0.056			
UCA	3.1	0.061	0.069	0.007	10.6
UCA	3.2	0.070			
UCA	3.3	0.075			
UCA	4.1	0.007	0.035	0.025	71.9
UCA	4.2	0.056			
UCA	4.3	0.042			

Como puede verse, los coeficientes de variación para tres, seis y doce meses son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.0850	0.497
Valor más cercano	0.1118	-
Rango	0.0539	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.0562	0.993
Valor más cercano	0.1166	-
Rango	0.0608	

Como el Qexp es mayor que 0.970 se rechaza el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.007	0.714
Valor más cercano	0.042	-
Rango	0.049	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso.

Por lo tanto los valores para la UCA son los mostrados en la Tabla III.20.

Tabla III.20 Resultados del aluminio en la UCA después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
UCA	1.2	0.1389	0.112 (mediana)	0.027
UCA	1.3	0.1118		
UCA	1.4	0.0850		
UCA	2.1	0.1166	0.117 (promedio)	0.000
UCA	2.2	0.1170		
UCA	3.1	0.0606	0.069 (promedio)	0.007
UCA	3.2	0.0704		
UCA	3.3	0.0748		
UCA	4.1	0.007	0.042 (mediana)	0.025
UCA	4.2	0.056		
UCA	4.3	0.042		

Los resultados de aluminio obtenidos para la UTEC se presentan en la Tabla III.21.

Tabla III.21 Resultados del aluminio en la UTEC antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coficiente de variación
UTEC	1.1	0.292	0.384	0.114	29.8
UTEC	1.2	0.347			
UTEC	1.3	0.512			
UTEC	2.1	0.460	0.359	0.118	32.8
UTEC	2.2	0.230			
UTEC	2.3	0.388			
UTEC	3.1	0.103	0.127	0.041	31.9
UTEC	3.2	0.104			

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
UTECH	3.3	0.174			
UTECH	4.1	0.221	0.281	0.091	32.4
UTECH	4.2	0.236			
UTECH	4.3	0.384			

Como puede verse, los coeficientes de variación para todos los períodos son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.512	0.750
Valor más cercano	0.347	-
Rango	0.220	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.230	0.687
Valor más cercano	0.388	-
Rango	0.230	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.174	0.986
Valor más cercano	0.104	-
Rango	0.071	

Como el Qexp es mayor que 0.970 se rechaza el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.384	0.908
Valor más cercano	0.236	-
Rango	0.163	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para la UTEC son los mostrados en la Tabla III.22.

Tabla III.22 Resultados del aluminio en la UTEC después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
UTEC	1.1	0.292	0.347 (mediana)	0.114
UTEC	1.2	0.347		
UTEC	1.3	0.512		
UTEC	2.1	0.460	0.388 (mediana)	0.118
UTEC	2.2	0.230		
UTEC	2.3	0.388		
UTEC	3.1	0.103	0.104 (promedio)	0.001
UTEC	3.2	0.104		
UTEC	4.1	0.221	0.236 (mediana)	0.090
UTEC	4.2	0.236		
UTEC	4.3	0.384		

Los resultados de aluminio obtenidos para San Marcos se presentan en la Tabla III.23.

Tabla III.23 Resultados del aluminio en San Marcos antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coficiente de variación
San Marcos	1.2	0.150	0.192	0.037	19.3
San Marcos	1.3	0.220			
San Marcos	1.4	0.206			
San Marcos	2.2	0.195	0.152	0.058	37.9
San Marcos	2.3	0.174			
San Marcos	2.4	0.086			
San Marcos	3.1	0.206	0.172	0.034	19.8
San Marcos	3.2	0.173			

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
San Marcos	3.3	0.138			
San Marcos	4.1	0.037	0.054	0.015	27.5
San Marcos	4.2	0.062			
San Marcos	4.3	0.063			

Como puede verse, los coeficientes de variación para todos los períodos son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.150	0.800
Valor más cercano	0.206	-
Rango	0.07	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.086	0.807
Valor más cercano	0.174	-
Rango	0.109	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.138	0.515
Valor más cercano	0.173	-
Rango	0.068	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.037	0.962
Valor más cercano	0.062	-
Rango	0.026	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para San Marcos son los mostrados en la Tabla III.22.

Tabla III.24 Resultados del aluminio en San Marcos después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
San Marcos	1.1	0.150	0.206 (mediana)	0.037
San Marcos	1.2	0.220		
San Marcos	1.3	0.206		
San Marcos	2.1	0.195	0.174 (mediana)	0.058
San Marcos	2.2	0.174		
San Marcos	2.3	0.086		
San Marcos	3.1	0.206	0.173 (mediana)	0.034
San Marcos	3.2	0.173		
San Marcos	3.3	0.138		
San Marcos	4.1	0.062	0.062 (mediana)	0.015
San Marcos	4.2	0.063		
San Marcos	4.3	0.037		

Los resultados de aluminio obtenidos para la UDB se presentan en la Tabla III.25.

Tabla III.25 Resultados del aluminio en la UDB antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
UDB	1.2	0.391	0.767	0.328	42.7
UDB	1.3	0.920			
UDB	1.4	0.989			
UDB	2.1	0.516	0.445	0.088	19.8
UDB	2.2	0.472			
UDB	2.3	0.346			
UDB	3.1	0.460			

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
UDB	3.2	0.330	0.424	0.082	19.3
UDB	3.3	0.482			
UDB	4.1	0.503	0.426	0.115	27.0
UDB	4.2	0.294			
UDB	4.3	0.482			

Como puede verse, los coeficientes de variación para todos los períodos son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.391	0.885
Valor más cercano	0.920	-
Rango	0.598	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.346	0.741
Valor más cercano	0.472	-
Rango	0.170	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.330	0.855
Valor más cercano	0.460	-
Rango	0.152	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.294	0.900
Valor más cercano	0.482	-
Rango	0.209	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para la UDB son los mostrados en la Tabla III.26.

Tabla III.26 Resultados del aluminio en la UDB después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
UDB	1.2	0.391	0.920 (mediana)	0.327
UDB	1.3	0.920		
UDB	1.4	0.989		
UDB	2.1	0.516	0.445 (mediana)	0.088
UDB	2.2	0.472		
UDB	2.3	0.346		
UDB	3.1	0.460	0.460 (mediana)	0.082
UDB	3.2	0.330		
UDB	3.3	0.482		
UDB	4.1	0.503	0.482 (mediana)	0.115
UDB	4.2	0.294		
UDB	4.3	0.482		

Los resultados de aluminio obtenidos para Soyapango se presentan en la Tabla III.27.

Tabla III.27 Resultados del aluminio en Soyapango antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Soyapango	1.2	0.213	0.241	0.038	15.8
Soyapango	1.3	0.285			
Soyapango	1.4	0.227			
Soyapango	2.1	0.021	0.023	0.004	17.2
Soyapango	2.2	0.021			
Soyapango	2.3	0.027			
Soyapango	3.1	0.005	0.038	0.029	78.0

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Soyapango	3.2	0.061	0.171	0.042	24.7
Soyapango	3.3	0.047			
Soyapango	4.1	0.207			
Soyapango	4.2	0.183			
Soyapango	4.3	0.125			

Como puede verse, los coeficientes de variación para todos los períodos son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.285	0.806
Valor más cercano	0.227	-
Rango	0.072	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.027	1.000
Valor más cercano	0.021	-
Rango	0.006	

Como el Qexp es mayor que 0.970, se rechaza el dato dudoso

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.005	0.75
Valor más cercano	0.047	-
Rango	0.056	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.125	0.707
Valor más cercano	0.183	-
Rango	0.082	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso.

Por lo tanto los valores para Soyapango son los mostrados en la Tabla III.28.

Tabla III.28 Resultados del aluminio en Soyapango después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Soyapango	1.2	0.213	0.227 (mediana)	0.038
Soyapango	1.3	0.285		
Soyapango	1.4	0.227		
Soyapango	2.1	0.021	0.021 (promedio)	0.000
Soyapango	2.2	0.021		
Soyapango	1.1	0.005	0.047 (mediana)	0.029
Soyapango	1.2	0.061		
Soyapango	1.3	0.047		
Soyapango	4.1	0.207	0.183 (mediana)	0.042
Soyapango	4.2	0.183		
Soyapango	4.3	0.125		

Los resultados de aluminio obtenidos para el Bulevar del Ejército se presentan en la Tabla III.29.

Tabla III.29 Resultados del aluminio en el Bulevar del Ejército antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coficiente de variación
Bulevar del Ejército	1.1	0.172	0.185	0.024	12.8
Bulevar del Ejército	1.2	0.171			
Bulevar del Ejército	1.3	0.213			
Bulevar del Ejército	2.1	0.127	0.151	0.024	16.2
Bulevar del Ejército	2.2	0.176			
Bulevar del Ejército	2.3	0.149			
Bulevar del Ejército	3.1	0.065	0.084	0.025	29.3

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Bulevar del Ejército	3.2	0.111	0.160	0.032	19.8
Bulevar del Ejército	3.3	0.074			
Bulevar del Ejército	4.1	0.124			
Bulevar del Ejército	4.2	0.174			
Bulevar del Ejército	4.3	0.183			

Como puede verse, los coeficientes de variación para seis, nueve y doce meses son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.176	0.551
Valor más cercano	0.149	-
Rango	0.049	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.111	0.804
Valor más cercano	0.074	-
Rango	0.046	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.124	0.847
Valor más cercano	0.174	-
Rango	0.059	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para el Bulevar del Ejército son los mostrados en la Tabla III.30.

Tabla III.30 Resultados del aluminio en Bulevar del Ejército después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Bulevar del Ejército	1.1	0.172	0.185 (promedio)	0.024
Bulevar del Ejército	1.2	0.171		
Bulevar del Ejército	1.3	0.213		
Bulevar del Ejército	2.1	0.127	0.149 (mediana)	0.024
Bulevar del Ejército	2.2	0.176		
Bulevar del Ejército	2.3	0.149		
Bulevar del Ejército	3.1	0.065	0.074 (mediana)	0.025
Bulevar del Ejército	3.2	0.111		
Bulevar del Ejército	3.3	0.074		
Bulevar del Ejército	4.1	0.124	0.174 (mediana)	0.032
Bulevar del Ejército	4.2	0.174		
Bulevar del Ejército	4.3	0.183		

Los resultados de aluminio obtenidos para Comasagua se presentan en la Tabla III.31.

Tabla III.31 Resultados del aluminio en Comasagua antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Comasagua	1.2	0.172	0.123	0.043	34.4
Comasagua	1.3	0.101			
Comasagua	1.4	0.097			
Comasagua	2.1	0.143	0.235	0.08	34.1
Comasagua	2.2	0.292			
Comasagua	2.4	0.270			
Comasagua	3.1	0.292	0.311	0.017	5.4
Comasagua	3.2	0.322			
Comasagua	3.3	0.319			
Comasagua	4.1	0.331	0.440	0.102	23.2
Comasagua	4.2	0.533			
Comasagua	4.3	0.457			

Como puede verse, los coeficientes de variación para tres, seis y doce meses son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.172	0.947
Valor más cercano	0.101	-
Rango	0.075	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.143	0.852
Valor más cercano	0.270	-
Rango	0.149	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.331	0.624
Valor más cercano	0.457	-
Rango	0.202	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para Comasagua son los mostrados en la Tabla III.32.

Tabla III.32 Resultados del aluminio en Comasagua después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Comasagua	1.2	0.172	0.101 (mediana)	0.042
Comasagua	1.3	0.101		
Comasagua	1.4	0.097		
Comasagua	2.2	0.292	0.270 (mediana)	0.080
Comasagua	2.3	0.143		
Comasagua	2.4	0.270		
Comasagua	3.1	0.292	0.311	0.017

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Comasagua	3.2	0.322	(promedio)	
Comasagua	3.3	0.319		
Comasagua	4.1	0.331	0.457 (mediana)	0.102
Comasagua	4.2	0.533		
Comasagua	4.3	0.457		

Los resultados de aluminio obtenidos para Los Planes se presentan en la Tabla III.33.

Tabla III.33 Resultados del aluminio en Los Planes antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Los Planes	1.1	0.502	0.72	0.305	42.3
Los Planes	1.2	1.069			
Los Planes	1.3	0.592			
Los Planes	2.1	0.548	0.626	0.069	11.0
Los Planes	2.2	0.673			
Los Planes	2.3	0.658			
Los Planes	3.1	0.209	0.167	0.036	21.8
Los Planes	3.2	0.145			
Los Planes	3.3	0.145			
Los Planes	4.1	0.232	0.174	0.051	29.3
Los Planes	4.2	0.147			
Los Planes	4.3	0.141			

Como puede verse, los coeficientes de variación para tres, nueve y doce meses son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	1.069	1.000
Valor más cercano	0.592	-
Rango	0.477	

Como el Qexp es mayor que 0.970, se rechaza el dato dudoso

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.209	1.000
Valor más cercano	0.145	-
Rango	0.064	

Como el Qexp es mayor que 0.970, se rechaza el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.232	0.934
Valor más cercano	0.147	-
Rango	0.091	

Como el Qexp es menor que 0.970 se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para Los Planes son los mostrados en la Tabla III.34.

Tabla III.34 Resultados del aluminio en Los Planes después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Los Planes	1.1	0.502	0.547 (promedio)	0.064
Los Planes	1.3	0.592		
Los Planes	2.1	0.548	0.626 (promedio)	0.068
Los Planes	2.2	0.673		
Los Planes	2.3	0.658		
Los Planes	3.2	0.145	0.145 (promedio)	0.000
Los Planes	3.3	0.145		
Los Planes	4.1	0.232	0.147 (mediana)	0.051
Los Planes	4.2	0.147		
Los Planes	4.3	0.141		

Los resultados de aluminio obtenidos para Villanueva se presentan en la Tabla III.35.

Tabla III.35 Resultados del aluminio en Villanueva antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Villanueva	1.1	0.695	0.319	0.326	102.2
Villanueva	1.2	0.123			
Villanueva	1.3	0.139			
Villanueva	2.1	0.062	0.196	0.244	124.4
Villanueva	2.2	0.478			
Villanueva	2.3	0.049			
Villanueva	3.1	0.031	0.028	0.005	18.5
Villanueva	3.2	0.030			
Villanueva	3.3	0.022			
Villanueva	4.1	0.081	0.212	0.115	54.1
Villanueva	4.2	0.292			
Villanueva	4.3	0.265			

Como puede verse, los coeficientes de variación para todos los períodos son superiores a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Tres meses

		Qexp
Valor dudoso	0.695	0.972
Valor más cercano	0.139	-
Rango	0.572	

Como el Qexp es mayor que 0.970, se rechaza el dato dudoso

Seis meses

		Qexp
Valor dudoso	0.478	0.970
Valor más cercano	0.062	-
Rango	0.429	

Como el Qexp es 0.970, por lo que se rechaza el dato dudoso

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.022	0.889
Valor más cercano	0.030	-
Rango	0.009	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.081	1.000
Valor más cercano	0.265	-
Rango	0.184	

Como el Qexp es mayor que 0.970 se rechaza el dato dudoso

Por lo tanto los valores para Villanueva son los mostrados en la Tabla III.36.

Tabla III.36 Resultados del aluminio en Villanueva después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Villanueva	1.2	0.123	0.131 (promedio)	0.011
Villanueva	1.3	0.139		
Villanueva	2.1	0.062	0.056 (promedio)	0.009
Villanueva	2.3	0.049		
Villanueva	3.1	0.031	0.030 (mediana)	0.005
Villanueva	3.2	0.030		
Villanueva	3.3	0.022		
Villanueva	4.2	0.292	0.279 (promedio)	0.019
Villanueva	4.3	0.265		

Los resultados de aluminio obtenidos para Acajutla se presentan en la Tabla III.37.

Tabla III.37 Resultados del aluminio en Acajutla antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
Acajutla	1.1	1.082	1.036	0.050	4.8
Acajutla	1.2	1.043			
Acajutla	1.3	0.983			
Acajutla	2.1	0.633	0.680	0.072	10.6
Acajutla	2.2	0.644			
Acajutla	2.3	0.763			
Acajutla	3.1	0.329	0.403	0.070	17.5
Acajutla	3.2	0.469			
Acajutla	3.3	0.410			
Acajutla	4.2	0.277	0.278	0.017	6.0
Acajutla	4.3	0.261			
Acajutla	1.4	0.295			

Como puede verse, el coeficiente de variación para nueve meses es superior a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Nueve meses

		Qexp
Valor dudoso	0.329	0.579
Valor más cercano	0.410	-
Rango	0.140	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para Acajutla son los mostrados en la Tabla III.38.

Tabla III.38 Resultados del aluminio en Acajutla después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Acajutla	1.1	1.082	1.036 (promedio)	0.050
Acajutla	1.2	1.043		
Acajutla	1.3	0.983		
Acajutla	2.1	0.633	0.680 (promedio)	0.072
Acajutla	2.2	0.644		
Acajutla	2.3	0.763		

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
Acajutla	3.1	0.329	0.410 (mediana)	0.070
Acajutla	3.2	0.469		
Acajutla	3.3	0.410		
Acajutla	4.2	0.277	0.278 (promedio)	0.017
Acajutla	4.3	0.261		
Acajutla	4.4	0.295		

Los resultados de aluminio obtenidos para San Blas se presentan en la Tabla III.39.

Tabla III.39 Resultados del aluminio en San Blas antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coficiente de variación
San Blas	1.2	2.568	2.228	0.296	13.3
San Blas	1.3	2.084			
San Blas	1.4	2.032			
San Blas	2.2	1.230	1.119	0.100	8.9
San Blas	2.3	1.037			
San Blas	2.4	1.091			
San Blas	3.2	0.886	0.891	0.046	5.2
San Blas	3.3	0.848			
San Blas	3.4	0.939			
San Blas	4.1	0.817	0.988	0.149	15.1
San Blas	4.2	1.085			
San Blas	4.3	1.063			

Como puede verse, el coeficiente de variación para doce meses es superior a 15%, por lo que se realizó la prueba de Q.

Doce meses

		Qexp
Valor dudoso	0.817	0.918
Valor más cercano	1.063	-
Rango	0.268	

Como el Qexp es menor que 0.970, se acepta el dato dudoso

Por lo tanto los valores para San Blas son los mostrados en la Tabla III.40.

Tabla III.40 Resultados del aluminio en San Blas después de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar
San Blas	1.2	2.568	2.228	0.296
San Blas	1.3	2.084		
San Blas	1.4	2.032		
San Blas	2.2	1.230	1.119	0.100
San Blas	2.3	1.037		
San Blas	2.4	1.091		
San Blas	3.2	0.886	0.891	0.046
San Blas	3.3	0.848		
San Blas	3.4	0.939		
San Blas	4.2	1.085	1.063 (mediana)	0.149
San Blas	4.3	1.063		
San Blas	4.4	0.817		

Los resultados de aluminio obtenidos para La Puntilla se presentan en la Tabla III.41.

Tabla III.41 Resultados del aluminio en La Puntilla antes de la prueba de Q

Sitio	Réplica	Tasa corrosión (g/m ² .año)	Tasa corrosión promedio (g/m ² .año)	Desviación estándar	Coefficiente de variación
La Puntilla	1.1	0.809	0.798	0.082	10.3
La Puntilla	1.3	0.711			
La Puntilla	1.4	0.874			
La Puntilla	1.2	0.495	0.477	0.028	5.8
La Puntilla	1.3	0.445			
La Puntilla	1.4	0.491			
La Puntilla	1.1	0.339	0.351	0.014	4.0
La Puntilla	1.2	0.347			
La Puntilla	1.3	0.366			
La Puntilla	1.1	0.929	0.877	0.045	5.1
La Puntilla	1.2	0.849			
La Puntilla	1.3	0.854			

Como puede verse, el coeficiente de variación para doce meses es menor a 15% en los cuatro períodos, por lo que no es necesario realizar la prueba de Q y los datos de este sitio son los mostrados en la Tabla III.41.



Anexo IV. Condiciones climatológicas de los sitios de monitoreo

Los datos meteorológicos de las estaciones de Procafé, Ilopango y Acajutla, presentados a continuación, fueron proporcionados por la Unidad de Gestión de Datos e Información del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Estación de Procafé

Los datos presentados en la Tabla IV.1 son el promedio mensual de las mediciones realizadas en la estación de Procafé cada diez minutos desde el 01 de abril de 2014 hasta el 30 de junio de 2015. La lluvia acumulada representa la suma de las mediciones hechas a lo largo de cada mes cada diez minutos durante este mismo período.

Tabla IV.1 Datos de la estación de Procafé

Mes	Temperatura ambiente °C	Humedad relativa %	Lluvia acumulada (mm)	Dirección del viento	Velocidad del viento km/h
abr-14	22.7	75.4	51.0	OSO	0.9
may-14	22.5	85.5	209.0	OSO	0.8
jun-14	22.4	88.2	413.0	ONO	0.9
jul-14	23.5	79.8	174.0	O	1.0
ago-14	22.4	88.3	276.0	O	0.9
sep-14	21.6	93.4	278.0	ONO	0.8
oct-14	21.4	94.6	320.0	O	0.7
nov-14	20.9	88.2	8.0	SSO	0.8
dic-14	20.7	92.7	0.0	SSO	0.7
ene-15	21.0	85.9	0.0	SO	1.2
feb-15	21.2	76.9	0.0	SO	0.9
mar-15	22.4	68.6	8.0	OSO	1.1
abr-15	23.2	84.9	97.0	O	0.9
may-15	23.2	86.9	165.0	O	0.7
jun-15	23.1	76.1	148.0	O	0.9

(MARN-Datos de Estaciones Meteorológicas 2014-2105)

Los datos de temperatura ambiente, humedad relativa y lluvia acumulada son presentados en gráficos de barra en las Figura IV.1, Figura IV.2 y Figura IV.3. Como puede verse los meses con mayor temperatura fueron julio 2014, abril, mayo y junio de 2015; los meses con mayor humedad relativa fueron septiembre, octubre y diciembre de 2014, el mes con menor humedad fue marzo 2015; el mes donde hubo mayor cantidad de lluvia acumulada fue junio de 2014.

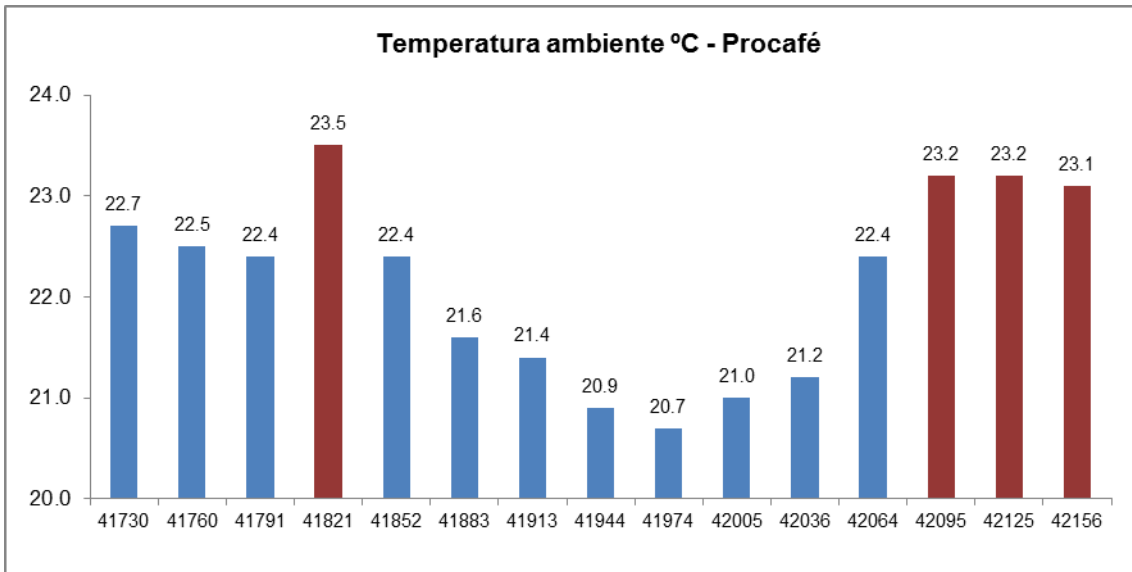


Figura IV.1 Temperatura ambiente medida en Procafé de abril 2014 a junio 2015

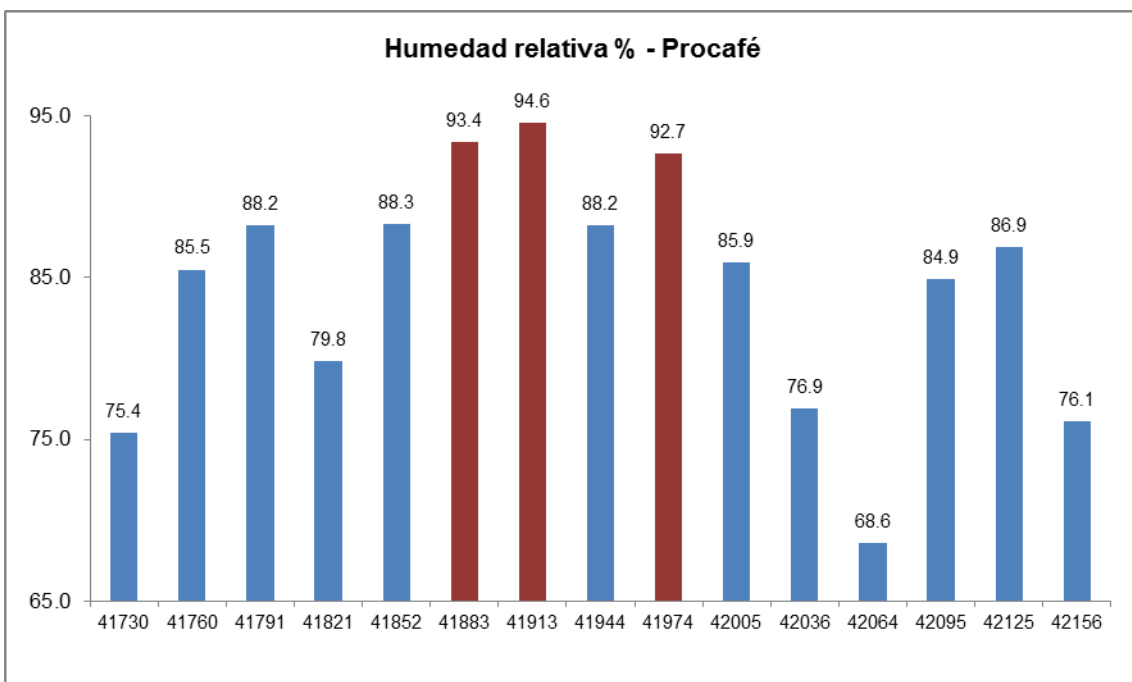


Figura IV.2 Humedad relativa medida en Procafé de abril 2014 a junio 2015

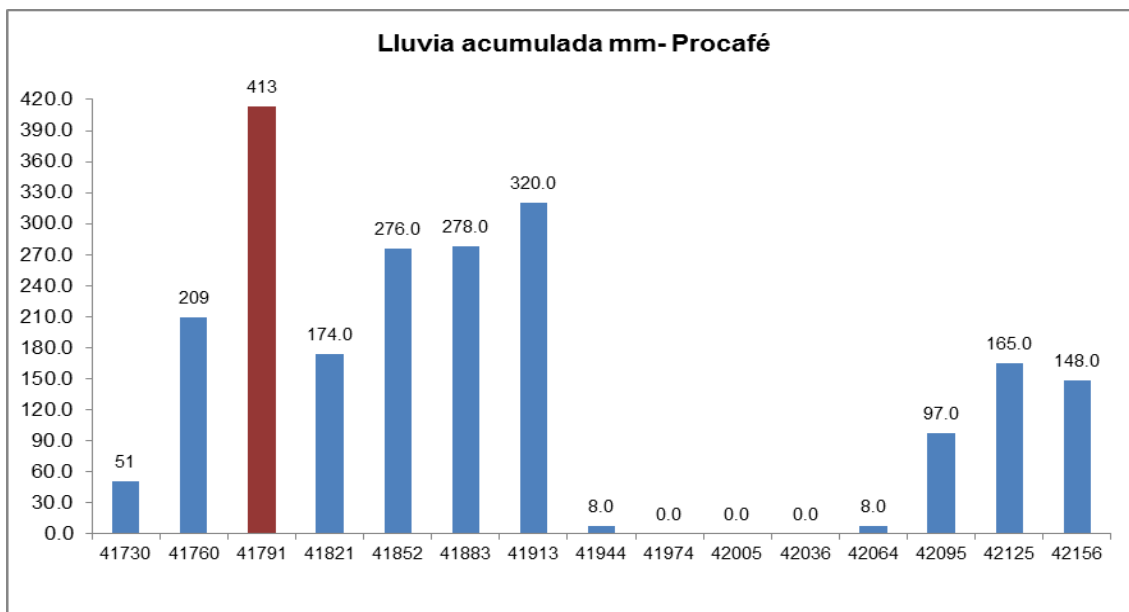


Figura IV.3 Lluvia acumulada medida en Procafé de abril 2014 a junio 2015

Estación de Ilopango

Los datos presentados en la Tabla IV.2 son el promedio mensual de las mediciones realizadas en la estación de Ilopango desde el 01 de abril de 2014 hasta el 31 de mayo de 2015. La lluvia acumulada representa la suma de las mediciones hechas a lo largo de cada mes durante este mismo período.

Tabla IV.2 Datos de la estación de Ilopango

Mes	Temperatura ambiente °C	Humedad relativa %	Lluvia acumulada (mm)	Velocidad del viento km/h
abr-14	25.5	73.0	89.3	1.6
may-14	24.7	81.0	219.5	1.3
jun-14	24.6	85.0	465.1	1.1
jul-14	25.5	77.0	120.6	1.5
ago-14	24.4	82.0	345.2	1.3
sep-14	23.7	86.0	383.4	1.2
oct-14	23.7	85.0	355.6	1.3
nov-14	23.1	75.0	6.3	2.4
dic-14	23.1	71.0	0.2	2.1
ene-15	23.6	66.0	0.0	2.5
feb-15	24.0	66.0	0.1	1.9
mar-15	25.4	65.0	12.6	1.6
abr-15	26.2	71.0	25.2	1.7
may-15	25.8	74.0	172.3	1.6

(MARN-Datos de Estaciones Meteorológicas 2014-2105)

Los datos de temperatura ambiente, humedad relativa y lluvia acumulada son presentados en gráficos de barra en las Figura IV.4, Figura IV.5 y Figura IV.6. Como puede verse el mes con mayor temperatura fue abril de 2015; los meses con mayor humedad relativa fueron junio, septiembre y octubre de 2014, el mes con menor humedad fue febrero 2015; el mes donde hubo mayor cantidad de lluvia acumulada fue junio de 2014.

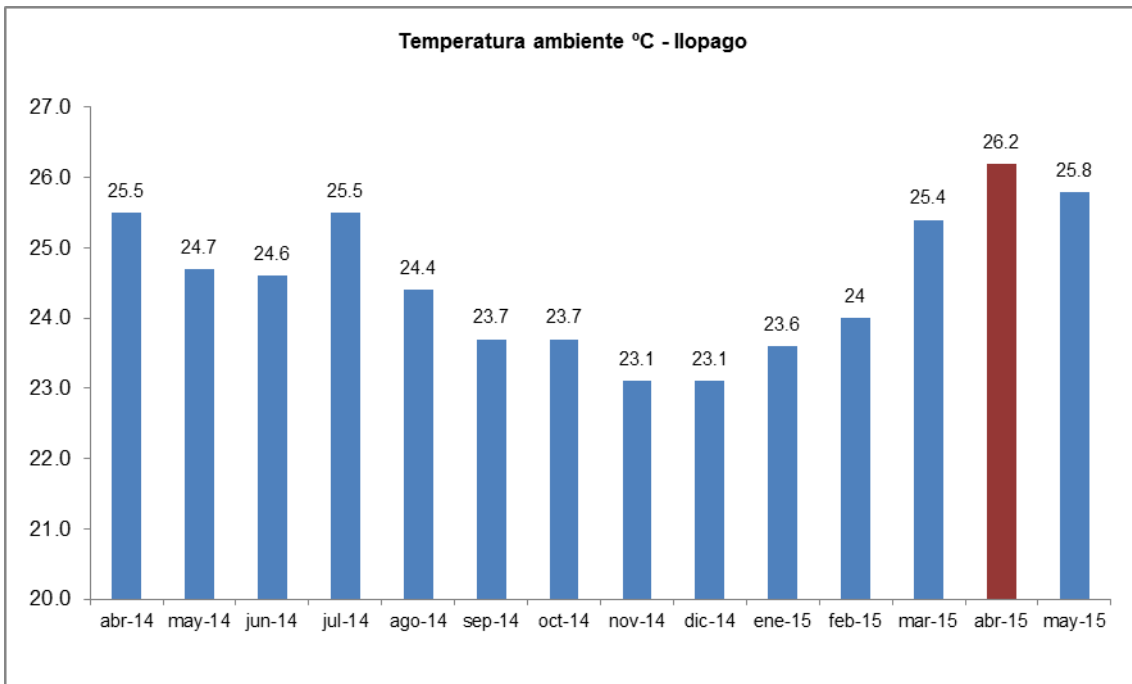


Figura IV.4 Temperatura ambiente medida en Ilopango de abril 2014 a mayo 2015

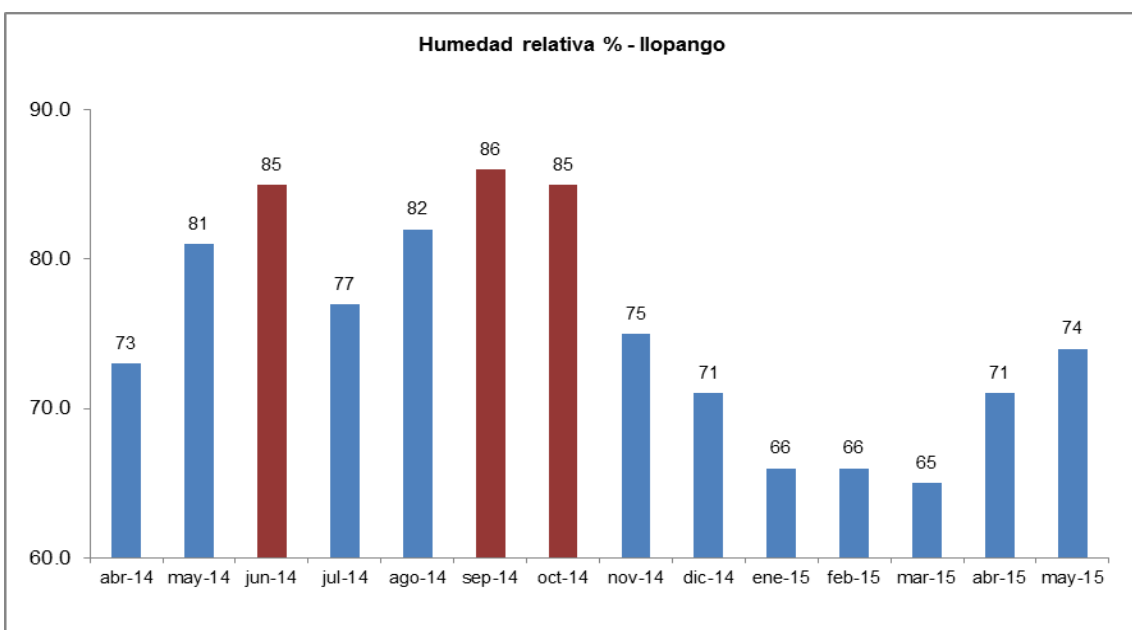


Figura IV.5 Humedad relativa medida en Ilopango de abril 2014 a mayo 2015

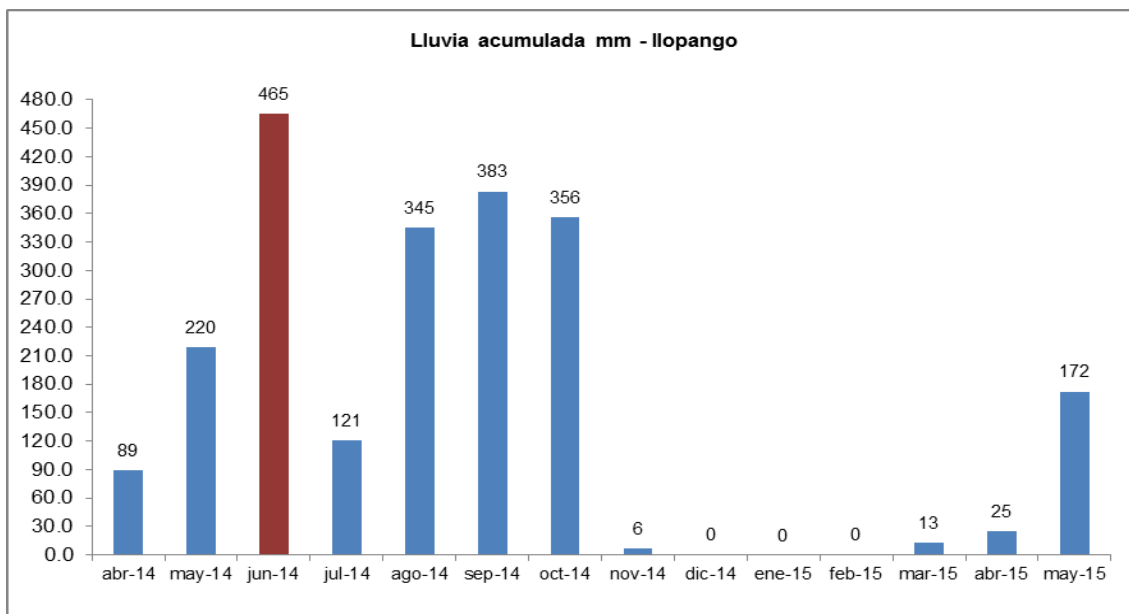


Figura IV.6 Lluvia acumulada medida en Ilopango de abril 2014 a mayo 2015

Estación Acajutla

Los datos presentados en la Tabla IV.3 son el promedio mensual de las mediciones realizadas en la estación de Acajutla desde el 01 de abril de 2014 hasta el 31 de mayo de 2015. La lluvia acumulada representa la suma de las mediciones hechas a lo largo de cada mes durante este mismo período.

Tabla IV.3 Datos de la estación de Acajutla

Mes	Temperatura ambiente °C	Humedad relativa %	Lluvia acumulada (mm)	Velocidad del viento km/h
abr-14	29.5	69.0	1.4	1.9
may-14	29.5	74.0	39.3	2.0
jun-14	29.1	78.0	303.3	1.8
jul-14	30.0	72.0	152.7	1.8
ago-14	29.3	76.0	341.0	2.1
sep-14	28.3	81.0	172.8	2.0
oct-14	27.5	81.0	359.6	2.0
nov-14	28.2	69.0	17.1	1.8
dic-14	27.7	66.0	0.0	1.8
ene-15	27.6	65.0	0.0	2.3
feb-15	28.0	64.0	0.0	2.2
mar-15	29.1	66.0	0.6	2.1
abr-15	29.9	75.0	9.3	2.0
may-15	29.7	75.0	63.7	1.7

(MARN-Datos de Estaciones Meteorológicas 2014-2105)

Los datos de temperatura ambiente, humedad relativa y lluvia acumulada son presentados en gráficos de barra en la Figura IV.7, Figura IV.8 y Figura IV.9. Como puede verse, los meses con mayor temperatura fueron julio de 2014 y abril de 2015; los meses con mayor humedad relativa fueron septiembre y octubre de 2014, el mes con menor humedad fue febrero 2015; el mes donde hubo mayor cantidad de lluvia acumulada fue octubre de 2014.

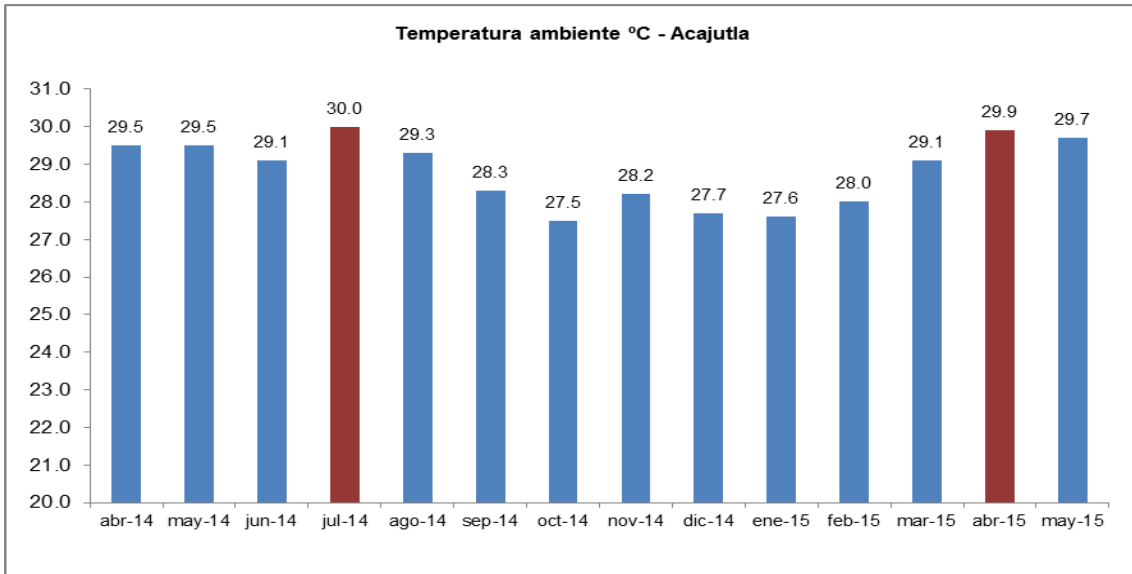


Figura IV.7 Temperatura ambiente medida en Acajutla de abril 2014 a mayo 2015

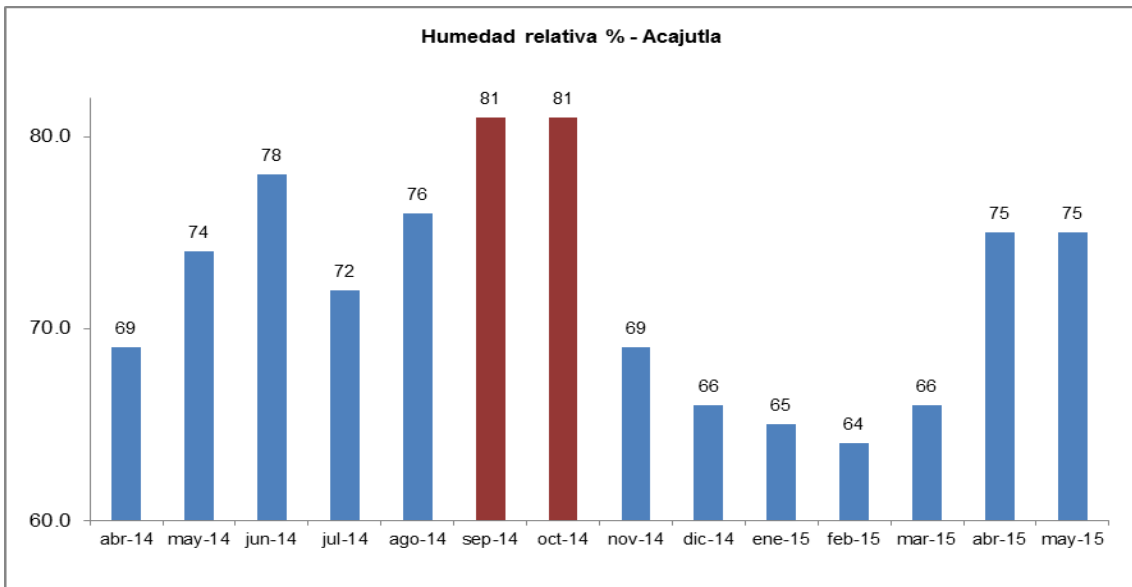


Figura IV.8 Humedad relativa medida en Acajutla de abril 2014 a mayo 2015

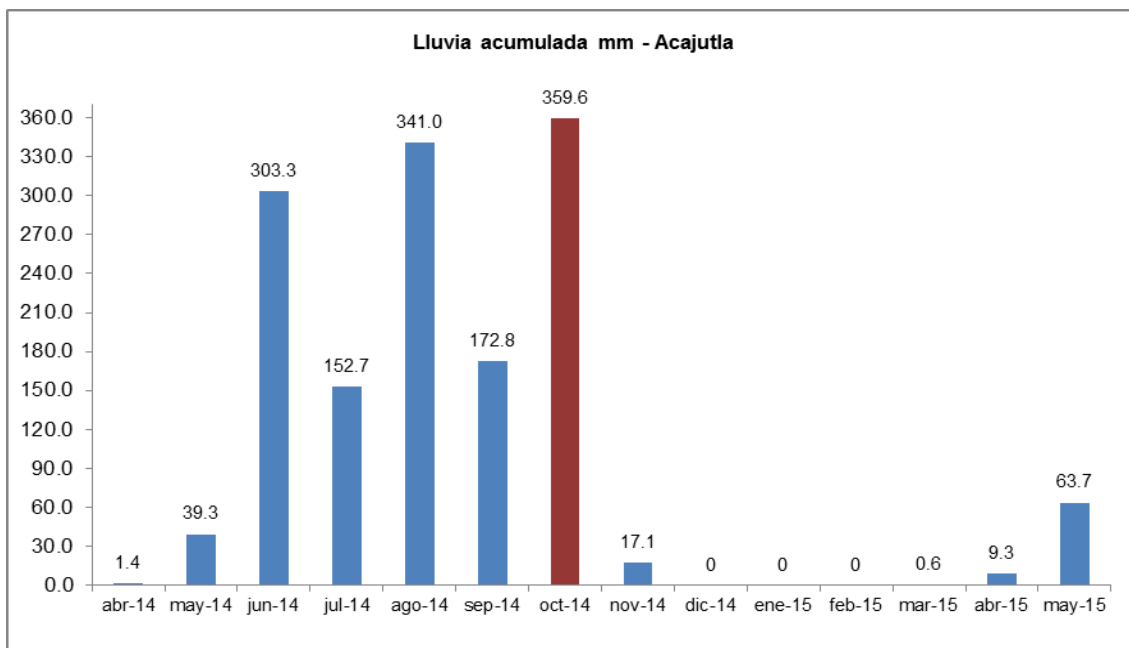


Figura IV.9 Lluvia acumulada medida en Acajutla de abril 2014 a mayo 2015

Estación UCA

Los datos presentados en la Tabla IV.4 son el promedio mensual de las mediciones realizadas en la estación de la UCA desde el 01 de enero de 2014 hasta el 31 de enero de 2015. La lluvia acumulada representa la suma de las mediciones hechas a lo largo de cada mes durante este mismo período.

Tabla IV.4 Datos de la estación UCA

Mes	Temperatura ambiente °C	Humedad relativa %	Lluvia acumulada (mm)	Velocidad del viento km/h
ene-14	22.7	57.3	0.0	3.4
feb-14	23.7	62.2	6.0	2.8
mar-14	24.2	65.7	38.0	3.1
abr-14	24.6	64.3	42.0	3.5
may-14	24.0	74.8	196.0	2.5
jun-14	23.8	78.9	230.0	1.6
jul-14	25.7	64.8	104.0	1.9
ago-14	24.2	73.6	219.0	2.0
sep-14	23.0	81.7	170.0	1.6
oct-14	23.3	82.0	299.0	1.6
nov-14	23.1	62.4	4.0	3.6
dic-14	22.7	59.8	0.0	4.2
ene-15	22.3	56.1	0.0	3.3

(UCA-DCEF 2014)

Los datos de temperatura ambiente, humedad relativa y lluvia acumulada son presentados en gráficos de barra en la Figura IV.10, Figura IV.11 y Figura IV.12. Como puede verse, de los meses de los que se tiene datos, el mes con mayor temperatura fue julio de 2014; los meses con mayor humedad relativa fueron septiembre y octubre de 2014, el mes con menor humedad fue enero 2015; el mes donde hubo mayor cantidad de lluvia acumulada fue octubre de 2014.

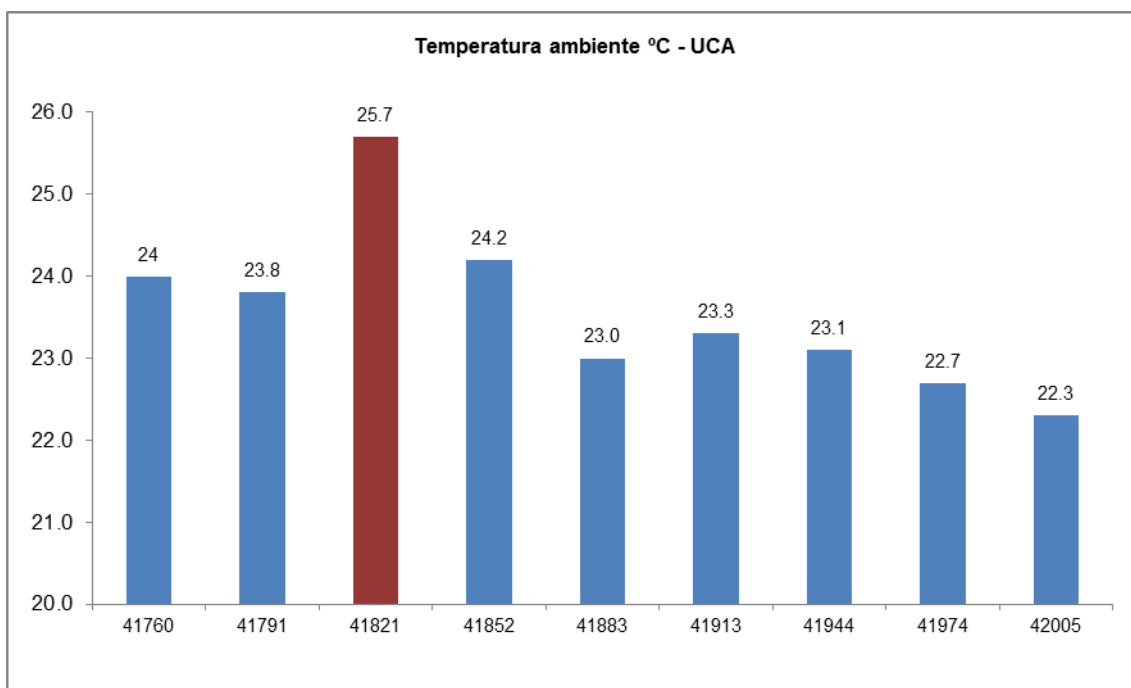


Figura IV.10 Temperatura ambiente medida en la UCA de mayo 2014 a enero 2015

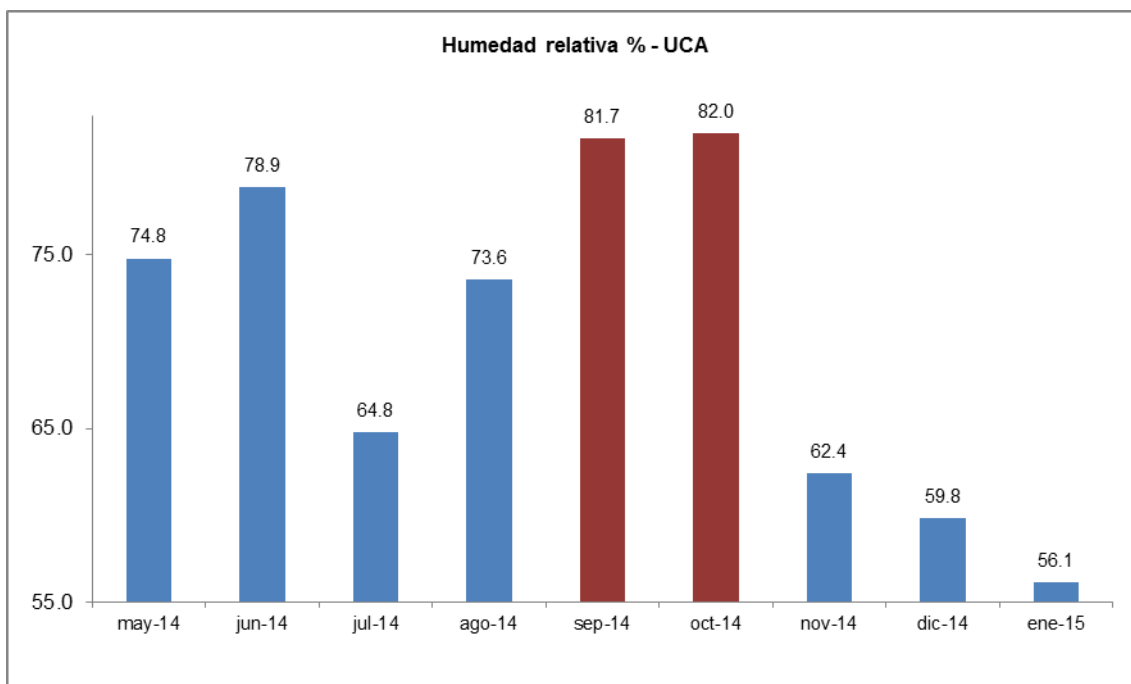


Figura IV.11 Humedad relativa medida en la UCA de mayo 2014 a enero 2015

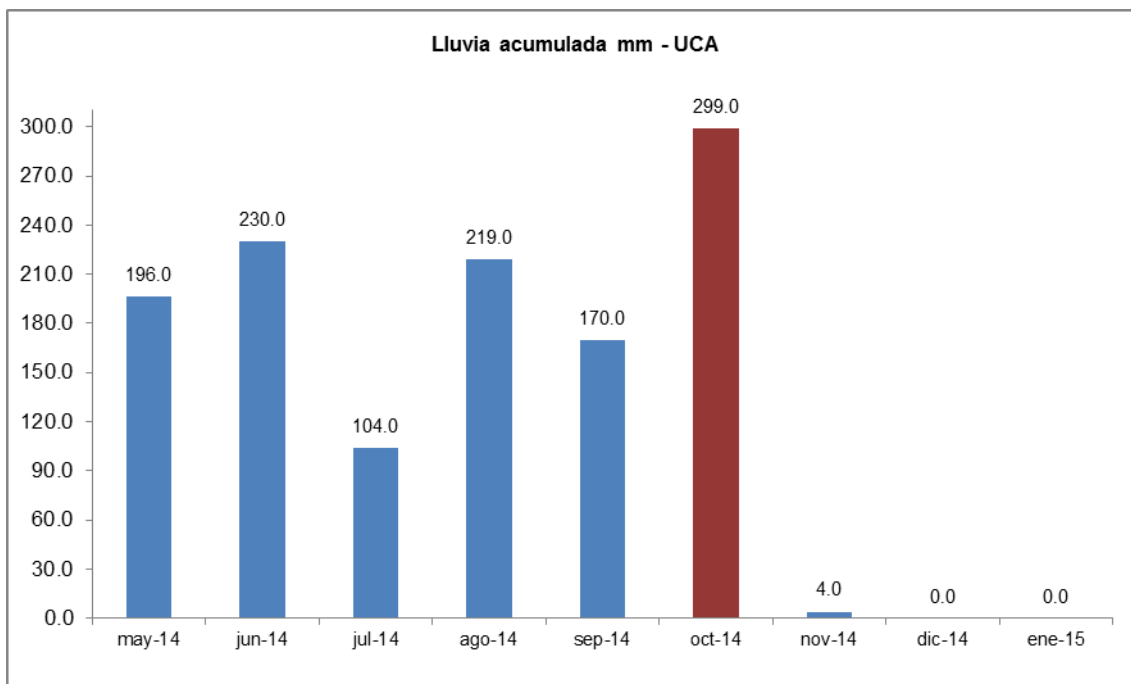


Figura IV.12 Lluvia acumulada medida en la UCA de mayo 2014 a enero 2015

Caracterización de los sitios de monitoreo de acuerdo a condiciones climatológicas y composición de la atmósfera

Como se mencionó en la sección 1.2, las condiciones climatológicas y la composición de la atmósfera influyen en la corrosión, por lo que para realizar el análisis de resultados se ha considerado diferentes elementos que forman parte de estos dos factores con el fin de correlacionar cada uno de ellos con la respectiva tasa de corrosión. Se usa los datos del acero al carbono, ya que estos presentan una tendencia clara y son los esperados de acuerdo a las condiciones de cada sitio de monitoreo.

Condiciones climatológicas

Las condiciones climatológicas que tienen influencia sobre la velocidad de corrosión son: Temperatura ambiente, humedad relativa, régimen de lluvias, velocidad y dirección del viento. Los datos estos parámetros en cada sitio fueron obtenidos de la estación meteorológica más cercana o de los datos históricos presentados en la sección 4.1.

La temperatura promedio registrada en cada sitio durante los doce meses que duró el monitoreo se presenta en la Tabla IV.5. Para Comasagua, Los Planes, San Blas y La

Puntilla, la temperatura que se tendrá en cuenta es la que corresponde a la altura del sitio.

Tabla IV.5 Valores de temperatura para cada sitio de monitoreo

Sitio de monitoreo	Meses de monitoreo	Estación meteorológica	Altura msnm	Temperatura (°C)
Santa Tecla	Junio 2014-junio 2015	Procafé	945	22.1
UCA	Mayo 2014 – mayo 2015	UCA	780	23.8
UTEC	Mayo 2014 – mayo 2015	UCA	691	23.8
San Marcos	Junio 2014-junio 2015	UCA	695	23.8
UDB	Abril 2014-abril 2015	Ilopango	656	24.4
Soyapango	Mayo 2014 – mayo 2015	Ilopango	622	24.4
Bulevar del Ejército	Abril 2014-abril 2015	Ilopango	628	24.4
Comasagua	Abril 2014-abril 2015	Procafé	1230	20.0*
Los Planes	Abril 2014-abril 2015	Ilopango	1090	20.0*
Villanueva	Abril 2014-abril 2015	Procafé	577	22.1
Acajutla	Abril 2014-abril 2015	Acajutla	24	28.7
San Blas	Mayo 2014 – mayo 2015	Procafé	2	27.0*
La Puntilla	Mayo 2014 – mayo 2015	-	4	27.0*

*Temperatura en base a la altura.

En la Tabla IV.6 se muestra los datos de humedad relativa promedio y la lluvia acumulada durante el año de exposición en cada sitio de monitoreo. Debido a que para La Puntilla no se tiene datos meteorológicos, se tendrá en cuenta los datos históricos presentados en el capítulo 4.

Tabla IV.6 Valores de humedad relativa y lluvia acumulada para cada sitio de monitoreo

Sitio de monitoreo	Estación meteorológica	Meses de monitoreo	Humedad relativa (%) promedio	Lluvia acumulada (mm) durante el año
Santa Tecla	Procafé	Junio 2014-junio 2015	85.0	1886.8
UCA	UCA	Mayo 2014 – mayo 2015	68.0	1307.0
UTEC	UCA	Mayo 2014 – mayo 2015	68.0	1307.0

Sitio de monitoreo	Estación meteorológica	Meses de monitoreo	Humedad relativa (%) promedio	Lluvia acumulada (mm) durante el año
San Marcos	UCA	Junio 2014-junio 2015	68.0	1307.0
UDB	Ilopango	Abril 2014-abril 2015	75.6	2023.1
Soyapango	Ilopango	Mayo 2014 – mayo 2015	75.7	2106.1
Bulevar del Ejército	Ilopango	Abril 2014-abril 2015	75.6	2023.1
Comasagua	Procafé	Abril 2014-abril 2015	84.8	1833.4
Los Planes	Ilopango	Abril 2014-abril 2015	75.6	2023.1
Villanueva	Procafé	Abril 2014-abril 2015	84.8	1833.4
Acajutla	Acajutla	Abril 2014-abril 2015	72.0	1397.1
San Blas	Procafé	Mayo 2014 – mayo 2015	84.9	1947.4
La Puntilla	-	Mayo 2014 – mayo 2015	74.9*	1850**

* Humedad en base a la información presentada en la Figura 4.6

** Lluvia acumulada en base a los datos históricos presentados en la sección 4.1.1

Los valores de velocidad del viento registradas para el período de monitoreo en cada sitio son mostrados en la Tabla IV.7.

Tabla IV.7 Valores de velocidad del viento en cada sitio de monitoreo

Sitio de monitoreo	Estación meteorológica	Meses de monitoreo	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento
Santa Tecla	Procafé	Junio 2014-junio 2015	0.88	O / OSO
UCA	UCA	Mayo 2014 – mayo 2015	2.69	-
UTEC	UCA	Mayo 2014 – mayo 2015	2.69	-
San Marcos	UCA	Junio 2014-junio 2015	2.69	
UDB	Ilopango	Abril 2014-abril 2015	1.65	-
Soyapango	Ilopango	Mayo 2014 – mayo 2015	1.65	-
Bulevar del Ejército	Ilopango	Abril 2014-abril 2015	1.65	-
Comasagua	Procafé	Abril 2014-abril 2015	0.89	O / OSO
Los Planes	Ilopango	Abril 2014-abril 2015	1.65	-
Villanueva	Procafé	Abril 2014-abril 2015	0.89	O / OSO

Sitio de monitoreo	Estación meteorológica	Meses de monitoreo	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del viento
Acajutla	Acajutla	Abril 2014-abril 2015	1.98	-
San Blas	Procafé	Mayo 2014 – mayo 2015	0.88	O / OSO
La Puntilla	-	Mayo 2014 – mayo 2015	-	-

Composición y tipos de atmósfera

Contaminación atmosférica

Como se mencionó en la sección 4.2, el monitoreo de contaminantes llevado a cabo en El Salvador se reduce a dos estaciones ubicadas en San Salvador Centro (Centro de Gobierno) y San Salvador Este (Universidad Don Bosco), las cuales monitorean partículas menores a 2.5 micras, parámetro que permite definir la calidad del aire en el AMSS.

El flujo vehicular puede ser un indicador de la contaminación atmosférica, debido a las emisiones provenientes de las fuentes móviles. Se cuenta con datos de flujo vehicular (VMT 2010) de diez de las carreteras más transitadas del AMSS. De los sitios de monitoreo, sólo la UCA está ubicada sobre una de las mencionadas carreteras (Bulevar Los Próceres). Para Santa Tecla, la UTEC, Soyapango y Bulevar del Ejército se tiene datos de calles cercanas al sitio. Los mencionados datos son mostrados en la Tabla IV.8.

Tabla IV.8 Sitios de monitoreo con datos de flujo vehicular

Sitio de monitoreo	Flujo vehicular vehículos/día	Clasificación del flujo vehicular
Santa Tecla	26610	Mediano
UCA	71988	Muy alto
UTEC	41470	Alto
San Marcos	sd	-
UDB	sd	-
Soyapango	42102	Alto
Bulevar del Ejército	42102	Alto
Comasagua	sd	-
Los Planes	sd	-

Sitio de monitoreo	Flujo vehicular vehículos/día	Clasificación del flujo vehicular
Villanueva	sd	-
Acajutla	sd	-
San Blas	sd	-
La Puntilla	sd	-

sd: sin datos

Salinidad (cloruros)

Los cloruros presentes en las nieblas salinas tienen gran influencia en la corrosión. Como no se tienen datos de la tasa de deposición de cloruros, se tendrá en cuenta la distancia a la costa a la cual se ubicó el rack de monitoreo, ya que a mayor distancia menor salinidad. Las respectivas distancias a la costa de cada sitio se muestran en la Tabla IV.9.

Tabla IV.9 Distancia a la costa de cada sitio de monitoreo

Sitio	Distancia a la costa (km)*
Santa Tecla	23.100
UCA	24.700
UTEC	27.500
San Marcos	23.300
UDB	29.850
Soyapango	28.690
Bulevar del Ejército	29.960
Comasagua	18.500
Los Planes	21.600
Villanueva	11.500
Acajutla	1.000
San Blas	0.035
La Puntilla	0.170

*Se midió la menor distancia en (Google Earth 2015)

Cobertura vegetal

Como se mencionó en la sección 1.2.2, la cobertura vegetal tiene la capacidad de capturar diferentes sustancias de la atmósfera, por lo que puede hacer disminuir la tasa de corrosión. El tipo de cobertura vegetal en cada sitio se muestra en la Tabla IV.10.

Tabla IV.10 Tipo de cobertura vegetal en cada sitio

Sitio de monitoreo	Tipo de cobertura vegetal
Santa Tecla	Vegetación arbustiva
UCA	Vegetación arbustiva
UTEC	Poca o ninguna vegetación
San Marcos	Vegetación arbustiva
UDB	Vegetación arbórea
Soyapango	Poca o ninguna vegetación
Bulevar del Ejército	Vegetación arbustiva
Comasagua	Vegetación arbórea
Los Planes	Vegetación arbórea
Villanueva	Vegetación arbustiva
Acajutla	Poca o ninguna vegetación
San Blas	Poca o ninguna vegetación
La Puntilla	Vegetación arbórea