



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

“Determinación del grado de corrosividad, en materiales de equipo electrónico, por efectos ambientales”

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES**

P R E S E N T A:

ING. FRANCISCO SÁNCHEZ PÉREZ

TUTOR:

**DR. ARMANDO ORTIZ PRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM**

COMITÉ TUTOR:

**DR. ARTURO BRABA PINGARRON
FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DR. RICARDO VERA GRAZIANO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES**

México, D.F. SEPTIEMBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Determinación del grado de
corrosividad, en materiales de
equipo electrónico, por efectos
ambientales**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERIA DE
MATERIALES**

P R E S E N T A:

FRANCISCO SÁNCHEZ PÉREZ

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ARMANDO ORTIZ PRADO**

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN EQUIPO ELECTRÓNICO

1.1	Generalidades.....	1
1.1.1	Etapas de la corrosión atmosférica	2
1.2	Efecto de los Gases Atmosféricos en materiales de Equipo Electrónico	4
1.3	Efecto de las Partículas	6
1.4	Corrosión Atmosférica en Interiores	7
1.5	Efectos de la Corrosión Atmosférica en el cobre y componentes electrónicos.....	9
1.6	Problemática.....	13

CAPÍTULO 2

CONDICIONES DE OPERACIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO EN LA REPÚBLICA MEXICANA

2.1	Generalidades.....	15
2.2	Climatología de la República Mexicana	19
2.2.1	Características de la República Mexicana por Regiones.....	21
2.3	Definición de atmósferas en estudio en equipo electrónico.....	23
2.4	Problemática en la República Mexicana	24

CAPÍTULO 3

EQUIPO ELECTRÓNICO: DETERIORO EN ESPECÍMENES DE CAMPO Y ENSAYOS ACELERADOS

3.1	Antecedentes.....	28
3.2	Variables principales del deterioro por Corrosión Atmosférica	29
3.3	Metodología de diagnostico en Equipo Electrónico	30
3.4	Equipo Electrónico en condiciones normales de operación (Especímenes de campo).....	32
	3.4.1 Inspección en MEB.....	34
3.5	Pruebas de Laboratorio, Simulación acelerada por corrosión	36
	3.5.1 Parámetros de ensayo acelerado	37
	3.5.2 Determinación de los gases inyectados en ensayos acelerados	39
	3.5.3 Resultados de especímenes sometidos a ensayos acelerados.....	41

CAPÍTULO 4

MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA

4.1	Generalidades.....	46
4.2	Características generales de las regiones en estudio.....	48
4.3	Determinación del grado de corrosioivdad de acuerdo al tipo de atmósfera existente	53
	4.3.1 Asignación de los niveles de deterioro en equipo electrónico.....	58
	4.3.2 Asignación del nivel de corrosividad de acuerdo a resultados de inspección en especímenes de campo y pruebas de laboratorio.....	59

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

5.1	Conclusiones.....	65
------------	--------------------------	-----------

REFERENCIAS	68
--------------------------	-----------

ANEXO.....	73
-------------------	-----------

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Armando Ortiz Prado, por sus conocimientos, experiencia y gran aportación a este trabajo, por la confianza, el apoyo brindado y sobre todo paciencia que me ha tenido durante este tiempo.

A la DGAPA de la UNAM por los fondos proporcionados al proyecto “Mapa de Corrosividad Atmosférica en Equipo Electrónico”

A mi familia por el apoyo, la confianza, amistad y todo aquello que se puede encontrar en ellos, especialmente en mi Madre Ma. Guadalupe Pérez Álvarez y Madrina Diana Alicia Estrada Rodríguez †.

Al Biol. Germán Álvarez Lozano, por su apoyo brindado en la obtención de imágenes mediante microscopía electrónica de barrido.

A quienes integran la UDIATEM: Dr. Víctor Hugo Jacobo, Dr. Lázaro Morales Acosta, M.C Juan Armando Ortiz Valera, Ing. Jorge Luís Romero Hernández, M.I Ignacio Cueva Güitron, M.I Efraín Ramos Trejo, Ing. Roberto Cisneros Hernández, M.C. Edgar Isaac Ramírez Díaz, M.I Adrián Esteban Ortiz Valera, M.C Osvaldo Ruíz Cervantes, así como a los prestadores de servicio social César, Luis, Ángel, Juan José, Daniel Octavio, Yadin, Oso.

A quienes han compartido grandes anécdotas, Ing. Martín Reyes Farías, José Luis Almaráz Moreno, Ing. Israel Garduño García, Ing. Alejandra Garza, M.I. Abraham Muñoz Barrera, Ing. Álvaro Contreras García, Ing. César Billy Gutiérrez Santacruz, M.I. Abraham Barajas Ocaña ya todas aquellas personas que han formado parte de mi vida en esta etapa.

A la Universidad Nacional Autónoma de México – Instituto de Investigaciones en Materiales.

Ing. Francisco Sánchez Pérez.

INTRODUCCIÓN

A través del tiempo los materiales se han empleado en diversas actividades con la finalidad de satisfacer las diversas necesidades de una sociedad que día a día va evolucionando a pasos agigantados. Con lo anterior ha surgido la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías que involucran el uso de los materiales de acuerdo a sus propiedades físicas, ópticas, mecánicas, magnéticas y eléctrico-electrónicas. La importancia del estudio de los materiales, en especial de índole electrónica, es el amplio uso e interacción que el ser humano tiene al desarrollar sus actividades, siendo una herramienta esencial en los medios de comunicación ya sea en oficinas, educación e incluso en el hogar, que si bien dan cierto confort de vida cada vez se vuelven más indispensables, lo cual genera una problemática al tener fallas en el funcionamiento de este tipo de dispositivos considerando la posible pérdida de información almacenada.

Es aquí donde surge la problemática y el interés por el estudio de los materiales que conforman todos aquellos dispositivos de índole electrónica. La presente investigación se realizó evaluando dispositivos que van desde nivel macro hasta componentes micro que son justamente los encargados del funcionamiento del dispositivo electrónico, realizando un muestreo en diferentes regiones de la República Mexicana con la finalidad de tener elementos representativos del comportamiento de este tipo de especímenes ante diferentes atmósferas considerando las actividades principales de cada región.

Para lograr la correlación entre el deterioro sufrido por efectos ambientales en equipo electrónico y el efecto en su funcionamiento, se realizaron ensayos de corrosión aceleradas, exponiendo tarjetas electrónicas y sistemas de almacenamiento magnético de datos (muestras de laboratorio), a diferentes condiciones ambientales dentro de una cámara atmosférica de ensayos acelerados, comparando los resultados obtenidos con los de especímenes evaluados bajo condiciones normales de operación (muestras de campo).

Con lo anterior el **objetivo** fundamental es la determinación del deterioro sufrido en los ya citados sistemas por efectos ambientales, apoyándose en el desarrollo de un Mapa de Corrosividad Atmosférica, considerando los diversos ambientes que comprende la República Mexicana, así como en los resultados de ensayos en “muestras de laboratorio”, identificando aquellas regiones que son más agresivas mediante la propuesta de un Índice de Deterioro por Corrosión Atmosférica (*IDECA*),

generado por estándares internacionales y ensayos realizados dentro de los laboratorios de la UDIATEM a dispositivos de las regiones más significativas que por su clasificación atmosférica son propicias para que se presenten fenómenos corrosivos.

A la fecha no se cuenta con un mapa de corrosividad atmosférica en materiales de equipo electrónico en la República Mexicana por lo que toma mayor relevancia este estudio, si bien es cierto falta por analizar regiones peculiares de la República Mexicana, con el presente trabajo se da la pauta para el estudio de la hermeticidad como sistema y el diseño de los dispositivos (distribución) para reducir en gran medida el fenómeno de la corrosión atmosférica.

Para la conformación de este estudio, se han realizado diversos artículos publicados en memorias de congreso a nivel Nacional e Internacional así como Revista Ingeniería Investigación y Tecnología, los cuales se enuncian en el Anexo I.

CAPÍTULO 1

CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN EQUIPO ELECTRÓNICO

Objetivo.- Conocer los principales elementos que propician el fenómeno de la corrosión atmosférica en equipo electrónico, efecto e interacción entre ellos.

1.1 GENERALIDADES

Actualmente los dispositivos electrónicos se involucran en gran medida en las actividades del ser humano, desde los medios de transporte hasta dispositivos móviles de comunicación, donde estos últimos son una herramienta importante en cuestiones laborales donde se almacenan grandes cantidades de información, siendo esto un factor importante en el desarrollo de nuevos diseños donde la mayor parte de los dispositivos y por ende sus componentes tienden a la miniaturización. Reduciendo los espacios entre éstos al instalarse en las tarjetas impresas, es más factible que se presenten problemas de continuidad, cúmulo de polvo, así como acumulación de condensado producto de los ciclos de temperatura en presencia de la humedad relativa acorde al medio donde se localizan, propiciando en conjunto un fallo prematuro de los dispositivos electrónicos.

Se pueden mencionar diversos factores que afectan el funcionamiento de un dispositivo electrónico, sin embargo el estudio de la corrosión atmosférica en equipo electrónico toma importancia específicamente en atmósferas que por sus características son propicias para que el efecto corrosivo se presente de forma acelerada. Ante estas circunstancias surge la necesidad de realizar estudios para evaluar y determinar el grado de corrosividad, considerando como elementos de estudio todos aquellos que componen un “dispositivo” y por ende los materiales que son susceptibles a sufrir daños por corrosión, tal es el caso de los diversos metales y aleaciones utilizados como conductores, contactos o como componentes de soporte.

Para que el deterioro por corrosión atmosférica se presente debe existir la interacción entre altos porcentajes de humedad relativa, gases contaminantes, cloruros, agentes orgánicos volátiles, ozono y la luz ultravioleta; estos últimos actuando como catalizadores, todo esto conjugado con la presencia de partículas y gases contaminantes; estos factores varían de acuerdo a la ubicación geográfica y actividad industrial característica de la zona donde se encuentren los dispositivos electrónicos.

En términos de la corrosión atmosférica (CA) su estudio formal da inicio con el trabajo de W.J.H.Vernon (*A laboratory study of the atmospheric corrosion of metals*, Trans. Faraday Soc, 1931). En la década de los 1960's se reconoció el efecto de la corrosión atmosférica en equipo electrónico, debido a los inconvenientes observados en la aeronáutica en Estados Unidos, esto debido a que no se consideraron los efectos ambientales durante el diseño de partes, de acuerdo a los informes presentados de los análisis de falla realizados a estos componentes.

Para el estudio de la corrosión atmosférica sobre equipo electrónico se deben considerar las condiciones ambientales de las regiones donde se encuentran operando, es por ello que se tiene una primera clasificación de las atmósferas de exposición como "exposición natural" y "exposición artificial" (sistemas de aire acondicionado), ya que en muchos de los casos los dispositivos no están en contacto directo con las variables ambientales, es decir, expuestos al intemperie, lo cual dará la pauta para definir los efectos que se presentan en equipo electrónico así como definir las previsiones para aminorar dicho fenómeno.

1.1.1 Etapas de la corrosión atmosférica

En la Figura 1.1 se relaciona el tiempo con los fenómenos de deterioro por efectos atmosféricos. La primera etapa de la interacción entre la superficie de un componente electrónico y la atmósfera es la reacción instantánea del agua (condensado) con el metal, en este caso el enlace se puede dar en forma molecular (a través del átomo de oxígeno al metal o algún otro constituyente superficial de carga positiva). La fuerza dominante para la disociación del agua es la formación de enlaces metal – oxígeno o metal-oxidrilo.

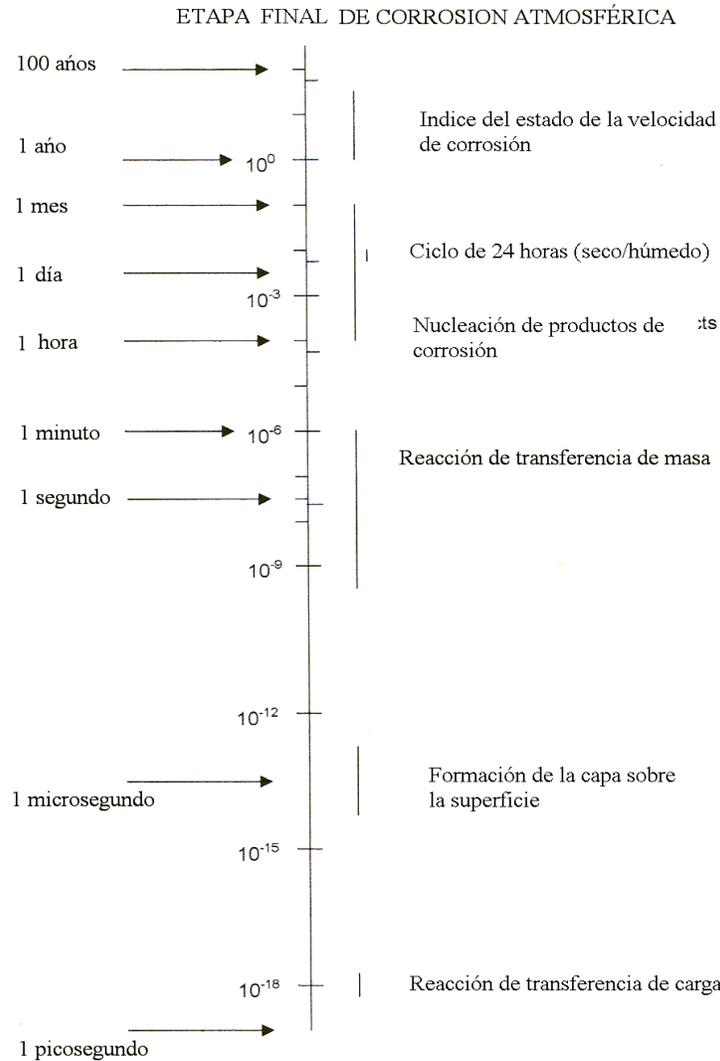


Figura 1.1 Ordenes de magnitud de los periodos requeridos para el desarrollo de los fenómenos característicos de la corrosión atmosférica [Leygraf, 2000].

Dentro de los mecanismos que propician el fenómeno de la corrosión, la película de condensado formada sobre la superficie metálica de los componentes electrónicos está sujeta a ciclos de menor variación de temperatura y de humedad, traducido en ciclos de depósito- evaporación menos notorios y drásticos, pero suficientes para que se presente el fenómeno corrosivo [Ortiz, 2004]. En el caso de dispositivos electrónicos los rangos de deterioro [velocidad de la corrosión] que son despreciables en elementos estructurales, serán altamente significativos en equipo electrónico. Es por esto la necesidad de evaluaciones más detalladas y específicas para poder determinar aquellas condiciones de exposición aceptables para el equipo eléctrico-electrónico.

Cuando los productos de corrosión ya no varían en el tiempo esto significa que las velocidades de disolución y reformación están en equilibrio, entonces éstos alcanzan un espesor constante. El tiempo requerido para lograr un estado estable de corrosión puede tomar varios años o hasta décadas. Esta transformación gradual coincide con la presencia de los productos de corrosión formados luego de una exposición atmosférica muy prolongada sobre superficies electrónicas o bien ante la exposición de atmosferas consideradas como agresivas por sus altos promedios anuales de humedad y temperatura.

Para poder evaluar y determinar el grado de deterioro sufrido en equipo electrónico por efectos ambientales, se buscan herramientas y metodologías que permitan de alguna forma predecir y detectar cuál o cuáles son los principales factores que conllevan a la presencia del fenómeno de la corrosión, aun cuando persiste la complejidad de modelar el fenómeno corrosivo que permita describir sus efectos considerando los fenómenos e interacciones que se dan durante su presencia (debido a la atmósfera, proceso electroquímico), teniendo únicamente resultados de forma experimental.

1.2 EFECTO DE LOS GASES ATMOSFÉRICOS EN MATERIALES DE EQUIPO ELECTRÓNICO

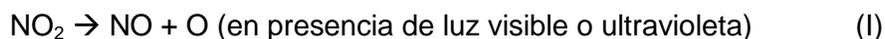
La corrosión, el cambio climático y la calidad del aire han contribuido al rápido desarrollo de la química atmosférica. Actualmente más de 2000 especies químicas han sido identificadas como gases atmosféricos o como constituyentes de partículas. La fotoquímica es importante para entender la gran cantidad de reacciones en los procesos atmosféricos.

Afortunadamente desde el punto de vista de la corrosión atmosférica sólo pocos constituyentes han sido identificados como corrosivos. Un constituyente no necesariamente es corrosivo para todos los materiales, del mismo modo un material particular no necesariamente es susceptible a todos los constituyentes. En términos generales se han identificado ocho especies corrosivas, de mayor influencia (CO_2 , O_3 , NH_3 , NO_2 , H_2S , SO_2 , HCl , ácidos orgánicos).

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las especies involucradas en el deterioro de los materiales expuestos ante condiciones atmosféricas, cabe mencionar que algunas de ellas se presentan en mayor proporción de acuerdo a la región que se tenga en estudio.

a) Ozono

Es uno de los iniciadores de las transformaciones gaseosas junto con el radical hidroxilo. El ozono es un producto de la fotoquímica atmosférica, su fuente dominante es la fotólisis del dióxido de nitrógeno:

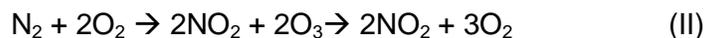


El ozono es asimismo muy reactivo a la radiación ultravioleta, de tal forma que puede dar lugar a un átomo de oxígeno que al combinarse con una molécula de agua forma radicales hidroxilo, siendo una de las dos especies químicas más oxidantes en la atmósfera, teniendo en cuenta que pequeñas cantidades de O_3 pueden disolverse en gotas o capas de agua, generando condensado en la superficie de los componentes de equipo electrónico.

Estudios experimentales han demostrado que en presencia de SO_2 actúa como un acelerador de la corrosión en el **cobre**, siendo este uno de los principales elementos que constan los componentes de los dispositivos electrónicos.

b) Óxidos de Nitrógeno

Se han desarrollado un amplio número de trabajos de investigación relacionados al efecto de los óxidos de nitrógeno en la corrosión atmosférica, sobre todo de acero, **cobre** y zinc. Su fuente principal la representan los procesos de combustión a elevadas temperaturas, durante los cuales el NO_x es formado, siendo rápidamente oxidado en presencia de O_3 .



Dado que las fuentes principales del NO_2 son las mismas que para el CO_2 (combustión), su distribución geográfica es coincidente, encontrándose las mayores concentraciones en las áreas altamente industrializadas (Sureste Asiático, Europa y Norteamérica). En estas áreas urbanas la concentración de NO_2 puede alcanzar los 300ppb durante periodos de smog fotoquímico intenso. El dióxido de nitrógeno es prácticamente insoluble en el agua, por lo que no es precipitado a través de gotas, rocío o películas de agua que se formen en las superficies, el único sumidero lo representa la reacción con el radical OH para formar ácido nítrico. Para el caso de la República Mexicana la zona industrial en donde se presume se encuentran en mayor proporción este tipo de gases es justamente en regiones de la franja fronteriza y en el caso específico de Monterrey, N.L.



Desde el punto de vista del deterioro de equipo electrónico es conveniente hacer acelerar la corrosión del **cobre, plata y en menor proporción al oro**.

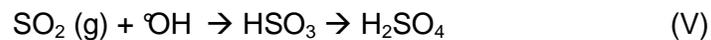
c) Óxidos de Azufre

Se trata de los gases más importantes para la corrosión atmosférica (se generan durante la combustión y en la refinación de piritas). Su control es factible desde el punto de vista tecnológico por lo que se han limitado sus emisiones sobre todo en países altamente industrializados; por otra parte, su concentración se ha venido incrementando en regiones de rápida industrialización con nulos o reducidos controles en las emisiones (economías emergentes o países en vías de desarrollo). Su concentración varía sensiblemente de región a región y aún dentro de una misma zona urbana.

El dióxido de azufre es moderadamente soluble en agua, de acuerdo a:



De manera similar cuando se deposita en una superficie reacciona con el radical OH (en fase gaseosa), formando así H₂SO₄:



Cabe mencionar que el ácido sulfúrico se disuelve en el agua en donde se disocia en forma iónica.

1.3 EFECTO DE LAS PARTÍCULAS

La dinámica, composición y comportamiento de las partículas (líquidas o sólidas) que se encuentran en suspensión en la atmósfera (aerosol) es un problema complejo, sin embargo es necesario conocer su comportamiento por el efecto que éstas, una vez depositadas en la superficie, tienen en la velocidad de corrosión. Las partículas se producen por la condensación de gases de baja volatilidad seguida de coalescencia o por efectos mecánicos (partículas de grandes dimensiones).

Al igual que los gases, las partículas se depositan y son retenidas por la superficie (deposición en seco). Pero al contrario que los gases, en el depósito de las partículas se vuelve evidente el efecto de tamaño, donde las partículas pequeñas son más susceptibles al movimiento del aire. Lo anterior se traduce en una diferencia en la velocidad de depósito por efecto de tamaño. Las mínimas velocidades de depósito se presentan para partículas del orden de 0.1 μm de diámetro.

De acuerdo a su origen las partículas pueden ser producto de la condensación de compuestos gaseosos o producirse por medios mecánicos.

Las partículas formadas por la condensación de diversos compuestos se caracterizan por una composición mixta debido a que éstas se forman en un proceso progresivo a partir de diferentes especies.

1.4 CORROSION ATMOSFÉRICA EN INTERIORES

En la década de los 80's autores como Rice *et al*, han orientado el estudio de materiales tales como cobre, plata, níquel, cobalto y hierro en dispositivos que se encuentran en interiores, en donde los resultados muestran que la velocidad de corrosión es mucho menor en estos sitios que en exteriores.

Cuando los elementos expuestos al intemperie pueden tener menor concentración de contaminantes por efecto de la lluvia, en comparación con elementos que se encuentran expuestos en "interiores" que son propensos a tener mayor cúmulo de condensado en los espacios entre elementos electrónicos (Figura 1.2).

Este tipo de condensados son producto de la existencia, en muchas de las ocasiones, de sistemas de aire acondicionado, aunado al incremento de temperatura existente en cada uno de los componentes que se encuentran ubicados en las tarjetas controladoras de este tipo de elementos.

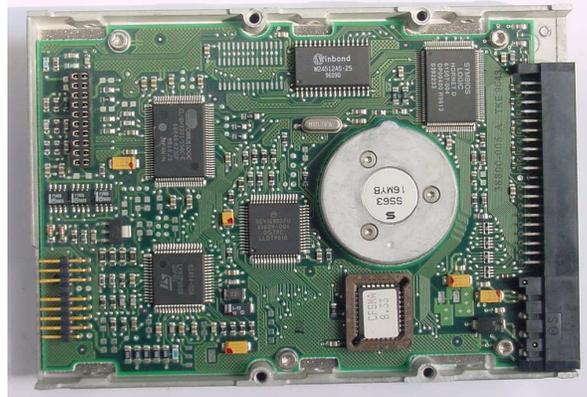


Figura 1.2 Dispositivo de almacenamiento magnético de datos; la reducción de espacios entre componentes hace más factible el cúmulo de condensado propiciando la corrosión en estos sitios.

En México este fenómeno se presenta en áreas que cuentan con sistemas de aire acondicionado, que cada vez es más frecuente encontrar en oficinas y hogares con condiciones elevadas de temperatura en exteriores. Consideración que debe tomar en cuenta la necesidad de que los sistemas de aire acondicionado cuenten con deshumidificadores, porque de no contar con ello el % humedad relativa (%HR) será mucho mayor en el interior propiciando la generación de condensados al interior de los dispositivos.

Si bien es cierto que no todos los dispositivos en la actualidad se encuentran operando en interiores, ya que una gran variedad de estos son portátiles lo cual ya no solamente los hace estar propensos a condiciones atmosféricas en interiores sino también en exteriores, de ahí la importancia de reproducir ensayos de forma acelerada bajo condiciones ambientales, siendo esto una herramienta que ayuda a determinar de forma confiable el comportamiento de este tipo de componentes ante diferentes tipos de atmósferas.

La Tabla 1.1 muestra el comparativo de concentraciones de los contaminantes más representativos existentes en la atmósfera que conllevan a la corrosión en su mayoría en exteriores, no estando exenta de aparecer en interiores.

Tabla 1.1 Comparativo entre concentraciones en interiores y exteriores [Ortiz, 2004].

Compuesto		Concentración (ppb)	
		Exteriores	Interiores
O ₃	Ozono	4 - 42	3 – 30
H ₂ O ₂	Agua oxigenada	10 - 30	5
SO ₂	Dióxido de azufre	1 - 65	0.3 – 14
H ₂ S	Ácido sulfhídrico	0.7 - 24	0.1 - 0.7
NO ₂	Dióxido de nitrógeno	9 - 78	1 – 29
HNO ₃	Ácido nítrico	1 - 10	3
NH ₃	Amoniaco	7 - 16	13 - 259
HCl	Ácido clorhídrico	0.18 - 3	0.05 - 0.18
Cl ₂	Cloro	0.005 - 0.08	0.001 - 0.005
HCHO	Formaldehído	4 - 15	10
HCOOH	_____	4 - 20	20

1.5 EFECTOS DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN EL COBRE Y COMPONENTES ELECTRÓNICOS.

En términos generales el cobre y sus aleaciones se han utilizado en edificios monumentales y en estatuas, debido a su elevada resistencia a la corrosión atmosférica, y por el aspecto estético del recubrimiento formado.

En épocas recientes el cobre se ha utilizado en equipos electrónicos, tales como ordenadores y unidades de control de procesos, en los que la corrosión atmosférica permitida teóricamente es mínima, sin embargo se sabe que este tipo de dispositivos suelen tener fallos no solo por efectos ambientales, a lo cual se debe considerar efectos como la vibración, choques electrostáticos, o bien interferencias electromagnéticas.

A continuación se enuncian algunas de las características actuales de los dispositivos electrónicos:

- Circuitos de alta densidad de integración.
- Las tarjetas están dotadas de pistas de conducción cada vez más finas, así como un mayor número de capas.
- Debido a sus reducidas dimensiones, microscópicas cantidades de agentes agresivos o de productos de corrosión bastan para causar una grave degradación de sus componentes e, incluso, el fallo total del sistema.

Un circuito impreso se define como un componente electrónico que sirve para la interconexión y soporte de los demás componentes electrónicos de un sistema, que al estar en interiores en la mayor parte de las veces el condensado, los residuos salinos (de existir), partículas de polvo y contaminantes gaseosos aceleran el proceso de corrosión de materiales metálicos. Se estima que un 0,1% del aire consiste en vapor de agua, gases agresivos y partículas diversas. La concentración media del vapor de agua en una habitación puede ser de unas 2×10^3 partes por millón (ppm), y la de los gases agresivos de unas pocas ppm, o unos pocos μm^3 [Leygraf, 2000].

Este tipo de elementos suelen estar compuestos por metales tales como el cobre y sus aleaciones, oro, paladio, platino, titanio, plata, plata-paladio, estaño, estaño-plomo, níquel, cromo, aluminio y varias soldaduras, como son el estaño y sus aleaciones.

Los tipos de corrosión presentes en estos materiales se pueden agrupar en dos:

- Aquellos casos en que la corrosión se detecta fácilmente e incluye la corrosión uniforme, corrosión localizada, celdas de concentración, corrosión galvánica entre otros. Se requiere, por lo general, la existencia de ambientes agresivos, como son las zonas marinas y fuertemente contaminadas.
- El segundo tipo se refiere a formas más sutiles de corrosión, que no pueden ser observadas a simple vista, y que se presentan bajo condiciones ambientales relativamente benignas. Incluyen el, la corrosión en poros y la migración de productos de corrosión [Frankel, G.S. 1995].

La corrosión en hendiduras o celdas de concentración; cuando está presente en el diseño del equipo, es causa de la degradación macroscópica del material. La corrosión galvánica es debida al contacto de metales distintos, como aleaciones de aluminio con oro o cobre. La corrosión electrolítica está

motivada por la disolución anódica que se produce bajo la acción de una diferencia de potencial, en presencia de un electrólito, siendo esta última en la que se enfoca este estudio.

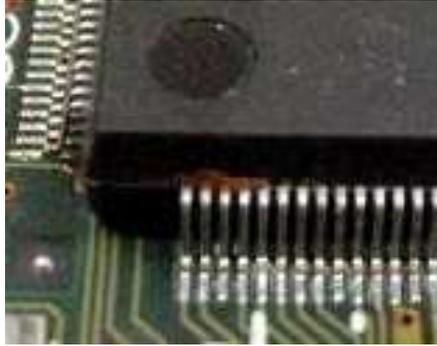


Figura 1.3 Evidencia de corrosión entre las uniones de circuito integrado.

Como ejemplo de lo antes citado, las pistas de conducción de los circuitos integrados y otros componentes pueden desarrollar pilas de corrosión electrolítica, siempre que se forme una capa de electrólito entre dos áreas de diferente potencial eléctrico, por ejemplo, entre pistas adyacentes [Sánchez, 2005].

El voltaje aplicado se divide en una caída anódica, una caída catódica y una caída óhmica entre ánodo y cátodo. Cuando esta última disminuye, debido a la adsorción superficial de humedad e impurezas iónicas, aumenta el voltaje disponible para impulsar las reacciones electroquímicas. La corrosión electrolítica consume metal anódico o bien oxida el agua para producir oxígeno; en el cátodo, tanto el oxígeno como el agua se reducen para formar iones OH^- . Los iones metálicos formados anódicamente tienden a migrar hacia el cátodo, donde se reducen y depositan, adoptando formas dendríticas provocando con esto cortocircuitos.

En la corrosión en poros, el metal base, generalmente cobre o níquel, aporta los productos de corrosión, en donde la presencia de cloruros y la densidad de poros del recubrimiento intensifican el proceso de corrosión. El mecanismo de la migración iónica de los productos de corrosión se manifiesta en la exposición de los conectores eléctricos a ambientes algo agresivos, presentando un comportamiento similar a la corrosión en poros.

Ejemplo de esto es la presencia de sulfuro de cobre que puede migrar desde los poros del recubrimiento de metal noble, o desde otras zonas en las que el metal base está al descubierto, hacia superficies cercanas.

La fiabilidad de un interruptor eléctrico debe ser grande. Por ejemplo, se le puede exigir una frecuencia de fallo inferior al 0,001% en 1.000 horas. Sin embargo, la corrosión puede causar fallos y ser uno de los principales motivos de degradación del interruptor. La resistencia de éste aumenta con la presencia de delgadas películas de óxido o sulfuro, que empañan la superficie metálica. Si la presión mecánica es pequeña, películas de tan sólo 100-500 Å pueden impedir el contacto eléctrico a bajo voltaje [Strandberg, 1997].

Otro factor a considerar es el desgaste por rozamiento, que constituye la principal causa de fallo de los contactos eléctricos en ambientes libres de contaminación. El fenómeno se debe al movimiento relativo de las caras en contacto. Otros parámetros pueden favorecer este fenómeno, como son la vibración, choque, dilatación diferencial y aspectos mecánicos.

A modo de ejemplo se hace mención de los materiales que fungen como recubrimientos metálicos en la superficie del interruptor eléctrico tales como el Au o el Sn. El depósito de estaño es una alternativa al depósito de oro, en aplicaciones en las que no se requieren las propiedades únicas del oro. La interacción del ambiente con el estaño puede originar la corrosión de éste, sobre todo en presencia de pequeñas concentraciones de halógenos. Otras impurezas presentes en el medio ambiente, tales como el H₂S y SO₂, podrían influir también en menor medida en componentes de interruptores eléctricos [Strandberg, 1997].

A la fecha se tienen identificados dos contaminantes de tipo inorgánico que aparecen de modo reiterado; los cloruros y los derivados del azufre que al estar juntos o en combinación con un oxidante como el NO₂ u O₃, son capaces de actuar sinérgicamente con efectos devastadores para el cobre [Eriksson, 1992].

Los cloruros aceleran la corrosión más que ningún otro agente contaminante los cuales suelen encontrarse en interiores en forma de aniones solubles, adsorbidos a las partículas de polvo. Por lo general el cloruro sódico se encuentra en las costas (atmósfera marina) [Ortiz, 2004].

El sulfuro de hidrógeno (H₂S) ataca, en particular, al cobre y la plata [Abbott, 1993]. Los compuestos de azufre originan la formación de cristales con forma dendrítica sobre la superficie del cobre y la plata, causando cortocircuito en las pistas de conducción de la tarjeta controladora.

Sobre estos metales (cobre y plata) se forman películas negras que aumentan la resistencia de los contactos y causan, a veces, intermitencias eléctricas. El efecto del H₂S, como el de los cloruros, depende de la presencia de vapor de agua [Zamanzadeh, 1990].

La influencia del dióxido de azufre (SO₂) en la corrosión atmosférica (exteriores) de los materiales metálicos, indican un papel significativo en la corrosión de los componentes electrónicos en interiores, aun por la marcada atenuación de la concentración de SO₂ en ellos, al actuar mecanismos de absorción.

Indudablemente la velocidad de corrosión del cobre, níquel, hierro y cobalto es muy inferior en interiores que en exteriores, caso contrario es la plata en donde la velocidad de corrosión en interiores puede superar a la existente en exteriores debido a la concentración de H₂S que se pudiese encontrarse en interiores.

Por otra parte, la corrosión del níquel en interiores se relaciona con la influencia del SO₂ así como de compuestos orgánicos [Veleva, 1999].

El deterioro en cobre se identifica por las tonalidades que adopta este material de acuerdo a la exposición ante el medio ambiente, ejemplo de esto es el tono marrón dorado en un periodo de 4 a 6 meses de exposición indica el inicio del deterioro, pero si muestra un color azul negro es prácticamente segura la degradación de la parte del equipo electrónico (terminales de circuitos integrados).

Aspecto importante a considerar para la determinación del deterioro en equipo electrónico es conocer y disponer de los datos sobre la concentración de los contaminantes de cada región. La utilización de probetas es un procedimiento ampliamente utilizado en este tipo de estudios [Johansson, 1999], que en este caso se utilizarán probetas extraídas de las zonas más representativas a evaluar de la República Mexicana.

1.6 PROBLEMÁTICA

En lo concerniente a la problemática que presentan los dispositivos electrónicos en su funcionamiento es de suma importancia determinar las causas fundamentales que conllevan al fallo de estos elementos verificando si la CA es factor fundamental para que se presente dicho fenómeno y de existir de acuerdo a la Figura 1.1 existirán pérdidas de masa del orden de fracciones de micra lo cual puede ser más que suficiente para la interrupción de la continuidad propiciando fallo en el

dispositivo. En el caso de la presencia de gases contaminantes, *Gouda* estudió en 1989 casos de corrosión en componentes de hardware mediante análisis microscópico y EDS (energy dispersive spectroscopy), de lo cual determina que concentraciones de gases contaminantes 10 veces menores al límite permitido para el hombre, pueden dañar el equipo electrónico.

Adicionalmente se tiene la premisa que la corrosión atmosférica en equipo electrónico puede ocurrir durante la manufactura, almacenaje, transporte o desde luego durante el servicio, sin embargo *Guttenplan, 1978*, define la problemática de la corrosión en la industria electrónica, de acuerdo a las siguientes tendencias en el diseño, lo cual se ha comprobado de acuerdo a estudios realizados en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la UNAM (UDIATEM):

- Mayor número de componentes por unidad de área así como secciones de las pistas conductoras de menores dimensiones, se traduce en elevados gradientes de potencial.
- Exposición del equipo electrónico a condiciones más severas.

En general se reconoce que las fallas en equipo electrónico por efectos ambientales [Sánchez et al., 2005] se deben fundamentalmente a:

- Pérdida de la continuidad por corrosión de las pistas o elementos conductores.
- Formación de depósitos no conductores en componentes de tarjetas controladoras (efecto de miniaturización).
- Cortocircuitos, producto de partículas depositadas sobre las pistas conductoras, por condensación de humedad sobre éstas o por la formación de depósitos filiformes.

En términos generales el presente capítulo define aquellos elementos que intervienen en el deterioro por efectos ambientales en equipo electrónico, se han identificado las variables que afectan en mayor proporción a los materiales y por ende a los componentes electrónicos de un sistema, lo anterior con base a estudios realizados en UDIATEM a diversos especímenes de campo y pruebas de laboratorio. Si bien se han identificado y clasificado las principales fallas que propician el daño en equipo electrónico, se deben identificar las variables que intervienen en el deterioro, con base a la actividad de cada región de estudio de la República Mexicana; para ello es importante definir las características de la región en estudio lo cual se plantea en el Capítulo 2.

CAPÍTULO 2

CONDICIONES DE OPERACIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO EN LA REPÚBLICA MEXICANA

Objetivo.- Determinar las condiciones bajo las cuales operan los dispositivos electrónicos en la República Mexicana, con la finalidad de identificar las zonas más propensas para la presencia del fenómeno corrosivo.

2.1 GENERALIDADES

La República Mexicana se encuentra en su totalidad en el hemisferio Norte del Continente Americano, con las siguientes coordenadas extremas [INEGI, 2012]:

- *Norte:* 32° 43' 06'' latitud norte.
- *Sur:* 14° 32' 27'' latitud norte.
- *Este:* 86° 42' 36'' longitud oeste.
- *Oeste:* 118° 27' 24'' longitud oeste.

Un aspecto dentro del análisis de la climatología existente en la República Mexicana es su ubicación, de la cual el Trópico de Cáncer atraviesa en su parte central a la República Mexicana, dividiéndola tanto en zona tropical y en subtropical, siendo esto un aspecto importante a considerar por los niveles de humedad relativa (%HR) existentes.

La parte sur se localiza dentro de la zona de los vientos alisios, mientras que su parte norte se localiza dentro de la faja subtropical de alta presión a lo largo de la cual se encuentran los anticiclones oceánicos del Atlántico del Norte y del Pacífico del Norte.

A continuación se describen los principales factores climatológicos que influyen de forma directa en la corrosión atmosférica.

a) Influencia de los vientos. [García, 1988]

El efecto y la dirección de los vientos de acuerdo a la orografía de la República Mexicana, son factor importante a considerar, durante la mitad del año en la que el incremento de temperatura es considerablemente alto, con el desplazamiento hacia el Norte de la zona subtropical de alta presión,

la zona de los alisios aumenta en intensidad, latitud y altura, por lo que prácticamente todo el país queda bajo la influencia de los vientos que soplan con una dirección original de NE a SW en superficie o de este a oeste en las alturas, acopiando humedad del Golfo de México.

Durante el verano y parte del otoño se originan en el Mar de las Antillas y en el Océano Pacífico los ciclones tropicales que tienen su mayor frecuencia en septiembre; éstos afectan las condiciones del clima de la República Mexicana debido a que muchas de sus trayectorias corren paralelas a las costas o se internan en el continente.

En lo que corresponde a la mitad fría del año, tanto la faja subtropical de alta presión como la zona de los alisios se desplazan hacia el sur, dominando los vientos del Oeste en el norte y en las partes altas de la atmósfera de la porción central del país. La Altiplanicie Mexicana y las montañas que la rodean, debido a su gran altitud, interceptan la base de la zona de vientos del Oeste que son característicos de las latitudes medias. Estos vientos, especialmente en las alturas, son considerablemente menos húmedos que los alisios e imprimen al aire la sequedad característica que predomina en la mayor parte de la República Mexicana en esta época.

Sin embargo en invierno, los vientos del Oeste acarrearán embebidas en su corriente, algunas de las perturbaciones propias de las latitudes medias como vórtices fríos y depresiones ciclónicas que afectan las condiciones climáticas del norte del país y en ocasiones también, las de la Altiplanicie Mexicana.

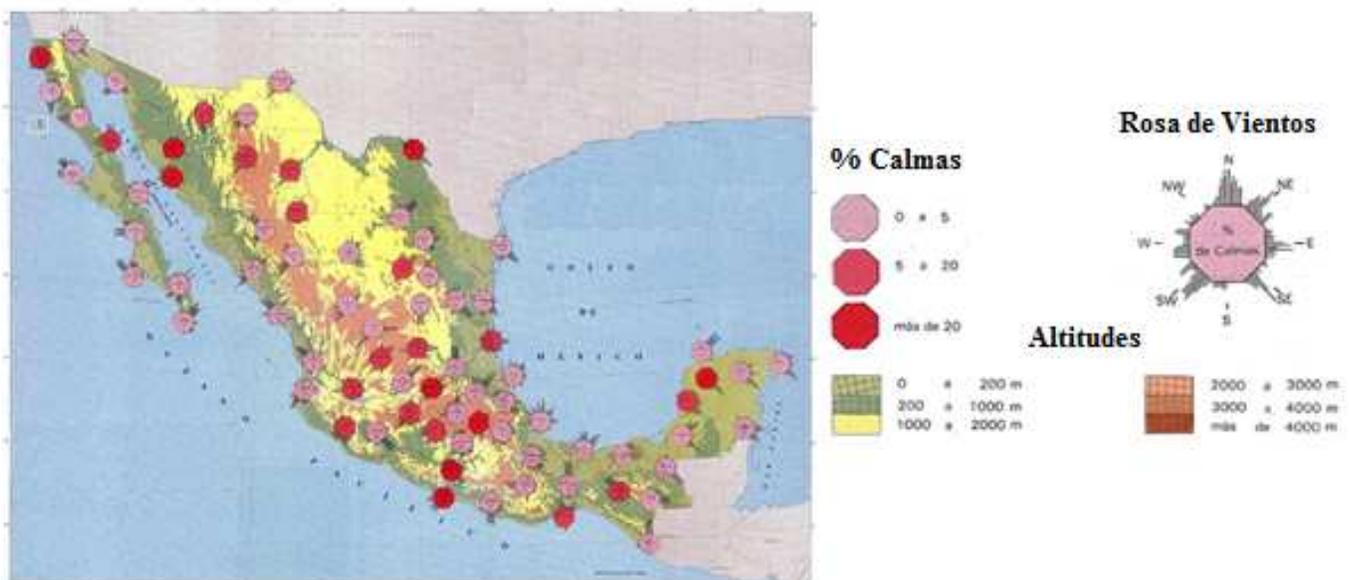


Figura 2.1 Distribución de Vientos dominantes durante el año [INEGI, 2012].

b) Distribución promedio de precipitaciones en el año. [García, 1988]

En la República Mexicana la temporada lluviosa se presenta en la mitad del año justo en el verano, (mayo a octubre), con excepción del área noroeste del país en donde predomina el clima con lluvias en invierno.

Las estaciones situadas en la vertiente del Océano Pacífico desde el paralelo 26° N hacia el sur incluyendo la porción oriental del sur de la Península de la Baja California, presentan un máximo muy marcado en septiembre que coincide con la época en que los ciclones tropicales del Pacífico son más frecuentes.

En la vertiente del Golfo de México y en la porción noreste de la Altiplanicie Mexicana, así como en las partes más elevadas de las montañas del sur del país, se presenta, también, un máximo muy marcado en septiembre que coincide con la época de mayor frecuencia de los ciclones antillanos.

En las cuencas interiores del sur, así como sobre la Altiplanicie Mexicana, el máximo se presenta en pleno verano: junio o julio, poniendo de manifiesto el origen convectivo de la precipitación que parece tener su fuente de humedad en la lengua de aire húmedo alimentada por los alisios.

En el extremo noroeste del país, que tiene régimen mediterráneo con su máximo en diciembre o enero, es clara la influencia de los vientos del Oeste asociados con las perturbaciones propias de las latitudes medias.

Las zonas del norte, noreste y noroeste de la porción continental del país con régimen de lluvias uniformemente repartidas, sugieren la influencia de la convección en el verano y de los vientos del Oeste en el invierno.

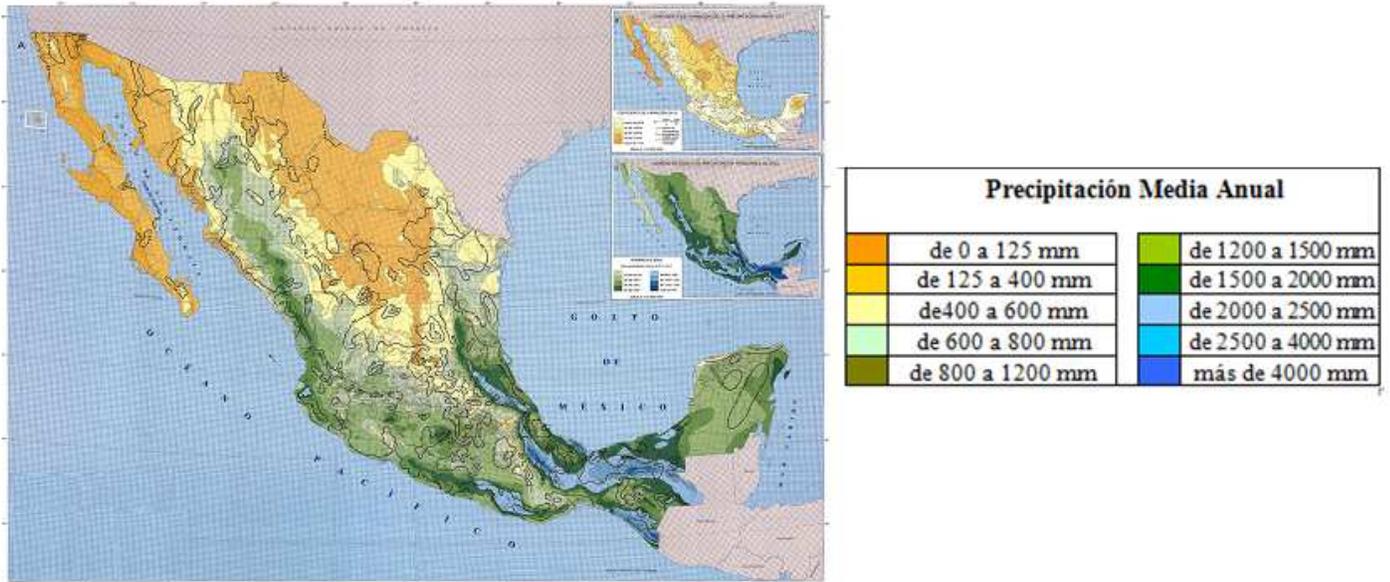


Figura 2.2 Precipitaciones promedio anuales [INEGI, 2012].

c) Temperatura media anual.

La temperatura es un factor importante a considerar, la cual dependerá mucho de la región en estudio de acuerdo a las altiplanicies o sistemas montañosos involucrados.

Así mismo la interacción de la misma con cierto porcentaje de humedad relativa es factor importante para la formación o no de depósitos corrosivos en los dispositivos.

En la Figura 2.3 se muestra la distribución de temperaturas promedio durante el año en la República Mexicana, así como la especificación de los valores promedio por región de acuerdo al Mapa.



Temperatura Media Anual (Zonas Térmicas)			
	Muy Cálida (Temperatura media mayor a 26° C)		Templada (Temperatura media de 12° a 18° C)
	Cálida (Temperatura media de 22° a 26° C)		Semifría (Temperatura media de 5° a 12° C)
	Semicálida (Temperatura media de 18° a 22° C)		Fría y Muy Fría (Temperatura media menor de 5° C)

Figura 2.3 Temperatura Media Anual.

2.2 CLIMATOLOGÍA DE LA REPÚBLICA MEXICANA

Actualmente se conoce una clasificación climatológica de la República Mexicana [UNEP/WHO 1992], en donde se muestran los principales climas existentes en el territorio mexicano, sin embargo cada estado de la República Mexicana muestra características muy peculiares mostrando sobre todo diversidad en los climas existentes, teniendo en algunos casos hasta 6 subclimas dentro de una misma región, lo cual genera cierta complejidad en el análisis de los dispositivos en las diferentes regiones para lo cual se consideran los climas más representativos de la República Mexicana.

En la Tabla 2.1, se muestra la clasificación actualizada por *Enriqueta García* apoyada en la clasificación climática de *Köppen* de los diversos climas existentes en México, presentando su distribución en la Figura 2.4.

Tabla 2.1. Climatología de la República Mexicana [García, 1988].

POR SU HUMEDAD POR SU TEMPERATURA	HÚMEDOS	SUBHÚMEDOS	SEMIÁRIDOS	ÁRIDOS	MUY ÁRIDOS	RÉGIMEN PLUVIAL	
CÁLIDOS Y MUY CÁLIDOS (Temp. media anual mayor de 18°C)	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
SEMI-CÁLIDOS Del grupo A	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
Del grupo C	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
Del grupo A	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
Del grupo C	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
(Temperatura media anual entre 18° y 22°C)	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
TEMPERADOS (Temperatura media anual entre 12° y 18°C)	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
SEMI-FRÍOS (Temperatura media anual entre 6° y 12°C)	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
FRÍOS (Temperatura media anual entre 2° y 6°C)	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
MUY FRÍOS (Temperatura media anual menor de 2°C)	Am Am(w) Am(B)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno
	AI A(fm)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	Aw ₁ Aw ₂ (w) Aw ₃ (x)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BS ₁ (h) BS ₂ (h) BS ₃ (h)	BWh ^h BWh ^w BWh ^x	Verano Intermedio Invierno



Figura 2.4. Distribución de los principales climas en la República Mexicana [García, 1988]

2.2.1 Características Climáticas de la República Mexicana por Regiones

Como se hizo mención, el estudio a realizar considera evaluar los dispositivos electrónicos que se encuentren en los climas más representativos de la República Mexicana, para su selección se consideran los siguientes criterios:

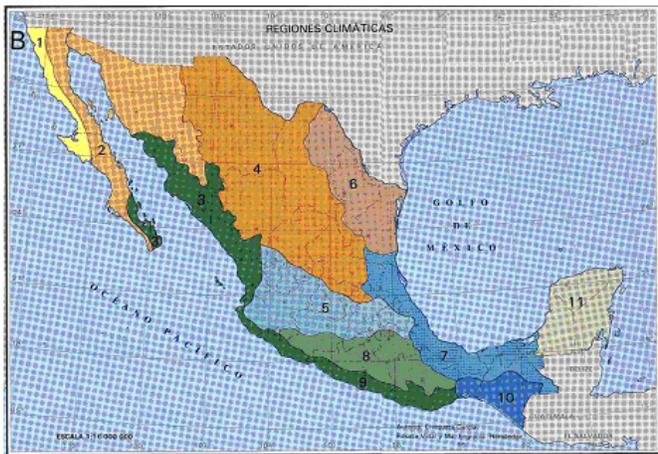
- a) Fenómenos Meteorológicos Dominantes.
- b) Régimen Pluviométrico.
- c) Distribución Anual de Temperatura.

Apoyándose en el siguiente mapa se identifican las regiones en estudio mostradas en la Tabla 2.2, donde se muestran las características de cada una de ellas, teniendo una vasta variedad de climas para poder determinar el deterioro sufrido en equipo electrónico.

Esta información será de suma importancia para poder evaluar los especímenes que más adelante se denominarán pruebas de campo, con lo cual además de determinar el deterioro sufrido de los

dispositivos electrónicos ante condiciones “normales” de operación, se pretende correlacionar el deterioro sufrido mediante ensayos acelerados.

Aunado a los parámetros establecidos a la fecha se tiene una clasificación generalizada de los climas más representativos por regiones existentes en la República Mexicana (Figura 2.5).



Distribución Climática de la República Mexicana

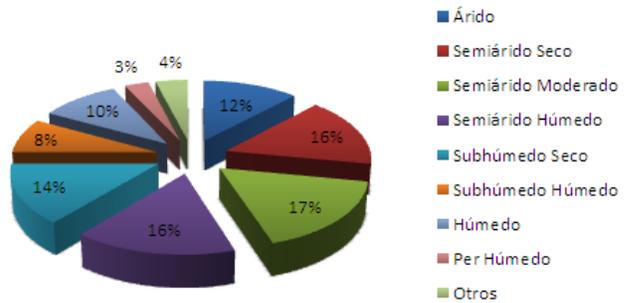


Figura 2.5 Distribución de climas más representativos en la República Mexicana. Porcentaje de los climas predominantes considerados para la recolección de muestras de EE en la República Mexicana.

De acuerdo a lo anterior, los climas más representativos son los áridos-semiáridos con el 61% del territorio mexicano, seguido del clima húmedo-subhúmedo-per húmedo con el 35% del territorio nacional.

Tabla 2.2. Características climáticas por región.

Regiones Climáticas	Características Principales
Noroeste	Circulación del oeste, régimen invernal, un máximo de temperatura
Golfo de California	Altas subtropicales y circulación del oeste, régimen intermedio, un máximo de temperatura
Pacífico Central	Monzón en verano y ciclones tropicales, régimen de verano.
Norte	Altas subtropicales, aislada de vientos húmedos, zonas áridas, régimen variable, un máximo de temperatura
Centro	Alisios en verano, monzón del Pacífico, lluvias en verano, dos máximos de Temperatura.
Noreste	Nortes en invierno, alisios y ciclones en verano, altas subtropicales, régimen intermedio, un máximo de temperatura.
Golfo de México	Alisios, ondas del este y ciclones tropicales en verano y otoño, nortes en invierno, régimen intermedio, dos máximos de temperatura.
Balsas - Valle de Oaxaca	Aislada de vientos húmedos, alisios y monzón descendientes, lluvia de verano, dos máximos de temperatura
Pacífico Sur	Zona Intertropical de convergencia, monzón en verano, ciclones tropicales, régimen veraniego, dos máximos de temperatura.
Sureste	Zona intertropical de convergencia, alisios del SE, ciclones, régimen de verano, muy escasa lluvia invernal, dos máximos térmicos
Península de Yucatán	Alisios del E y NE, ciclones tropicales, nortes en invierno, régimen de verano con porcentaje alto de precipitación invernal, dos máximos de temperatura.

2.3 DEFINICIÓN DE ATMÓSFERAS EN ESTUDIO EN EQUIPO ELECTRÓNICO

La severidad de la corrosión atmosférica varía significativamente dependiendo de la región y usualmente estos ambientes se clasifican como rural, urbano, industrial, marino, o combinaciones de éstos. A continuación se describen estos tipos de atmósferas [Sánchez et al., 2005]:

- a) **Industrial.-** Se caracteriza por las emisiones de la industria pesada, en particular por presentar todo tipo de contaminación por azufre en forma de dióxido de azufre principalmente, el cual proviene en su mayoría de la combustión. Así como concentraciones importantes de cloruros, fosfatos y nitratos.

- b) **Urbano.-** Este tipo de ambiente es similar al rural con bajo nivel de emisiones producto de la industria pesada, sus contaminantes provienen de la combustión de materiales fósiles

fundamentalmente producidas por fuentes móviles, así como las características antropogénicas. Los contaminantes más usuales son NO_x (NO + NO₂) y SO_x, principalmente.

- c) **Marino.**- Se caracteriza por tener altas concentraciones de cloruros. La concentración de NaCl en este ambiente se mantiene superior a los 15 mg/m² -día, no importando el nivel de SO₂ que se presente. La corrosividad se puede ver incrementada por la existencia de industria en la zona, así como también por la temperatura y la dirección de los vientos dominantes.

- d) **Rural;** Se caracteriza por la presencia de contaminantes provenientes del empleo de fertilizantes y la descomposición de materia orgánica lo cual da como resultado la activación de otros mecanismos de corrosión, debido a la presencia de iones amonio, nitratos, entre otros.

2.4 PROBLEMÁTICA EN LA REPÚBLICA MEXICANA

De acuerdo a la clasificación de la República Mexicana se tienen climas que van desde tropical lluvioso hasta el frío característico de las altas montañas. Esta diversidad y peculiaridades son debidas a su topografía y altitud. Las temperaturas mínimas y máximas absolutas en México son del orden de -10°C y 40°C respectivamente, mientras que la humedad relativa varía entre los 30% y 100%, condiciones que se ven atenuadas cuando se hace referencia a interiores. Por otra parte, los contaminantes presentes y su concentración son variados, como ejemplo se tiene la Ciudad de México y su área metropolitana en donde dispositivos electrónicos extraídos de un mismo lote expuestos en diferentes zonas de dicha región, expuestos en un mismo periodo sufren diferente grado de deterioro.

Durante los periodos de elevada temperatura, los materiales que se encuentran expuestos a estas condiciones no se ven afectados de forma significativa, hasta que la temperatura desciende hasta un valor tal que alcance el punto de rocío, siendo justamente cuando se presenta la condensación sobre la superficie de las piezas, y materiales en general, en función de sus características intrínsecas.

Considerando los contaminantes atmosféricos citados en la Tabla 1.1, los compuestos de azufre e iones cloruro son los más comunes e importantes agentes corrosivos en materiales expuestos al intemperie en zonas de actividad marina; para las atmósferas tanto rural, urbana e industrial se tiene conocimiento del actuar de otros contaminantes cuyo mecanismo de acción se ha estudiado

realmente poco sobre todo en dispositivos que se encuentran en interiores puesto que teóricamente al encontrarse bajo estas condiciones no podrían formar electrolitos lo suficientemente agresivos que aceleren la reacción del proceso de corrosivo, considerando que los niveles de Cl_2 , HCl , H_2S así como compuestos de NO_x son relativamente bajos.

Por otra parte la interacción de $\text{SO}_2 + \text{NO}_2$ sobre superficies de cobre, suele ser mucho más agresivo el efecto que si se tuviese uno solo de los compuestos bajo condiciones de humedad relativa alta (>90%). *Kucera et al.*, 2002, reportan que el efecto entre la interacción de $\text{SO}_2 + \text{O}_3$ tiende a ser más fuerte que el $\text{SO}_2 + \text{NO}_2$, para el cobre, y más débil para superficies de níquel.

Para la determinación del periodo (tiempo) de humectación se consideran valores superiores al 80% de HR (humedad relativa) de acuerdo a la norma ISO 9223 [ISO 9223:1992], dando una estimación de las condiciones bajo las cuales se encuentran los dispositivos en lo que se denomina “muestras de campo”, siendo justamente los periodos bajo los cuales se propicia el fenómeno de la corrosión.

Factor importante a considerar es la posición de las superficies sobre las cuales se podría concentrar condensado o bien partículas propias de las zonas de evaluación que aceleran la corrosión del metal, pues ante esto las superficies que se encuentran en posición horizontal, son más propensas a tener deposiciones elevadas con respecto a las verticales. En el caso de las atmosferas urbanas, los iones de amonio y sulfato son los más abundantes así como las partículas de polvo, por ejemplo la mayor parte del deterioro sufrido en una superficie es atribuible a las partículas de sulfato adsorbidos en aerosol [Mariaca,1999].

La magnitud de deterioro en equipo electrónico depende de la composición característica de la atmósfera (tipos de contaminantes y su concentración), así como de la sensibilidad de cada material a las condiciones del ambiente. Si bien el costo de la corrosión se estima del orden del 4 al 5% del PIB se acepta que en países industrializados el 50% de estas pérdidas son debidas a corrosión atmosférica (Figura 2.6).

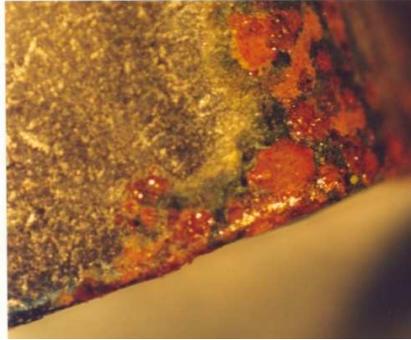


Figura 2.6 Soporte metálico de equipo electrónico expuesto a condiciones ambientales extremas.

Si bien existen diferentes pruebas para poder determinar y predecir el comportamiento de elementos expuestos a ambientes agresivos, las de corrosión atmosférica son las que de alguna forma proporcionan mayor información debido a la caracterización de las diferentes atmosferas que se quieran evaluar.

En el caso del equipo electrónico para tener daño sobre este tipo de dispositivos, no es necesario presentar pérdidas de masa significativas (fracciones de gramo) para producir severos inconvenientes en su operación, simplemente con tener presencia de condensado o depósitos de partículas es condición suficiente para que exista pérdida de continuidad.

Actualmente algunas de las técnicas utilizadas para la evaluación de este fenómeno son microscopia de fuerza atómica, espectroscopía infrarroja, etc., que permiten la evaluación *in situ*, así como un mayor detalle, en cuanto al análisis de las superficies de los componentes electrónicos. Sin embargo para la evaluación de los dispositivos se recomienda también ensayos que aceleran los procesos de corrosión por efectos ambientales (cámaras ambientales).

Conocer las condiciones ambientales de la República Mexicana, es de suma importancia para poder declarar las variables que intervienen en el deterioro por efectos ambientales en equipo electrónico; a la fecha no se cuenta con reportes actualizados de la clasificación de climas en México, sin embargo el presente trabajo muestra una clasificación basándose en las condiciones más representativas que de acuerdo a la actividad de cada región pudiesen ser factores para la presencia del deterioro en los materiales de equipo electrónico viéndose reflejado en su funcionamiento como sistema, apoyado en estudios realizados por Enriqueta García, quien considera condiciones generales de la República Mexicana.

Al existir una gran diversidad de climas en nuestro país, se ha realizado una subclasificación de los mismos (Figura 2.5), de la cual para el estudio del fenómeno de la corrosión atmosférica en equipo electrónico se procederá a recolectar muestras de dichas regiones, considerando el tipo de atmósfera el cual engloba las actividades desarrolladas y los principales contaminantes existentes. Esta información es de gran utilidad para poder realizar ensayos de laboratorio acelerando el proceso y posteriormente comparar con los resultados de la inspección realizada a especímenes recolectado de campo.

CAPÍTULO 3

EQUIPO ELECTRÓNICO: DETERIORO EN ESPECÍMENES DE CAMPO Y ENSAYOS ACELERADOS

Objetivo.- Plantear una Metodología para la evaluación del posible deterioro por efectos ambientales en dispositivos electrónicos.

Evaluar el deterioro sufrido en “muestras de campo”, así como reproducción de ensayos acelerados y evaluación del deterioro en “muestras de laboratorio”.

3.1 ANTECEDENTES

Los ensayos acelerados de corrosión atmosférica se han implementado para el estudio de metales, aleaciones y recubrimientos metálicos comúnmente expuestos a la atmósfera evaluando su comportamiento ante diferentes medios de exposición ambiental, lo cual se reproduce en laboratorio utilizando como alguno de los métodos de evaluación cámaras de simulación acelerada.

Los ensayos más antiguos y empleados hasta la fecha son los de cámara de niebla salina en el caso de los recubrimientos. No obstante en la actualidad, cada vez es mayor el número de sectores que demandan normas basadas en ensayos combinados de ciclos repetitivos formados por periodos de spray salino, seguidos de periodos de secado controlado y posterior humidificación. Dichos ensayos se realizan bajo normas internacionales las cuales son aplicadas de acuerdo a las condiciones de deterioro observadas, buscando con esto la máxima semejanza con los fenómenos naturales.

El estudio de los efectos que provoca la corrosión atmosférica en equipo electrónico se ha evaluado dentro de los Laboratorios de la UDIATEM desde el año 2000, realizándose la evaluación de circuitos impresos y componentes electrónicos de las tarjetas controladoras de teléfonos de uso residencial, ya que estos presentaban un mal funcionamiento operacional, de aquí la premisa de poder determinar cuales eran los factores o causas de ¿Porqué el mal funcionamiento? De lo anterior en la UDIATEM, se han desarrollado diversos estudios sobre el tema, así como el planteamiento de metodologías para su análisis.

Con base en estudios realizados, y considerando lo establecido por normas internacionales, en este apartado se validan los ensayos por corrosión atmosférica, realizando pruebas donde se evalúa el

deterioro sufrido en los elementos metálicos comparando y correlacionando variables con respecto a las condiciones ambientales características (tiempo real de exposición).

Para ello se han desarrollado una serie de ensayos para determinar las causas principales que conllevan al deterioro por efectos corrosivos, por lo cual se hace énfasis en el estudio de componentes tanto de equipo telefónico residencial así como elementos electrónicos que conforman sistemas de almacenamiento magnético de datos, considerando principalmente aquellas regiones que se caracterizan por la elevada humedad relativa y altas temperaturas que inducen a la utilización de sistemas de aire acondicionado o clima que alteran de alguna forma el ambiente real existente, no obstante un clima artificial se considera que de alguna forma acelera la presencia del fenómeno de la corrosión.

Dentro del estudio de la corrosión atmosférica en equipo electrónico, para tener una mejor visión sobre los elementos que sufren este fenómeno se han clasificado en tres grupos tomando en cuenta sus dimensiones, características y aplicación [Ortiz *et al.*,2004]:

- a) Dispositivos de microelectrónica (circuitos integrados, circuitos impresos)
- b) Dispositivos de macroelectrónica. Interruptores, conectores, resistencias, capacitores, tarjetas impresas, pilas, etc.
- c) Dispositivos de almacenamiento magnético de datos (discos duros)

3.2 VARIABLES A CONSIDERAR EN ENSAYOS ACELERADOS POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La corrosión atmosférica es uno de los fenómenos de deterioro que más se ha estudiado, y por consiguiente es necesario definir las variables a controlar para la reproducción del deterioro.

De acuerdo a las diferentes condiciones ambientales bajo las cuales operan los dispositivos electrónicos se tiene que los factores más importantes que intervienen en la corrosividad atmosférica son [Ortiz, 2004]:

1. Variación de temperatura
2. Ciclos de humedad relativa
3. Contaminantes gaseosos presentes en el aire. Composición y concentración (SO₂, NO_x, CO₂, O₃, NH₃, HCl, siendo estos los más representativos)
4. Partículas contaminantes. Composición, tamaño y concentración.

Si bien se ha considerado que los efectos que sufren los dispositivos al estar expuestos al intemperie no son los mismos que los obtenidos en ensayos de laboratorio, estos últimos se reproducen con la finalidad de prevenir el deterioro sufrido en los metales y aleaciones característicos de la industria eléctrica y electrónica, lo anterior mediante una cámara de simulación acelerada de corrosión atmosférica, diseñada y fabricada en la misma UDIATEM [Ortiz *et al.*, 2000].



Figura 3.1 Cámara para ensayos acelerados de corrosión atmosférica [Sánchez *et al.*, 2005]

3.3 METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO EN EQUIPO ELECTRÓNICO

Para poder llevar a cabo la inspección y evaluación de los especímenes identificados como de “campo” así como especímenes de “laboratorio” se plantea una metodología (Figura 3.2), donde se hace referencia únicamente a la forma en que se deberán tratar los especímenes que presenten fallo por indicio de corrosión previo análisis de diagnóstico realizado al recibir los equipos.

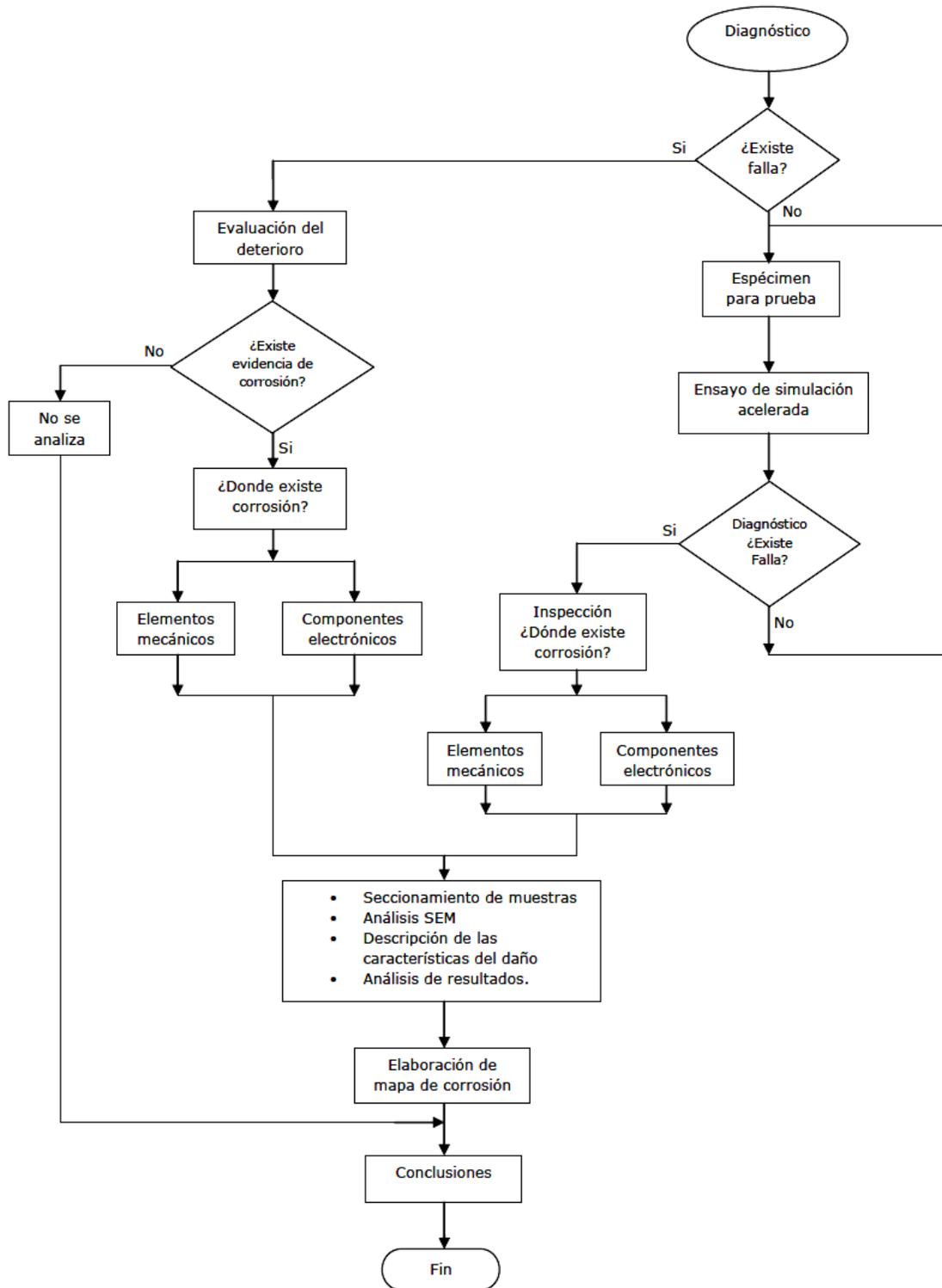


Figura 3.2 Metodología empleada para la inspección y determinación del deterioro sufrido en equipo electrónico. [Sánchez et al., 2010]

La recolección de las muestras para estudio se realiza considerando aquellas regiones que por sus condiciones climáticas presentan mayor susceptibilidad al fenómeno corrosivo. [Sánchez, 2005]

A la fecha se han realizado más de 200 evaluaciones en elementos metálicos de componentes electrónicos, determinando la degradación presente en cada caso.

3.4 EQUIPO ELECTRÓNICO EN CONDICIONES NORMALES DE OPERACIÓN (ESPECÍMENES DE CAMPO)

Como se ha hecho mención, los especímenes analizados denominados “pruebas de campo” serán aquellos componentes que han sido retirados de teléfonos de uso residencial o bien de PC, que se les ha diagnosticado y en su evaluación se ha determinado la existencia de algún tipo de falla [Sánchez et al., 2005].

La evaluación se inicia con una inspección visual del estado en que se encuentran los dispositivos, determinando fecha de manufactura, modelo, capacidad registrando todo esto en bitácoras con la finalidad de poder predecir el tiempo de servicio de los dispositivos ya que en muchas ocasiones es difícil determinarlo.

Siguiendo la metodología planteada, la Figura 3.3 muestra las terminales de conexión de un dispositivo donde se encuentra un cúmulo importante de polvo, siendo factor importante para el deterioro sufrido en esta zona, donde al perder el barniz protector, el metal está expuesto al condensado producto de la humedad existente. La Figura 3.4 muestra un circuito integrado el cual se ha retirado de la tarjeta controladora de un equipo telefónico, donde es evidente a bajos aumentos el cambio de tonalidad en las terminales del mismo, siendo justo estos elementos en los que mayor deterioro e indicios de corrosión se presentan, que al fallar propician que el dispositivo deje de funcionar.

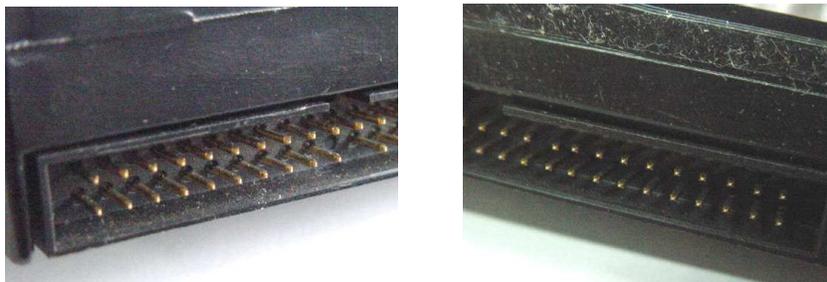


Figura 3.3 Acumulación de polvo en terminales de Pines IDE, lo cual propicia desgaste en la superficie, siendo puntos susceptibles a la presencia de corrosión (muestra proveniente de Gdl., Jalisco).

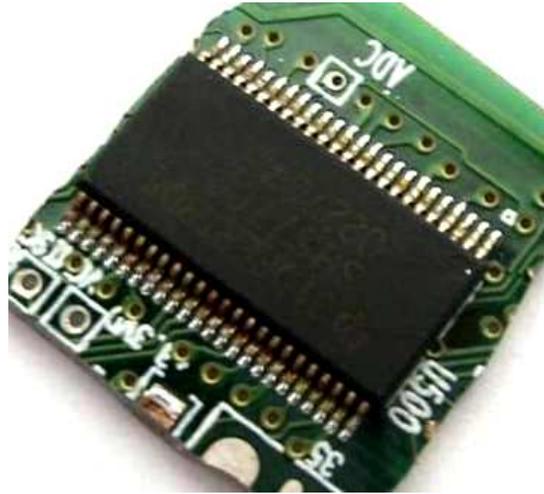


Figura 3.4 Terminales con deterioro identificado por el cambio de tonalidad.

En el caso de los sistemas de almacenamiento magnético de datos, la capa de carbono de la superficie del disco es desprendida debido al contacto existente con la Cabeza de L/E, aunado a esto en algunos casos se llega a dar la adhesión de la cabeza en algún punto de la superficie del plato
Figura 3.5

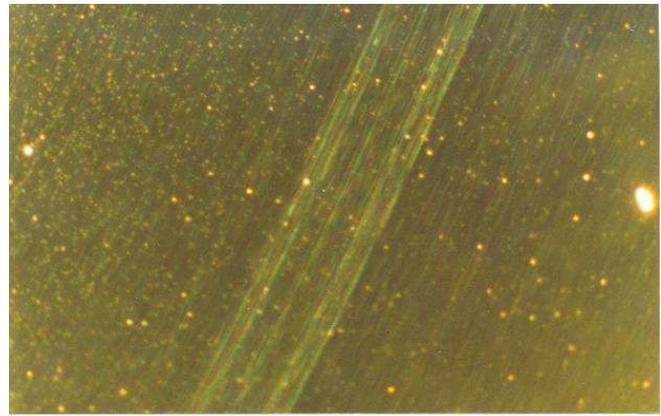
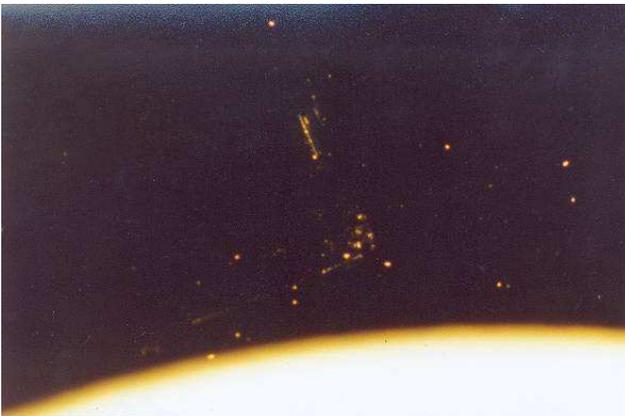


Figura 3.5 La imagen de la izquierda muestra desprendimiento de la capa de carbono. A la derecha se muestra el contacto existente entre la cabeza de lectura-escritura con la superficie magnética provocando el desgaste en la superficie del plato.

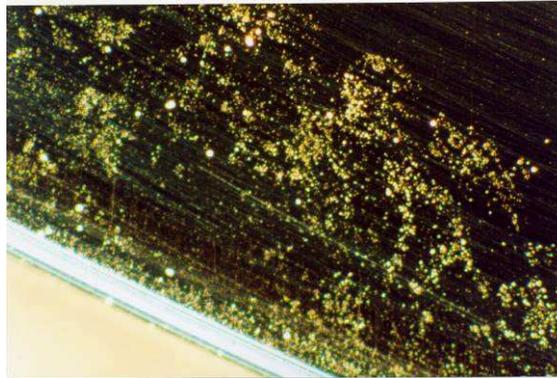


Figura 3.6 Desgaste sufrido por el estrecho vuelo de la cabeza de lectura- escritura con respecto a la superficie del plato (20X).

3.4.1 Inspección en MEB

Todos aquellos especímenes evaluados mediante microscopia a bajos aumentos donde se identifican posibles deterioros por fenómenos corrosivos, se analizaron mediante microscopia electrónica de barrido con la finalidad de identificar los agentes que causan en mayor proporción el deterioro.

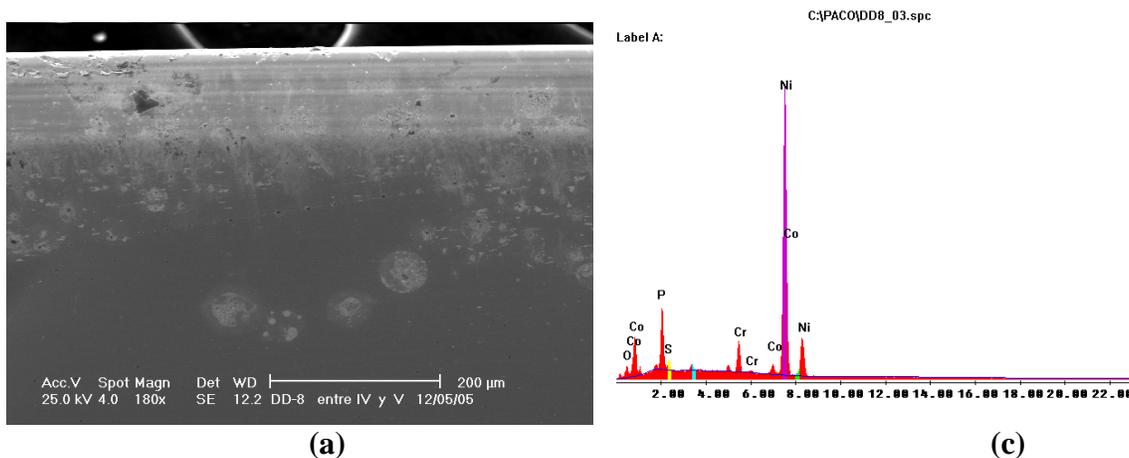
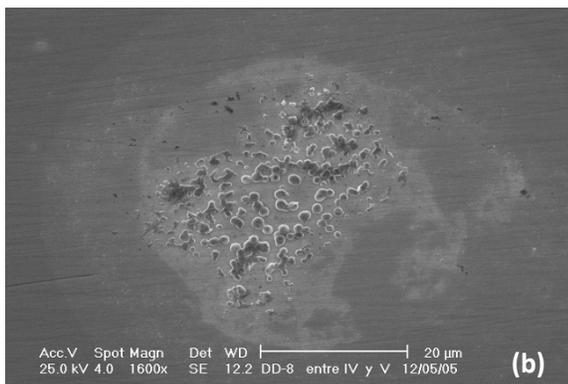


Figura 3.7 a) Periferia de superficie de almacenamiento magnético de datos de la Figura 3.6. b) Productos de corrosión, el principal elemento que interactúa es el azufre de acuerdo al espectro mostrado. c) Presencia de Ni, lo que se traduce como pérdida de la capa magnética del disco.



Analizando componentes de conexión para sistemas de almacenamiento magnético de datos, a bajos aumentos (12X) no se aprecia un deterioro significativo o cambios notorios de tonalidad que indican el posible daño sufrido en la superficie de los mismos; sin embargo, para poder verificar la existencia de desgaste sufrido o bien posibles indicios de corrosión, se analizan dichos componentes mediante MEB encontrando depósitos de condensado justo en zonas de cambio de geometría donde existe desgaste de dicho componente. (Zona A de la figura 3.8).

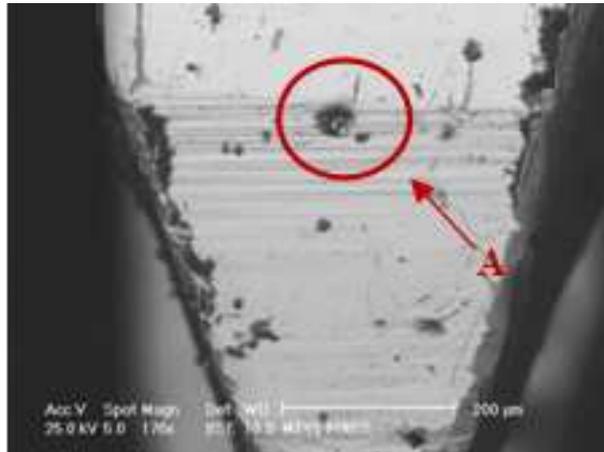


Figura 3.8 Pines IDE, de dispositivo electrónico expuesto en tiempo real. La zona A se convierte en depósito de condensado.

Dentro del análisis de los componentes electrónicos mediante MEB, se realiza a la par un análisis por EDS que permite conocer la naturaleza de los componentes que se encuentran en la muestra inspeccionada. Cabe mencionar que en dicho espectro se han encontrado algunos de los principales gases contaminantes que en este caso, al ser muestras de la ciudad de Monterrey N.L. son dióxidos de azufre (SO₂).

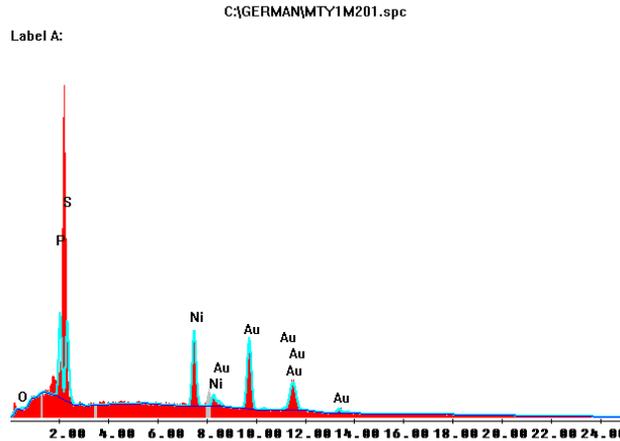


Figura 3.9 El análisis químico muestra la presencia de azufre, siendo uno de los gases principales que intervienen y propician el fenómeno de la corrosión, la velocidad de la misma depende también de las condiciones bajo las cuales se encuentre expuesto dicho elemento.

3.5 PRUEBAS DE LABORATORIO, SIMULACIÓN ACELERADA POR CORROSIÓN

Los ensayos se efectuaron con base en las Normas ISO 9223:1992 (E), NOM - 020, 022,023 – SSA1, ASTM G154, D4585, así como tomando en cuenta lo establecido por ASTM B827, ASTM B845, en lo que se refiere a la concentración y mezcla de gases contaminantes. La selección del tipo de condiciones de ensayo se ha definido con la finalidad de reproducir las condiciones de deterioro lo más cercano a la realidad.

Dentro de las ventajas que presentan este tipo de ensayos, son las condiciones bajo las cuales se desarrollan, teniendo como principales elementos:

- 1) Facilidad de desarrollo
- 2) Repetitividad
- 3) Reproducción de cualquier atmósfera existente de los lugares de exposición.
- 4) Bajo costo
- 5) Rapidez

3.5.1 Parámetros de ensayo acelerado.

Los ensayos de simulación acelerada se desarrollan tanto en especímenes que han estado expuestos a diferentes grados de corrosividad, como en elementos nuevos con la finalidad de tener un punto de referencia en el deterioro sufrido a diversas condiciones de prueba.

Al momento de realizar la recolección de las muestras de campo es importante conocer las características y tiempo de servicio de las mismas, para poder correlacionar el deterioro que se presenta.

La norma para ensayos acelerados, indica que en la reproducción de las pruebas debe considerarse al menos **100** veces el valor mínimo establecido [Ortiz, 2004]. En el caso de la República Mexicana los valores establecidos por la Secretaría de Salud [NOM-022-SSA1] en el ambiente se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Límites permitidos de los principales contaminantes en el ambiente para el ser humano.

CONTAMINANTE	LÍMITE PERMITIDO
Ozono (O ₃)	0.110 ppm (como máx. en una Hora)
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.130 ppm (como máx. en 24 Horas)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.210 ppm (máximo en 1 Hora)
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm (máximo diario promedio de 8 Horas)
Partículas PM 10µm	150 µg/m ³ (máximo en 24 Horas)
Partículas PM 2.5µm	65 µg/m ³ (máximo en 24 Horas)
Partículas PST	260 µg/m ³ (máximo en 24 Horas)

Los especímenes que son sometidos al ensayo de Simulación Acelerada por Corrosión Atmosférica, son aquellos que después de realizado el diagnóstico inicial planteado en la metodología, siguen en funcionamiento; desafortunadamente para estos casos no se cuenta con fechas de inicio de operación ni las razones por las cuales fueron retirados.

Las condiciones bajo las que se expondrán los dispositivos en la cámara de simulación acelerada se programan por un determinado número de ciclos, en donde cada ciclo representa 1 día de exposición en tiempo real, con lo que se establece las siguientes condiciones de evaluación de los dispositivos para el desarrollo de ensayos acelerados:

- a) Duración del ensayo: 200 ciclos
- b) Humedad relativa controlada entre 80 y 95%.
- c) Concentración de gases contaminantes. Mínimo 100 veces la máxima para atmósfera industrial. (valores de acuerdo a la Tabla 3.1)
- d) Gases contaminantes: SO₂, NO₂.
- e) Duración del ciclo de temperatura: 20 minutos.
- f) Tipo de ciclo de temperatura; Onda trapezoidal (Figura 3.10)
Temperatura máxima de 45° C y mínima de 5° C. (El rango de temperatura se definió de acuerdo a la capacidad del equipo, evitando también la solidificación del condensado generado).

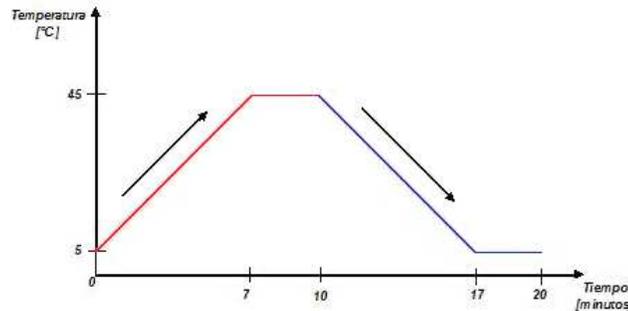


Figura 3.10 Representación del ciclo aplicado mediante ensayos acelerados a dispositivos electrónicos.

Los ensayos acelerados se plantean de tal forma que el efecto de las variables utilizadas en el proceso sean lo más cercanas a las condiciones donde normalmente se encuentran operando los dispositivos, pero en este caso la hipótesis que se planteó fue la de acelerar los fenómenos empleando condiciones extremas.

Una de las ventajas que presentan este tipo de pruebas es el control de todos aquellos parámetros que están involucrados en las condiciones de servicio, desarrollando ensayos bajo condiciones definidas como críticas (atmósferas marinas e industrial- marino), obteniendo resultados en primer instancia de tipo cualitativo, dando el antecedente para evaluaciones cuantitativas, las cuales se podrán plantear con base en los datos generados.

3.5.2 Determinación de los gases inyectados en ensayos acelerados

Otro de los aspectos importantes es poder evaluar el comportamiento de los gases inyectados durante el ensayo [lo cual se presenta en la Figura 3.11]; esto se logra gracias al monitoreo realizado mediante un detector de gases con sensores para SO_2 y NO_2 que indican la cantidad del gas que se encuentra dentro de la cámara graficando su comportamiento ante la interacción de los ciclos de temperatura Figura 3.11, proporcionando los valores en ppm Tabla 3.2

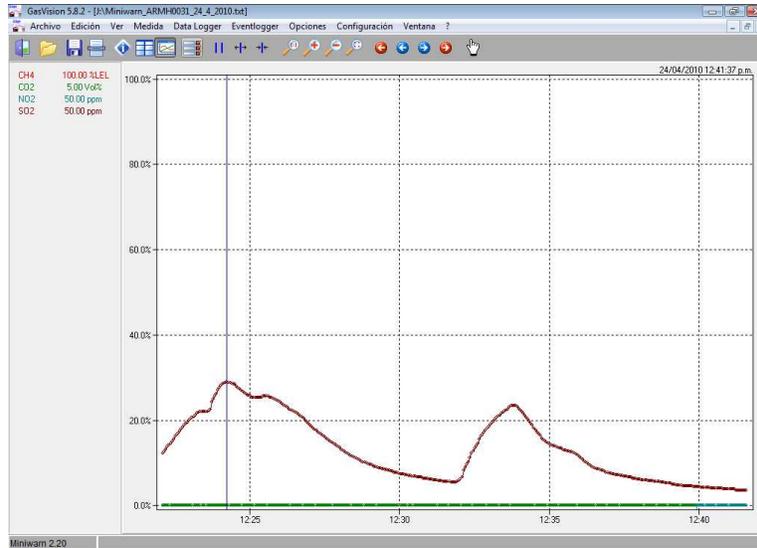


Figura 3.11 Comportamiento del SO_2 al incrementar la temperatura de ensayo, el pico se presenta a una temperatura de 40 °C.

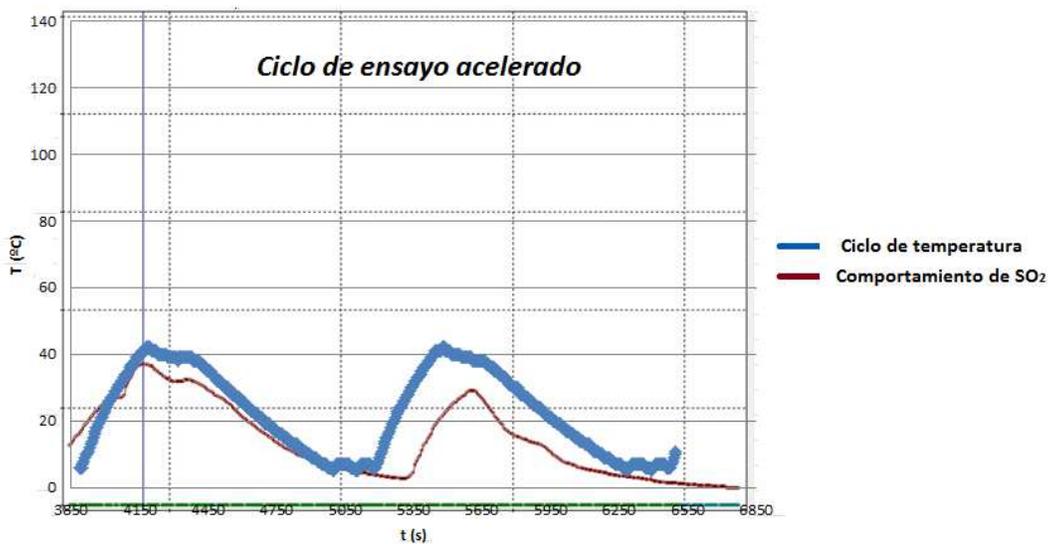


Figura 3.12. Comparativo entre el comportamiento del SO_2 y el ciclo de temperatura empleado en los ensayos acelerados.

Estos datos son de suma importancia para la correlación entre el tiempo real de exposición y de laboratorio, considerando la difusión de los gases en cierto periodo del día, siendo este periodo lo más significativo para la presencia de los efectos corrosivos en las aleaciones de Cobre (Cu), dando como resultado los periodos del día en que los materiales son más propensos al fenómeno corrosivo.

Cabe mencionar que el SO₂ a bajas temperaturas tiende a depositarse en la superficie de los componentes, llevando a cabo una reacción electroquímica con el entorno acuoso (condensado acumulado). En el caso del NO₂, se tiene un comportamiento muy similar pero con mucho menor presencia con relación al SO₂.

La Tabla 3.2 muestra los valores en ppm registrados durante el ciclo, a los 15° C para el NO₂ los valores registrados son de 5.8 ppm, siendo para el SO₂ de 6.1 ppm. La Tabla 3.3 a 40°C muestra que los valores de ambos gases se elevaron teniendo como máximos para el NO₂ 13.4 ppm y para el SO₂ 14.5 ppm.

Tabla 3.2 Valores correspondientes a los gases inyectados en un ciclo del ensayo acelerado por corrosión, etapa enfriamiento.

Tipo		Online [1s]	Gas	CH4	CO2	NO2	SO2
Localización		A7 I	Unidades	%LEL	Vol%	ppm	ppm
Ident. ID		-	Ajustar A1	10.00	4.00	20.00	30.00
			Ajustar A2	20.00	4.50	30.00	40.00
		12:22:06 p.m.	0.00	0.00	-5.80	6.10	
		12:22:09 p.m.	0.00	0.00	-5.90	6.30	
		12:22:12 p.m.	0.00	0.00	-6.20	6.60	
		12:22:15 p.m.	0.00	0.00	-6.40	6.90	
		12:22:18 p.m.	0.00	0.00	-6.60	7.10	
		12:22:22 p.m.	0.00	0.00	-6.80	7.30	
		12:22:25 p.m.	0.00	0.00	-7.10	7.50	
		12:22:28 p.m.	0.00	0.00	-7.40	7.80	
		12:22:31 p.m.	0.00	0.00	-7.60	8.10	
		12:22:34 p.m.	0.00	0.00	-7.80	8.30	
		12:22:37 p.m.	0.00	0.00	-8.00	8.50	
		12:22:40 p.m.	0.00	0.00	-8.20	8.70	
		12:22:44 p.m.	0.00	0.00	-8.40	9.00	
		12:22:47 p.m.	0.00	0.00	-8.60	9.20	
		12:22:50 p.m.	0.00	0.00	-8.80	9.40	
		12:22:53 p.m.	0.00	0.00	-9.00	9.60	
		12:22:56 p.m.	0.00	0.00	-9.10	9.70	
		12:22:59 p.m.	0.00	0.00	-9.30	10.00	
		12:23:02 p.m.	0.00	0.00	-9.50	10.10	
		12:23:05 p.m.	0.00	0.00	-9.70	10.30	
		12:23:09 p.m.	0.00	0.00	-9.80	10.40	
		12:23:12 p.m.	0.00	0.00	-9.90	10.60	
		12:23:15 p.m.	0.00	0.00	-10.10	10.80	
		12:23:18 p.m.	0.00	0.00	-10.20	10.90	
		12:23:21 p.m.	0.00	0.00	-10.30	11.00	
		12:23:25 p.m.	0.00	0.00	-10.30	11.00	
		12:23:28 p.m.	0.00	0.00	-10.20	11.00	

Tabla 3.3 Valores correspondientes a los gases inyectados en un ciclo del ensayo acelerado por corrosión, etapa calentamiento.

Tipo	Online [1s]	Gas	CH4	CO2	NO2	SO2
Unidades		%LEL	Vol%	ppm	ppm	
Localización A7 I	Ajustar A1	10.00	4.00	20.00	30.00	
Ident. ID	Ajustar A2	20.00	4.50	30.00	40.00	
	12:23:35 p.m.	0.00	0.00	-10.20	11.00	
	12:23:38 p.m.	0.00	0.00	-10.50	11.10	
	12:23:41 p.m.	0.00	0.00	-10.90	11.30	
	12:23:44 p.m.	0.00	0.00	-11.30	12.10	
	12:23:47 p.m.	0.00	0.00	-11.70	12.50	
	12:23:50 p.m.	0.00	0.00	-12.00	12.80	
	12:23:53 p.m.	0.00	0.00	-12.30	13.10	
	12:23:56 p.m.	0.00	0.00	-12.50	13.50	
	12:24:00 p.m.	0.00	0.00	-12.80	13.80	
	12:24:03 p.m.	0.00	0.00	-13.10	14.10	
	12:24:06 p.m.	0.00	0.00	-13.30	14.20	
	12:24:09 p.m.	0.00	0.00	-13.30	14.30	
	12:24:12 p.m.	0.00	0.00	-13.40	14.40	
	12:24:15 p.m.	0.00	0.00	-13.40	14.50	
	12:24:18 p.m.	0.00	0.00	-13.30	14.40	
	12:24:21 p.m.	0.00	0.00	-13.20	14.40	
	12:24:25 p.m.	0.00	0.00	-13.20	14.30	
	12:24:28 p.m.	0.00	0.00	-13.00	14.20	
	12:24:31 p.m.	0.00	0.00	-12.90	14.20	
	12:24:34 p.m.	0.00	0.00	-12.70	14.00	
	12:24:37 p.m.	0.00	0.00	-12.60	13.80	
	12:24:40 p.m.	0.00	0.00	-12.40	13.70	
	12:24:43 p.m.	0.00	0.00	-12.20	13.50	
	12:24:47 p.m.	0.00	0.00	-12.10	13.40	
	12:24:50 p.m.	0.00	0.00	-11.90	13.20	
	12:24:53 p.m.	0.00	0.00	-11.80	13.10	
	12:24:56 p.m.	0.00	0.00	-11.70	12.90	

3.5.3 Resultados de especímenes sometidos a ensayos acelerados

Una vez retiradas las muestras de los diferentes dispositivos electrónicos (Figura 3.13, 3.14) sometidas a ensayos acelerados por corrosión, se corrobora la existencia de una reacción electroquímica generada entre la interface del sustrato sólido y la capa acuosa producto del cúmulo de condensado.

Al inspeccionar los dispositivos electrónicos la filtración de humedad (Figura 3.15) es notoria al encontrar residuos de condensado justo en el sello que garantizaría hermeticidad; si bien es cierto que a condiciones normales de operación se presenta este fenómeno, al simular de forma acelerada bajo condiciones extremas (90%HR, ciclos de temperatura 40°C máx.- 5°C min., 14.5 ppm SO₂, 13.4ppm NO₂).

Acorde con las imágenes, las áreas anódicas se encuentran en las zonas adyacentes a donde se depositan los productos de reacción, mientras que las catódicas corresponderán a las regiones definidas entre las zonas de depósito. Debido al acceso inmediato del oxígeno del aire a la capa líquida de la superficie, la reacción anódica tiende a ser la limitante del proceso más que la reacción catódica.

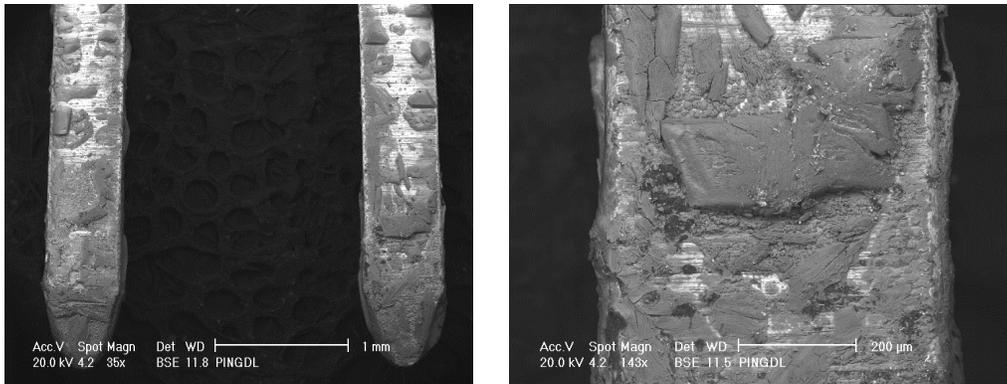


Figura 3.13 Pines IDE expuestos a simulación acelerada por 150 ciclos, evidente deterioro sufrido en la superficie, así como acumulación de depósitos corrosivos.

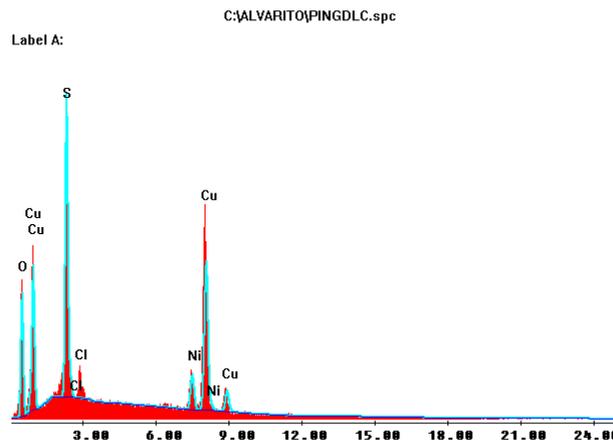


Figura 3.14 El espectro muestra el análisis realizado a los pines expuestos a pruebas de simulación acelerada por corrosión atmosférica, la cuantificación de elementos permite considerar la precipitación de sulfatos de cobre fundamentalmente.

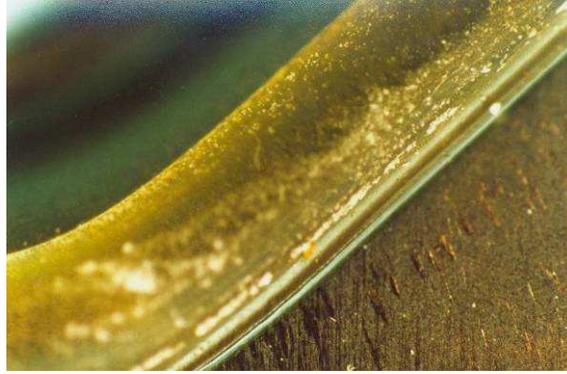


Figura 3.15 Filtración de humedad, con evidencia de condensado al interior de dispositivo electrónico.

El deterioro que sufren las terminales de conexión en las tarjetas controladoras es evidente a simple vista (Figura 3.16), la cual se presenta después de ser sometidos a 200 ciclos de prueba, en donde al realizar el diagnóstico de operación planteado en la Metodología de evaluación, éstos ya no funcionan.

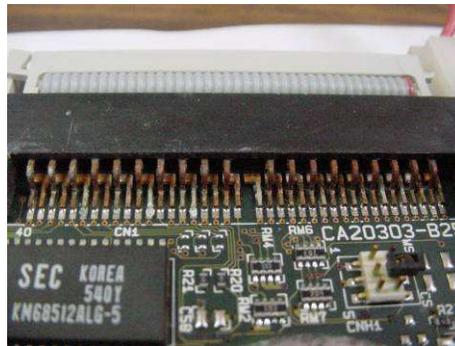
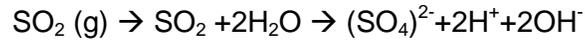


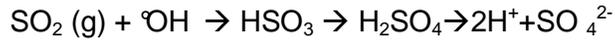
Figura 3.16 Terminales de cobre presentando productos de corrosión después de ser sometidos a ensayos acelerados. El cambio de tonalidad (verdoso), indica el deterioro sufrido.

En términos generales la fase acuosa generada ante combinación entre humidificación y disminución de temperaturas durante el ensayo actúa no solamente como un medio propicio para las reacciones electroquímicas, sino también como un solvente para los constituyentes atmosféricos como gases o partículas suspendidas en el ambiente.

De acuerdo a las condiciones de ensayo el gas más representativo que interactúa en el fenómeno corrosivo es el SO_2 , el cual se considera moderadamente soluble en medios acuosos dando como resultado una reacción de la siguiente forma:



Justo al depositarse en la superficie del elemento evaluado, inicia la reacción en fase gaseosa con el radical $\cdot\text{OH}$, dando lugar a H_2SO_4 , convirtiéndose en ácido sulfúrico y disociándose de forma iónica al disolverse en agua.



Al evaluar las superficies de los platos de sistemas de almacenamiento magnético de datos, se corrobora que no existe hermeticidad de este tipo de dispositivos Figura 3.17. La existencia de los gases contaminantes en el interior se corrobora por los análisis químicos realizados a las muestras seleccionadas, donde los espectros permiten inferir con relación a presencia y concentración.

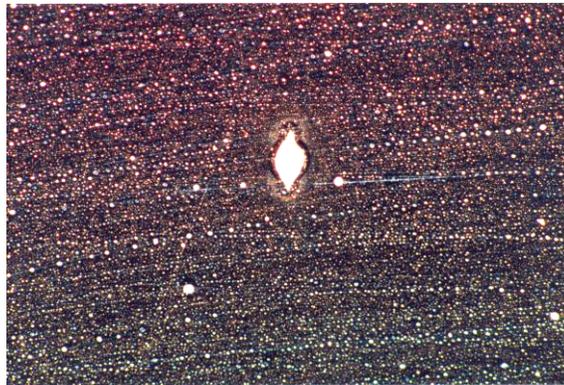


Figura 3.17 Muestra de la filtración de humedad y desgaste de la capa de C, sobre la superficie de almacenamiento magnético de datos.

Como se mencionó en el Capítulo 1, los efectos mecánicos contribuyen a que el efecto de la corrosión se presente, al generar un efecto de sinergia, por ejemplo en los dispositivos de almacenamiento magnético al existir las distancias tan reducidas de vuelo entre cabeza de lectura-escritura y la superficie del disco se producen colisiones generando desgaste, por lo que al estar en contacto con la humedad presente da lugar a productos de la corrosión y en casos extremos al desprendimiento de la cabeza de lectura-escritura.

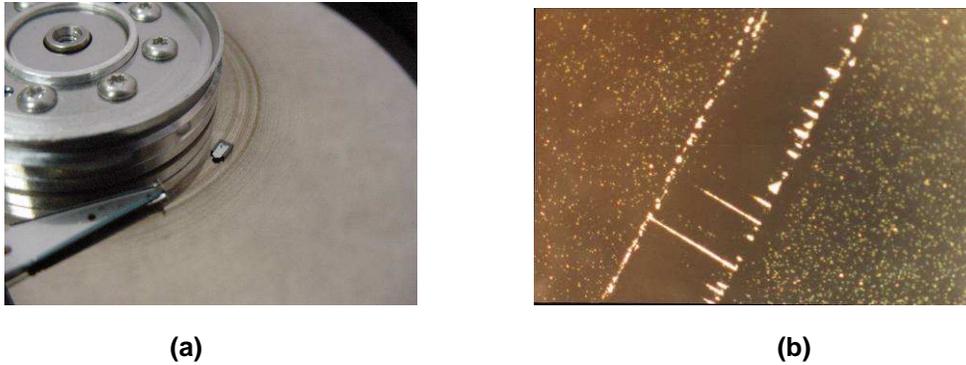


Figura 3.18 (a) Desprendimiento de la cabeza de L/E, debido a la colisión entre cabezal y superficie del disco justo al inicio del diagnóstico después de ser sometido al ensayo por CA. (b) Marcas de vuelo sobre la superficie del disco, dicho efecto pudo haberse presentado por efecto de vibraciones.

Los resultados obtenidos al analizar especímenes de campo, muestran la influencia de cada una de las atmósferas y condiciones climatológicas sobre los dispositivos electrónicos. Como se observa en las imágenes en primer instancia lo más significativo es la existencia del cumulo de polvo que funge como abrasivo dejando expuesto el material al ambiente donde opera, así mismo la existencia de condensados que generan una reacción electroquímica principalmente en terminales de circuitos integrados, y de contaminantes atmosféricos de acuerdo a análisis por MEB. Por otra parte, las pruebas de laboratorio validan el deterioro sufrido en este tipo de componentes ante condiciones de humedad y temperatura, determinando qué tipo de gases contaminantes son los más agresivos y que propician fallo en los dispositivos, tal es el caso del SO_2 y el NO_2 , siendo el primero el más representativo de acuerdo a lo reportado en las Tablas 3.2 y 3.3 correlacionando y validando lo anterior con los análisis químicos por EDS en aquellos elementos que han dejado de operar.

Así mismos, los ensayos de laboratorio, predicen la vida útil de los dispositivos de acuerdo al tipo de atmósfera en el que se puedan encontrar operando, lo cual ayudaría en el diseño de este tipo de componentes así como de tarjetas controladoras para evitar fallos prematuros.

Se confirma que el deterioro sufrido en equipo electrónico va de la mano con la actividad propia (agrícola, industrial etc.) desarrollada en cada región, siendo notorio el efecto tan agresivo de una atmósfera Marino-Industrial, donde además de existir gases contaminantes se cuenta con la presencia de cloruros siendo una combinación letal para los materiales de dispositivos electrónicos. En el Capítulo 4 se clasificarán de acuerdo al deterioro mostrado en componentes de equipo electrónico a las regiones evaluadas de la República Mexicana, dando lugar al desarrollo del Mapa de corrosividad.

CAPÍTULO 4

MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA

Objetivo.- Integración de la información obtenida dando pauta al desarrollo y conformación del Mapa de Corrosividad Atmosférica como herramienta para la determinación del índice de deterioro sufrido en dispositivos electrónicos por corrosión atmosférica.

4.1 GENERALIDADES

La construcción del mapa de corrosividad para dispositivos electrónicos en la República Mexicana, surge ante la problemática existente en el funcionamiento de éstos por efectos de las condiciones ambientales de cada región de exposición y la ausencia de documento alguno en donde se represente dicho deterioro, considerando climas naturales y climas “artificiales” reproducidos mediante ensayos de laboratorio. Para tal estudio se consideran aquellas regiones climatológicas más representativas para atmosferas urbana, industrial, marina, rural y combinación de alguna de éstas.

Los estudios realizados sobre los efectos de la corrosión atmosférica en equipo electrónico, han dado la pauta para poder mostrar el comportamiento y deterioro de componentes como:

- Circuitos impresos
- Micro componentes de la tarjeta controladora del equipo
- Sistemas de almacenamiento magnético de datos.

Actualmente se cuenta con mapas en donde se muestran las diversas climatologías de algunos países de Latinoamérica incluyendo a México, siendo la plataforma para la construcción de un mapa de corrosividad atmosférica en equipo electrónico de la República Mexicana, considerando sus principales características geográficas; apoyándose en los resultados obtenidos de las diferentes evaluaciones a muestras de campo provenientes de algunas regiones más representativas propicias para el fenómeno de CA en equipo electrónico, así como en el análisis y evaluación de especímenes extraídos de ensayos acelerados.

Los estudios realizados se enfatizan en los componentes electrónicos de tarjetas de teléfono de uso residencial, así como en elementos que constituyen un SAMD; los cuales se ha verificado que presentan problemáticas en su funcionamiento debido a la formación de depósitos de herrumbre en algunos de sus componentes, lo anterior se puede atribuir al diseño de cada uno de

estos equipos puesto que el sello existente en el interior de la carcasa no evita la filtración de polvo, humedad y todos aquellos agentes que se encuentran en la atmosfera.

Para realizar este estudio los especímenes fueron recolectados de las regiones donde se encontraban en operación, para poder identificar lo más próximo posible las condiciones bajo las cuales operan, así mismo recabar la mayor cantidad de datos de estos dispositivos.



Figura 4.1 Entidades que por su climatología son propicias para recolección de especímenes de equipo electrónico.

El muestreo (260 unidades) se llevó a cabo en 16 entidades de la República Mexicana (Figura 4.2) cuyas características son peculiares en cuanto a su climatología y ubicación geográfica.

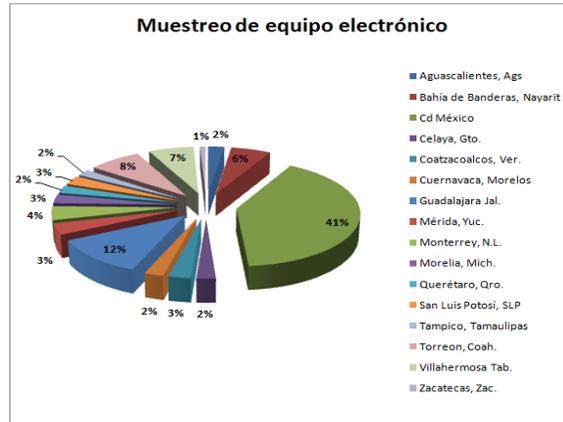


Figura 4.2 Entidades evaluadas en la República Mexicana en porcentaje de especímenes de EE.

4.2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS REGIONES EN ESTUDIO

A continuación se muestran las principales características de las regiones de la República Mexicana en estudio, haciendo énfasis a temperaturas promedio, humedad relativa, así como contaminantes presentes en la región, mencionando el tipo de atmosfera presente en cada caso:

Tabla 4.1 Características generales de las entidades en estudio.

ENTIDAD	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS	CONTAMINANTES PRESENTES	TIPO DE ATMÓSFERA
Cd. de México y Área Metropolitana	Sus coordenadas son: Al norte 19°36', al sur 19°03' de latitud norte; al este 98°57', al oeste 99°22' de longitud oeste	Cuenta con una temperatura promedio anual de 16.8°C; su temperatura máxima promedio es de 19.6 °C con una temperatura mínima promedio de 13.8°C. Las precipitaciones pluviales van de 580 a 1200 mm. Su humedad relativa es variable de acuerdo a las estaciones del año, teniendo un promedio del 40% al 60%. Ubicada a una altitud de 2240 m SNM. Clima Predominante: <u>Templado subhúmedo con lluvias en verano.</u>	Las concentraciones de NO _x , CO ₂ , y SO ₂ son las más representativas para la corrosión, así como partículas suspendidas.	Urbano
Cocoyoc – Oaxtepec (Morelos)	Se localiza a 18°54' latitud norte, 98°58' longitud oeste	Cuenta con una temperatura promedio anual 21.5°C, teniendo una temperatura máxima promedio de 24.5°C y con una temperatura mínima de 19°C con precipitación pluvial promedio de 900 mm a 1385 mm, teniendo una humedad relativa entre el 50% y 70%. Ubicada a una altitud de 1320 m SNM. Clima Predominante: <u>Cálido subhúmedo con lluvias en verano</u>	Contaminantes propios de las prácticas agrícolas características de la región, así como presencia mínima de contaminantes característicos de las fuentes móviles.	Rural
Cuernavaca (Morelos)	Capital del estado de Morelos con 18°55' de latitud norte, 99°44' longitud oeste.	Cuenta con una temperatura media anual de 20.7°C, con temperatura máxima promedio de 23.5°C y temperatura mínima de 18.2°C, con una precipitación pluvial de 1146 mm a 1529 mm, teniendo una humedad relativa entre 52% -70%. Ubicada a una altitud de 1480 m SNM. Clima Predominante: <u>Cálido subhúmedo con lluvias en verano.</u>	Contaminantes propios de las prácticas agrícolas, así como presencia de contaminantes característicos de las fuentes móviles.	Urbano

Determinación del grado de corrosividad, en materiales de equipo electrónico, por efectos ambientales

<p style="text-align: center;">Guadalajara (Jalisco)</p>	<p>Guadalajara se localiza en el Valle de Atemajac; con una altitud de 1,567 metros sobre el nivel del mar, con 20°37' latitud norte, al este 101°28' 105°14' longitud oeste.</p>	<p>Su temperatura media anual es de 21°C, con una temperatura máxima promedio de 24°C y una temperatura mínima promedio de 16.5°C. La precipitación pluvial promedio es de 987.6 mm, con una humedad relativa entre 35% y 60%. Ubicada a una altitud de 1567 m SNM.</p> <p>Clima Predominante: <u>Semicálido subhúmedo con lluvias en verano.</u></p>	<p>En la ciudad de Guadalajara se tiene la presencia de monóxido de carbono, ozono, dióxido de nitrógeno, así como óxidos de azufre.</p>	<p style="text-align: center;">Urbano</p>
<p style="text-align: center;">Bahía de Banderas (Nayarit)</p>	<p>Sus Coordenadas al norte 21°03', al sur 20°44' de latitud norte; al este 104°58' y al oeste 105°32' de longitud oeste.</p>	<p>Temperatura media anual es de 24°C, contando con una temperatura máxima promedio de 29°C y una temperatura mínima de 18°C, con una humedad relativa entre 60% y 88%, con una precipitación pluvial promedio de 1,159.2 mm. Ubicada a una altitud de 40 m SNM.</p> <p>Clima Predominante: <u>Cálido subhúmedo con lluvias en verano.</u></p>	<p>Contaminantes característicos de la costa (cloruros), adicional a lo cuales se considera la presencia de productos de la actividad agrícola.</p>	<p style="text-align: center;">Marino</p>
<p style="text-align: center;">Coatzacoalcos (Veracruz)</p>	<p>Sus Coordenadas 18°09 latitud norte, 94°25' longitud oeste.</p>	<p>Tiene 26 °C de temperatura media anual, con temperatura máxima promedio de 28°C y temperatura mínima promedio de 21°C y precipitación pluvial promedio de 2921 mm, con una humedad relativa entre el 65% y 82%. Ubicada a una altitud de 50 m SNM.</p> <p>Clima Predominante: <u>Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano.</u></p>	<p>Emisiones producto de la industria petroquímica, así como condiciones de salinidad en combinación con la elevada humedad relativa. Lo anterior marca a esta región en una de las de mayor índice de corrosividad atmosférica en el país.</p>	<p style="text-align: center;">Marino – Industrial</p>
<p style="text-align: center;">Tampico (Tamaulipas)</p>	<p>Sus Coordenadas 22°16' latitud norte,</p>	<p>Cuenta con una temperatura media anual de 24.7 °C, con una temperatura máxima promedio de 30°C y una temperatura mínima promedio de 18°C, con 1105.8 mm de precipitación pluvial promedio</p>	<p>Se caracteriza por la presencia de los contaminantes típicos de una atmósfera marina, a la cual se debe</p>	<p style="text-align: center;">Marino – Industrial</p>

Determinación del grado de corrosividad, en materiales de equipo electrónico, por efectos ambientales

	97°47' longitud oeste.	<p>anual, y humedad relativa entre el 64% y 75%. Ubicada a una altitud de 10 m SNM.</p> <p>Clima Predominante: <u>Cálido Subhúmedo con Lluvias en verano.</u></p>	<p>adicionar los contaminantes generados por la actividad de la industria pesada en la zona.</p>	
Villahermosa (Tabasco)	<p>Sus Coordenadas al norte 18°39', al sur 17°15' de latitud norte; al este 91°00', al oeste 94°07' de longitud oeste.</p>	<p>La temperatura máxima promedio anual es de 29°C y una temperatura mínima promedio de 24°C teniendo una temperatura media anual de 26.9° C y humedad relativa entre 64% y 80%; la variación de temperaturas promedio anuales, tiene una amplitud de apenas 1.5° C. Las grandes masas de aire caliente y húmedo provenientes del Golfo de México provocan fuertes precipitaciones que van de los 1,500 mm en la costa, hasta los 4,000 mm en la sierra. Ubicada a una altitud de 10 m SNM.</p> <p>Clima Predominante: <u>Cálido húmedo con abundantes Lluvias en verano.</u></p>	<p>Se tiene la presencia principalmente de cloruros así como de SO₂.</p>	Marino - Industrial.
Celaya (Guanajuato)	<p>Sus Coordenadas 101° 48' 55" longitud oeste del Meridiano de Greenwich y 20° 31' 24" latitud norte.</p>	<p>La temperatura media anual es de 20.65° C. con una temperatura máxima promedio de 24°C y una temperatura mínima de 15.8°C y humedad relativa entre 35% y 60%, con una precipitación pluvial promedio de 598 mm anuales. Ubicada a una altitud de 1750 m SNM.</p> <p>Clima Predominante: <u>Semiseco Templado.</u></p>	<p>Se tienen Óxidos de nitrógeno, ozono, componentes amoniacales y además se tiene la presencia de cloro en una muy baja proporción, así como partículas suspendidas producto de emisiones móviles e industria</p>	Rural-Industrial
Morelia (Michoacán)	<p>Sus Coordenadas 19° 42' 10" latitud norte y 101° 11' 32" longitud oeste.</p>	<p>La temperatura promedio anual es de 18.6° C, cuenta con una temperatura máxima promedio anual de 24.5°C y una temperatura mínima de 15°C con una humedad relativa entre 38% y 60% teniendo una precipitación pluvial promedio anual de 780.2 mm. Ubicada a</p>	<p>Se tiene principalmente partículas suspendidas totales a causa de la actividad industrial y vehicular, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y</p>	Urbano – Rural

		una altitud de 1921 m SNM. Clima Predominante: <u>Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano.</u>	cloruros.	
Querétaro (Querétaro)	Sus Coordenadas 20° 31' a 20° 56' de latitud norte y entre los 100° 9' a 100° 36' de longitud oeste.	La temperatura media anual es 18.7° C, con una temperatura máxima promedio anual de 21.5°C y una temperatura mínima promedio anual de 15°C su humedad relativa oscila entre 36% y 58%, con una precipitación pluvial promedio anual de 548 mm. Ubicada a una altitud de 1820 m SNM. Clima Predominante: <u>Semiseco Templado.</u>	Se tienen partículas suspendidas ocasionadas por la actividad vehicular, óxidos de nitrógeno, cloruros, ozono y componentes amoniacales.	Urbano – Industrial.

4.3 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE CORROSIVIDAD DE ACUERDO AL TIPO DE ATMÓSFERA EXISTENTE

Basándose en la **Clasificación de ambientes de intemperie para protección anticorrosiva**, regida por la **Norma ISO 9223**, se tiene una clasificación general de los diversos ambientes existentes tomando en cuenta Tiempo de Humectación, Climas existentes, así como la definición del grado de corrosividad existente de acuerdo a las condiciones de exposición de los elementos metálicos. Para ello es necesario definir algunos parámetros, con lo cual se podrá describir de forma sencilla el grado de corrosividad por región, mediante la siguiente simbología:

- **T** : Tiempo de humectación
- **P**: Categoría de polución por componentes de azufre basada en los niveles de SO₂ existentes en la atmósfera
- **S**: Categoría de polución basada en los niveles de Cl⁻ existentes en la atmósfera
- **C**: Categoría de corrosividad atmosférica

Factor importante a considerar es que no todos los ambientes tienen el mismo comportamiento, dejando de lado el tipo de clima que se tiene en el lugar, el tipo de atmósfera también cambia, de acuerdo a las actividades que se desarrollan, población, etc.

La clasificación se realiza considerando las atmósferas definidas en Capítulos anteriores como:

- Rural
- Urbano
- Industrial
- Marino

Basándose en los diferentes climas existentes y combinación de los mismos por regiones, se realizó una designación de subclimas (Tabla 4.2), con la finalidad de identificar las regiones más propensas a presentar fenómenos corrosivos.

Así mismo se tiene una subclasificación del tipo de atmósfera en combinación con el tipo de clima, de acuerdo a la ubicación geográfica de la región; dicha subclasificación se presenta de acuerdo a la **Norma ISO 9223**:

Tabla 4.2. Subclasificación de Ambientes.

Ambientes	
Designación	Definición
RS	Ambiente rural seco
RH	Ambiente rural húmedo
IS	Ambiente industrial seco
IH	Ambiente industrial húmedo
M	Ambiente marino
IM	Ambiente industrial-marino

De acuerdo a la **Norma ISO 9223**, se definen los ambientes establecidos en función de los niveles de cloruros así como de bióxido de azufre existentes, aunado a los tiempos de humectación, generándose categorías que por sus actividades correspondientes a la región en estudio se identifican como se muestra en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 Clasificación de categorías de acuerdo a la región evaluada.

CATEGORÍAS	DESCRIPCIÓN
P ₀ ,P ₁ ,S ₀ ,S ₂	Se puede considerar en aquellas zonas en las que dentro de un radio de 5 km. no existan fábricas, industrias pesadas, grandes zonas urbanas y no estén próximas a la línea del litoral.
P ₂ ,P ₃ ,S ₁ ,S ₂ ,S ₃	Se considera cuando dentro de un radio < 5 km, existan fábricas, industrias pesadas o se encuentren grandes núcleos urbanos.
S ₂ ,S ₃	Se considera en las proximidades de la costa, hasta una distancia libre al mar de < 5 km.

Tabla 4.4 Clasificación de categorías de acuerdo al Tiempo de Humectación.

Ambientes	Clasificación de Humectación
Húmedo	τ_4, τ_5
Seco	τ_2, τ_3

Por último se definen las categorías de corrosividad considerando tanto Tiempo de Humectación como niveles de contaminantes existentes por ambiente:

Tabla 4.5 Clasificación de categorías de acuerdo al Tiempo de Humectación.

		Tipo de Atmósfera			
		<i>Rural</i>	<i>Industrial</i>	<i>Marino</i>	<i>Industrial -Marino</i>
Tipo de Ambiente por Tiempo de Humectación	<i>Húmedo</i>	C2, C3, C4	C4, C5	C4, C5	C5
	<i>Seco</i>	C1, C2	C2, C3, C4		

En términos generales se sabe que la concentración de contaminantes depende de factores meteorológicos como la temperatura, la velocidad del viento y de movimientos de sistemas ciclónicos y anticiclónicos los cuales interactúan con la topografía local del lugar en estudio, favoreciendo o no la dispersión de las impurezas de la atmósfera.

Cuando una capa de aire caliente se encuentra bajo una capa de aire frío, se produce una inversión térmica, aun cuando la temperatura suele decrecer con la altitud; con lo anterior la mezcla atmosférica se retarda y los contaminantes se acumulan cerca del suelo, conllevando a la interacción con los elementos expuestos a condiciones atmosféricas.

A la fecha se tiene el monitoreo de la calidad del aire en diferentes regiones del país, realizándose mediante estaciones las cuales indican la cantidad de contaminantes presentes en la atmósfera dependiendo de la región (clima) de la República Mexicana. La dependencia encargada de dar a

conocer la calidad del aire en México es el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA).

De lo anterior se muestra la relación existente entre los contaminantes monitoreados por región con sus respectivos rangos y unidades, de lo cual se realiza un análisis para la valoración de las regiones propicias a favorecer la presencia de corrosión en equipo electrónico.

Los valores límite permitidos encontrados en las redes de monitoreo, sólo son indicativos para los efectos dañinos a la salud del ser humano, sin embargo tomando estos valores como referencia se correlacionarán dichos parámetros con respecto al deterioro mostrado en los diferentes elementos de equipo electrónico en campo.

Tabla 4.6 Límites permitidos de los principales contaminantes monitoreados en el Distrito Federal de acuerdo a valores establecidos por la Secretaría de Salud [RAMA, 2011]

CONTAMINANTE	LÍMITE PERMITIDO
Ozono (O ₃)	0.110 ppm (como máx. en una Hora)
Dióxido de Azufre (SO ₂)	0.130 ppm (como máx. en 24 Horas)
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	0.210 ppm (máximo en 1 Hora)
Monóxido de Carbono (CO)	11 ppm (máximo diario promedio de 8 Horas)
Partículas PM 10µm	150 µg/m ³ (máximo en 24 Horas)
Partículas PM 2.5µm	65 µg/m ³ (máximo en 24 Horas)
Partículas PST	260 µg/m ³ (máximo en 24 Horas)

La Tabla 4.7, muestra los valores registrados por entidad de estudio, donde se realizó el muestreo, siendo entidades que muestran a nivel nacional mayor probabilidad de presentar corrosión atmosférica en los dispositivos electrónicos que se encuentren en operación bajo esas condiciones ambientales.

Tabla 4.7 Niveles promedio en 24 horas de contaminantes registrados por entidad de estudio. [SINAICA, 2011]

ENTIDAD	Ozono (O ₃) ppm	Dióxido de Azufre (SO ₂) ppm	Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) ppm	Monóxido de Carbono (CO) ppm	Partículas PM 10 (µg/m ³)	Partículas PM 2.5 (µg/m ³)	Partículas PST (µg/m ³)
Cd. de México y Área Metropolitana	0.087	0.018	0.056	3.2	128	30	118
Cocoyoc – Oaxtepec (Morelos)	0.0291	0.0023	0.0256	1.57	S/R	S/R	S/R
Cuernavaca (Morelos)	0.0308	S/R	0.0134	S/R	S/R	S/R	S/R
Guadalajara (Jalisco)	0.050	0.007	0.031	2.4	99	42	S/R
Bahía de Banderas (Nayarit)	(0.019 - 0.112)*	(0.006 - 0.026)*	0.031	(1 - 8.8)*	41.4	S/R	S/R
Coatzacoalcos (Veracruz)	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
Tampico (Tamaulipas)	S/R	S/R	S/R	S/R	26	S/R	S/R
Villahermosa (Tabasco)	S/R	S/R	S/R	S/R	34.89	S/R	S/R
Celaya (Guanajuato)	0.06	0.015	0.002	3.4	S/R	S/R	S/R
Morelia (Michoacán)	0.041	0.0068	0.0055	1.25	26.55	S/R	S/R
Querétaro (Querétaro)	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
Monterrey (Nuevo)	0.056	0.008	0.027	3.00	S/R	70	131

León)							
Torreón (Coahuila)	0.032	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	147
Aguascalientes (Ags.)	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
Mérida (Yucatán)	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R
San Luis Potosí (SLP)	0.028	0.021	0.013	0.7	S/R	S/R	S/R
Zacatecas (Zacatecas)	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R	S/R

* Los valores mostrados corresponden a los máximos y mínimos.

***S/R.- Sin registro.

4.3.1 ASIGNACIÓN DE LOS NIVELES DE DETERIORO EN EQUIPO ELECTRÓNICO

Sustentado en la asignación de los niveles de corrosividad, así como en la clasificación climatológica de la República Mexicana, después de evaluar el deterioro sufrido por los dispositivos electrónicos, se da una clasificación preliminar de las características corrosivas en las regiones en estudio.

Para tales efectos una vez realizada la inspección a las unidades provenientes de campo siguiendo la metodología planteada, se da la asignación de los niveles de agresividad y deterioro clasificándolos en un orden del 1 al 5, definiéndolos de la siguiente forma:

Baja (1).- Los dispositivos electrónicos (circuitos integrados) presentan indicios de deterioro tales como cambios de tonalidad en terminales eléctricas. Para su inspección es necesaria la utilización de microscopía electrónica de barrido, con lo que se determinará la ubicación de la zona en estudio del dispositivo.

Baja - Media (2).- Los dispositivos presentan cierta acumulación de condensado, polvo que afecta la continuidad y transferencia de señal. Típicamente se presentan principalmente en circuitos impresos, pines de alimentación, conectores. Atmósfera rural-urbana.

Media (3).- Los principales contaminantes presentes son NO₂, SO₂, CO₂, Ozono, siendo agentes que aceleran los procesos corrosivos [Ortiz, 2004]; generados por vehículos automotores aunado a la presencia de Industria existente en la región evaluada.

Media - Alta (4).- La acumulación de condensado es más factible en las denominadas “zonas críticas” (espacios muy reducidos donde se localizan las conexiones), considerando las variaciones de HR, altas temperaturas y presencia de contaminantes. Típicamente se presenta este fenómeno en costas del pacífico y zona costera del Golfo de México.

Alta (5).- Notable deterioro teniendo pérdida de masa en terminales y demás elementos que componen un DE. En esta etapa de deterioro es factible observar a simple vista. Las regiones con mayor agresividad son el Istmo de Tehuantepec, así como regiones que desarrollan actividad petrolera siendo atmósferas marino – industrial.

4.3.2 ASIGNACIÓN DEL NIVEL DE CORROSIVIDAD DE ACUERDO A RESULTADOS DE INSPECCIÓN EN ESPECÍMENES DE CAMPO Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Cada uno de los dispositivos provenientes de las regiones en estudio fueron analizados minuciosamente, con la finalidad de identificar los elementos que sufren mayor deterioro por efectos ambientales, la asignación se da con base en los resultados mostrados en el Capítulo 3.

Considerando en términos generales el comportamiento por atmósferas, la que presenta mayor agresividad es la marino – industrial, en donde se encuentran depósitos de cloruros con compuestos de azufre (Figura 4.3a). La presencia de cloro en las zonas costeras se comporta como catalizadores, conllevando al deterioro prematuro de los recubrimientos, atacando el sustrato del material (Figura 4.3b).

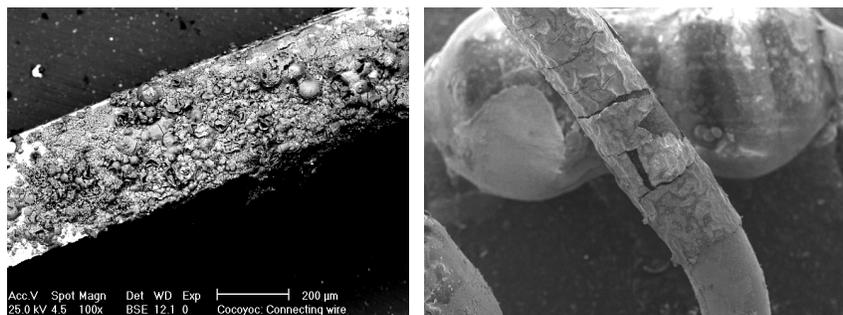


Figura 4.3. (a) Productos de corrosión en un alambre de cobre recubierto con níquel 100x. (b) Conector de una resistencia que sufre el desprendimiento del recubrimiento del conector.

En el caso de las regiones áridas, el deterioro se presenta en menor proporción, sin embargo la presencia de humedad combinado con las altas temperaturas de operación de los dispositivos (25°C - 300°C), conllevan a la generación de fases acuosas dando lugar al desprendimiento de los recubrimientos en conectores (Figura 4.4).

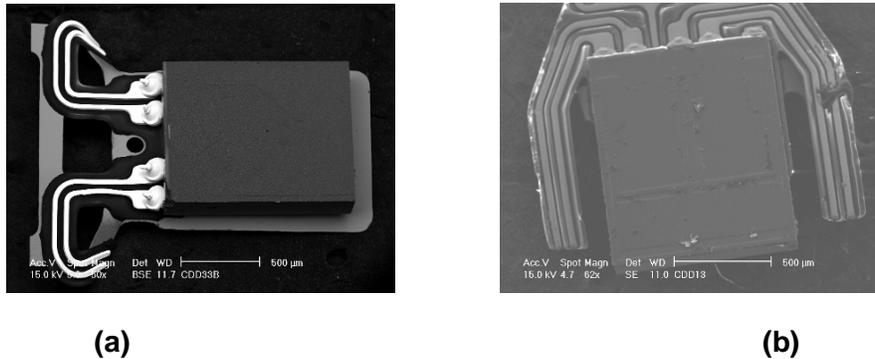


Figura 4.4 (a) Cabeza típica de lectura-escritura de disco duro (nuevo) con conectores de oro, (b) presencia de condensado y desprendimiento del recubrimiento en conectores.

En el caso de conectores provenientes de regiones de clima predominante muy cálido - cálido semiseco se presenta desprendimiento del recubrimiento en menor proporción con respecto a atmósferas industrial, marino o bien la combinación de ambas (Figura 4.5a). Los elementos que se componen de aleaciones de aluminio, es notorio el desgaste sufrido en la superficie conllevando a la posible presencia de fenómenos corrosivos, que al existir se reflejan en el desprendimiento del recubrimiento magnético, teniendo presencia de óxido de níquel, (Figura 4.5b).

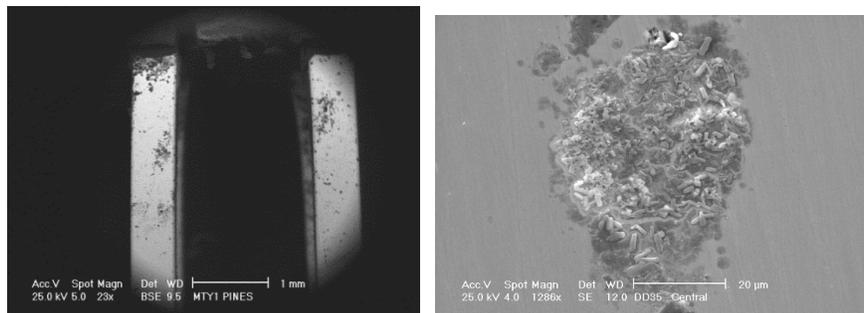


Figura 4.5. (a) Conectores con desprendimiento del recubrimiento de níquel presentándose óxidos en la región de conexión. (b) Superficie de plato de almacenamiento magnético de datos, se aprecian depósitos filiformes. (1286 X), así como presencia de níquel.

La asignación del nivel de deterioro para cada región en estudio se muestra en la Tabla 4.8, donde se indican los principales gases contaminantes que interactúan y favorecen la presencia de productos corrosivos. La identificación de este nivel se llevará a cabo por la asignación de un **Índice de**

Deterioro por Corrosión Atmosférica (IDECA). La propuesta se basa en los resultados obtenidos del muestreo, considerando todas las variables definidas en capítulos anteriores, dando la pauta a la identificación mediante un código, aquellas regiones que son más susceptibles a presentar el fenómeno corrosivo en materiales de equipo electrónico. Cabe destacar que aquellas regiones que no han sido consideradas y que presentan características similares podrán ser clasificadas por el mismo código para poder determinar el grado de corrosividad en dichas zonas de la República Mexicana.

Tabla 4.8 Nivel de deterioro en equipo electrónico por región de estudio.

REGIÓN	ATMÓSFERA	CONTAMINANTES ENCONTRADOS EN ESPECÍMENES ANALIZADOS	NIVEL DE DETERIORO
Cocoyoc – Oaxtepec	Rural	Azufre cloruros partículas de hollín	IDECA - 4
Bahía de Banderas – Puerto Vallarta	Rural – Marino	Cloruros partículas suspendidas	IDECA - 4
Coatzacoalcos	Industrial – Marino	cloruros ozono partículas suspendidas azufre	IDECA - 5
Cd. México	Urbana	óxidos de nitrógeno partículas suspendidas ozono dióxido de carbono	IDECA - 3
Cuernavaca	Urbana	cloro azufre partículas suspendidas	IDECA - 4
Tampico	Industrial – Marino	cloruros sulfuros	IDECA - 5
Celaya	Rural – Industrial	cloruros sulfuros	IDECA - 3

Morelia	Rural – Industrial	azufre cloruros	IDECA - 3
Querétaro	Rural – Industrial	óxidos de zinc	IDECA - 3
Guadalajara	Urbana	azufre partículas suspendidas formación de sales	IDECA - 3
Tabasco	Marino - Industrial	azufre cloro partículas suspendidas	IDECA - 5
Aguascalientes	Urbana	azufre cloruros Polvo	IDECA - 3
Mérida	Rural – Marino	cloruros partículas suspendidas	IDECA - 4
Monterrey	Urbana- Industrial	cloruros azufre partículas adheridas a las pistas.	IDECA - 4
San Luis Potosí	Urbana	azufre estaño plomo	IDECA 3-4
Zacatecas	Urbana- Rural	cobre azufre pequeñas cantidades de Plomo	IDECA - 3

La asignación del IDECA, no sólo queda en un código, su representación por regiones dentro de la República Mexicana, se da por tonalidades en color café (Tabla 4.9), siendo el más oscuro el de mayor grado de corrosividad como se muestra en el siguiente mapa:

Tabla No. 4.9 Clasificación del grado de corrosividad, considerando temperaturas y humedad presentes en las regiones en estudio, así como IDECA.

CLIMAS	IDENTIFICACIÓN	INDICE DE CORROSIÓN
Cálidos- Muy Cálidos / Áridos - Muy Áridos		IDECA 1
Semicalidos /Subhúmedos		IDECA 2
Semicalidos - Subhúmedos /Semiáridos Templados - Subhúmedos		IDECA 3
Cálidos - Semi Cálidos / Húmedos - Subhúmedos		IDECA 4
Muy Cálidos - Cálidos /Húmedos Muy Cálidos - Cálidos /Áridos - Muy Áridos		IDECA 5

La recolección de información de cada región, los mapas existentes, los análisis hechos a especímenes de equipo electrónico dan paso al desarrollo del Mapa de Corrosividad Atmosférica de la República Mexicana en Equipo Electrónico, de acuerdo a la región y características propias de la misma. El siguiente mapa muestra dicho fenómeno de la corrosión en materiales que componen a los dispositivos electrónicos (Figura 4.6).



Figura 4.6 Mapa de corrosividad atmosférica de la República Mexicana.

El cúmulo de información recabada en este estudio, da la pauta al desarrollo de un mapa de corrosividad atmosférica, apoyado en normas internacionales para la validación de ensayos acelerados por corrosión atmosférica. De igual forma se han definido los grados de corrosividad de acuerdo al deterioro existente considerando, como se ha hecho mención, las condiciones climatológicas por regiones, que si bien es cierto por la diversidad de climas existentes en la República Mexicana es difícil tener un mapa detallado del comportamiento del ambiente en equipo electrónico, sin embargo el presente mapa muestra en forma general aquellas regiones en las que se deben tener mayores consideraciones al momento de instalar o bien almacenar sistemas que contengan componentes electrónicos tal es el caso de puertos marítimos.

El índice de corrosividad (IDECA), además de identificar la región bajo la cual estará expuesto el equipo electrónico, da la pauta para un mejor diseño y distribución de los componentes en las tarjetas controladoras pues nos dictamina que tipo de elementos contaminantes existen por región dentro del País, cabe mencionar que en el caso de la Península de Baja California , ni la zona fronteriza con EUA, fueron evaluadas, sin embargo se hace una aproximación que de acuerdo a sus características climatológicas se tiene con otras regiones de la República Mexicana. Lo anterior se puede aplicar también para aquellos microclimas que no se han evaluado, pero se tiene conocimiento de las actividades que se desarrollan, pudiendo asignar un IDECA.

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSIONES

De acuerdo a las regiones evaluadas se concluye que ante los diagnósticos realizados los dispositivos provenientes de la región del Golfo de México, son los que presentan en mayor proporción deterioro causado por el alto porcentaje de humedad relativa, temperatura, presencia de cloruros y precipitaciones pluviales, lo anterior se corrobora en las muestras de campo obtenidas, las cuales presentan indicios de acumulación de condensado y en sus elementos electrónicos cambios de tonalidad y por ende inconvenientes en el funcionamiento del dispositivo.

La evaluación en la zona centro del país, indica que los factores que conllevan en mayor proporción a la corrosión atmosférica son los contaminantes, ya que en cuestión de humedad y temperatura no se tienen valores tan altos como en la costa o regiones de tipo tropical- húmedo con altas concentraciones de cloruros. Las partículas suspendidas en el aire son factor importante en el desgaste de aquellos componentes de conexión así como el deterioro en elementos que se tienen en la tarjeta controladora del dispositivo. Por consecuencia se concluye que la baja humedad relativa característica de la Ciudad de México se traduce en menores índices de deterioro en el equipo electrónico, si bien para esto habrá que considerar la existencia de microclimas en zonas metropolitanas.

En los análisis realizados se ha encontrado que la miniaturización de los componentes electrónicos, conlleva a tener alta susceptibilidad de presentar deterioro debido a la acumulación de condensado, generando depósitos que propician el fenómeno corrosivo, como resultado de ello se tiene que del total de la muestra el 44% presenta indicios, cabe mencionar que los especímenes evaluados son del 2000 a la fecha.

Se valida la importancia de implementar ensayos de forma acelerada para la predicción del comportamiento de dispositivos de equipo electrónico. Los dispositivos electrónicos estuvieron expuestos a 200 ciclos dentro de la cámara de simulación acelerada lo cual equivale a 200 días de exposición en tiempo real bajo condiciones extremas (5°C – 40°C, 85%-90% HR), equivalente a las condiciones ambientales de la zona costera aunado a la presencia de gases contaminantes más

representativos de las diferentes regiones evaluadas, teniendo como ventaja la rapidez con que se puede tener resultados certeros.

Como dato, cada ciclo acelerado en laboratorio tiene una duración de 20 minutos, lo cual en tiempo real equivale a 1440 minutos, lo cual sólo representa el 1.11% del tiempo que se tendría que esperar para obtener los mismos resultados de deterioro en una componente, de ahí la importancia de implementar este tipo de ensayos para evaluación de muestras.

Cabe mencionar que las pruebas aceleradas realizadas dentro de los laboratorios de la UDIATEM, permiten correlacionar el deterioro sufrido en dispositivos electrónicos con el sufrido en campo permitiendo la predicción del comportamiento de los materiales. Como dato, tanto en especímenes de campo como en ensayos de laboratorio, el SO₂, es el contaminante con más presencia en el deterioro de los componentes electrónicos.

La cuantificación realizada en los especímenes indica que los contaminantes más representativos son el SO₂ (del 2% al 20% de la cuantificación acorde al número de especímenes evaluados mediante análisis por EDS, así como óxidos de Nitrógeno en menor proporción (NO_x), esto en regiones industriales y urbanas.

Se han identificado los principales elementos susceptibles al deterioro por corrosión son:

1. Pines IDE – Alimentación.- Elemento principal que sufre deterioro causando mala conductividad.
2. Circuitos integrados.- Se presenta en terminales de conexión, formando sulfatos de Cu, por el cúmulo de condensado, aunado al sobrecalentamiento del componente en el momento de operar.
3. Pistas conductoras de la tarjeta impresa.- deterioro por causa de acumulación de condensado siendo muy susceptible a efectos de humedad.
4. Capacitores y demás elementos.- Al igual que los demás componentes sufren deterioro en terminales expuestas al ambiente, sin embargo presentan mayor resistencia a la corrosión de acuerdo a los ensayos acelerados a los que se sometieron.
5. Sello protector de la carcasa.- Aunque se han mejorado los materiales de este elemento, sigue existiendo filtración de humedad en discos duros.
6. Cabeza de L/E.- El deterioro sufrido en estos elementos se da por el choque entre cabezal y plato debido a la vibración existente o producto de la interrupción en el envío de la señal para su óptimo funcionamiento.

En lo que si no se ha hecho énfasis es en el estudio de materiales y formas de encapsulado de los circuitos integrados, así como la forma de proteger todos los componentes de la tarjeta controladora.

En el caso de los fallos por cuestiones mecánicas actualmente se trabaja con nuevas tecnologías (*Western Digital-Tecnología Shock Guard, aplicada en unidades con capacidad de 320 GB en adelante y velocidad de rotación de 7200 rpm*) para evitar las vibraciones existentes así como golpes mientras se encuentra en operación para el caso de discos duros y con ello tratar de disminuir las colisiones entre cabezal y superficie del plato.

Uno de los objetivos de este trabajo es que lo reportado sea tomado en cuenta para cuestiones de diseño, montaje, transporte, y almacenamiento de componentes electrónicos, pues al conocer el comportamiento de los materiales ante diversos medios de interacción (atmosferas), se puede prevenir en gran medida el deterioro de estos. En futuros trabajos se recomienda hacer un estudio de los principales recubrimientos que se pudiesen colocar en los componentes electrónicos, formas de encapsulado o bien una mejor distribución sobre las tarjetas controladoras.

Finalmente lo anterior da lugar al desarrollo de un Mapa de Corrosividad, así como la determinación de un Índice de Deterioro (IDECA), para materiales en equipo electrónico, que si bien cada uno de ellos requiere un análisis de forma independiente ante circunstancia diversas, combinación de parámetros, lo presentado es una muy buena aproximación para conocer más el comportamiento de materiales no ferrosos que interactúan con el medio ambiente en la República Mexicana.

REFERENCIAS

1. Abbott, W. Atmospheric Corrosion of Control Equipment. The Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, Inc. NACE International, 1993.
2. Abbott, W. The Development and Performance Characteristics of Flowing Mixed Gas Test Environments, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol.11, 1989.
3. Abbott, W.H. Mater. Performance, 24 (1985) 46-50; 30, 55, 1991.
4. Arroyave, C., Morcillo, M., The Effect of Nitrogen Oxides in Atmospheric Corrosion of Metals, Corrosion Science, Vol. 37, 293, 1995.
5. Baboian, R., CORROSION 91, Paper No. 371, NACE, 1991.
6. Bastidas, J. M., N. Mora, E. Cano and J.L. Polo, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, "Characterization of copper corrosion products originated in simulated uterine fluids and on packaged intrauterine devices", Volume 12, Number 5, 2004.
7. Bhushan, Bharat. Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices, Springer- Verlag 1990.
8. Britton, S.C., J.C. Sherlock, Br. Corros. J. 9, pp 96, 1974.
9. Brown, P.W., and L.W. Masters, Factors affecting the corrosion of metals in the atmosphere, in Atmospheric Corrosion, Proc. Conf Hollywood, FL, 5-10 October, 1980. John Wiley and Sons, Inc., Somerset, NJ, 1982.
10. Callister, W.D., Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Editorial Reverté, Tomo II, 2000.
11. Cano, E., Azcaray, H., Mora, E.M., Bastidas y J.M. J. Electrochem. Soc., 151, B207, 2004.
12. Castaño, J.C., D. de la Fuente, M. Morcillo, A laboratory study of the effect of NO₂ on the atmospheric corrosion of zinc, Atmospheric Environment 41 pp. 8681–8696, 2007.
13. Cerrud, S., Jacobo, V., Ortiz, A., Schouwenaars, R. Corrosión y Protección, Facultad de Ingeniería UNAM, 2003.
14. Comizzoli, R.B., Frankenthal, R.P., Milner, P.C. y Sinclair, J.D. Science, 234, 340 1986.
15. Elshawesh, F., M. El Agaili, A. Elwaer, Br. Corros. J. 32 (1) pp 77–80, 1997.
16. Eriksson, P., Effect of SO₂ and NO₂ on metal surfaces: atmospheric corrosion of copper and surface reactions on gold. Thesis, University of Goteborg, 1992.
17. Falkenberg, F., Fushimi, K. y Seo, M. Corros. Sci., 45, 2657, 2003.

18. Feliu, S., Bastidas, J.M. "Corrosión y Protección de Metales", Vol. 1, Colección: Nuevas Tendencias 15, CSIC, Madrid, p 181. 1991.
19. Feng, Y., W.K. Teo, K.S. Siow, A.K. Hsieh, The corrosion behavior of copper in neutral tap water, Part I: corrosion mechanisms, Corros. Sci. 38 (3) pp. 369–385, 1996.
20. Frankel, G.S. "Corrosion Mechanisms in Theory and Practice", P. Marcus y J. Oudar, (eds.), Marcel Dekker, Nueva York, p 547, 1995.
21. García, E., Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, UNAM, Instituto de Geografía, 1988.
22. Gesch, S., and P. Heimgartner, Materials and Corrosion 47, 425, 1996.
23. Gouda, V. K., Carew, J. A., Riad, W.T. Investigation of Computer Hardware Failure due to Corrosion. British Corrosion Journal, Vol. 24, 192, 1989.
24. Guttenplan, J. D. Corrosion in the Electronics Industry. Metals Handbook, ASM International, Vol. 13, 1987.
25. Guttenplan, J., Hasimoto, L. Corrosion Control for Electrical Contacts in Submarine Based electronic equipment. Materials Performance, Vol. 18, 1978.
26. Guttman, H., Atmospheric, weather factors in corrosion testing, in: Atmospheric Corrosion, Wiley, New York, 1982.
27. Guttman, H., P.J. Sereda, in: Metal Corrosion in the Atmosphere, ASTM STP, vol. 435, ASTM, Philadelphia, 1968.
28. Haneef, S. J., J. B. Johnson, C. Dickinson, G. E. Thompson and G. C. Wood, Atmos. Environ. 26 A, 2963 , 1992.
29. Hoffmann, M.R., and D.J. Jacob, SO₂, NO and NO₂ Oxidation Mechanisms in Atmospheric Considerations, Acid Precipitation Series Vol.3, ed. J.G. Calvert. Boston, 1984, p. 101.
30. ISO 8407:1991, Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens.
31. ISO 9223:1992 (E). Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres-Classification. International Standard Organization, 1992.
32. ISO 9226:1992. Corrosion of Metals and Alloys, Corrosivity of Atmospheres-Determination of Corrosion Rate of Standards Specimens for the Evaluation of Corrosivity. International Standard Organization, 1992.
33. JEIDA-25, Japanese Electronic Industry Development Association, Standard on SO₂, Japón 1974.
34. JEIDA-32, Japanese Electronic Industry Development Association, Standard on H₂S, Japón 1974.
35. Johansson, E., Leygraf, C. Brit. Corros. Journal., 34,27, 1999.

36. Johnson, J.B., S.J. Haneef, B.J. Hepburn, A.J. Hutchinson, G.E. Thompson and G.C. Wood, Atmos. Environ. 24(10), 2585, 1990.
37. Jouen, S., M. Jean, B. Hannyer, Atmospheric corrosion of nickel in various outdoor environments, Corrosion Science 46 pp. 499–514, 2004.
38. Knotkova, D., and K. Barton, Atmos. Envir. 26A(17), 3169, 1992.
39. Koch, G.H., M. P. H. Brongers, N. G. Thompson, Mater. Perform. 2002, 12, 4.
40. Leygraf, C. y Graedel, T.E. "Atmospheric Corrosion", Electrochemical Society Series, Wiley Interscience, Nueva York, pp 109 y 189, 2000.
41. Lopez, B.G., S.B. Valdez, K. R. Zlatev, P.J, Flores, B.M. Carrillo and W. M. Schorr , Corrosion of metals at indoor conditions in the electronics manufacturing industry; Anti-Corrosion Methods and Materials, 2000.
42. Marcus, P. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, Marcel Dekker Publisher, 2002.
43. Mariaca, R.L., Genesca, J., Uruchurtu, Ch., J. Corrosividad Atmosférica, Plaza y Valdez Editores- UNAM, 1999.
44. Martin, L.R., SO₂, NO and NO₂ Oxidation Mechanisms in Atmospheric Considerations, Acid Precipitation Series Vol.3, p. 63. ed. J.G. Calvert. Boston, 1984.
45. Meeker, W. Q., Escobar, L.S. Statical Methods for Reliability Data, John Wiley & Sons Inc, 1998.
46. Mendoza, A., Francisco Corvo, Ariel Gómez, Jorge Gómez, Influence of the corrosion products of copper on its atmospheric corrosion kinetics in tropical climate, Corrosion Science 46 pp. 1189–1200, 2004.
47. Morcillo, M., E. Almeida, B. Rosales, J. Uruchurtu y, M. Marrocos, Corrosion and protection of metals in the atmospheres of Ibero- America, Part 1, CYTED, Madrid, 1998, p. 568.
48. Odnevall and C. Leygraf, Corrosion. Sci. 16, 1551, 1994.
49. Oesch, S., Corros. Sci. 38, 1357, 1996.
50. Oesh, S., Faller, M., Environmental Effects on Materials: The Effect of the Air Pollutants SO₂, NO₂, NO and O₃ on the Corrosion of Copper, Zinc and Aluminium A Short Literature Survey, and Results of Laboratory Exposures, Corrosion Science, Vol. 39, 105, 1997.
51. Ortiz, A., Jacobo, V.H., Schouwenaars., R., Sánchez., F., Análisis de las Causas de Deterioro en Sistemas de Almacenamiento Magnético de Datos, Revista Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XI No. 4 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México 2010. p.p. 431-443. ISSN 1405-7743.
52. Ortiz, A., Simulación Acelerada de la Corrosión Atmosférica en Equipo Electrónico, Tesis Doctoral, Posgrado de Ingeniería UNAM 2004.

53. Payer, J.H., and S.K. Chawla, Corrosion of Electronic Materials and Devices 2, 186, 1991.
54. Rice, D.W., Cappell, R. J., Kinsolving, W., Laskowski, J. Indoor Corrosion of Metals. Journal of the Electrochemical Society, Vol.127, 1980.
55. Rice, D.W., Peterson, P., Rigby, E.B., Phipps, P.B.P., Cappel, R.J. and Tremoureux, R.: Atmospheric Corrosion of Copper and Silver. Journal of the Electrochemical Society. Vol 128, No 2. 1981.
56. Rice, D.W., Phipps, P.B.P., Tremoureux, R.: Atmospheric Corrosion of Nickel. Journal of the Electrochemical Society. Vol 127, No 3. 1980.
57. Roberge, P.R., Handbook of Corrosion Engineering, Mc Graw-Hill, USA, 2000.
58. Sánchez, F., Ortiz, A., An Atmospheric Corrosion Map For Mexico, The European Corrosion Congress 2011. ESTOCOLMO SUECIA, Septiembre 2011.
59. Sánchez, F., Ortiz, A., Contreras, A., Estudio del Deterioro por Corrosión Atmosférica en Discos Duros y Cabezas de Lectura/Escritura, Memorias del XIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. 2007.
60. Sánchez, F., Ortiz, A., Correlación del Deterioro Sufrido ante Efectos Ambientales y Pruebas de Laboratorio en elementos de Equipo Electrónico, Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. ,2010.
61. Sánchez, F., Ortiz, A., Efectos Ambientales Sobre Equipo Electrónico En La República Mexicana, VIII LATINCORR, Congreso Latinoamericano de Corrosión LIMA PERÚ, 2012.
62. Sánchez, F., Ortiz, A., Evaluación De Recubrimientos De Capa Delgada Empleados En Superficies De Almacenamiento Magnético, XX Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva, 2011.
63. Sánchez, F., Ortiz, A., Mapa de Corrosividad Atmosférica de la República Mexicana en Equipo Electrónico, Memorias del XIX International Conference on Extractive Metallurgy. "Recent Developments in Metallurgy, Materials and Environment", 2010.
64. Sánchez, F., Ortiz, A., Mapa de Corrosividad en Equipo Electrónico para la República Mexicana, Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. 2009.
65. Sánchez., F., Deterioro por Corrosión Atmosférica en Sistemas de Almacenamiento Magnético de Datos, Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM 2005.
66. Shuizhou, Cai., Xianping Xia, Changsheng Xie, Research on Cu²⁺ transformations of Cu and its oxides particles with different sizes in the simulated uterine solution, Corros. Sci. 47 pp. 1039–1047, 2005.
67. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire 2009.<http://sinaica.ine.gob.mx/>

68. Stoch, A., Stoch, J., Gurbiel, J. et al., FTIR study of copper patinas in urban atmosphere, J. Mol. Struct. 596 pp. 201–206, 2001.
69. Strandberg, H., Johansson, L. Role of O₃ in the Atmospheric Corrosion of Copper in the Presence of SO₂. Journal of the Electrochemical Society Vol. 144, No. 7, 1997.
70. Sun-Tae, Kima., Yasuaki Maeda, Yoshio Tsujino, Assessment of the effect of air pollution on material damages in Northeast Asia, Atmospheric Environment 38 pp. 37–48, 2004.
71. Svensson, J.E., Johansson, L.G. A Laboratory Study of the Effect of Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulphure Dioxide on the Atmospheric Corrosion of Zinc. Journal of the Electrochemical Society, Vol. 140, 1997.
72. UNEP/WHO , Urban Air Pollution in Megacities of the World. 1992
73. Van, Y., Ingelgem, I.Vandendael, J.Vereecken, A.Hubin, Study of copper corrosion products formed during localized corrosion using field emission Auger electron spectroscopy, Surface and Interface Analysis, Volume 40 Issue 3-4, pp 273 – 276, 2003.
74. Veleva, L. y Lujá, M. Brit. Corros. Journal., 34, 34, 1999.
75. Veleva, L., B. Valdez, G. Lopez, L. Vargas, J. Flores, Atmospheric corrosion of electro-electronics metals in indoor environment, Corrosion Engineering, Science and Technology 43 (2) pp.149–155, 2008.
76. Wesshler, Ch., Hodgson, A., Wooley, J. Indoor Chemistry: Ozone, Volatile Organic Compounds and Carpets. Environmental Science and Technology. American Chemical Society Vol. 26. No 12, 1992.
77. White, E., Slensky, B. Dobbs. Case Histories and Failures of Electronics and Communications Equipment. Metals Handbook, ASM International, Vol. 13,1987.
78. Zakipour, S. Tidblad, J., Leygraf C. Atmospheric Corrosion Effects of SO₂ , NO₂, and O₃, Journal of the Electrochemical Society, Vol 144,3513, 1997.
79. Zakipour, S., Leygraf, C. Evaluation of Laboratory Tests to Simulate Indoor Corrosion of Electrical Contact Materials, Journal of the Electrochemical Society, Vol 133, 21, 1986.
80. Zamanzadeh, M., Meilink, S.L., Warren, G.W., Wynblatt, P. y Yan, B. Corrosion, 46, 665, 1990.

ANEXO

Artículos publicados en memorias de congresos nacionales e internacionales así como en Revista Ingeniería Investigación y Tecnología.

1. "EFECTOS AMBIENTALES SOBRE EQUIPO ELECTRÓNICO EN LA REPÚBLICA MEXICANA" VIII LATINCORR, Congreso Latinoamericano de Corrosión LIMA PERÚ. Julio 2012
2. "AN ATMOSPHERIC CORROSION MAP FOR MEXICO" The European Corrosion Congress 2011. ESTOCOLMO SUECIA, Septiembre 2011.
3. "EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE CAPA DELGADA EMPLEADOS EN SUPERFICIES DE ALMACENAMIENTO MAGNÉTICO" XX Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México del 18 al 20 de Mayo del 2011.
4. "CORRELACIÓN DEL DETERIORO SUFRIDO ANTE EFECTOS AMBIENTALES Y PRUEBAS DE LABORATORIO EN ELEMENTOS DE EQUIPO ELECTRÓNICO". Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, N.L., México del 22 al 24 de Septiembre del 2010.
5. "MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA DE LA REPÚBLICA MEXICANA EN EQUIPO ELECTRÓNICO". Memorias del XIX International Conference on Extractive Metallurgy. "Recent Developments in Metallurgy, Materials and Environment". CINVESTAV, Universidad de Sonora. Saltillo, Coahuila. México del 18 al 21 de Mayo del 2010.
6. "MAPA DE CORROSIVIDAD EN EQUIPO ELECTRÓNICO PARA LA REPÚBLICA MEXICANA" Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. Instituto Tecnológico Superior de Cajeme. Cd. Obregón, Sonora. México del 23 al 25 de Septiembre del 2009.
7. "ESTUDIO DEL DETERIORO POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN DISCOS DUROS Y CABEZAS DE LECTURA/ESCRITURA." Memorias del XIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, A. C. Instituto Tecnológico de Durango. Durango, Dgo. México del 19 al 21 de Septiembre del 2007.

PUBLICACIONES EN REVISTA

1. "ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DE DETERIORO EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO MAGNÉTICO DE DATOS". Revista Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XI No. 4 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México 2010. p.p. 431-443. ISSN 1405-7743.