



T
620.11223
QUIE



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica



“EVALUACION DE LA CORROSION ATMOSFERICA EN
EL ECUADOR DENTRO DEL MARCO DEL PROYECTO

MAPA IBEROAMERICANO DE CORROSIVIDAD

ATMOSFERICA (MICAT)”

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

WILSON JOHN QUITO TORO



GUAYAQUIL

ECUADOR

AÑO

1994

DECLARACIÓN EXPRESA

“ La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta Tesis, le corresponden exclusivamente al autor; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL ”.

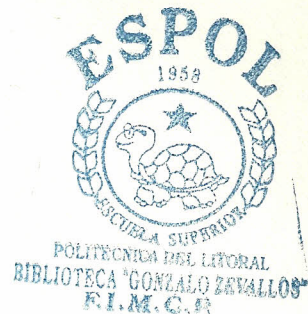
(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



WILSON JOHN QUITO TORO

AGRADECIMIENTO

El autor desea expresar su agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que con su colaboración han hecho posible el desarrollo de esta TESIS. Su especial reconocimiento al **ING. JULIÁN PEÑA**, Director de Tesis y al **ING. JOSÉ PACHECO**, por su invaluable ayuda. Desea agradecer, asimismo, al Sr. **MARCOS ROJANO**, por la asistencia en las pruebas experimentales.



DEDICATORIA

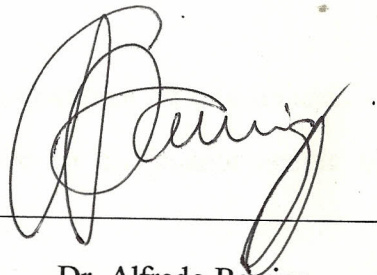
A DIOS y a la VIRGEN MARÍA, por la fe
que tengo.

A MIS PADRES, muy en especial a mi Sra.
madre ALBA TORO GARCÍA.

A MI ESPOSA e HIJA, que siempre
apoyaron para culminar con éxito esta Tesis.

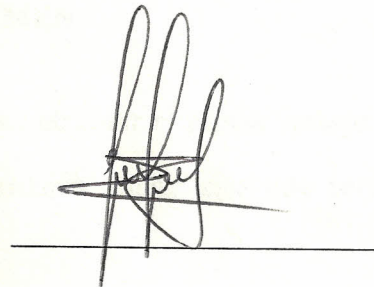
A MI QUERIDA Y SIEMPRE AMADA
ABUELA.

A MI HERMANA Y TÍOS.



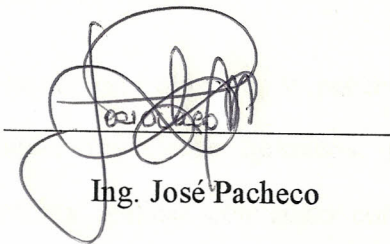
Dr. Alfredo Barriga

DECANO



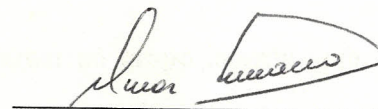
Ing. Julián Peña

DIRECTOR TESIS



Ing. José Pacheco

MIEMBRO TRIBUNAL



Ing. Omar Serrano

MIEMBRO TRIBUNAL



RESUMEN

Con la ejecución de este trabajo, se propone elaborar el primer trabajo experimental realizado en el Ecuador acerca de la corrosión atmosférica que actúa en ciertos metales.

Este trabajo tiene como objetivo conseguir un mayor conocimiento acerca de los mecanismos de corrosión en las distintas atmósferas de estudio; establecer, a través de adecuados tratamientos estadísticos, expresiones matemáticas que permitan el cálculo de la corrosión atmosférica en función de parámetros climáticos y de contaminación; y por último, caracterizar las categorías de corrosividad de cada estación de ensayo.

Toda la metodología empleada, está circunscrita bajo los requerimientos de las normas ISO.

Para lograr este objetivo, se procedió a formar un grupo interdisciplinario en el que participan Ingenieros químicos, mecánicos y medioambientales así también se procedió a realizar convenios con otras instituciones para que intervengan en la ejecución de este trabajo. Estas instituciones colaboraron con la prestación de un espacio físico y custodio de las respectivas estaciones de ensayo. Las estaciones de ensayo son:

Guayaquil (ESPOL); Riobamba (ESPOCH); Salinas (Base Naval); Esmeraldas (REE); Galápagos (San Cristóbal - Base Naval).

Se han elaborado 6 capítulos para realizar este estudio.

En el primer capítulo se hace referencia a las características climáticas que posee nuestro País, con lo cual se establece la clasificación climática que posee cada estación de ensayo de acuerdo a Köppen.

En el segundo capítulo, se incluyen los parámetros medioambientales (tiempo de humectación (TDH), contaminantes atmosféricos (dióxido de azufre (SO_2) y cloruros)) que inciden en la corrosión de los metales en estudio y se hace referencia a la metodología seguida para la determinación de los mismos, así también, se hace una clasificación de la corrosividad basado en datos medioambientales según las normas ISO.

El tercer capítulo trata de la degradación de los materiales y los productos de corrosión que se obtienen cuando estos son expuestos a la atmósfera, también se hace referencia a ecuaciones que gobiernan la cinética de corrosión y se obtiene la clasificación de la corrosividad basado en la velocidad de corrosión de acuerdo a las normas ISO, por último, se obtiene las categorías de corrosividad en función de las anteriores clasificaciones.

En el capítulo cuarto, se pone en ejecución la metodología para la obtención del dato de corrosión.

Finalmente en los capítulos quinto y sexto se presentan los resultados obtenidos y se procede a caracterizar las atmósferas de acuerdo al grado de corrosividad obtenido.

INDICE GENERAL

	pág.
RESUMEN.....	V
INDICE GENERAL.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	IX
INDICE DE TABLAS.....	XII
NOMENCLATURA.....	XIV
INTRODUCCION.....	XV
CAPITULO I: CARACTERISTICAS GENERALES DEL CLIMA EN EL ECUADOR.....	.19
1.1 Factores que controlan las condiciones climáticas.....	22
1.2 Ubicación e influencia de las masas de aire regionales.....	23
1.3 Variables principales del clima.....	26
1.4 Clasificación climática según Köppen.....	32
CAPITULO II: PARAMETROS MEDIOAMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA CORROSION ATMOSFERICA.....	39
2.1 Tiempo de humectación (TDH).....	39
2.2 Acción de los principales contaminantes.....	42
2.3 Clasificación de corrosividad basado en datos medioambientales.....	61
CAPITULO III: LA CORROSION ATMOSFERICA Y SU NATURALEZA ...	63
3.1 Mecanismo de la corrosión atmosférica.....	64
3.2 Clasificación de la corrosividad basado en la velocidad de corrosión.....	78

Atmósfera de Varios
→

3.3 Categorías de corrosividad.....79

3.4 Estudios Electroquímicos
CAPITULO IV: TRABAJO EXPERIMENTAL81

4.1 Tipos de atmósferas..... 81

4.2 Estaciones de ensayo.....82

4.3 Materiales utilizados..... 84

4.4 Secuencias de exposición..... 93

4.5 Procedimiento para la obtención del dato de corrosión atmosférica..... 95

4.5.1 Limpieza de los productos de corrosión

4.5.2 Cálculo de la pérdida de peso

4.5 Determinación de R_p de la Cuarta Probeta
CAPITULO V: RESULTADOS OBTENIDOS..... 99

5.1 Estación de Guayaquil (EC - 01 - A)..... 101

5.2 Estación de Riobamba (EC - 02 - B)..... 102

5.3 Estación de Salinas (EC - 03 - C)..... 103

5.4 Estación de Esmeraldas (EC - 04 - D)..... 104

5.5 Estación de Galápagos (EC - 05 - E)..... 105

CAPITULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS..... 106

6.1 Comportamiento del TDH..... 106

6.2 Comportamiento de los contaminantes atmosféricos..... 107

6.3 Caracterización de la atmósfera por contaminantes..... 109

6.4 Caracterización de la atmósfera por velocidad de corrosión..... 111

6.5 Proyección futura de la evaluación 115

6.6 Cuarta Probeta
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 123

ANEXOS

BIBLIOGRAFIA

ÍNDICE DE FIGURAS

- 1.- Países participantes en el Proyecto MICAT.
- 2.- Regiones naturales del Ecuador.
- 3.- Mapa de las isolíneas de heliofanía en el Ecuador.
- 4.- Mapa de las isotermas de temperaturas medias anuales en el Ecuador.
- 5.- Mapa de isoyeetas de precipitaciones anuales en el Ecuador.
- 6.- Termohigrógrafo instalado en la estación de Guayaquil.
- 7.- Datos de corrosión del cinc frente a contaminación por SO_2 en atmósferas de diferentes puntos de Europa.
- 8.- Variación de la corrosión del acero en función de la salinidad de la atmósfera (método de la candela húmeda), según se deduce de datos de distintos autores.
- 9.- Variación de la salinidad con la distancia a la costa. Datos medios de 29 lugares.
- 10.- Percha de exposición para la captación de SO_2 .
- 11.- Candela de peróxido de plomo.
- 12.- Dispositivo para captar cloruros en las estaciones de ensayo.
- 13.- El espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica influye grandemente en la velocidad de corrosión.
- 14.- Representación de distintas causas de condensación capilar de humedad sobre una superficie metálica en la atmósfera.

- 15.- Mecanismo cíclico de la corrosión atmosférica del acero en presencia del anhídrido sulfuroso o iones cloruros procedentes de sustancias diferentes (hidrolizables o no).
- 16.- Diagrama esquemático que muestra el mecanismo electroquímico del herrumbre atmosférico en un medio ambiente contaminado por SO₂.
- 17.- Verificación aproximada de leyes de tipo $C = A t^n$.
- 18.- Microestructura del acero de bajo carbono.
- 19.- Microestructura del acero galvanizado.
- 20.- Microestructura del cobre.
- 21.- Microestructura del aluminio.
- 22.- Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalado en la ESPOL (Guayaquil).
- 23.- Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalado en la ESPOCH (Riobamba).
- 24.- Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalado en la BASE NAVAL (Salinas).
- 25.- Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalado en la BASE NAVAL (San Cristóbal - Galápagos).
- 26.- Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalado en la REFINERÍA ESTATAL ESMERALDAS (Esmeraldas).
- 27.- Secuencias de exposición de las distintas series de probetas en la atmósfera.



- 28.- Estudios de laboratorio de "la cuarta probeta".
- 29.- Pérdida de peso en función del número de ciclos de limpieza.
- 30.- Tiempo de humectación de las estaciones de ensayo.
- 31.- Promedio de deposición de SO_2 en las estaciones de ensayo.
- 32.- Promedio de deposición de iones cloruros en las estaciones de ensayo.
- 33.- Velocidad de corrosión del acero en las estaciones de ensayo.
- 34.- Velocidad de corrosión del acero galvanizado en las estaciones de ensayo.
- 35.- Velocidad de corrosión del cobre en las estaciones de ensayo.
- 36.- Velocidad de corrosión del aluminio en las estaciones de ensayo.

ÍNDICE DE TABLAS

- 1.- Clasificación climática Köppen de las estaciones de ensayo en el Ecuador.
- 2.- Clasificación del tiempo de humectación (TDH).
- 3.- Clasificación de contaminantes por SO₂
- 4.- Clasificación de contaminates por cloruros.
- 5.- Categorías de corrosividad de las atmósferas
- 6.- Categorías de corrosividad de las atmósferas en función de datos medioambientales.
- 7.- Categorías de corrosividad en función de la rapidez de corrosión de los metales durante el periodo de exposición.
- 8.- Categorías de corrosividad de las atmósferas.
- 9.- Estaciones MICAT - Fase Ecuador.
- 10.- Composición (%) de los materiales empleados.
- 11.- Soluciones específicas para la eliminación de los productos de corrosión.
- 12.- Datos medioambientales y de velocidad de corrosión en la estación de Guayaquil.
- 13.- Datos medioambientales y de velocidad de corrosión en la estación de Riobamba.
- 14.- Datos medioambientales y de velocidad de corrosión en la estación de Salinas.
- 15.- Datos medioambientales y de velocidad de corrosión en la estación de Esmeraldas.

- 16.- Datos medioambientales y de velocidad de corrosión en la estación de San Cristóbal.
- 17.- Categorías corrosividad de las estaciones de ensayo de acuerdo a la clasificación medioambiental.
- 18.- Clasificación de las categorías de corrosividad atmosférica en función de la velocidad de corrosión.
- 19.- Obtención de la ecuación $C = At^n$ para el acero en las cinco estaciones de ensayo.
- 20.- Obtención de la ecuación $C = At^n$ para el acero galvanizado en las cinco estaciones de ensayo.
- 21.- Obtención de la ecuación $C = At^n$ para el cobre en las cinco estaciones de ensayo.
- 22.- Obtención de la ecuación $C = At^n$ para el aluminio en las cinco estaciones de ensayo.

NOMENCLATURA

ISO: Organización Internacional de Normalización

SO₂: anhídrido sulfuroso o dióxido de azufre

NaCl: cloruro de sodio (sal)

Cl⁻: iones cloruros

C: velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)

A: área de exposición (cm^2)

t: tiempo de exposición (años)

T: temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

HR: humedad relativa (%)

TDH: Tiempo de humectación ($\text{hr}/\text{año}$)

d: densidad (gr/cm^3)

m: masa (mg)

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

INTRODUCCION

En nuestro País no existen antecedentes sobre investigaciones realizadas en el área de la corrosión atmosférica, pues es notorio observar que no hay publicaciones que relevan la importancia del estudio de la corrosión de los metales y su incidencia sobre la inversión realizada para reposición de materiales.

La acción de la atmósfera sobre los metales constituye uno de los mayores problemas planteados por la corrosión. Las pérdidas directas e indirectas motivadas por la corrosión atmosférica son enormes, lo que es lógico si se tiene en cuenta que la mayoría de los equipos y construcciones metálicas se encuentran al aire libre. Según Tomashov (1), más del 50% de las pérdidas por corrosión se deben a que estas instalaciones están a la intemperie. Está demostrado, a través de distintos ensayos, que la velocidad de corrosión de los metales en la atmósfera puede ser decenas e incluso centenares de veces mayor en unos lugares que en otros, lo que justifica el interés en conocer las variables fundamentales que operan en la corrosión atmosférica por las que se origina esta gran dispersión de resultados.

La magnitud de la corrosión atmosférica depende fundamentalmente del tiempo durante el cual la superficie aparece húmeda (tiempo de humectación), aunque en realidad influyen también una combinación de factores como la lluvia, la humedad relativa (HR), la temperatura, etc. Por todo ello, el *clima* de la región juega un papel importante en la magnitud de la corrosividad atmosférica. Otro factor que determina la intensidad del fenómeno corrosivo es la composición química de la atmósfera

(contaminación del aire con gases, vapores ácidos y aerosoles del agua de mar). El anhídrido sulfuroso (SO_2) y el cloruro sódico (NaCl) son los agentes corrosivos más corrientes de la atmósfera. El cloruro sódico se incorpora a la atmósfera desde el mar, siendo sus efectos muy acusados cerca de la orilla, donde el aire marino transporta grandes cantidades de sal. Lejos del mar la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y de núcleos de población. En este caso, el principal contaminante por su frecuencia e incidencia sobre el proceso corrosivo es el SO_2 , que proviene de la combustión de sólidos y líquidos que contienen azufre.

La trascendencia del fenómeno que nos ocupa justifica la continua búsqueda de relaciones, empíricas o teóricas, entre velocidad de corrosión y factores atmosféricos (meteorológicos y químicos).

El Proyecto MICAT (MAPA IBEROAMERICANO DE CORROSIVIDAD ATMOSFERICA) se inició en 1988 bajo los auspicios del Programa Iberoamericano Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. V Centenario (CYTED-D). La finalidad de este programa es promover la cooperación científica y técnica entre los países iberoamericanos.

En la actualidad, el proyecto MICAT cuenta con la participación de 14 países (ver Fig. N° 1).

El proyecto MICAT tiene como objetivo conseguir, en diferentes fases un mayor conocimiento acerca de los mecanismos de corrosión en las distintas atmósferas de Iberoamérica; establecer, a través de adecuados tratamientos estadísticos, expresiones matemáticas que permitan el cálculo de la corrosión atmosférica en función de parámetros climáticos y de contaminación; y por último, elaborar el mapa

iberoamericano de corrosividad atmosférica. Todo ello permitirá sentar las bases para una selección óptima de los materiales metálicos y recubrimientos (convencionales y avanzados) que deban emplearse en las distintas situaciones de agresividad atmosférica.

Para el cumplimiento de este objetivo es fundamental disponer de una red de estaciones de corrosión atmosférica representativas de las condiciones climáticas imperantes de los países participantes en el proyecto. El conocer la agresividad de las distintas atmósferas, en función exclusiva de las condiciones climáticas, tiene un enorme interés científico y técnico. No hay que olvidar que un gran porcentaje de las estructuras metálicas están ubicadas en zonas densamente pobladas, donde la agresividad atmosférica depende también del grado de contaminación atmosférica por la presencia de contaminantes antropogénicos vertidos a la atmósfera. Por ello, una segunda fase del estudio abordará la contaminación para definir las agresividades atmosféricas de los distintos países iberoamericanos. Además, raramente las estructuras metálicas, en especial de acero, se exponen desnudas a la acción atmosférica. Debido a la alta corrosividad de este material, se suele proteger mediante recubrimientos diversos: pinturas, recubrimientos metálicos, recubrimientos de conversión, etc.

La metodología del proyecto se basa principalmente en la seguida en el programa internacional colaborativo "ISOCORRAG" de corrosión atmosférica (2), en la que se encuentran incluidas las normas ISO 9223-9226 (3-6), relativas al sistema de clasificación de la corrosividad atmosférica.



Fig. N°1: Países participantes en el Proyecto MICAT

CAPITULO I

CARACTERISTICAS GENERALES DEL CLIMA EN EL ECUADOR

El Ecuador está situado al Noroeste de América del Sur, entre los 01° 20' de latitud norte y 05° de latitud sur y desde el Océano Pacífico hasta la parte oriental de la planicie Amazónica. El territorio del Ecuador está dividido en tres regiones naturales claramente definidas entre sí, ya sea por su topografía, clima, vegetación y población. Estas tres regiones son: La región Litoral, Costa, Occidental o Anteandina; la región Central, Interandina o Sierra y la región Oriental, Amazónica o Transandina (7).

La región Litoral se extiende desde el río Mataje, al norte, hasta el río Zarumilla, al sur (conforme al Protocolo de Río de Janeiro), o hasta el río Túmbez (conforme a los legítimos derechos del Ecuador), y desde el Océano Pacífico, al Oeste, hasta las estribaciones de la cordillera occidental de los Andes, al Este. Tiene una longitud de 560 kilómetros y su anchura alcanza entre 40 y 200 kilómetros. Su superficie aproximada es de 70.000 kilómetros cuadrados. El suelo de la región Litoral es generalmente bajo, con pequeñas elevaciones que no sobrepasan los 1200 m de altura sobre el nivel del mar. El principal sistema montañoso de la región lo constituye la cordillera Costera o de Chongón o Colonche que divide a la región en dos subregiones denominadas Costa Externa y Costa Interna (8).

La región Central o Interandina se extiende desde el río Carchi y el volcán Chiles, al norte, hasta el río Macará, al sur y desde la cordillera occidental hasta la cordillera

Central de los Andes. Tiene una longitud calculada de 800 kilómetros y una anchura entre 70 y 90 kilómetros, con una superficie aproximada de 82.000 kilómetros cuadrados. Su altura varía entre los 1.200 y 6.000 metros.

La región Oriental se extiende desde las estribaciones orientales de la cordillera Central de los Andes hasta los límites con el Perú, al Este, y desde los límites con Colombia hasta los límites con Perú, al Sur. Su extensión conforme a DERECHO es de 314.836 kilómetros cuadrados, aunque de acuerdo con el Protocolo de Río de Janeiro se vería reducido a 109.298 kilómetros cuadrados (8).

A 1.000 kilómetros de la costa ecuatoriana hacia el oeste se encuentra la región Insular o de Galápagos, está formado por 13 islas principales (5 grandes y 8 pequeñas), además de 17 islotes y un gran número de rocas y promontorios. Su extensión aproximada es de 7.900 kilómetros cuadrados (7).

Debido a su posición geográfica y a la diversidad de alturas impuesta por la cordillera de los Andes, el Ecuador presenta una gran variedad de climas y cambios considerables a cortas distancias. Además, nuestro país está ubicado dentro del cinturón de bajas presiones atmosféricas donde se sitúa la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), por esta razón, ciertas áreas reciben la influencia alternativa de masas de aire con diferentes características de temperatura y humedad (7).

Se cuentan con climas tropicales y templados, regiones con características subtropicales, situadas principalmente en las estribaciones de las dos cordilleras; también encontramos zonas desérticas, semi-desérticas, estepas frías y cálidas (7).

En la Fig. N° 2, se presentan las regiones naturales del Ecuador (8).

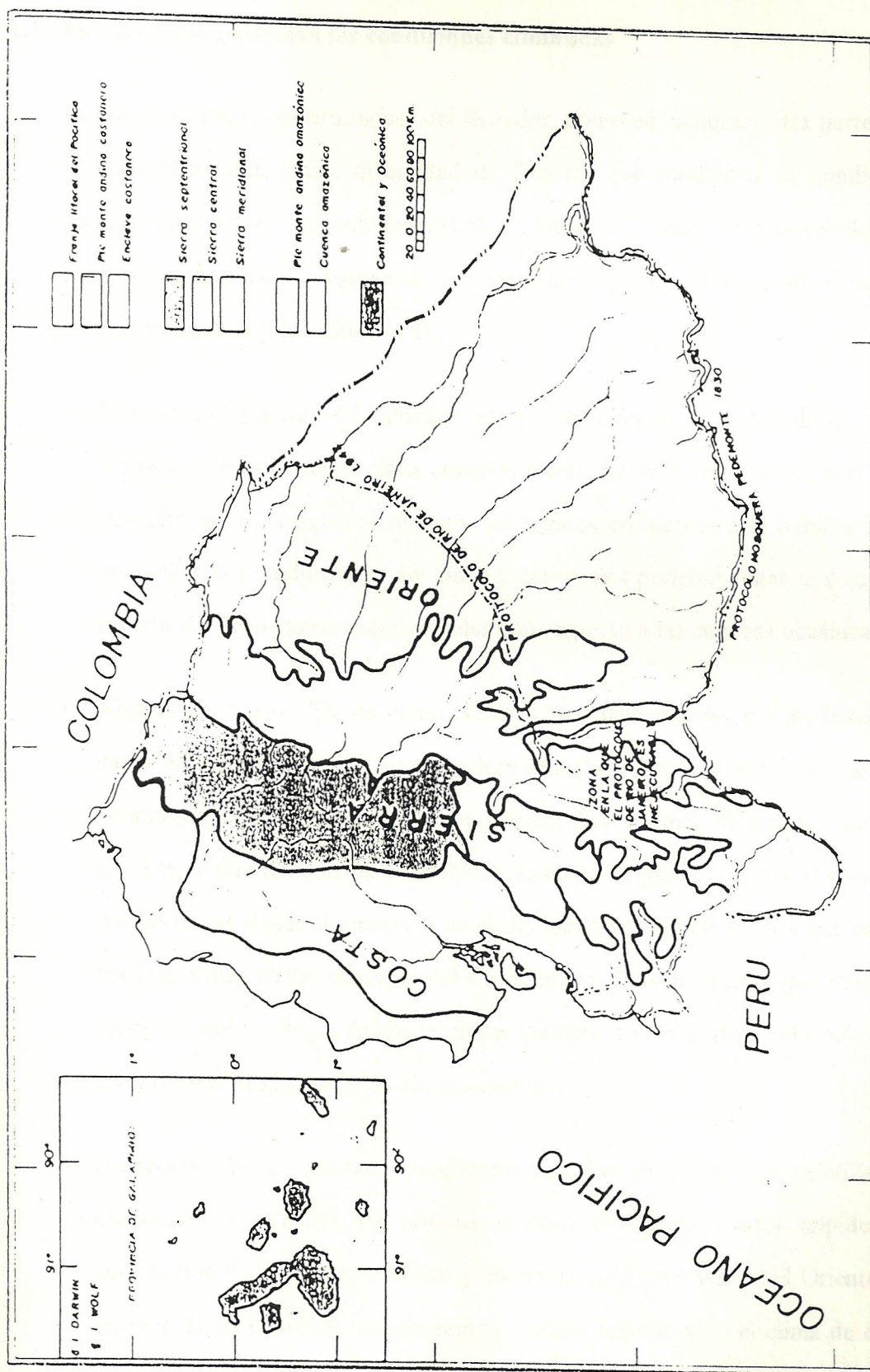


Fig. Nº 2: Regiones naturales del Ecuador.

1.1. Factores que controlan las condiciones climáticas

Las características climatológicas del Ecuador, como en cualquier otra parte del planeta, responden a una diversidad de factores que modifican su condición natural, tales como: latitud geográfica, altitud del suelo, dirección de las cadenas montañosas, vegetación, acercamiento y alejamiento del Océano, corrientes marinas y los vientos (8).

- **Latitud geográfica.-** El Ecuador por su situación en el centro de la Zona Tórrida debiera tener un clima completamente cálido de manera general. No obstante, no es siempre ni en todos los lugares así, debido a la influencia de otros factores modificantes del clima y entre ellos podemos citar la desigual repartición de las masas continentales con respecto a las cuencas oceánicas.
- **Altitud del suelo.-** Es, sin duda, el factor que más contribuye a modificar el clima en nuestro país. Si se considera que partiendo del nivel del mar la temperatura descende *un grado* por cada *200 metros* de altura, nuestro clima tiene una fluctuación de aproximadamente 31 grados, ya que el nivel de sus tierras va desde 0 metros al nivel del mar hasta 6.310 metros que es su máxima altura en las cumbres del Chimborazo. Esto ha hecho que nuestro país goce del privilegio de poseer todos los tipos de clima, desde el cálido del Litoral hasta el glacial de las alturas andinas.
- **Dirección de las cadenas montañosas.-** La altura de las cordilleras Occidental y Oriental del sistema montañoso de los Andes impide la penetración de los vientos cálidos y húmedos del Occidente y del Oriente al interior de las hoyas de nuestra región Andina, modificando el clima de esta región.

- **Vegetación.-** Donde existe mayor vegetación, como en el Litoral y el Oriente, se produce mayor evaporación del agua, lo que contribuye al aumento de las precipitaciones, modificando así el clima en dichas regiones.
- **Acercamiento o alejamiento del Océano.-** La Región Litoral o Costa por estar cerca del Océano Pacífico recibe su acción térmica modificadora del clima.
- **Corrientes marinas.-** Las llanuras de la región Litoral reciben al influencia de la Corriente Fría de Humboldt, la misma que disminuye la temperatura hasta la altura del Cabo Pasado que le corresponde por estar en la Zona Tórrida, como también no permite el paso de los vientos cálidos y húmedos del Pacífico, haciendo que en estas zonas las precipitaciones sean escasas, convirtiendo en estériles a los suelos de Santa Elena. La Corriente Cálida de El Niño, en cambio, influye en el clima de nuestra región Litoral desde el Norte hasta el Cabo Pasado, haciéndolo más cálido, aumentando grandemente el régimen de lluvias en este sector.
- **Los vientos.-** Los vientos que soplan desde los Andes disminuyen la temperatura de los suelos bajos de la Costa y Oriente. Además, al chocar con los vientos calientes y húmedos de estas regiones producen las precipitaciones.

1.2. Ubicación e influencia de las masas de aire regionales

Las tres regiones que distinguen el territorio ecuatoriano, Costa, Sierra y Oriente se diferencian entre sí y son el lugar de origen de grandes masas de aire que toman de él sus condiciones características, produciéndose con su

desplazamiento ciertas modificaciones causadas por las variaciones que sufre en su trayectoria a regiones con diferentes cualidades (7). Por consiguiente en nuestro País podemos considerar tres zonas de origen de masas de aire, así:

- **Masas Tropicales Marítimas.**- Estas masas se originan en las extensiones oceánicas y se distinguen por su alta temperatura y gran contenido de humedad.
- **Masas Tropicales Continentales.**- Estas masas se caracterizan por bajas temperaturas y un contenido menor de humedad, su lugar de origen son las planicies del Litoral y del Oriente, distinguiéndose estas últimas por un mayor contenido de humedad.
- **Masas Templadas.**- Estas masas se caracterizan por bajas temperaturas y un contenido muy irregular de humedad, se sitúan en los valles interandinos.
- **Masas de Aire Frías.**- Estas masas se asientan en las mesetas andinas y en las cimas altas de las montañas (más de 3.000 m de altura); las temperaturas son menores o iguales a 0 °C y la humedad depende de la influencia de las masas de aire que recibe.

Conocemos que los vientos predominantes son los alisios de noreste en el hemisferio Norte y los del sureste en el hemisferio Sur, alterándose esta prevalencia por el comportamiento de las masas de aire y los desplazamientos del cinturón ecuatorial.

Lo expuesto anteriormente determina que en el Ecuador se formen masas de aire ora estáticas ora móviles con características propias. El papel de estas masas de aire pueden resumirse de la siguiente forma:

- **La región costanera central** (Península de Santa Elena y sur de Manabí) la mayor parte del tiempo está bajo la influencia de la corriente fría de Humboldt. En Salinas la temperatura de la superficie marítima disminuye entre los meses de Junio y Septiembre que corresponden al invierno austral. Masas de aire marítimo relativamente frío invaden la faja costanera dando lugar a neblinas y lloviznas con valores de precipitaciones muy débiles, determinando un clima seco. Sin embargo, tiene una influencia importante en las partes altas de los relieves (Cordillera Costanera) donde son responsables de zonas notablemente más húmedas.
- **La región de la Sierra**, se encuentra bajo la influencia alterna de "Masas de Aire Tropical Marítimo" (MATM) y "Masas de Aire Tropical Continental" (MATC). Desde el principio de Septiembre, la ZCIT (que se encuentra a esa época del año sobre el Hemisferio Norte y en proceso de alcanzar el Ecuador), después de rechazar los alisios del sureste, moviliza hacia el continente las MATM. Estos al sumarse los alisios del nordeste dan inicio a la estación lluviosa. A fines de Diciembre, la ZCIT comienza su migración hacia el norte, detiene el movimiento anterior, y sin que haya mayor ingreso de aire marítimo húmedo, provoca una ligera recesión de la pluviometría que corresponde al llamado "veranillo del Niño" de fines de Diciembre-Enero. Mientras tanto, debido a las fuertes temperaturas, las MATC de la llanura amazónica siguen reforzándose; al verse empujadas luego hacia la cordillera,



ingresan en parte al callejón interandino y dan lugar a un segundo pico lluvioso a partir de Marzo.

- **En las hoyas interandinas**, sigue válido el régimen anteriormente expuesto de una estación lluviosa con dos picos separados por una corta estación seca. Sin embargo, por estar mejor abrigadas, por recibir aire marítimo o continental casi totalmente descargado de humedad y porque ahí reinan "Masas de Aire Templado Continental", el total de las precipitaciones es menor y el clima más estable y seco.
- **La región Amazónica.-** Fundamentalmente se encuentra bajo la influencia de las MATC, las mismas que se originan en la Amazonía Central y que gran parte del año actúan como perturbaciones tropicales; de todas maneras y aunque sea en forma limitada, también se observa una ligera recesión de las precipitaciones a fines de Diciembre y en Enero.

1.3. Variables principales del clima

Entre las variables principales del clima tenemos: temperatura, humedad, lluvia, heliofanía, evaporación, tensión del vapor, dirección y fuerza del viento, radiación solar, etc. (7).

- **Heliofanía.-** Se entiende por heliofanía el número de horas en que el sol se hace presente en un lugar determinado. En toda la llanura litoral hasta una altura de 500 m en la ladera de la cordillera occidental, el promedio anual de horas de brillo solar fluctúa entre las 600 y 1.700 horas, siendo las más favorables de este número las zonas más secas. En la región interandina, la

insolación fluctúa entre las 1.200 y 2.000 horas anuales con ciertas excepciones de lugares muy lluviosos.

Pese a la poca información de datos existentes en la región amazónica se ha determinado que la insolación se ubica entre las 1.000 y 1.400 horas anuales. En el Archipiélago de Colón, el promedio anual de insolación se ubica alrededor de las 2.000 horas anuales.

En el mapa de la Fig. N° 3, se muestran las isolinneas de heliofanía en el Ecuador (9).

- **Temperatura (T).**- Es el grado de calor o de frío de la atmósfera. En la Región Interandina la temperatura está vinculada estrechamente con la altura. Entre los 1.500 y 3.000 metros los valores medios varían entre los 10 y 16 °C. En la región oriental, zona litoral e Islas Galápagos, la media anual se establece entre los 24 y 26 °C, con extremos que raramente sobrepasan los 36 °C o bajan a menos de 14 °C.

En el mapa de la Fig. N° 4, se muestran las isotermas de temperaturas medias anuales en el Ecuador (9).

- **Precipitación.**- Es la cantidad de agua procedente de la atmósfera. La Región Amazónica, al igual que el noreste de la provincia de Esmeraldas, son las zonas más lluviosas con totales anuales que fluctúan entre los 3.000 y 4.000 mm.

En la Región Litoral, las precipitaciones anuales aumentan de oeste a este. Los valores más bajos se registran en el sector comprendido entre Manta y la

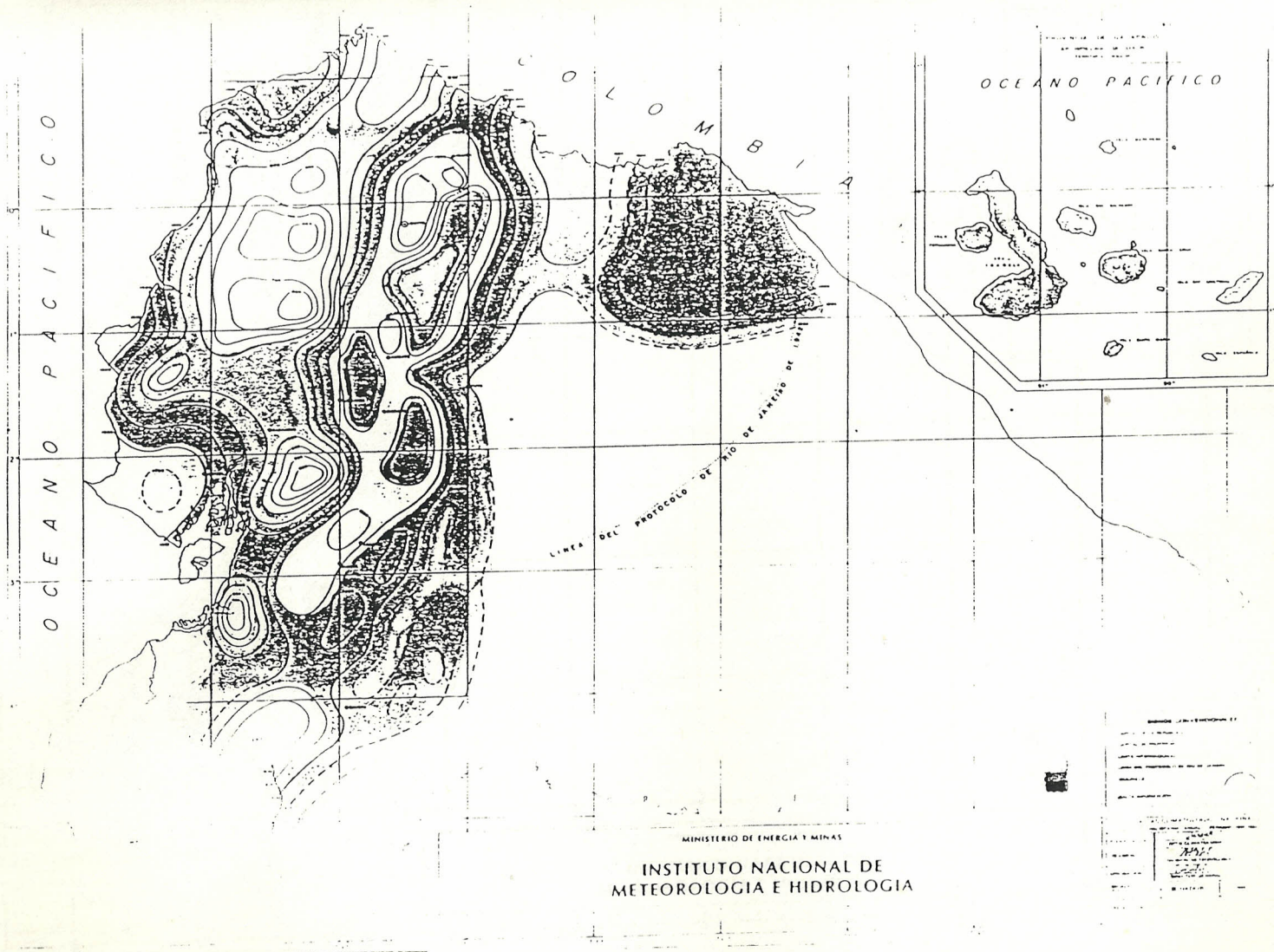
Península de Santa Elena cuyos registros alcanzan los 250 mm, mientras que precipitaciones anuales superiores a los 3.000 mm. pueden observarse hacia el interior de la Región hasta una altura aproximada de 1.500 m.

En la Región Interandina, se observan dos estaciones lluviosas, de Febrero a Mayo y de Octubre a Noviembre, con una primera estación seca muy marcada entre Junio y Septiembre, y con una segunda menos acentuada en Diciembre-Enero. Los totales pluviométricos fluctúan entre los 700 y 1.500 mm. generalmente. En la hoyas interandinas los valores anuales se ubican en el orden de los 500 mm.

Por otra parte, en las regiones situadas sobre los 3.500 m de altura, se observan frecuentes neblinas y las lluvias son generalmente de larga duración y débil intensidad.

En el mapa de la Fig. N° 5, se muestran las isoyetas de precipitaciones anuales en el Ecuador (9).

- **Humedad relativa (HR).**- Es la proporción entre la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera y el máximo que necesitará para la saturación.



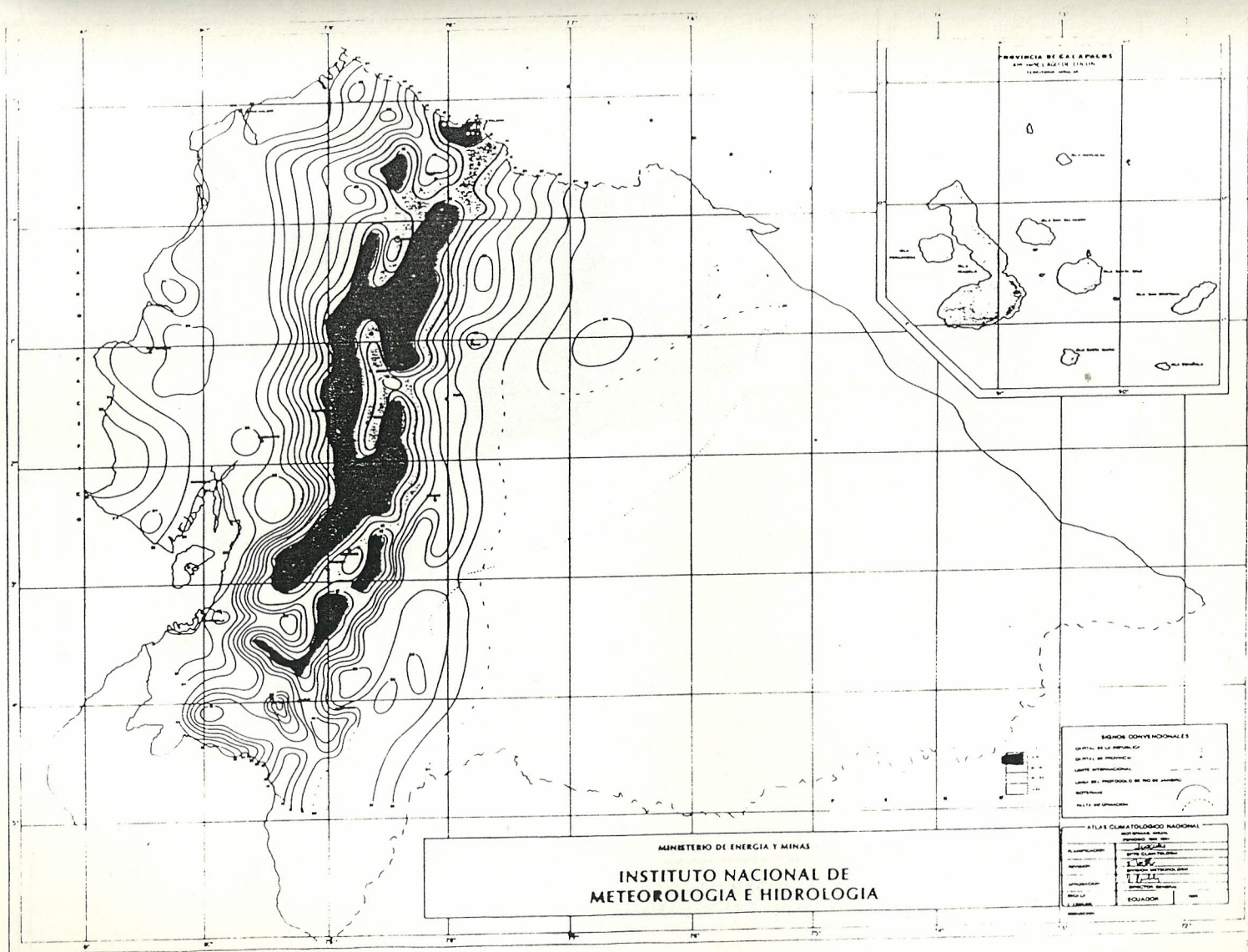
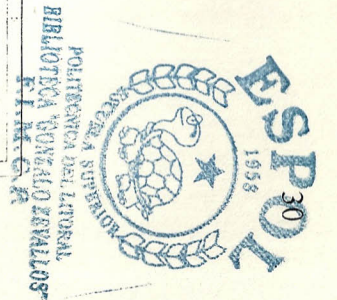


Fig. N° 4: Mapa de isotermas de temperaturas medias anuales en el Ecuador.



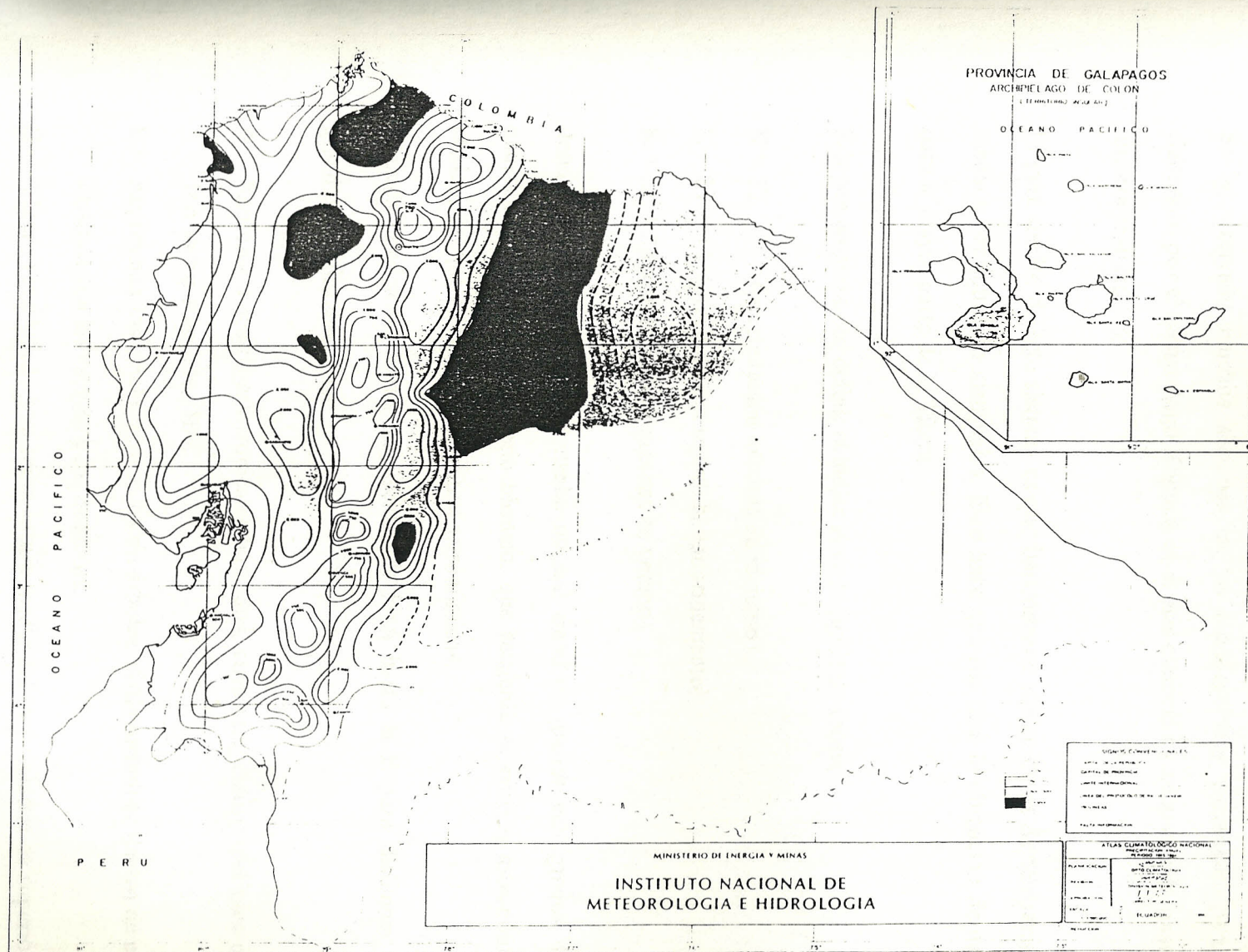


Fig. Nº 5: Mapa de isoyectas de precipitaciones anuales en el Ecuador.

1.4. Clasificación climática según Köppen

Se ha ensayado muchos sistemas en las clasificaciones climáticas, pero el elaborado por el climatólogo Köppen es el más conocido y se acomoda mejor a nuestra realidad (7).

El gran mérito de este sistema es que básicamente utiliza datos de temperatura media y precipitación mensuales. Esto hace que sea fácil la obtención de datos para la mayor parte de la Tierra.

Köppen empieza por definir el índice K en la siguiente forma:

$K = 2T$ (precipitación máxima en invierno)

$K = 2T + 14$ (precipitación repartida uniformemente)

$K = 2T + 28$ (precipitación máxima en verano)

donde: T es la temperatura media normal anual en grados centígrados. Los climas se clasifican con criterio térmico, que recuerda el criterio astronómico clásico, del que se deducen las zonas astronómicas.

Köppen emplea las letras mayúsculas de la A hasta la E para distinguir las grandes clasificaciones así:

A = Representa los climas tropicales húmedos, cuya temperatura del mes más frío es superior a los 18°C.

B = Representa los climas muy secos sin árboles, distinguiéndose dentro de esta clasificación las estepas y los desiertos.

C = Climas templados, cuya temperatura media del mes más frío es superior a los 3°C.

D = Climas fríos, la temperatura media del mes más frío es inferior a los 3°C.

E = Climas polares o de altura.

Para mejor comprensión y detalle de estas grandes clasificaciones se ha añadido otras especificaciones, representadas por letras minúsculas:

f = significa que no hay estación seca.

s = significa que hay una estación seca en verano.

w = significa que hay una estación seca en invierno.

m = significa estación seca en verano o estación muy lluviosa en invierno.

Si la clasificación y los criterios de Köppen se aplican a los datos disponibles de las estaciones de ensayo en el Ecuador, tenemos que el clima de sabana tropical (Aw) es característico de gran parte del sector costanero del País, mientras que en la región insular es característico el clima de estepas (Bs), y por último en la región interandina predominan los climas Mesotérmico Húmedo (Cf), y Mesotérmico Semi-Húmedo (Cw).

Clima Tropical Sabana (Aw).- Este clima se distingue por:

Temperatura media anual entre los 24 y 26 °C

Temperatura máxima absoluta entre los 32 y 37 °C

Temperatura mínima absoluta entre los 15 y 19 °C

Humedad relativa varía entre el 70 y 80 %

Precipitación total anual entre los 500 y 1.000 mm

Este tipo de clima es característico de las estaciones de Esmeraldas y Guayaquil.

Climas Secos: Estepa (Bs) y Desértico (Bw).- Sus características son:

Temperatura media anual entre los 18 y 24 °C

Temperatura máxima absoluta entre los 30 y 37 °C

Temperatura mínima absoluta entre los 12 y 18 °C

Humedad relativa varia entre el 65 y 80 %

Precipitación total anual inferiores a los 500 mm

El tipo de clima de estepa (Bs) es característico de la estación de San Cristóbal, mientras que el tipo de clima desértico (Bw) es característico de Salinas.

Clima Mesotérmico Húmedo (Cw).- Los parámetros climáticos de este tipo de clima se distinguen por:

Temperatura media anual entre los 12 y 16 °C

Temperatura máxima absoluta inferiores a los 30 °C

Temperatura mínima absoluta bajo 0 °C

Humedad relativa varia entre el 75 y 80 %

Precipitación total anual varia entre los 400 y 1.000 mm

Este tipo de clima comprende casi toda la región interandina interrumpida por algunos lugares secos y de clima de altura; comienza en sus límites del norte hasta cerca de los 3.5° de latitud.

DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE LAS ESTACIONES DE ENSAYO.

GUAYAQUIL.- Se localiza al sur del Ecuador, sobre los 02°09'12" de latitud sur y en los 79°53'00" de longitud oeste, a 5 m de altura sobre el nivel del mar. El régimen de precipitación es muy variado, con una estación seca durante los meses de Julio a

Noviembre con valores que oscilan entre los 2 y 14 mm, mientras que durante los meses de Diciembre y Abril estos oscilan entre los 44 y 278 mm. La precipitación media anual alcanza los 1.134,8 mm.

La temperatura media anual fluctúa entre los 24.4 °C en Julio y 27.0 °C en Abril. La temperatura mínima absoluta oscila desde los 18.4 °C en Agosto hasta los 21.8 °C en Marzo. La temperatura máxima absoluta varía entre los 32.1 °C en Julio y los 34.9 °C en Diciembre.

La humedad relativa varía durante el año entre el 68 % en Diciembre y 81% en Febrero.

RIOBAMBA.- Se localiza en sector centro de la Región Interandina del Ecuador, sobre los 01°39'00" de latitud sur y en los 78°39'00" de longitud oeste, a 2760 m de altura sobre el nivel del mar. El régimen de precipitación es mas o menos regular durante todo el año, siendo el mes mas seco Julio con 14.4 mm, y el mes mas lluvioso Abril con 58.1 mm. La precipitación media anual esta en el orden de los 439.7 mm.

La temperatura media anual también es mas o menos constante durante el año con valores que oscilan desde los 12.2 °C en Julio hasta los 14.0 °C en Diciembre. La temperatura mínima absoluta varía desde los 0.9 °C en Agosto hasta los 4.8 °C en Abril. La temperatura máxima absoluta va desde los 21.7 °C en Julio hasta los 24.3 °C en Diciembre. La amplitud entre las temperaturas mínima y máxima medias se localiza en el orden de los 23 °C.

La humedad relativa varía entre el 71 y 75%.

SALINAS.- Se localiza en la parte mas saliente de las costas continentales del Ecuador, sobre los $02^{\circ}12'00''$ de latitud sur y en los $80^{\circ}59'23''$ de longitud oeste, a 4 m de altura sobre el nivel del mar. El régimen de precipitación es muy escaso, con valores que oscilan entre los 0.5 mm en Agosto y 54.7 mm en Marzo. La precipitación media anual apenas alcanza los 215.0 mm.

La temperatura media anual oscila desde los 20.9°C en Agosto hasta los 26.1°C en Marzo. La temperatura mínima absoluta varia desde los 18.2°C en Agosto hasta los 21.7°C en Febrero. La temperatura máxima absoluta fluctúa entre los 24.9°C en Agosto y los 30.6°C en Marzo, de ahí que la amplitud entre las temperaturas mínima media y máxima media se localiza en el orden de los 13°C .

La humedad relativa es mas o menos constante durante todo el año y varia desde el 77 al 82%.

ESMERALDAS.- Se localiza en el noroccidente del Ecuador, sobre los $00^{\circ}58'45''$ de latitud norte y en los $79^{\circ}37'28''$ de longitud oeste, a 7 m de altura sobre el nivel del mar. Se caracteriza por tener una estación relativamente seca con precipitaciones que varían desde los 12 hasta los 40 mm durante la segunda mitad del año, mientras que en los seis primeros meses estas alcanzan los 180 mm (Febrero). La precipitación media anual se localiza en el orden de los 778.7 mm.

La temperatura media anual es más o menos constante ya que oscila entre los 25.5°C en Septiembre y los 26.1°C en Marzo, mientras que la temperatura mínima absoluta alcanza los 19.9°C en Diciembre y la temperatura máxima absoluta varia entre los 30.8°C en Febrero y 32.1°C en Octubre.

La humedad relativa oscila durante el año entre el 78% en Octubre y el 84% en Enero.

SAN CRISTÓBAL.- Se localiza en el Archipiélago de Galápagos, sobre los $00^{\circ}54'00''$ de latitud sur y en los $89^{\circ}36'00''$ de longitud oeste, a 8 m de altura sobre el nivel del mar. El periodo de lluvias comienza en enero y termina en mayo, siendo el mes mas lluvioso Febrero con una media multianual de 105.7 mm, en tanto que el resto del año las lluvias son escasas y estas oscilan desde los 6.0 mm en Septiembre hasta los 25.1 mm en Diciembre. La precipitación media anual se localiza en el orden de los 471.5 mm.

La temperatura media anual fluctúa desde los 21.2°C en Septiembre hasta los 25.9°C en Marzo, mientras que la temperatura mínima absoluta varia desde los 17.3°C en Septiembre hasta los 20.7°C en Febrero. La temperatura máxima absoluta varia desde los 26.3°C en Septiembre hasta los 32.1°C en Marzo, siendo aun mayor la amplitud entre las temperaturas mínima y máxima medias en el orden de los 16°C .

Con relación a la humedad relativa, esta oscila desde el 77% en Noviembre y el 83% en Marzo.

Para una mejor comprensión de lo antes mencionado nos referimos al siguiente cuadro de datos estadísticos de las estaciones de ensayo.

ESTACIÓN	PRECIP. ANUAL (mm)	TEMP. MEDIA (°C)	TEMP. MÁXIMA (°C)	TEMP. MÍNIMA (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)
Guayaquil	1.134,8	25.7	34.9	18.4	74
Riobamba	439.7	13.5	24.3	-0.7	72
Salinas	215.0	23.5	30.6	17.9	76
Esmeraldas	778.7	25.8	32.2	19.2	81
San Cristóbal	471.5	23.6	32.1	16.6	80

Para realizar la clasificación climática de acuerdo a Köppen se deben registrar datos de temperatura y precipitación de por lo menos 25 años de dicha información. Esta labor ya ha sido realizada por el INAMHI.

De lo antes mencionado, en la Tabla N° 1, se detalla la clasificación climática de las estaciones de ensayo.

TABLA N° I
CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA KÖPPEN DE LAS ESTACIONES DE ENSAYO EN EL ECUADOR

	ESTACIÓN DE ENSAYO				
	Guayaquil	Riobamba	Salinas	Esmeraldas	San Cristóbal
Tipo de Clima	A _w	C _w	B _w	A _m	B _s

CAPITULO II

PARÁMETROS MEDIOAMBIENTALES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

De acuerdo con ISO 9223 (3), los factores medioambientales como el tiempo de humectación (TDH) y los contaminantes atmosféricos (SO_2 y cloruros) son los responsables para la corrosividad de los materiales metálicos. A continuación se detalla cada uno de estos parámetros.

2.1. Tiempo de humectación (TDH)

El proceso de corrosión atmosférica es suma de los procesos parciales de corrosión que tienen lugar cada vez que se forma la capa de electrólito sobre el metal. Las precipitaciones acuosas (lluvia, rocío, nieve o niebla) y la condensación de humedad por cambios de temperatura son, sin duda, los principales promotores de la corrosión atmosférica; si τ_i es la duración de cada periodo individual de humectación superficial y v_i la velocidad media de corrosión en ese periodo, la corrosión total al cabo de n periodos será:

$$C = \sum_{i=1}^n v_i \tau_i$$

Los valores de τ_i incluyen tanto los periodos de alta HR, como los de precipitación directa de lluvia, rocío, niebla, etc. El valor de v_i puede cambiar mucho, según las circunstancias, a causa de los diferentes grados posible de humectación y de contaminación atmosférica.

La suma de los tiempos parciales de humectación constituye el llamado TDH, durante el cual es posible la corrosión metálica. Se ha encontrado una buena correlación entre el TDH y el tiempo en que la HR supera un determinado nivel de humedad, por lo general, superior al 70%. De acuerdo con el TDH, se han construido mapas de corrosividad atmosférica de algunos países o regiones.

Sin embargo, hay que tener presente que en las atmósferas fuertemente contaminadas es probable que la lluvia intensa por su acción de lavado resulte bastante menos corrosiva que el rocío o la niebla que no limpian el contaminante de la superficie del metal (10).

Determinación del TDH.- Una de las posibilidades para la estimación del TDH consiste, de acuerdo con el documento MICAT A-18 (11), en calcular a partir de gráficas de registro continuo de humedad relativa (HR) y temperatura (T), el número de horas en que la HR se mantiene igual o superior al 80% y simultáneamente la temperatura superior a 0 °C.



Los datos de HR y T pueden obtenerse mediante un termohigrógrafo (ver Fig. N° 6) situado en la estación de ensayo, o a partir de los datos suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional de una estación próxima equivalente a la estación de ensayo.

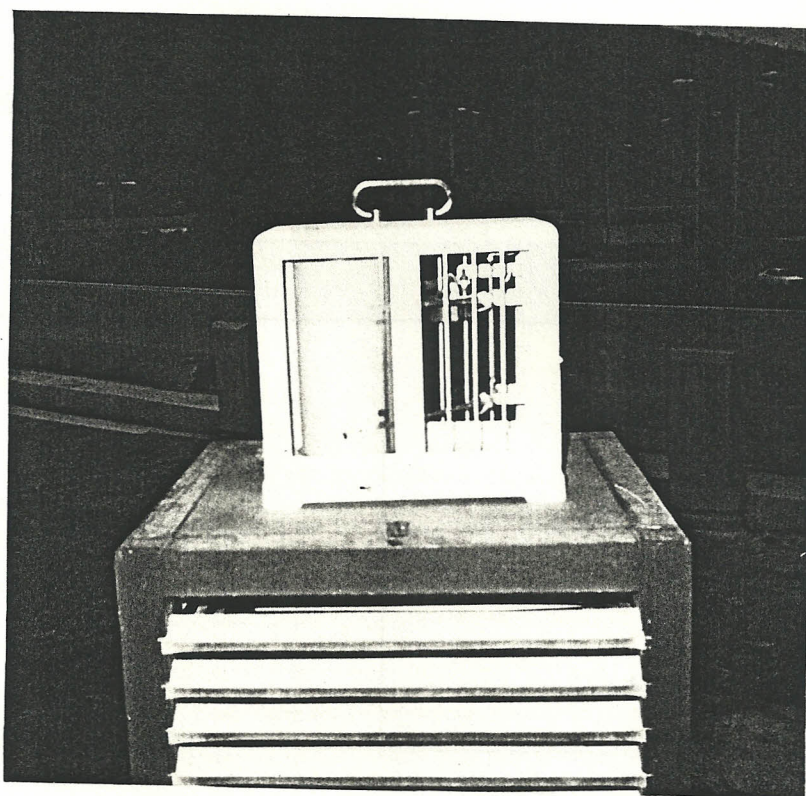


Fig. N° 6: Termohigrógrafo instalado en la estación de Guayaquil.

El método más exacto consistiría en la estimación a partir de las bandas de registro continuo de HR y T que suministra el termohigrógrafo. Una alternativa consiste en representar en una gráfica los valores de HR y T a diferentes horas del día (tal y como

lo suelen suministrar los Servicios Meteorológicos) y hacer pasar una "simple curva" de variación por todas ellas. Obviamente este método no supone más que una burda aproximación. En el Anexo I se presenta la gráfica para el cálculo del TDH.

Una vez obtenido el TDH, se procede a su clasificación de acuerdo a lo especificado en la Norma ISO 9223 (3) (ver Tabla N° 2).

TABLA N° II
CLASIFICACIÓN DEL TIEMPO DE HUMECTACIÓN (TDH) (3)

CATEGORÍA	TDH (hr/año)
τ_1	< 10
τ_2	10 - 250
τ_3	250 - 2500
τ_4	2500 - 5500
τ_5	> 5500

Esta Tabla nos indica el número de horas en que la superficie ha permanecido húmeda durante el año.

2.2. Acción de los principales contaminantes

Como se ha indicado, por debajo de un determinado nivel de HR no es probable la corrosión, pues no existe película apreciable de electrolito sobre el metal.

Generalmente, la corrosión del hierro y otros metales es insignificante por debajo del 60 - 80%. Aún cuando la HR exceda este valor, para que la velocidad de corrosión sea realmente importante, la atmósfera debe estar, además contaminada (10).

De los contaminantes atmosféricos, el cloruro de sodio (NaCl) y el anhídrido sulfuroso (SO_2) son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera. El NaCl se incorpora a ésta desde el mar, siendo sus efectos muy acusados cerca de la orilla, donde el aire transporta grandes cantidades de sal y se produce una continua pulverización de agua. EL SO_2 de origen antropogénico puede llegar a alcanzar concentraciones importantes en las atmósferas próximas a centrales térmicas, atmósferas impurificadas por humos industriales y de hogares domésticos, transporte, etc. Se origina al quemar combustibles que contienen azufre.

Estas dos sustancias químicas, estimulan grandemente la corrosión de las superficies metálicas humedecidas, ya que aumentan la actividad de la película acuosa. Por ello, la corrosión atmosférica en puntos cercanos a la orilla del mar suele exceder considerablemente a lo previsible en el caso de atmósferas no contaminadas distintas de la costa. Igual sucede con los focos de emisión de SO_2 , en cuyo caso los procesos corrosivos se aceleran.

La acción del SO_2 atmosférico, en particular sobre el acero, ha sido estudiada por numerosos investigadores hace tiempo.

Se han realizado numerosos estudios experimentales para cuantificar las relaciones entre la velocidad de corrosión y la concentración de SO_2 en la atmósfera. La información es abundante, particularmente para el acero y el cinc. La gráfica de la Fig. N° 7 constituye un ejemplo de ello (10).

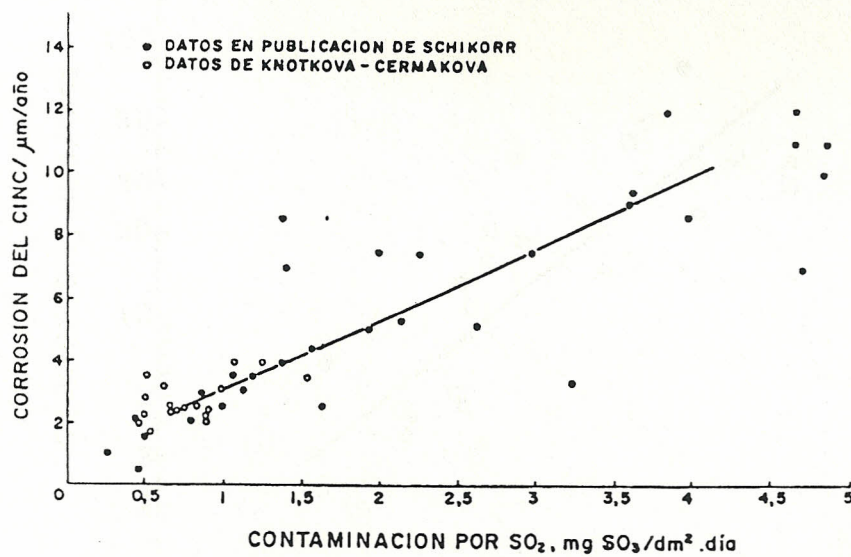


Fig. N° 7: Datos de corrosión del cinc frente a contaminación por SO_2 en atmósferas de diferentes puntos de Europa (10).

La información cuantitativa en el caso de los cloruros es menos abundante. Sin embargo, está perfectamente establecido el importante efecto de este contaminante cuando su concentración excede determinados niveles. Como es lógico, la cantidad de cloruro en el aire, proveniente de las gotitas de agua de mar arrastradas por el viento, depende de la distancia al mar. En general se establece una relación directa entre corrosión y contenido salino (ver Fig. N° 8).

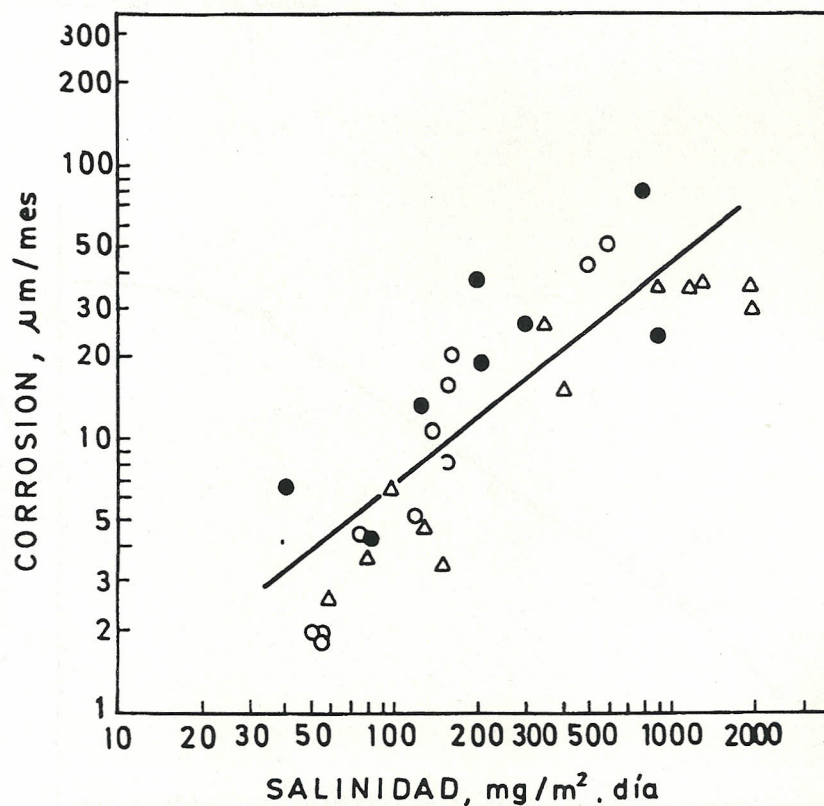


Fig. N° 8: Variación de la corrosión del acero en función de la salinidad de la atmósfera (método de la candela húmeda), según se deduce de datos de distintos autores (10).

Los resultados de un proyecto de la Comisión de la Comunidad Europea (EUR 7455 EN), en el que se estudió el decrecimiento de la salinidad con la distancia a la costa en 29 puntos típicos de la costa de Europa, indica que el nivel de cloruros es muy alto cerca de la orilla del mar, pero 10 Km. tierra adentro, este nivel desciende a menos de $10 \text{ mg/m}^2\text{-día}$ en la mitad de las estaciones. Se juzga de interés la información recogida en la Fig. N° 9 sobre la variación de los valores medios de concentración salina, para el conjunto de las estaciones, en función de la distancia a la costa.

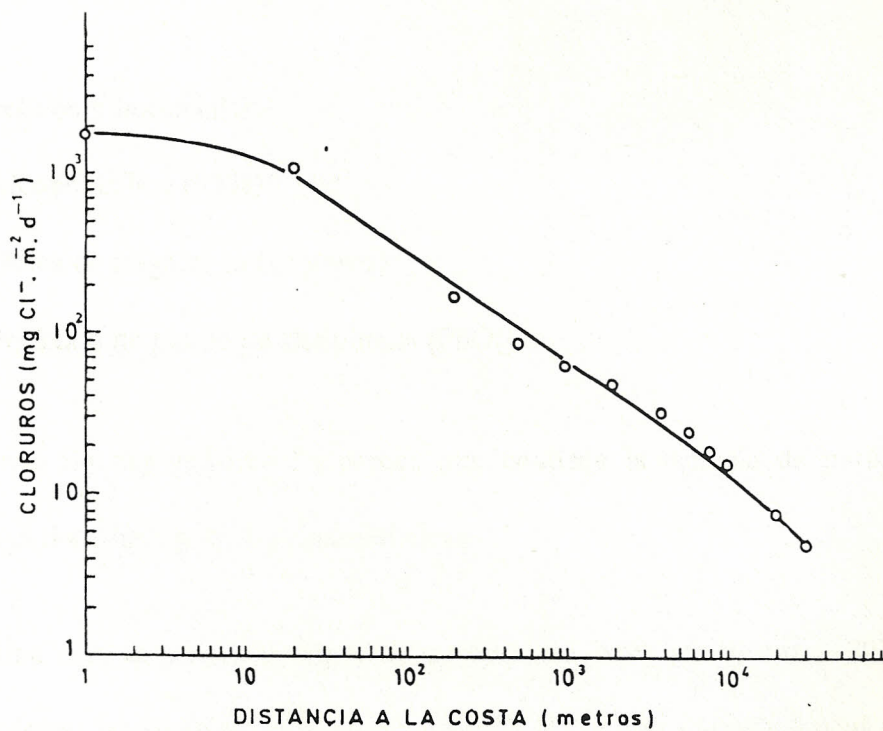
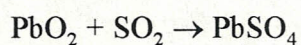


Fig. N° 9: Variación de la salinidad con la distancia a la costa. Datos medios de 29 lugares (10).

Determinación del dióxido de azufre.- El grado de contaminación por SO₂ se determinó por el método de la candela del peróxido de plomo (12).

Principio.- Este método cubre la evaluación de la sulfatación total en la atmósfera. Suministra una medida para determinar la cantidad de dióxido de azufre que ataca una área específica durante un periodo de 30 días. El método está basado en la siguiente reacción:



Al término del ensayo, se analiza el contenido de SO₂, expresándose el resultado en mgSO₂/m²·día.

Reactivos y materiales.-

- Alcohol etílico (95%)
- Goma de tragacanto (en polvo)
- Peróxido de plomo de alta pureza (PbO₂)

Percha de exposición.- La percha que contiene la candela de peróxido de plomo tiene las siguientes características:

- Una caja de persiana, cuyas dimensiones no debe ser menor a 203 mm y además las persianas deben estar colocadas a 45° para suministrar un máximo resguardo de las lluvias.

- La caja fue hecha de madera y laqueada; mientras que la persiana fue elaborada con perfiles de aluminio.
- La caja a su vez fue asegurada a una base de madera.

En la Fig. N° 10, se muestra la percha de exposición.



Fig. N° 10: Percha de exposición para la captación de SO_2 .

Preparación de la candela de peróxido de plomo.- Para la elaboración de esta candela se procedió de la siguiente forma:

- Se corta un pedazo de gasa quirúrgica, la misma que es enrollada en un tubo de PVC (soporte) y fijada por tapones de caucho en sus extremos (el área de la superficie reactiva es de 100 cm²).
- Para preparar el fijador de la pasta, se disolvieron 2 gr. de goma de tragacanto en 10 gr. de alcohol etílico (95%), inmediatamente se añadió agua caliente (hasta completar un volumen aproximado de 150 ml) mientras se mantenía la agitación de la mezcla en una placa caliente a baja temperatura hasta obtener la goma (volumen final aproximado de 100 ml).
- En la preparación de la pasta para cada candela se emplearon 8 gr. de peróxido de plomo en 5 ml de la goma. La pasta entonces fue aplicada de tal manera que cubrió la totalidad de la gasa adherida al soporte.
- Posteriormente la candela preparada es secada y mantenida en una funda plástica para evitar que la superficie reactiva se contamine hasta ser utilizada.
- Luego se colocó la candela en la percha y al final del periodo de exposición, las candelas se vuelven a colocar en fundas plásticas para luego realizar el análisis respectivo.

En la Fig. N° 11, se muestra la candela de peróxido de plomo. En el Anexo II se presenta el esquema del soporte y candela del peróxido de plomo.

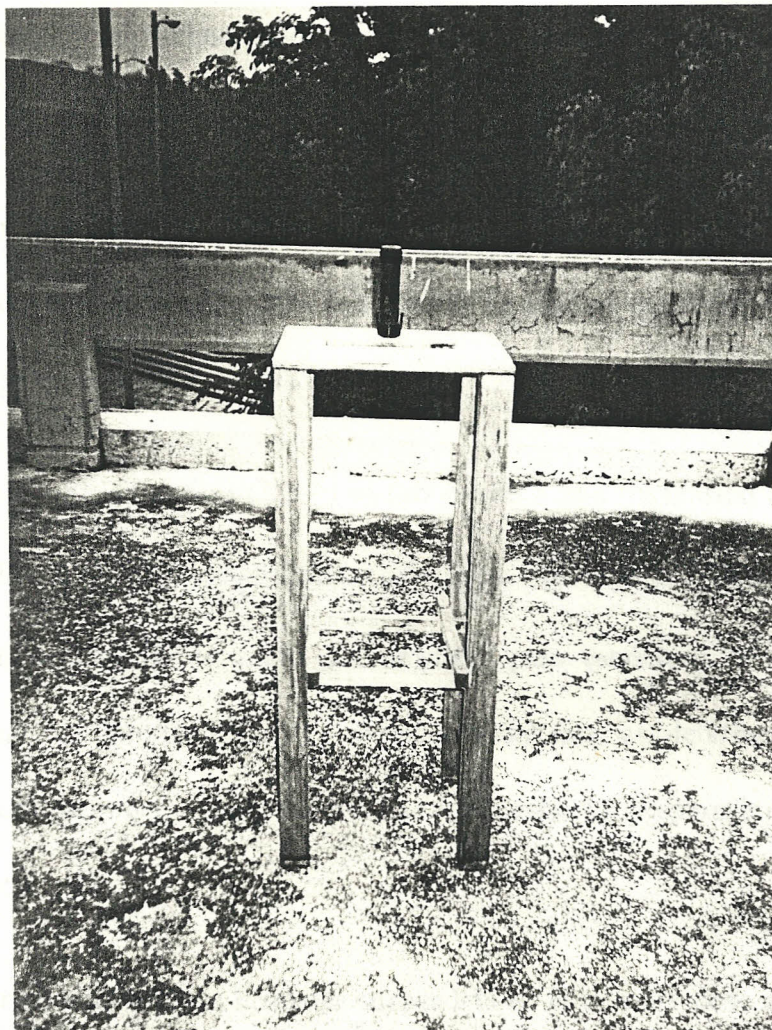


Fig. N° 11: Candela de peróxido de plomo.

Tratamiento de las candelas expuestas.- Retire la superficie reactiva del soporte y mida una área de 100 cm^2 , coloque en un vaso de precipitación y añada agua destilada hasta cubrir la gasa, luego caliente aproximadamente durante 5 horas reponiendo el líquido perdido para mantener el volumen constante. Luego filtre el contenido del vaso hasta dejar limpia la gasa (libre de

partículas negras), repita este procedimiento hasta obtener un líquido transparente y por último añada agua destilada hasta completar un volumen de 100 ml.

Análisis del sulfato.- Las candelas de sulfatación son analizadas por el contenido de sulfato utilizando una técnica de análisis cuantitativa. El método empleado es el turbidimétrico (13,14).

Principio.- El ion sulfato (SO_4^{2-}) es convertido a una suspensión de sulfato de bario (Ba SO_4) bajo condiciones controladas. La solución de glicerina y la solución de cloruro de sodio son añadidas para estabilizar la suspensión y minimizar las interferencias. La turbidez resultante es determinada por un espectrofotómetro y comparada con una curva estándar preparada de soluciones de sulfato.

Interferencias.- Materia insoluble suspendida en la muestra debe ser removida. Las muestras de color oscuras no pueden ser utilizadas con este procedimiento porque interfieren en la medición del sulfato de bario suspendido.

Aparatos utilizados.-

- Espectrofotómetro
- Celdas de 1 cm para el espectrofotómetro

Reactivos.-

- Solución buffer A: Disuelva 30 gr. de cloruro de magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 5gr de acetato de sodio ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), 1 gr. de nitrato de potasio (KNO_3) y 20 ml de ácido acético (CH_3COOH -99%) en 500 ml de agua destilada y completar hasta 1000 ml.
- Solución buffer B (requerida cuando la concentración de la muestra de SO_4^{2-} es menor a 10 mg/l): Disuelva 30 gr. de cloruro de magnesio, 5 gr. de acetato de sodio, 1 gr. de nitrato de potasio, 0.111 gr. de sulfato de sodio (Na_2SO_4) y 20 ml de ácido acético en 500 ml de agua destilada y complete hasta 1000 ml.
- Cristales de cloruro de bario (Ba Cl_2).
- Solución estándar de sulfato: Prepare una solución de H_2SO_4 0.02N y titúela. Tome 10.4 ml de esta solución y complete con agua destilada hasta 100 ml.

$$1\text{ml} = 100 \mu\text{gSO}_4^{2-}$$

Procedimiento.-

1. Formación de turbidez de la muestra: Colocar en una celda 25 ml de la solución filtrada, agregar 5 ml de la solución buffer y 0.25 gr. de cloruro de bario, agitar manualmente por un tiempo de 60 seg. y colocar parte de esta solución en la celda de 1 cm, la cual se introduce en el espectrofotómetro y se mide la turbidez en absorbancia.

2. Formación de turbidez del blanco de la muestra: Se toma otros 25 ml de la solución filtrada y se continúa con el procedimiento anterior sin agregar el c
3. Cloruro de bario.
4. Se resta el valor de absorvancia de la turbidez de la muestra con el blanco y el resultado obtenido se compara con la curva de calibración para determinar la concentración del ion sulfato.

Preparación de la curva de calibración.- La curva de calibración va de acuerdo a la concentración de la muestra.

- Curva de calibración con la solución buffer A: Tome 5 tubos de ensayo y agregue en 4 de ellos las siguientes cantidades de la solución estándar de sulfato: 2.5 ml, 5 ml, 7.5 ml y 10 ml, completar cada tubo con agua destilada hasta 25 ml (un tubo contendrá solamente 25 ml de agua destilada, el cual se lo considerará como el blanco de las soluciones estándar). A cada tubo agregue 5 ml de la solución buffer A y agite los tubos, luego agregue 0.25 gr. de cloruro de bario a cada tubo y agite manualmente por el tiempo de 60 seg. Lea la absorvancia en celdas de 1 cm. Los estándares obtenidos corresponden a: 10, 20, 30 y 40 mg/ltr de SO_4^{2-} . Graficar la curva.
- Curva de calibración con la solución buffer B: Tome 5 tubos de ensayo y agregue a 4 de ellos las siguientes cantidades de la solución estándar de sulfato: 0.5 ml, 1ml, 1.5 ml y 2ml, completar cada tubo con agua destilada hasta 25 ml (un tubo contendrá solamente 25 ml de agua destilada, el cual se

lo considerará como el blanco de las soluciones estándar). A cada tubo agregue 5 ml de la solución buffer B y agite, luego agregue 0.25 gr. de cloruro de bario a los 5 tubos y agite manualmente por el tiempo de 60 seg. Lea la absorvancia en celdas de 1 cm. Los estándares obtenidos corresponden a: 2, 4, 6 y 8 mg/ltr de SO_4^{2-} . Graficar la curva.

En el Anexo III, se presentan las gráficas de las curvas de calibración con las cuales se determina periódicamente la concentración de sulfato. Cabe indicar, que se deben realizar nuevas curvas de calibración para analizar las muestras de cada estación de ensayo.

Para poder caracterizar la categoría de la atmósfera, es necesario, clasificar la agresividad de ésta con la cantidad de SO_2 obtenida. Así en la Tabla N° III se presentan estas categorías de acuerdo a la Norma ISO 9223 (3).

TABLA N° III
CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES POR SO_2 (3)

Rapidez de deposición de SO_2 ($\text{mg}/\text{m}^2\text{día}$)	Concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Categoría
≤ 10	≤ 12	P ₀
10 - 35	12 - 40	P ₁
35 - 80	40 - 90	P ₂
80 - 200	90 - 250	P ₃

Determinación de cloruros.- La salinidad atmosférica se determina por el método de la candela húmeda según ISO 9225 (5). Dicha técnica consiste de una superficie textil húmeda protegida de la lluvia con una área conocida expuesta durante un tiempo determinado. La cantidad de cloruro depositado es determinado por análisis químico. De los resultados de este análisis la rapidez de deposición es calculada en $\text{mgCl}^-/\text{m}^2\cdot\text{día}$.

Aparato de captación.- La candela húmeda esta formada de una mecha insertada en un frasco. La mecha abarca un núcleo central de una varilla de material inerte de aproximadamente 25 mm de diámetro sobre el cual se expande una capa doble de gasa quirúrgica. La superficie de la mecha expuesta a la atmósfera es aproximadamente de 100 cm^2 .

Un extremo de la varilla se coloca dentro de un tapón hecho de caucho. El tapón tiene dos agujeros adicionales a través de los cuales pasan los extremos libres de la gasa. Los extremos libres de la gasa deben ser bastantes largos para alcanzar el fondo del frasco.

El tapón es insertado en el cuello del frasco de vidrio con un volumen aproximadamente de 500 ml. El frasco contiene 200 ml de solución agua - glicerina al 20%.

Percha de exposición.- La candela húmeda está expuesta sobre una percha bajo el centro de un techo. El techo será de $500 \times 500 \text{ mm}$ de un material inerte. La

vela está colocada de tal manera que la distancia del techo al tope de la mecha sea de 200 mm y de igual forma estará centrada con relación al techo. La distancia entre el frasco y el nivel del suelo será por lo menos de 1 m.

En la Fig. N° 12, se muestra el conjunto del aparato y percha de exposición y en el Anexo IV se muestran las dimensiones de este conjunto.

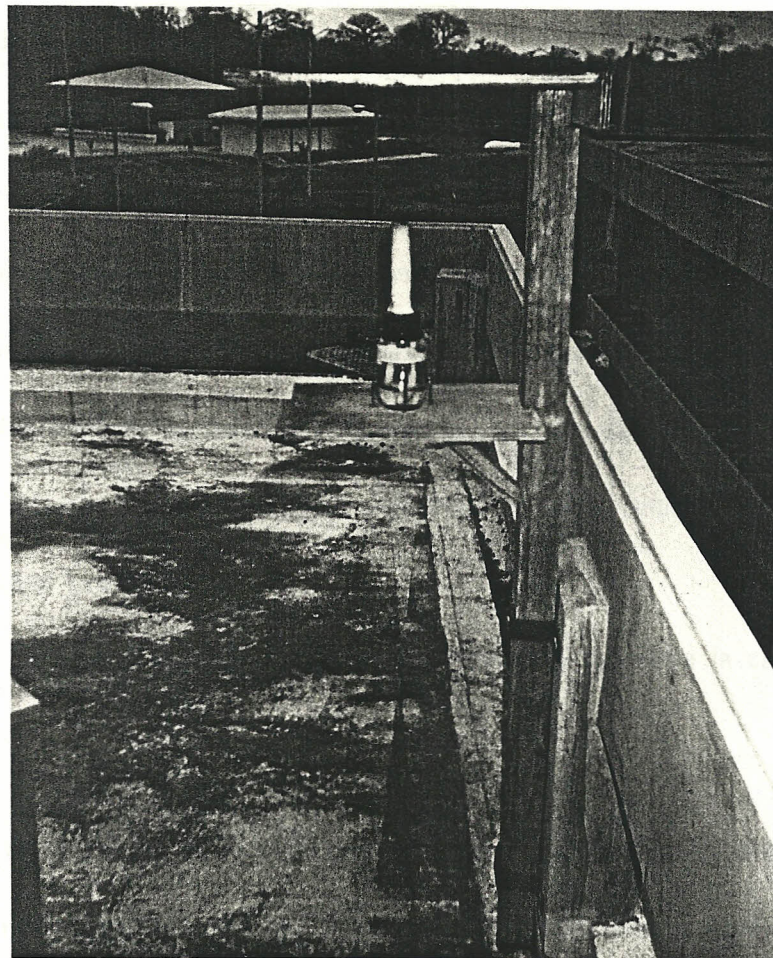


Fig. N° 12: Dispositivo para captar cloruros en las estaciones de ensayo.

Técnica operativa.- En el sitio de prueba la candela prefabricada es instalada y controlada en los siguientes pasos:

1. Ajuste la longitud de la parte expuesta de la mecha al valor designado
2. Remueva el tapón y la mecha del frasco, lave la gasa, los extremos libres y el frasco con agua destilada.
3. Coloque 200 ml de la solución agua - glicerina en el frasco.
4. Junte de nuevo la mecha y el frasco.

La solución agua - glicerina será cambiada en intervalos mensuales como sigue:

- Afloje el tapón del frasco.
- Lave hacia abajo la mecha y los extremos libres por lo menos con 200 ml de agua destilada, asegurándose que el lavado fluya hacia el interior del frasco.
- Tape fuertemente el frasco, asegurándose que no se derrame. Marque el frasco claramente con el nombre del sitio de prueba, localización, fecha de exposición y remoción.
- Repita el procedimiento descrito anteriormente y devuelva la candela a su puesto.

Análisis de cloruros.- El método empleado es el argentométrico, cualquier otro procedimiento analítico el cual da una precisión satisfactoria puede ser usado (13).

Principio.- En una solución neutra o altamente alcalina, el cromato de potasio puede indicar el punto final de la titulación del cloruro con el nitrato de plata. El cloruro de plata es precipitado cuantitativamente antes que el cromato de plata que es de color rojo se forme.

Interferencias.- Las sustancias en cantidades normalmente encontradas en agua potable no interferirán. Bromuro, yoduro y cianuro se registran como concentraciones equivalentes a cloruros. Los iones sulfuros, tiosulfatos y sulfatos interfieren pero pueden ser removidos por tratamiento con peróxido de hidrógeno. Ortofosfato en exceso de 25 mg/ltr interfiere precipitándose como fosfato de plata. Hierro en exceso de 10 mg/ltr interfiere marcando el punto final de la titulación.

Aparatos utilizados.-

- Fiolas de 250 ml
- Buretas de 250 ml

Reactivos.-

- Solución indicadora de cromato de potasio: Disuelva 50 gr. de cromato de potasio (K_2CrO_4) en 1 litro de agua destilada. Agregue solución de nitrato de plata ($AgNO_3$) hasta que un precipitado rojo definido se forme. Deje sedimentar por 12 horas, filtre y diluya hasta 1 litro con agua destilada.

- Titulante estándar de nitrato de plata 0.0141N: Disuelva 2.395 gr. de AgNO_3 en agua destilada y diluya hasta 1 litro. Estandarice contra una solución de NaCl 0.0141N por el procedimiento descrito en el párrafo siguiente. Almacene en una botella oscura.
- Solución estándar de cloruro 0.0141N: Disuelva 824 mg de NaCl (secado a 140°C) en agua destilada y diluya hasta 1 litro.

$$1 \text{ ml} = 500 \mu\text{gCl}^-$$

Procedimiento.-

- Mida la muestra y coloque en una fiola, luego filtre la muestra para retener las impurezas.
- De la parte filtrada tome 50 ml y agregue 5 gotas de la solución indicadora de cromato de potasio.
- Titule con nitrato de plata hasta obtener un color amarillo - ladrillo, que es el punto final.
- Blanco de la muestra: Tome 25 ml de agua destilada, agregue 1 ml del indicador de cromato de potasio y titule con el nitrato de plata, su valor de consumo no debe ser mayor que 0.2 a 0.3 ml en el blanco.

Cálculo.-

$$\text{mgCl} / \text{ltr} = \frac{(A - B) \times N \times 35450}{\text{muestra}(ml)}$$

donde:

A = volumen usado para la titulación de la muestra (ml)

B = volumen usado para la titulación del blanco (ml)

N = normalidad del nitrato de plata

Una vez obtenido la cantidad de estos contaminantes, se procede a caracterizar por categorías la agresividad que tiene la atmósfera. Para esto, la Norma ISO 9223 (3) ha elaborado la Tabla N° IV, donde se indica el rango de la cantidad de cloruros para las diferentes categorías.

TABLA N° IV
CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES POR CLORUROS (3)

Rapidez de deposición de cloruros (mg/m ² -día)	Categoría
≤ 3	S ₀
3 - 60	S ₁
60 - 300	S ₂
> 300	S ₃

2.3. Clasificación de corrosividad basado en datos medioambientales

Para poder decir que tan agresiva es una atmósfera, es necesario, de acuerdo a la Norma ISO 9223 (3) clasificar la corrosividad de una atmósfera en cinco categorías (ver Tabla N° V).

TABLA N° V

CATEGORIAS DE CORROSIVIDAD DE LAS ATMOSFERAS

CATEGORIA	CORROSIVIDAD
C1	MUY BAJA
C2	BAJA
C3	MEDIA
C4	ALTA
C5	MUY ALTA

Estas categorías pueden ser obtenidas mediante dos formas; la una con la obtención de datos medioambientales como son el TDH y los contaminantes atmosféricos (SO_2 y cloruros), y la otra forma por la pérdida de masa en metales específicos. En la Tabla N° VI de acuerdo a la Norma ISO 9223 (3), se presentan las categorías de corrosividad correspondientes a las categorías clasificadas por el tiempo de humectación y por contaminantes.

TABLA N° VI

CATEGORIAS DE CORROSIVIDAD DE LAS ATMOSFERAS EN FUNCION DE DATOS MEDIOAMBIENTALES (3)

Acero															
	τ_1			τ_2			τ_3			τ_4			τ_5		
	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃
P ₀ -P ₁	1	1	1-2	1	2	3-4	2-3	3-4	4	3	4	5	4	5	5
P ₂	1	1	1-2	1-2	3-4	3-4	3-4	3-4	4-5	4	4	5	5	5	5
P ₃	1-2	1-2	2	2	3	4	4	4-5	5	5	5	5	5	5	5

Ac. galv. (cinc) y cobre															
	τ_1			τ_2			τ_3			τ_4			τ_5		
	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃
P ₀ -P ₁	1	1	1	1	1-2	3	3	3	3-4	3	4	5	4	5	5
P ₂	1	1	1-2	1-2	2	3	3	3-4	4	3-4	4	5	5	5	5
P ₃	1	1-2	2	2	3	3-4	3	3-4	4	4-5	5	5	5	5	5

Aluminio															
	τ_1			τ_2			τ_3			τ_4			τ_5		
	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃	S ₀ -S ₁	S ₂	S ₃
P ₀ -P ₁	1	2	2	1	2-3	4	3	3-4	4	3	3-4	5	4-5	5	5
P ₂	1	2	2-3	1-2	3-4	4	3	4	4-5	3-4	4	5	4-5	5	5
P ₃	1	2-3	3	2-4	4	4	3-4	4-5	5	4-5	5	5	5	5	5



CAPITULO III

LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA Y SU NATURALEZA

La corrosión atmosférica es la causa más frecuente de la destrucción de metales y aleaciones. La gran mayoría de las construcciones y piezas metálicas operan bajo la acción de este medio, habiéndose calculado que aproximadamente el 80% del metal producido queda expuesto a él. Es posible que la agresividad atmosférica sea culpable, por sí sola, de más del 50% de las pérdidas totales atribuibles a la corrosión metálica.

Si se tiene en cuenta el amplio uso del acero, se comprenderá que uno de los mayores problemas en corrosión sea evitar la formación de herrumbre. Realmente, las medidas encaminadas a la protección del acero en la atmósfera constituye uno de los principales estudios de cualquier cálculo de gastos imputables a la corrosión.

A temperatura ambiente y en una atmósfera perfectamente seca la corrosión puede ser ignorada a efectos prácticos puesto que progresa a velocidad infinitesimal. La corrosión es posible únicamente cuando las superficies metálicas están humedecidas. El mecanismo de corrosión es electroquímico. El electrólito es una capa de humedad, que unas veces es extremadamente delgada e invisible y otras veces moja perceptiblemente al metal. La corrosión depende del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica. Realmente, está fijada por la combinación de una serie de factores: humedad, temperatura, lluvia, condiciones de

exposición, contaminación atmosférica, composición del metal, propiedades del óxido formado, etc. (15).

3.1. Mecanismo de la corrosión atmosférica

Ya que el mecanismo es electroquímico, la velocidad de corrosión atmosférica guarda necesariamente relación con el proceso anódico, el proceso catódico y la resistencia óhmica del electrolito (15).

Proceso anódico.- El metal debe disolverse dentro de una delgada capa de electrolito, en la que la concentración de cationes se eleva muy pronto hasta la precipitación de algún compuesto poco soluble, a menudo de pobre poder protector; probablemente un hidróxido poroso en medios neutros. La fácil llegada de oxígeno a la superficie metálica a través de la delgada capa de electrolito produce, en ocasiones, la pasivación anódica, sobre todo con determinados metales y aleaciones. Tratándose de películas extremadamente delgadas, la dificultad que encuentran los iones metálicos para captar el agua de hidratación necesaria para la disolución inhibe el proceso anódico.

Proceso catódico.- Bajo la capa de humedad, la mayoría de los metales (Fe, Zn, Al) expuestos a la atmósfera se corroen por el proceso de reducción de oxígeno. No existe apenas impedimento para el transporte de oxígeno a la superficie metálica, siendo dicho impedimento tanto menor cuanto más delgada sea la película.

Resistencia óhmica.- El adelgazamiento de la capa de electrolito va acompañado por un aumento de resistencia óhmica entre las zonas anódicas y catódicas de las minúsculas pilas locales de corrosión que, en gran número, se

distribuyen sobre el metal. El corto radio de acción de los microelectrodos debajo de capas sumamente delgadas explica la mayor uniformidad de la corrosión atmosférica en comparación, por ejemplo, con la corrosión de metales sumergidos.

Se ha encontrado que el espesor de las capas formadas por condensación de humedad sobre las superficies verticales oscila entre unos 10 a 50 μm , ya que las capas más gruesas tienden a escurrir. Sobre superficies horizontales son posibles espesores de 50 a 100 μm y, en casos excepcionales, de más de 200 μm .

La Fig. N° 13 representa la dependencia entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa de electrolito sobre la superficie metálica.

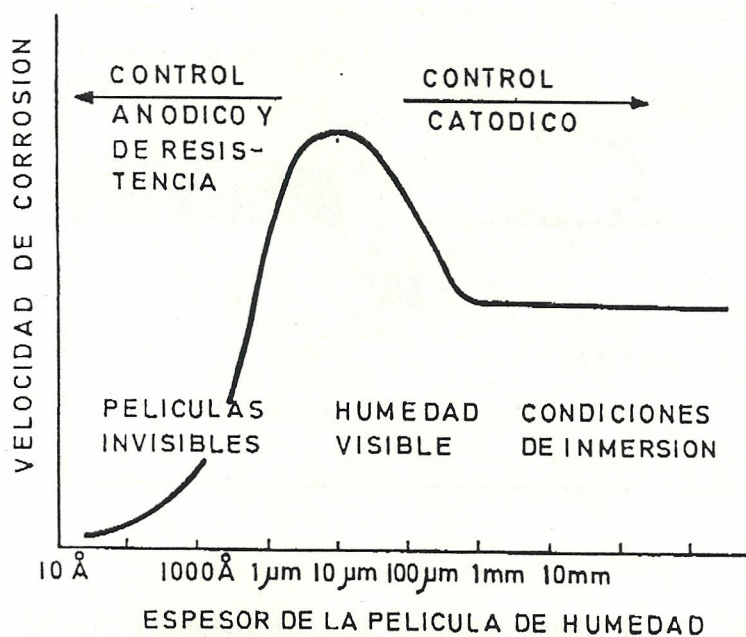


Fig. N° 13: El espesor de la película de humedad condensada sobre la superficie metálica influye grandemente en la velocidad de corrosión (15).

Dado el carácter electroquímico de la corrosión atmosférica, la formación de una capa de electrolito, bien sea por condensación, absorción, o precipitación en sus variadas formas (ver Fig. N° 14), es condición previa e indispensable para el desencadenamiento del problema, que pasa a producir desperfectos a través de una destrucción de las capas primarias de productos de corrosión, formando otras en las cuales su crecimiento ya no está limitado, como en las anteriores, a fracciones insignificantes de micra. Finalmente se llega a una situación estacionaria cuya cinética es la que realmente determina los riesgos de corrosión. Llegados a este punto, lo primero que llama la atención es la diferencia existente entre el ataque del hierro y el de los metales no féreos considerados en este estudio (15).

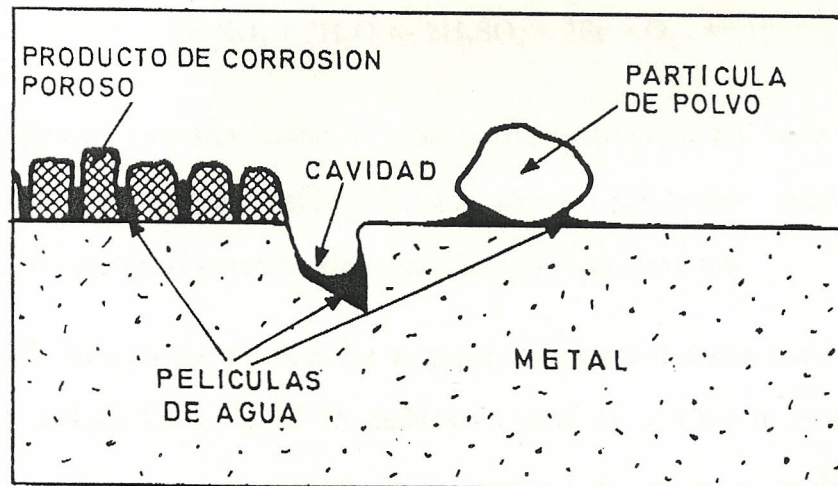
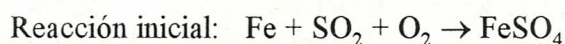
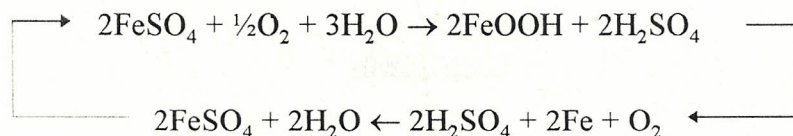


Fig. N° 14: Representación de distintas causas de condensación capilar de humedad sobre una superficie metálica en la atmósfera (15).

Mecanismos de corrosión del hierro.- Se admite que en la corrosión del hierro por dióxido de azufre se superponen varias etapas que implican la formación y regeneración de ácido sulfúrico, de forma que el contaminante desempeña el papel de catalizador del proceso, de acuerdo con el siguiente esquema, en el que cada una de sus moléculas es capaz de extraer de la red metálica un crecido número de átomos (de 15 a 40, según sean las condiciones reinantes), formándose esencialmente FeOOH como producto de corrosión (16). Las distintas etapas del proceso puede condensarse en las siguientes reacciones:



Ciclo de catálisis:



Las dos últimas muestran como el ácido sulfúrico se regenera hasta que se forma, en otra reacción secundaria, un sulfato difícilmente soluble, no identificado, que fija el contaminante rompiendo el ciclo catalítico.

En lugar del SO_2 pueden desempeñar su papel otros estimuladores, como el HCl (gas), Cl_2 o NaCl. En la Fig. N° 15, deducida a partir de contribuciones de otros investigadores, se representa el esquema general del proceso catalítico de corrosión del Fe, con diferentes posibilidades de actuación de los cloruros, según su procedencia. La diferencia capital a que conduce este mecanismo con respecto al que actúa con el Al, Cu o Zn es que mientras en el Fe la interrupción del suministro de contaminante no supone la desaparición de su efecto, continuando la corrosión a velocidad parecida, si bien decreciente con el tiempo,

en los metales no férricos el cese de la llegada del contaminante a su superficie coincide prácticamente con la paralización del ataque.

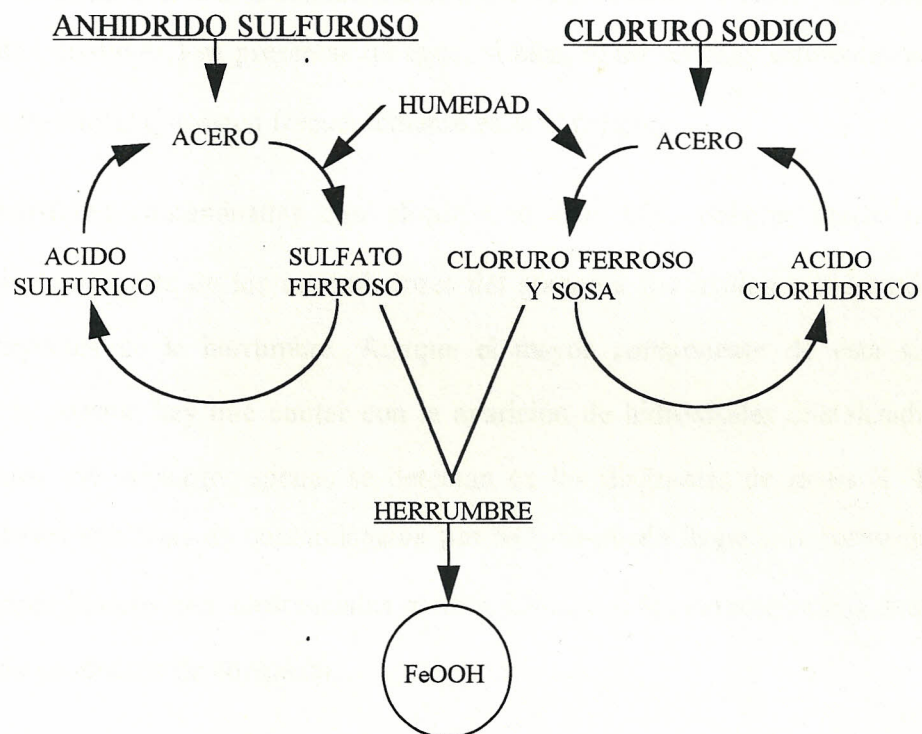


Fig. N° 15: Mecanismo cíclico de la corrosión atmosférica del acero en presencia del anhídrido sulfuroso o iones cloruro procedentes de sustancias diferentes (hidrolizables o no) (16).

En principio a la solución electrolítica que hacen posible la corrosión pasan iones Fe^{2+} , que en presencia de suficiente oxígeno se oxidan a Fe^{3+} , y éstos, según

las condiciones del medio, se transforman en α -goetita (α -FeOOH, α -Fe₂O₃·H₂O), con mucho el producto más frecuente de la corrosión y, por ello, componente mayoritario de la herrumbre. A este producto final puede llegarse a través de la formación intermedia e hidrólisis de varios óxidos e hidróxidos de hierro. La goetita es la fase termodinámicamente más estable, incluso más que la hematita (α -Fe₂O₃) en presencia de agua, si bien, al no ser muy diferentes una de la otra, ambas coexisten frecuentemente en la herrumbre.

En atmósferas contaminadas con cloruros, o con SO₂, debería fijarse por adsorción una parte de los estimuladores del ataque a los óxidos e hidróxidos constituyentes de la herrumbre. Aunque el mayor componente de ésta siga siendo la goetita, hay que contar con la aparición de hidroxisales cristalizadas, las cuales, sin embargo, apenas se detectan en los diagramas de rayos X. En condiciones extremas de contaminación por SO₂ se puede llegar a la formación de sulfatos básicos con substanciales modificaciones en las características de las capas de productos de corrosión.

Lo cierto es que, cualquiera que sea la composición de las capas de productos de corrosión, su capacidad de protección del metal subyacente es muy limitada, siendo en muchas circunstancias incluso contraproducentes, al facilitar la captación de sustancias agresivas. Así, por ejemplo, sobre el acero precorroído la fijación del SO₂ atmosférico tiene lugar tan rápidamente que prácticamente se capturan todas las moléculas que chocan contra la superficie, y esto incluso para aire con HR no muy alta y con capas de electrolito solidificadas (escarcha). Por el contrario, las superficies de hierro limpias, sin corroer aún, captan un porcentaje de SO₂ mucho menor (ver Fig. N° 16).

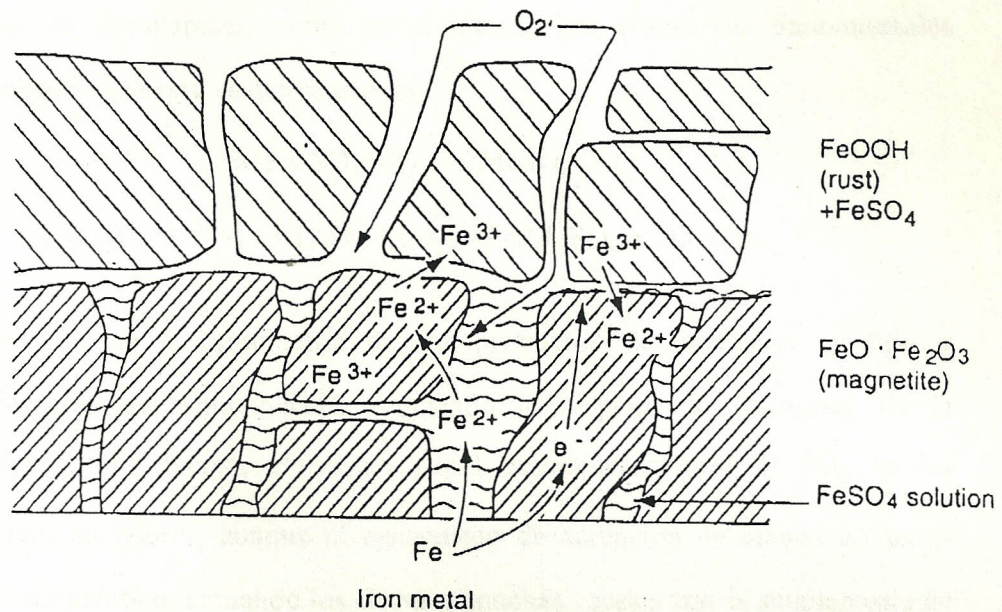
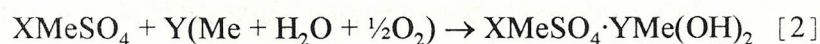
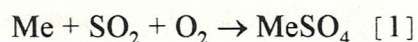


Fig. N° 16: Diagrama esquemático que muestra el mecanismo electroquímico del herrumbre atmosférico en un medio ambiente contaminado por SO_2 (17).

Mecanismo de corrosión de los metales no férreos.- El comportamiento del hierro es totalmente distinto del ofrecido por el resto de los metales estudiados si se considera la cinética de la corrosión atmosférica, evidenciando velocidades de corrosión diez o más veces superiores a las mostradas por éstos en la mayoría de los ambientes (16).

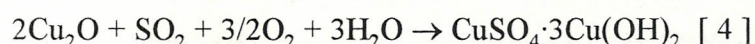
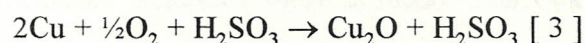
El mecanismo del proceso es también radicalmente diferente, y si los contaminantes aceleran la corrosión, y en gran medida, como sucede en el hierro, necesitan para ello consumirse, dado que entran a formar parte de los productos de corrosión, en lugar de renovarse continuamente, catalizando el

proceso sin desaparecer, como en el hierro. Las reacciones fundamentales responden al siguiente esquema general:



determinando la estequiometría de los productos de corrosión, el tipo y concentración del contaminante, pudiendo desempeñar los cloruros, de la procedencia que fueren, el mismo papel desempeñado por el SO_2 en las reacciones anteriores, aunque el mecanismo de actuación de ambos no tenga porqué ser idéntico, actuando los cloruros muchas veces a través simplemente de la ruptura de las capas protectoras.

Barton y Beranek proponen para el cobre las siguientes reacciones:



con el SO_2 actuando en la primera como catalizador, lo que concuerda con la gran aceleración del ataque que provoca su presencia. Ahora bien, esto debe ocurrir sólo en una primera fase del ataque, a la que suceden otras en las que, lo mismo que ocurre con el cinc, debe tener lugar un consumo continuo de SO_2 por formación de productos insolubles. Es más, con el cobre se muestra muy acentuada la capacidad de los productos de corrosión de captar los componentes agresivos de la atmósfera para formar sales básicas protectoras, lo que conduce a una corrosión muy pequeña y a una dependencia muy débil de la misma con respecto a la concentración de contaminantes.

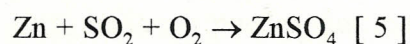
Con Barton y Beranek coincide Schikorr en afirmar que la hermosa pátina verde que recubre al cobre al cabo de los años se debe a un sulfato básico con, aproximadamente, la composición $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ y no, como aún se sigue encontrando en la bibliografía, a un carbonato básico de cobre.

Tales carbonatos son los productos de corrosión típicos de las atmósferas sin contaminar, mientras que en las atmósferas con cloruros el $\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$ sustituye al sulfato básico.

En ensayos naturales de exposición encuentra Schikorr que el cinc da lugar, en la época fría del año, a productos de corrosión formados en más de un 90% por mezclas de sulfito y sulfatos, que son disueltos y arrastrados por la lluvia. Por el contrario, en verano contienen cantidades notables de óxidos o carbonato básico de cinc, que permanecen adheridos sobre el metal. Con esta opinión coinciden otros autores, mientras que algunos distinguen entre los carbonatos básicos formados en las atmósferas rurales, esencialmente $\text{Zn}_5[(\text{OH})_3/\text{CO}_3]_2$, los formados por condensación de agua en atmósferas puras, en los que coexiste el compuesto anterior con ZnOZnCO_3 y $\text{ZnCO}_3 \cdot 3\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, formando la corrosión blanca y los sulfatos y cloruros básicos, $[\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{Zn}(\text{OH})_2$ y $\text{ZnCl}_2 \cdot 6\text{Zn}(\text{OH})_2]$, que junto con $\text{Zn}(\text{OH})_2$ y ZnO aparecen en atmósferas contaminadas, aunque la elevada solubilidad de cloruros y sulfatos hacen que desaparezcan una vez formados.

Schikorr supone que se forma sulfito primeramente, que luego se transforma en sulfato a través de varias reacciones parciales para las cuales es precisa la concurrencia del agua. El sulfato no se encuentra en íntimo contacto con el metal, lugar que probablemente ocupa el carbonato básico protector que se

disuelve en el medio ácido generado por el SO_2 o los cloruros para formarse de nuevo, equivaliendo el metal consumido a la corrosión. El proceso global transcurre, en resumen, de acuerdo con la reacción:



equivalente a la reacción [1] para Schikorr, mientras que Barton y Beranek creen en la continuación del proceso según la reacción [2], para dar lugar como producto final a un sulfato básico de composición variable, representado por la fórmula general $\text{XZnSO}_4 \cdot \text{YZn(OH)}_2$. Presumiblemente las distintas condiciones experimentales son las responsables de las diferencias de matiz entre las opiniones de los investigadores.

En el caso del Al, prácticamente todos los investigadores coinciden en afirmar que, en lugar de sulfatos básicos cristalizados; la corrosión conduce a hidróxido amorfo fuertemente peptizado, Las X moléculas de sulfato que entran a formar parte del producto de corrosión según la reacción [2] desaparecerían, pues, lo mismo que ocurre en el hierro, se desconoce la existencia de sulfatos básicos para el Al. Sin embargo, Barton y Beranek encuentran que los productos de corrosión contienen cantidades considerables de SO_2 , las cuales deben estar absorbidas en el hidróxido y/o disueltas en el agua retenida en sus capilares. De igual forma se fijarían los iones cloruro y, tanto el SO_2 como éstos, serán probablemente lixiviados con facilidad por el agua de lluvia (16).

Ecuaciones que gobiernan la cinética de corrosión.- El hecho de que la velocidad de corrosión de los metales en la atmósfera pueda ser decenas y hasta cientos de veces mayor en unos lugares que en otros, indica el interés práctico de una estimación científica de la agresividad de aquella (16).

En una atmósfera perfectamente seca, la corrosión a temperatura ambiente progresa a velocidad infinitesimal. Como se ha expuesto, la naturaleza electroquímica del proceso exige que las superficies metálicas estén humedecidas, ya que de otro modo no pueden funcionar las minúsculas pilas locales de corrosión.

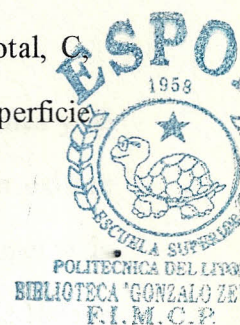
Es lógico, por tanto, que la magnitud de la corrosión dependa del tiempo durante el cual la superficie metálica (verdadera duración del proceso), más que del transcurso de un período determinado en el calendario (mes, año).

En conclusión, la corrosión atmosférica es un proceso discontinuo que sólo progresa cuando las capas superficiales de electrólito hacen posible las semirreacciones anódica y catódica, pudiendo expresarse la corrosión total, C , como la suma de la ocurrida durante los períodos (τ_{1-n}) en el que la superficie metálica permanece humedecida:

$$C = \tau_1 v_{c1} + \tau_2 v_{c2} + \dots + \tau_n v_{cn} = \sum \tau_{1-n} v_{c1-n} = v_c \tau \quad [1]$$

siendo v_c la velocidad media de corrosión durante el tiempo total de humectación τ , a menudo bastante inferior al de exposición.

Si se conociera el término v_c con la misma facilidad y seguridad con la que se puede conocer actualmente τ , las predicciones de corrosión no ofrecerían excesivas dificultades. Sin embargo, la medición exacta de la corrosión atmosférica es un problema complicado a causa de los múltiples factores que determinan la agresividad de cada lugar, es decir, v_c , entre los que se pueden destacar: a) los factores climatológicos; b) la contaminación; c) las condiciones de exposición, por ejemplo, orientación de la superficie metálica respecto al aire



marino dominante o el almacenamiento bajo abrigo ventilado, y d) la naturaleza y propiedades protectoras de los productos de corrosión.

Como, por otra parte, la velocidad instantánea de corrosión puede variar a lo largo de cada uno de los períodos parciales de humectación y, por supuesto, de uno a otro período, el único camino de lograr orientaciones fiables es medir, en cada lugar, el tiempo anual de humectación y la corrosión C de cada metal, durante un período suficientemente grande para que las extrapolaciones a largo plazo tengan garantía. Además, con las pequeñas velocidades de corrosión características de los metales no féreos y las peculiaridades cíclicas de las variables climatológicas, cualquier período de exposición inferior al año conduciría probablemente a predicciones muy incorrectas.

Si no se quiere o no se puede realizar ensayos de exposiciones naturales y se conocen las características meteorológicas y de contaminación del lugar existen en la bibliografía distintos estudios que intentan expresar matemáticamente la corrosión en función de tales datos, de entre los que cabe destacar los de Haynie y Upham para el acero, que por basarse en un cuidadoso análisis estadístico de los datos de corrosión, contaminación y meteorológicos de 57 ciudades de los Estados Unidos, y no en los de un determinado lugar de exposición, es de esperar tengan una aplicación más amplia. Según estos autores, la corrosión del acero dulce (C) durante el primer año de exposición estaría dada, en micras, por:

$$C = 325 \cdot e^{(2.75 S - 163.2/H)} \quad [2]$$

donde S es la concentración media anual de SO_2 en la atmósfera en mg/m^3 , y H , la humedad relativa media anual.

En un estudio similar, pero relativo a ocho ciudades, llegan los mismos investigadores a la siguiente ecuación para el cinc:

$$C = 1.028 (H - 48.8) S \quad [3]$$

donde C, H y S tienen idénticos significados que para el acero.

En el caso del acero dulce parece fuera de duda que el progreso de la corrosión tiende a amortiguarse con el tiempo, asimilándose con bastante aproximación a leyes del tipo:

$$C = A \cdot t^n \quad [4]$$

siendo n un exponente inferior a la unidad. Tratándose del acero dulce abundan los valores de n cercanos a 0.5, como testimonia la Fig. N° 17, lo que brinda un método aproximado de predecir la corrosión a largo plazo, siempre, claro está, que se haya determinado el dato de corrosión para el primer año en el lugar en cuestión.

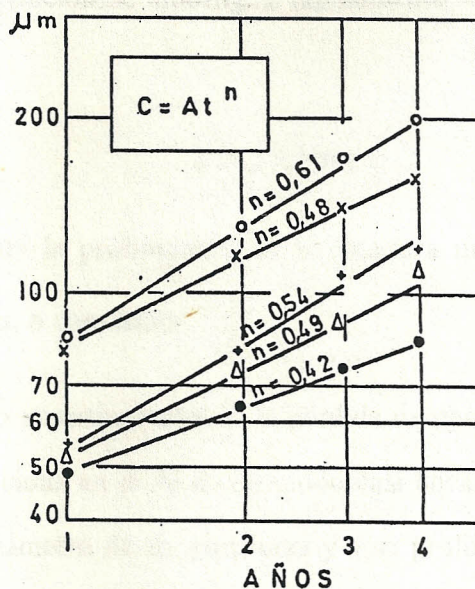


Fig. N° 17: Verificación aproximada de leyes tipo $C = A \cdot t^n$ (16).

También se puede asimilar a la ecuación [4] el comportamiento del Zn y del Cu. El campo de variación del exponente n es para el Zn más amplio que para el acero, encontrándose desde valores próximos a la unidad (crecimiento lineal) en un extremo, a 0.5 (ley parabólica) en el otro. El Cu ofrece un comportamiento más próximo al del Fe, con exponente frecuentemente en torno a 0.6, si bien con una constante A muy inferior.

No obstante, son muchos los investigadores que sostienen que, después de un primer período de disminución de la velocidad de corrosión, ésta se estabiliza en muchos ambientes, planteándose a partir de este momento una ley lineal de variación de la corrosión con el tiempo, tanto para uno como para otro metal.

Entre los metales aquí estudiados el Al presenta características especiales, debido a su fuerte tendencia a la pasivación y a corroerse localmente en forma de picaduras. Por ello resulta muchas veces más valioso el dato de la profundidad máxima alcanzado por las picaduras que la pérdida de peso. En general, la velocidad de penetración se amortigua rápidamente, adaptándose a ecuaciones del tipo:

$$P = a + b \log t$$

donde P representa la profundidad de la picadura más profunda en μm , t el tiempo en años y a , b constantes.

A pesar del citado amortiguamiento, la pérdida de peso, como suele suceder en el Cu y Zn, evoluciona en el Al de un modo casi lineal con el tiempo, debido al crecimiento del diámetro de las picaduras y a su proliferación, de modo que en una ley exponencial (ecuación 4) el exponente n sería próximo a la unidad.

De todas las ecuaciones empíricas mencionadas anteriormente, la más utilizada es la ecuación 4, la misma que será parte de nuestro estudio. Con esta ecuación se pueden extrapolar los datos anuales de corrosión a periodos más largos y predecir la corrosión que experimentarían los materiales.

En esta ecuación las constantes A y n se las obtienen por análisis de regresión lineal, en donde n es la pendiente del gráfico log - log y el valor de A es la intersección con la ordenada.

3.2. Clasificación de la corrosividad basado en la velocidad de corrosión

En la Tabla N° VII, se indica el rango de valores con que se corroen los diferentes metales, los mismos que son obtenidos luego de que los metales hayan cumplido su período de exposición, con lo cual se pueden establecer relaciones para determinar la agresividad de una atmósfera y por ende la categoría correspondiente.

TABLA N° VII

CATEGORÍAS DE CORROSIVIDAD EN FUNCION DE LA RAPIDEZ DE CORROSIÓN DE LOS METALES DURANTE EL PERIODO DE EXPOSICION (3)

Categorías de corrosividad	Unidades	Rapidez de corrosión de metales			
		Acero	Ac. Galv. (cinc)	Cobre	Aluminio
C1	gr/m ² ·año µm/año	< 10 < 1.3	< 0.7 < 0.1	< 0.9 < 0.1	despreciable
C2	gr/m ² ·año µm/año	10 - 200 1.3 - 25	0.7 - 5 0.1 - 0.7	0.9 - 5 0.1 - 0.6	< 0.6 < 0.2
C3	gr/m ² ·año µm/año	200 - 400 25 - 51	5 - 15 0.7 - 2.0	5 - 12 0.6 - 1.3	0.6 - 2 0.2 - 0.7
C4	gr/m ² ·año µm/año	400 - 650 51 - 83	15 - 30 2.0 - 4.2	12 - 25 1.3 - 2.8	2 - 5 0.7 - 2
C5	gr/m ² ·año µm/año	> 650 > 83	> 30 > 4.2	> 25 > 2.8	> 5 > 2

3.3. Categorías de corrosividad

La estimación de la categoría de corrosividad de una atmósfera puede realizarse para cada metal, a partir de los datos medioambientales o en función de los datos de corrosión en ella obtenidos. En la Tabla N° VIII, se ha escogido por

conveniencia 5 categorías donde se ubica la corrosividad que tiene una atmósfera.

TABLA N° VIII

CATEGORÍAS DE CORROSIVIDAD DE LAS ATMÓSFERAS

CATEGORÍA	CORROSIVIDAD
C1	muy baja
C2	baja
C3	media
C4	alta
C5	muy alta

Hay que indicar que cualquier camino seleccionado para caracterizar una atmósfera, ya sea por evaluación con datos medioambientales o por velocidad de corrosión de muestras específicas de metales, las categorías deben ser iguales.

CAPITULO IV

TRABAJO EXPERIMENTAL

En este capítulo se pone de manifiesto la metodología a seguir para obtener el dato de corrosión de los metales expuestos en diferentes atmósferas, para lo cual hay que identificar tipos de atmósferas existentes; metales a ensayar, su proceso de limpieza antes y después de su exposición, la codificación para registrar los datos obtenidos, el soporte que los contiene y la técnica utilizada (pérdida de peso). Los materiales a ensayar son: acero, acero galvanizado, cobre y aluminio..

4.1. Tipos de atmósferas

Antes que los materiales o datos sobre los materiales puedan ser evaluados, las variables atmosféricas del sitio donde están expuestos los materiales deben ser determinadas y periódicamente registrados durante el periodo de evaluación. La severidad del ambiente es usualmente indicada designando a los ambientes como: rural, urbano, industrial, marino o una combinación de estos.

Atmósfera rural.- Clasificada normalmente como una atmósfera que no contiene contaminantes químicos, pero contiene polvos orgánicos e inorgánicos. Su principal factor de corrosión es la humedad, y por supuesto, el dióxido de

carbono. Las atmósferas áridas o tropicales son casos especiales de los ambientes rurales debido a su extrema humedad relativa y condensación. La atmósfera rural es generalmente la menos corrosiva.

Atmósfera urbana.- Es similar a la rural en que está alejada de las complejidades de la industria. Los materiales expuestos en estas áreas están sujetos a la precipitación normal de contaminantes urbanos típicos que son emitidos por motores de vehículos y combustible de tipo casero.

Atmósfera industrial.- Se identifica típicamente como equipos pesados en la industria manufacturera. Estas atmósferas pueden contener concentraciones de dióxido de azufre, clorhidratos, fosfatos, nitratos y otras emisiones industriales. Estas emisiones se combinan con precipitación y forman el líquido corrosivo.

Atmósfera marina.- está cargada de finas partículas de sales del mar que son transportadas por los vientos y depositadas en los materiales. Esta atmósfera marina es usualmente una de las más corrosiva y se ha demostrado que la cantidad de sal en el ambiente marino decrece con el aumento de la distancia del océano y está influenciada grandemente por la dirección y velocidad del viento.

4.2. Estaciones de ensayo

En nuestro País se pudo haber seleccionado cualquier sitio geográfico que tenga o no características relevantes tanto de contaminación ambiental como de aspectos climatológicos. Sin embargo, los sitios escogidos para realizar la fase de exposición atmosférica, obedecen a un requerimiento de infraestructura y

apoyo logístico mínimo; es decir: acceso a toda la información pertinente de una estación meteorológica que opere en las cercanías del panel de exposición.

La Tabla N° IX, detalla la codificación internacional utilizada por MICAT, además suministra información referente a los sitios escogidos y la atmósfera aparente.

TABLA N° IX
ESTACIONES MICAT - FASE ECUADOR

ESTACIÓN	CÓDIGO	ORGANISMO RESPONSABLE	ATMÓSFERA
Guayaquil	EC-01-A	ESPOL	Rural
Riobamba	EC-02-B	ESPOCH	Rural
Salinas	EC-03-C	BASE NAVAL	Marina
Esmeraldas	EC-04-D	REE	Marina-Industrial
San Cristóbal	EC-05-E	BASE NAVAL	Marina

- Las estaciones de ensayo disponen de equipos de captadores de contaminantes de SO₂ y cloruros; sólo la estación de Guayaquil cuenta con un equipo de registro continuo de humedad relativa y temperatura (termohigrógrafo).
- La inclinación de las probetas en el panel de exposición es de 30°.

- Las probetas de exposición miran hacia el Nororiente en el Hemisferio Sur.

Para el montaje y localización de las estaciones de ensayo se siguió la metodología propuesta en ASTM G50 (18), teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Exposición al aire libre y sin apantallamientos
- Ubicación de las estaciones de ensayo próximas a estaciones meteorológicas.
- Los paneles de exposición deben asegurar una durabilidad durante toda la investigación.
- La altura sobre el suelo de las probetas no deberá ser inferior a 0.75m.
- Se evitará el contacto eléctrico entre probetas mediante aisladores.

4.3. Materiales Utilizados

Según la Norma ISO, los materiales que se estudian son metales estructurales de las siguientes características:

- Acero no aleado de bajo contenido de carbono
- Acero galvanizado
- Cobre
- Aluminio

En la Tabla N° X, se muestra la composición química de los materiales utilizados.

TABLA N° X

COMPOSICIÓN (%) DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

MATERIAL	COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)						
	Mn	Si	C	Zn	Cu	Al	Otros
Acero	0.34	0.072	0.05	-	-	-	0.023 S, 0.023 P
Ac. Galv. (cinc)	0.26	0.067	0.04	99.95	-	-	0.012 S, 0.025 P
Cobre	-	-	-	-	99.9	-	-
Aluminio	-	-	-	-	-	99.5	-

Además se muestran en las figuras 18, 19, 20 y 21 las microestructuras de cada material empleado.



Fig. N° 18: Microestructura del acero de bajo carbono, constituida de granos equiaxiales de ferrita.

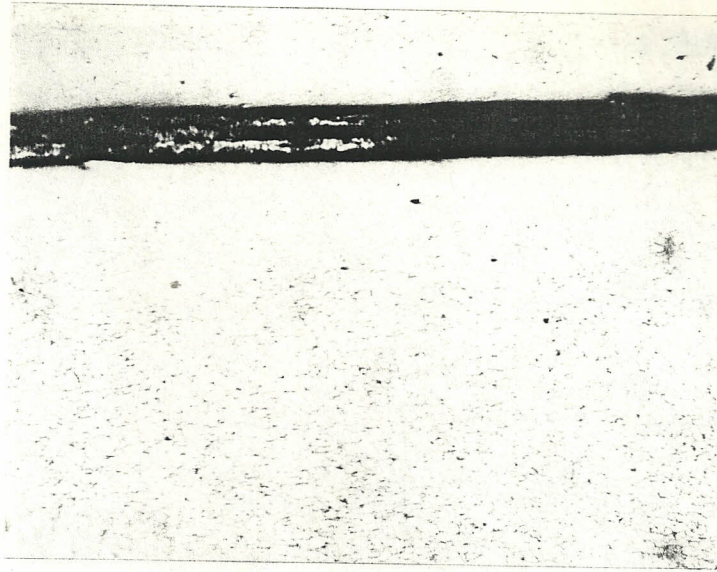


Fig. N° 19: Microestructura del acero galvanizado. Muestra el metal base constituido por acero de bajo carbono y el recubrimiento de cinc.

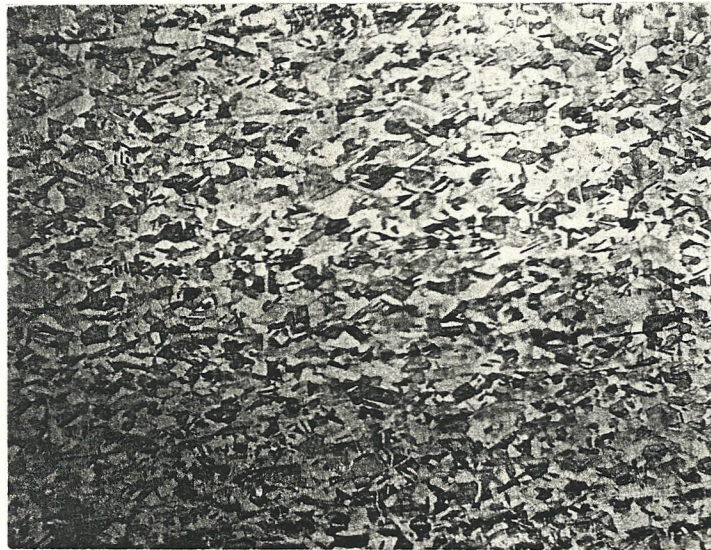


Fig. N° 20: Microestructura del cobre, muestra granos equiaxiales.



Fig. N° 21: Microestructura del aluminio, la estructura es típica de un proceso de deformación en frío. Las partículas oscuras son compuestos insolubles que contienen principalmente hierro y/o silicio

Forma y dimensiones.- Las probetas de ensayo, por lo general de 10 x 15 cm, se prepararon a partir de chapas de 1 mm de espesor. En las estaciones marinas severas, para evitar problemas de exfoliación, se acudió a mayores espesores de chapa, protegiéndose los bordes con recubrimientos de pintura epoxídica-poliamida, que se aplica por inmersión con un ancho de recubrimiento de 2 a 5 mm.

Identificación.- Las probetas se identificaron mediante estampación de letras y números en el centro de la cara superior expuesta al ciclo de cada ensayo.

Se ha seguido como clave de identificación la siguiente combinación de letras y números:

LETRA

NUMERO

LETRA

Indica el material

F: acero

G: ac. galvanizado

C: cobre

A: aluminio

Indica el N° de probeta

1 - 20

Indica la estación de ensayo

A: Guayaquil

B: Riobamba

C: Salinas

D: Esmeraldas

E: San Cristóbal

Una vez identificadas, se procedió a la limpieza de las probetas metálicas previa a su exposición a la atmósfera. Existen distintos métodos de preparación en función del material de que se trate. A modo de ejemplo, se exponen las distintas etapas que se deberían considerar:

- a) Eliminación de la grasa o aceites superficiales utilizando disolventes orgánicos o mezclas alcalinas en caliente, teniendo en cuenta que las soluciones alcalinas y los disolventes clorurados pueden atacar algunos metales.
- b) Decapado con inhibidor en el caso de que existan óxidos o manchas.
- c) Limpieza completa con soluciones químicas específicas para cada metal, secado en aire caliente y almacenamiento en desecador.

Las probetas de ensayo se pesaron en una balanza analítica con precisión de hasta centésima de gramo.

En el Anexo V, se muestran los pesos iniciales de todas las probetas utilizadas en el estudio.

Con el fin de conservarlas en perfecto estado hasta el momento de su exposición, las probetas de ensayo fueron envueltas en fundas plásticas herméticamente cerradas.

A continuación se muestran en las figuras 22 al 26 los paneles de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes (cloruros y dióxido de azufre) instalados en las diferentes estaciones de ensayo, los mismos que servirán para establecer relaciones de comportamiento entre variables meteorológicas y de contaminación con el grado de corrosividad atmosférica sobre los metales expuestos.

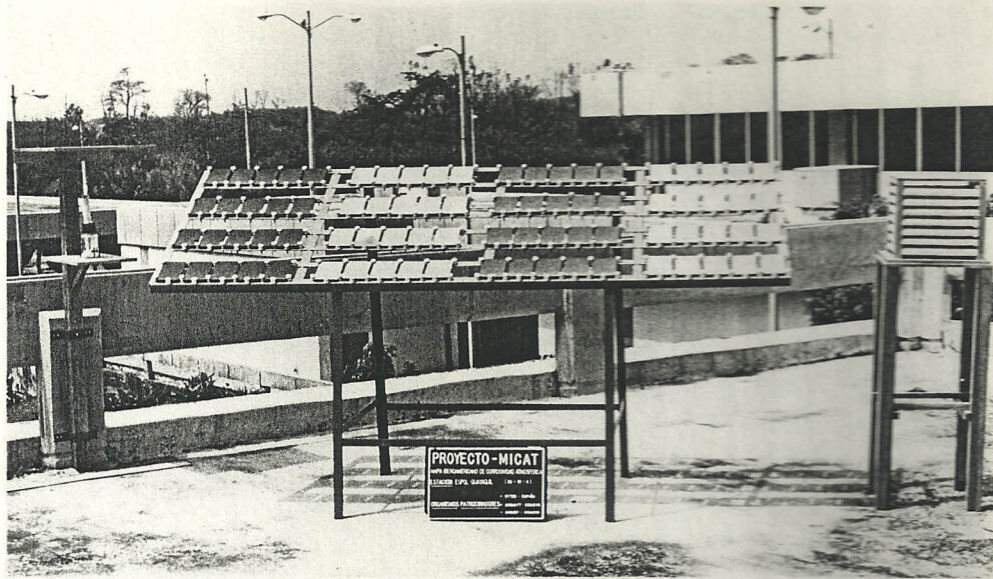


Fig. N° 22: Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalados en la ESPOL (Guayaquil).

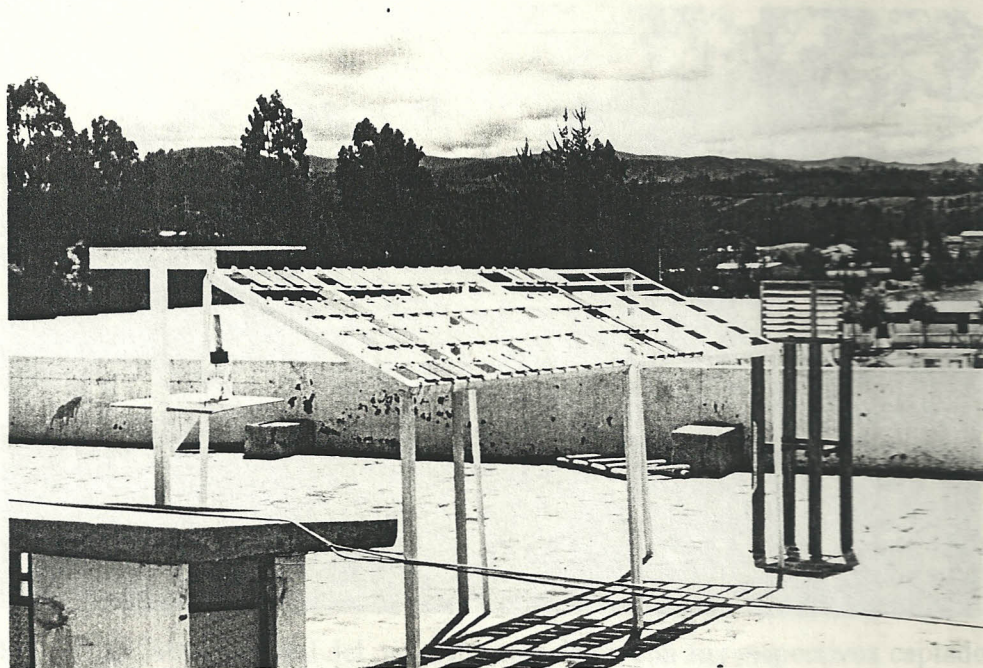


Fig. N° 23: Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalados en la ESPOCH (Riobamba).

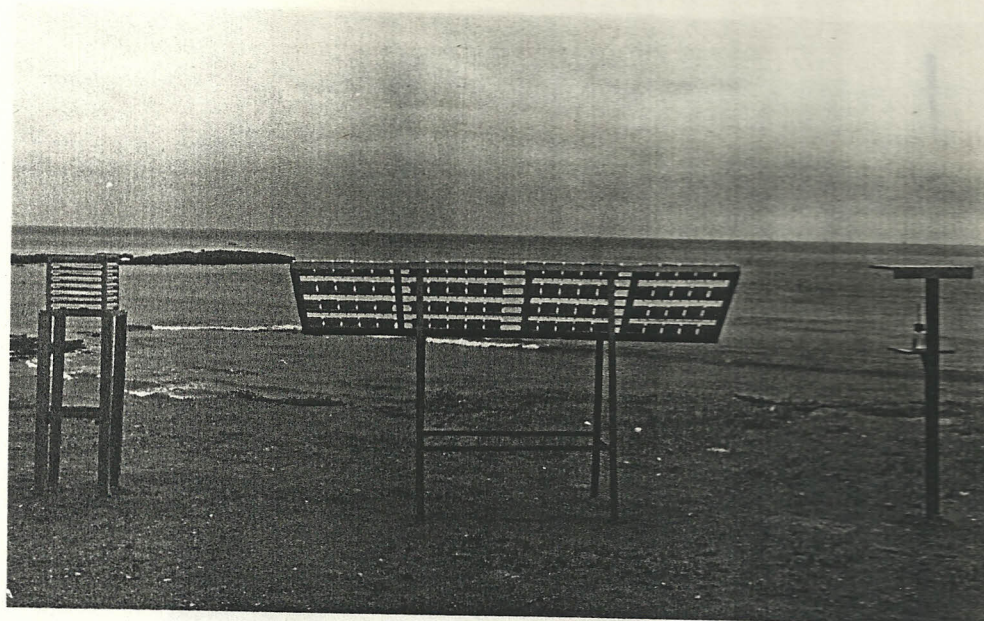


Fig. N° 24: Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalados en la Base Naval (Salinas).

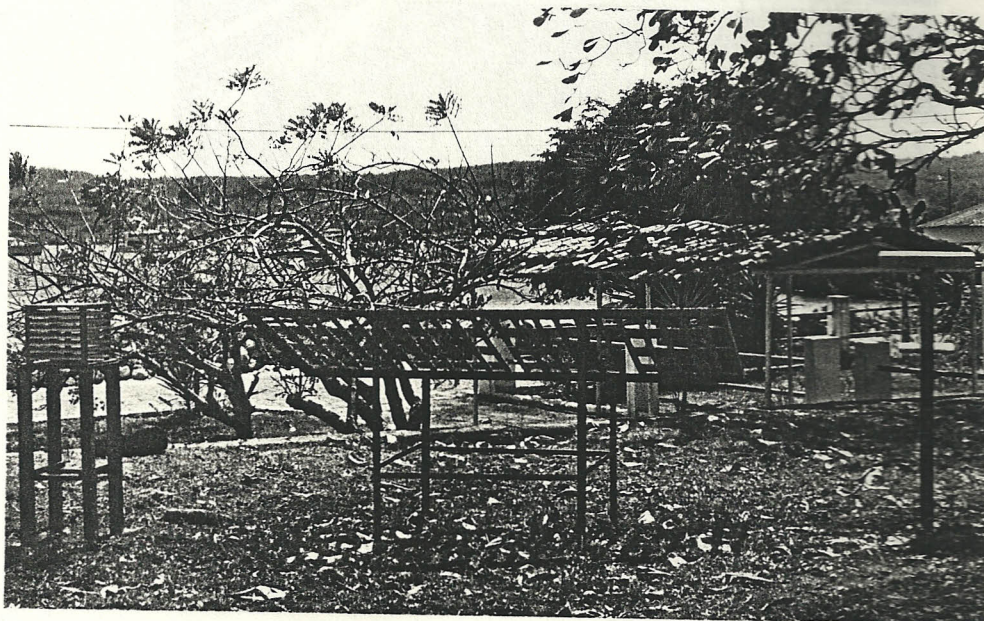


Fig. N° 25: Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalados en la Base Naval (San Cristóbal - Galápagos).

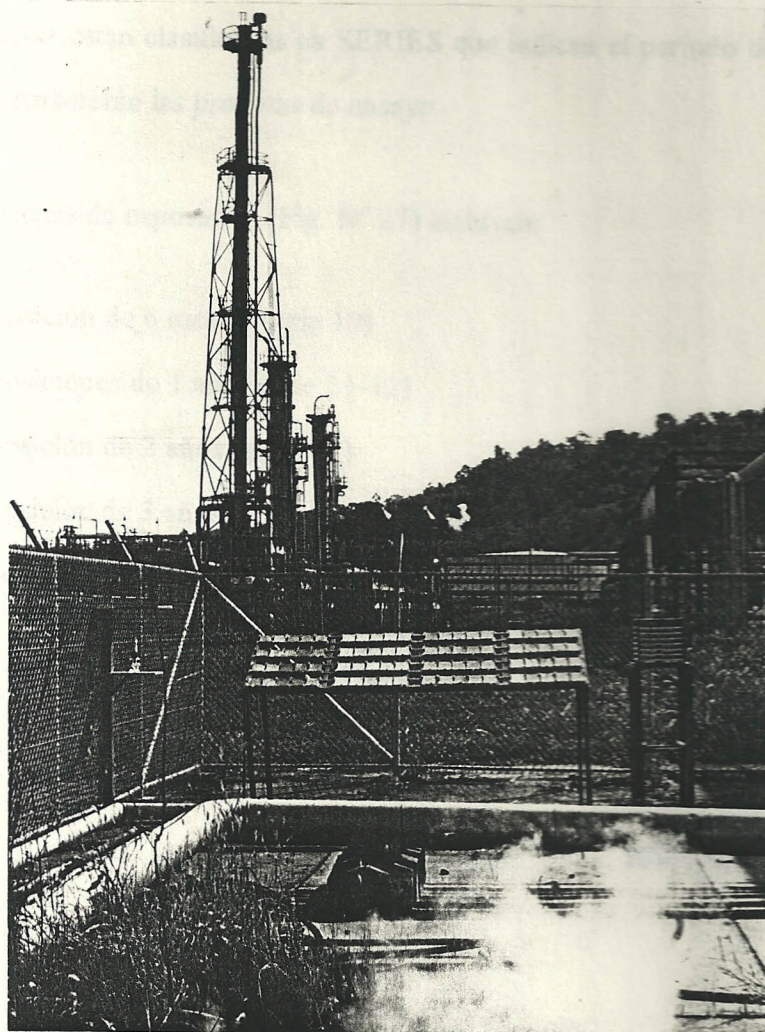


Fig. N° 26: Vista general del panel de exposición con sus respectivos captadores de contaminantes instalados en Refinería Estatal de Esmeraldas (Esmeraldas).

4.4. Secuencias de exposición

Las probetas están clasificadas en SERIES que indican el periodo de exposición al que se someterán las probetas de ensayo.

Las secuencias de exposición (Fig. N° 27) incluyen:

- 1 exposición de 6 meses (serie 10)
- 2 exposiciones de 1 año (serie 11-12)
- 1 exposición de 2 años (serie 21)
- 1 exposición de 3 años (serie 31)
- 1 exposición de 4 años (serie 41)

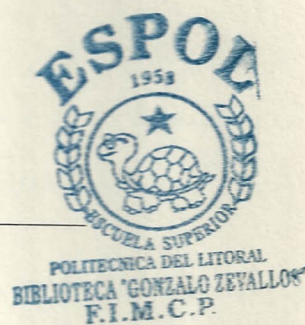
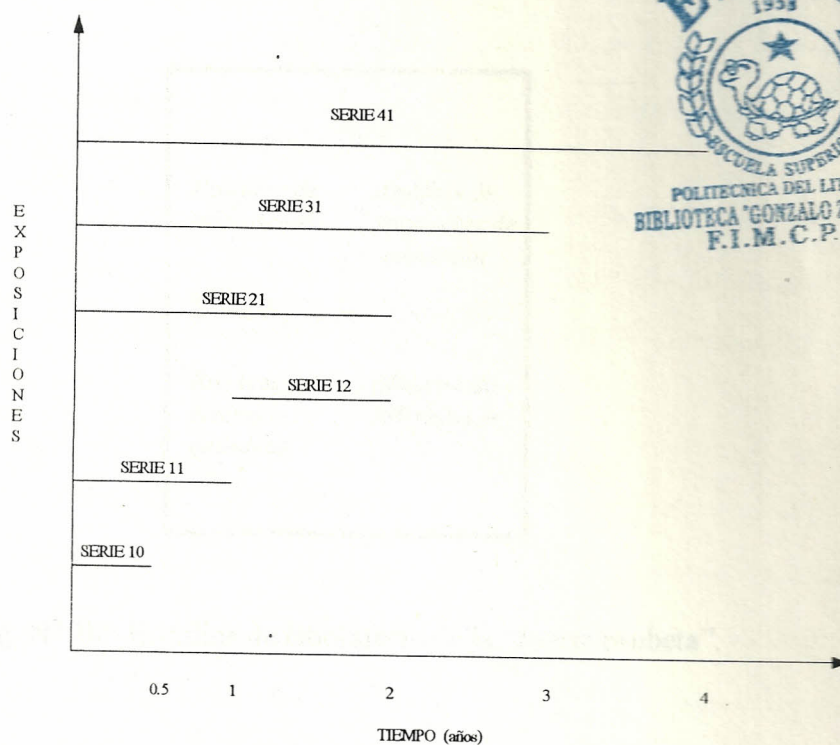


Fig. N° 27: Secuencias de exposición de las distintas series de probetas.

En cada secuencia se han expuesto cuatro probetas de cada material, tres de las cuales se emplean para el cálculo de la velocidad de corrosión por la técnica de pérdida de peso (ISO/DIS 9226) (6).

La eliminación de los productos de corrosión, para el cálculo de la pérdida de peso, hace que se pierda una valiosa información sobre la naturaleza de las distintas fases presentes entre los productos de corrosión, morfología de las capas de productos de corrosión, etc., que son de gran ayuda para un mejor conocimiento de los mecanismos de corrosión atmosférica. Por ello, el proyecto MICAT considera en cada secuencia de exposición una "cuarta probeta" destinada a diferentes estudios (Fig. N° 28):

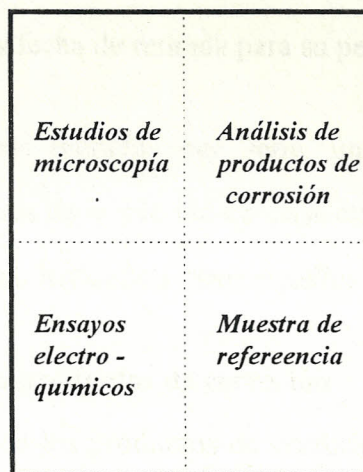


Fig. N° 28: Estudios de laboratorio de la "cuarta probeta".

- a) Análisis de los productos de corrosión: DRX, FTIR, Espectroscopia, Mössbauer, determinación de la concentración de cloruros y sulfatos entre los productos de corrosión, etc.

- b) Exámenes microscópicos de las capas de productos de corrosión: MEB, EDAX, etc.
- c) Ensayos electroquímicos: curvas de polarización, ciclovoltametrías, resistencia de polarización, espectroscopía de impedancia electroquímica, ruido electroquímico, etc.

4.5. Procedimiento para la obtención del dato de corrosión atmosférica

Al cumplirse el período de exposición correspondiente a cada serie, las probetas se retiran de la estación de ensayo situándolas individualmente en bolsas de plástico u otro procedimiento análogo herméticamente cerradas.

Para mayor seguridad, en la bolsa se anotará el material, el número de probeta, nombre de la estación y fecha de retirada para su perfecta identificación.

De las cuatro probetas retiradas por serie, únicamente tres de ellas irán destinadas para la medida de la pérdida de masa experimentada por la corrosión atmosférica, la cuarta irá destinada a otros estudios descritos anteriormente.

4.5.1. Limpieza de los productos de corrosión

La eliminación de los productos de corrosión se realiza de acuerdo con ISO 9226 (6). El método consiste en introducir las probetas en aquellas soluciones durante un período de tiempo determinado. Pasado este tiempo, se extrae la probeta de la disolución, se lava, se seca y se pesa en una balanza analítica. Este ciclo se repite hasta la eliminación completa de los productos de corrosión. La Tabla N° XI muestra las disoluciones químicas.

TABLA N° XI

SOLUCIONES ESPECIFICAS PARA LA ELIMINACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN (19)

MATERIAL	BAÑO	TIEMPO DE INMERSIÓN (min.)	TEMP. (°C)	OBSERVACIONES
Acero	500 ml de ácido clorhídrico (d=1.19), 3.5 gr de hexametilentetramina y agua destilada hasta completar 1 ltr.	10	20 - 25	
Ac. Galv. (cinc)	200 gr. de trióxido de cromo y agua destilada hasta completar 1 ltr.	1	80	La contaminación del ácido crómico por los cloruros existentes entre los productos de corrosión formados en una atmósfera marina debe evitarse para disminuir el ataque del metal base.
Cobre	54 ml de ácido sulfúrico (d=1.84) y agua destilada hasta completar 1 ltr.	30 - 60	40 - 50	Se aconseja utilizar la solución de limpieza desairada con nitrógeno. Cepillar las probetas al finalizar la inmersión con un cepillo que no dañe el metal. Así se facilita la eliminación de los productos de corrosión. Volver a sumergir la probeta en el baño durante 3 -4 seg.
Aluminio	50 ml de ácido fosfórico (d=1.69), 20 gr de trióxido de cromo y agua destilada hasta completar 1 ltr.	5 - 10	90 - 95	Si no se consigue eliminar totalmente la película de productos de corrosión, seguir el procedimiento del ácido nítrico.
	Ácido nítrico (d=1.42)	1 - 5	20 - 25	Eliminar previamente depósitos extraños y costras de productos de corrosión para evitar un excesivo ataque del metal base.

4.5.2. Cálculo de la pérdida de peso (19)

Las pérdidas de peso acumuladas se representan en una gráfica frente al número de ciclos, según se muestra en la Fig. N° 29. La pérdida de peso debida a la eliminación de los productos de corrosión es la correspondiente a los puntos D o G, obtenidos por extrapolación a cero ciclos de la línea de disolución del metal base (líneas BC o EF).

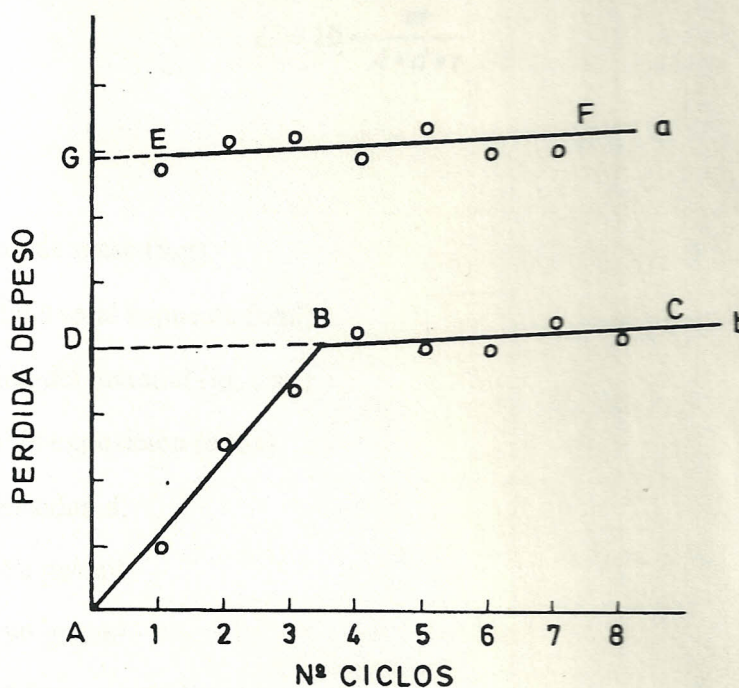


Fig. N° 29: Pérdida de peso en función del número de ciclos de limpieza. a)

Caso de una probeta en la que se han eliminado los productos de corrosión durante el primer ciclo de limpieza. b) Caso de una probeta en la que no se consiguen eliminar totalmente los productos de corrosión hasta el cuarto ciclo de limpieza.

Esta técnica de inmersiones sucesivas, aunque lenta, además de garantizar la eliminación total de los productos de corrosión, permite deslindar la pérdida de masa debida a la corrosión del metal por la acción atmosférica de la debida al ataque del metal base por la solución específica empleada.

El cálculo de la velocidad de corrosión, en $\mu\text{m/año}$, se obtiene mediante la ecuación:

$$C = 10 \cdot \frac{m}{A \cdot d \cdot t}$$

siendo:

m: pérdida de masa (mg)

A: superficie total expuesta (cm^2)

d: densidad del material (gr./cm^3)

t: tiempo de exposición (años)

Para la densidad d:

$$d_{\text{acero}} = 7.86 \text{ gr/cm}^3$$

$$d_{\text{cobre}} = 8.96 \text{ gr/cm}^3$$

$$d_{\text{aluminio}} = 2.70 \text{ gr/cm}^3$$

$$d_{\text{cinc}} = 7.20 \text{ gr/cm}^3$$

Para el cálculo de la superficie total expuesta habrá que considerar las dos caras y los bordes expuestos de la probeta, restando aquellas entallas, perforaciones, etc., que puedan estar presentes por motivos de identificación o fijación al bastidor de ensayos.

CAPITULO V

RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se hace un análisis de los primeros resultados obtenidos en las cinco estaciones de ensayo correspondientes al primer año de exposición atmosférica: datos medioambientales y datos de velocidad de corrosión de los metales ensayados.

Los datos medioambientales se refieren a datos meteorológicos y de contaminantes, entre los que se pueden citar: temperatura, humedad relativa (HR) del aire, precipitación y tiempo de humectación. Estos datos fueron suministrados por el INAMHI a excepción del TDH (fracción del año en que la $HR \geq 80\%$ y simultáneamente la $T > 0^\circ\text{C}$), el mismo que fue calculado a partir de las bandas de los termohigrógrafos y de datos a diferentes horas del día de HR y T.

Los datos de contaminantes se refieren a la contaminación atmosférica por dióxido de azufre (SO_2) y cloruros (Cl^-). Para la medida de la contaminación sulfurosa de la atmósfera, se utilizó el método de la sulfatación del dióxido de plomo, en tanto que para la medida de la salinidad atmosférica se utilizó el método de la candela húmeda.

Siguiendo procedimientos recomendados por la norma ISO 9225 (5).

Los datos de velocidad de corrosión de los metales ensayados son obtenidos por la técnica de pérdida de peso.

En las Tablas XII al XVI que se indican a continuación se recogen los valores de los datos medioambientales y de velocidad de corrosión durante el período 1993 - 1994 correspondientes a cada estación de ensayo.

En estas Tablas los datos meteorológicos son valores medios de temperatura y humedad relativa al igual que los datos de contaminantes; mientras que los otros factores meteorológicos de TDH y precipitación es la suma total dentro del periodo de exposición.

Por otro lado también se presentan los resultados de los diferentes materiales ensayados, para lo cual se utilizó la fórmula del cálculo de la pérdida de peso que sirve para determinar la velocidad de corrosión expresada sus unidades en $\mu\text{m}/\text{año}$.

5.1. Estación de Guayaquil (EC - 01 - A)

TABLA N° XII

DATOS MEDIOAMBIENTALES

METEOROLÓGICOS				CONTAMINANTES	
T _m (°C)	HR _m (%)	TDH (hr)	Precip. (mm)	mgSO ₂ /m ² *día	mgCl ⁻ /m ² *día
25.2	75	2800	664	1.64	1.59

VELOCIDAD DE CORROSIÓN

SERIE (duración)	p r o b e t a	Velocidad de Corrosión			
		Acero μm/año	Ac. Galv. (cinc) μm/año	Cobre μm/año	Aluminio μm/año
10 (6 meses)	1	18.15	0.45	0.59	0.05
	2	17.24	0.18	0.58	0.05
	3	18.06	0.09	0.50	0.02
	Vm	17.82	0.24	0.56	0.04
11 (1 año)	01	13.29	0.31	0.29	0.34
	02	12.73	0.27	0.58	0.37
	03	13.35	0.41	0.47	0.15
	Vm	13.12	0.33	0.45	0.29

5.2. Estación de Riobamba (EC - 02 - B)

TABLA N° XIII

DATOS MEDIOAMBIENTALES

METEOROLÓGICOS				CONTAMINANTES	
T _m (°C)	HR _m (%)	TDH (hr)	Precip. (mm)	mgSO ₂ /m ² *día	mgCl ⁻ /m ² *día
13.2	71	4936	598	1.47	2.09

VELOCIDAD DE CORROSIÓN

SERIE (duración)	P r o b e t a	Velocidad de Corrosión			
		Acero μm/año	Ac. Galv. (cinc) μm/año	Cobre μm/año	Aluminio μm/año
10 (6 meses)	1	4.51	-	0.22	-
	2	1.66	-	0.29	-
	3	7.14	-	0.22	-
	Vm	4.44		0.24	
11 (1 año)	01	3.84	0.13	0.21	-
	02	3.74	0.13	0.25	-
	03	5.35	0.05	0.22	-
	Vm	4.31	0.10	0.23	-

5.3. Estación de Salinas (EC - 03 - C)

TABLA N° XIV

DATOS MEDIOAMBIENTALES

METEOROLÓGICOS				CONTAMINANTES	
T _m (°C)	HR _m (%)	TDH (hr)	Precip. (mm)	mgSO ₂ /m ² *día	mgCl ⁻ /m ² *día
23.5	78.7	2105	15.9	1.55	36.27

VELOCIDAD DE CORROSIÓN

SERIE (duración)	p r o b e t a	Velocidad de Corrosión			
		Acero μm/año	Ac. Galv. (cinc) μm/año	Cobre μm/año	Aluminio μm/año
10 (6 meses)	1	59.42	0.76	1.57	0.37
	2	57.98	0.85	1.57	0.25
	3	47.37	0.74	1.66	0.29
	V _m	54.92	0.78	1.60	0.30
11 (1 año)	01	40.82	0.60	1.21	0.34
	02	45.97	0.72	1.42	0.20
	03	47.49	0.56	1.28	0.25
	V _m	44.76	0.63	1.30	0.26

5.4. Estación de Esmeraldas (EC - 04 - D)

TABLA N° XV

DATOS MEDIOAMBIENTALES

METEOROLÓGICOS				CONTAMINANTES	
T _m (°C)	HR _m (%)	TDH (hr)	Precip. (mm)	mgSO ₂ /m ² *día	mgCl ⁻ /m ² *día
26.8	78.4	6216	772.5	10.47	2.69

VELOCIDAD DE CORROSIÓN

SERIE (duración)	p r o b e t a	Velocidad de Corrosión			
		Acero µm/año	Ac. Galv. (cinc) µm/año	Cobre µm/año	Aluminio µm/año
10 (6 meses)	1	77.21	1.28	2.57	0.18
	2	79.15	1.28	2.77	0.30
	3	79.31	1.37	2.48	0.35
	Vm	78:56	1.31	2.61	0.28
11 (1 año)	01	58.03	0.94	2.03	0.36
	02	57.39	1.00	2.15	0.33
	03	59.80	1.05	1.93	0.34
	Vm	58.41	1.00	2.04	0.34

5.5. Estación de San Cristóbal (EC - 05 - E)

TABLA N° XV

DATOS MEDIOAMBIENTALES

METEOROLÓGICOS				CONTAMINANTES	
T _m (°C)	HR _m (%)	TDH (hr)	Precip. (mm)	mgSO ₂ /m ² *día	mgCl ⁻ /m ² *día
24.6	80.3	1767	246.8	1.05	25.01

VELOCIDAD DE CORROSIÓN

SERIE (duración)	p r o b e t a	Velocidad de Corrosión			
		Acero µm/año	Ac. Galv. (cinc) µm/año	Cobre µm/año	Aluminio µm/año
10 (6 meses)	1	23.65	1.34	1.88	0.02
	2	21.63	0.46	0.95	0.05
	3	21.92	0.46	1.59	0.02
	Vm	22.40	0.75	1.47	0.03
11 (1 año)	01	24.42	1.29	1.60	0.19
	02	27.92	1.04	1.69	0.19
	03	37.11	1.04	1.72	0.15
	Vm	29.82	1.12	1.67	0.18

CAPITULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Comportamiento del TDH

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la Fig. N° 30 se presenta el número de horas anuales en que $HR \geq 80\%$ y la $T > 0^\circ\text{C}$ para las estaciones de ensayo.

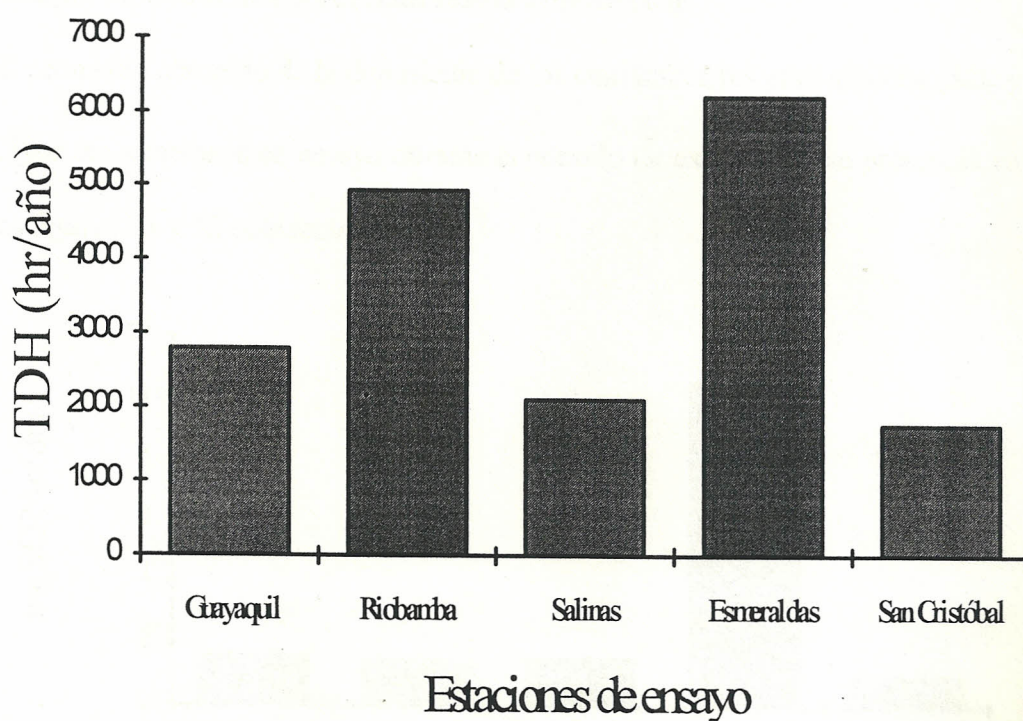


Fig. N° 30: Tiempo de humectación de las estaciones de ensayo.

La gráfica nos indica que tanto Esmeraldas como Riobamba poseen un TDH mayor que el resto de las estaciones. De acuerdo a la norma ISO 9223 (3), la clasificación para las estaciones de ensayo son:

Guayaquil.....	τ_4
Riobamba.....	τ_4
Salinas.....	τ_3
Esmeraldas.....	τ_5
San Cristóbal.....	τ_3

6.2. Comportamiento de los contaminantes atmosféricos

El promedio obtenido de la deposición de los contaminantes atmosféricos (SO_2 y Cl) en las estaciones de ensayo durante el periodo de exposición, se presentan en las figuras 31 y 32 respectivamente.

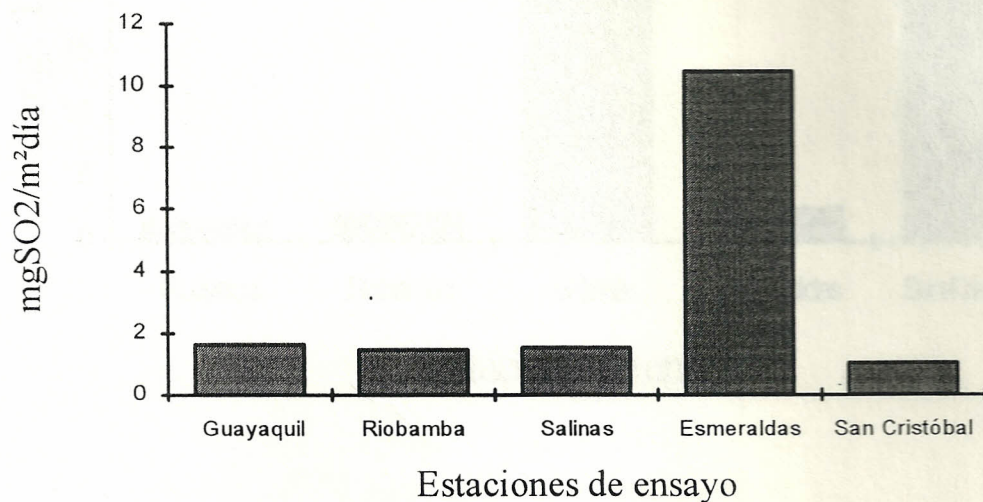


Fig. N° 31: Promedio de deposición de SO_2 en las estaciones de ensayo.

El gráfico nos muestra que la mayor cantidad de SO_2 registrados en las estaciones de ensayo lo tiene Esmeraldas, y en menor cantidad el resto de las estaciones. De acuerdo a la norma ISO 9223 (3), la clasificación de las estaciones de ensayo son:

Guayaquil.....	Po
Riobamba.....	Po
Salinas.....	Po
Esmeraldas.....	P1
San Cristóbal.....	Po

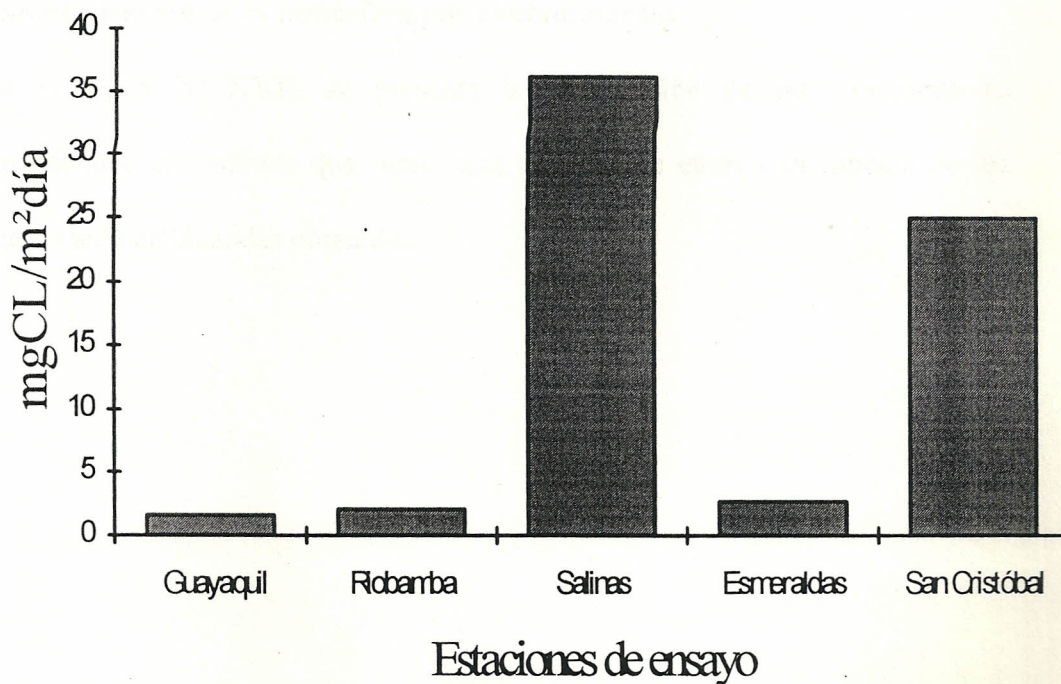


Fig. N° 32: Promedio de deposición de iones cloruros en las estaciones de ensayo.

El gráfico nos indica que la mayor cantidad de cloruros se registra en Salinas Y Galápagos y una cantidad muy pequeña en el resto de las estaciones de ensayo. De acuerdo a la norma ISO 9223 (3), la clasificación de las estaciones de ensayo es:

Guayaquil.....	So
Riobamba.....	So
Salinas.....	S1
Esmeraldas.....	So
San Cristóbal.....	S1

6.3. Caracterización de la atmósfera por contaminantes

En la Tabla N° XVII, se presenta la clasificación de las categorías de corrosividad atmosférica que tiene cada estación de ensayo en función de los datos medioambientales obtenidos.

TABLA N° XVII

CATEGORÍAS DE CORROSIVIDAD DE LAS ESTACIONES DE ENSAYO DE ACUERDO A LA CLASIFICACIÓN MEDIOAMBIENTAL

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN MEDIOAMBIENTAL			CATEGORÍAS
	TDH	SO ₂	Cl ⁻	
Guayaquil	τ_4	P ₀	S ₀	C3
Riobamba	τ_4	P ₀	S ₀	C3
Salinas	τ_3	P ₀	S ₁	C3
Esmeraldas	τ_5	P ₁	S ₀	C4
Galápagos	τ_3	P ₀	S ₁	C3

Esta clasificación fue obtenida de la Tabla N° VI que se presenta en el capítulo II

De acuerdo a las categorías obtenidas, las estaciones de Guayaquil, Riobamba, Salinas y San Cristóbal presentan una categoría C3, es decir, tienen una atmósfera de corrosividad media; mientras que la estación de Esmeraldas con una categoría C4, posee una atmósfera de corrosividad alta

6.4. Caracterización de la atmósfera por velocidad de corrosión

Los gráficos de las figuras 33 al 36 presentan los resultados de corrosión obtenidos para el primer año de exposición de cada metal en las diferentes estaciones de ensayo.

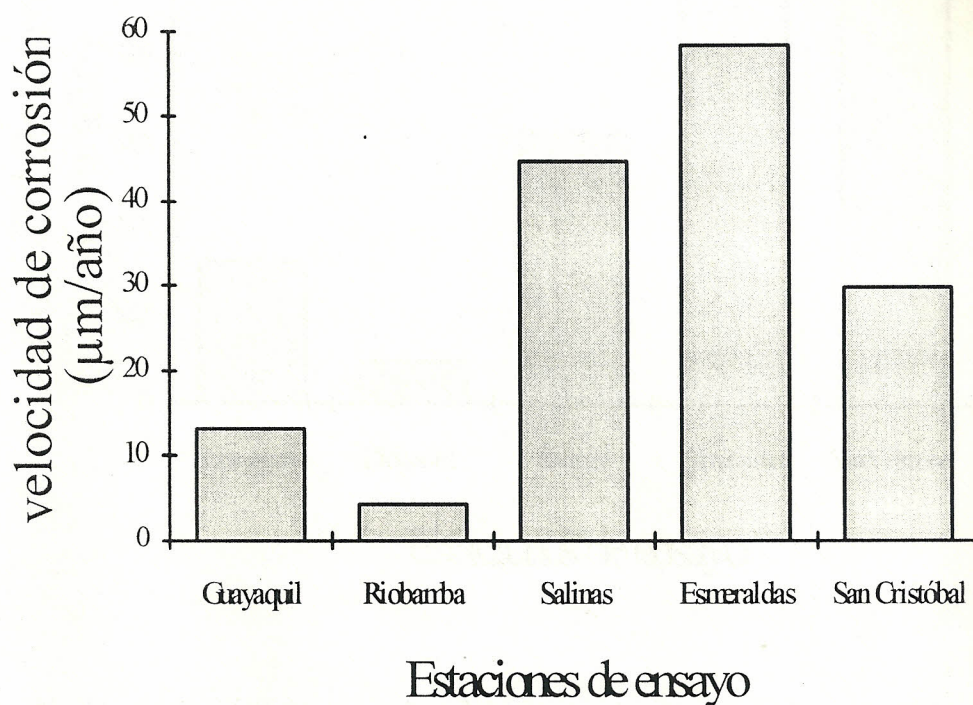


Fig. N° 33: Velocidad de corrosión del acero en las estaciones de ensayo

De acuerdo al gráfico se observa que el acero experimenta una mayor velocidad de corrosión en la estación de Esmeraldas; las estaciones de Salinas y San Cristóbal también experimentan una velocidad de corrosión un poco mayor en relación a la de

Esmeraldas; luego tenemos las estaciones de Guayaquil y Riobamba, cuya velocidad de corrosión que experimenta el acero es insignificante.

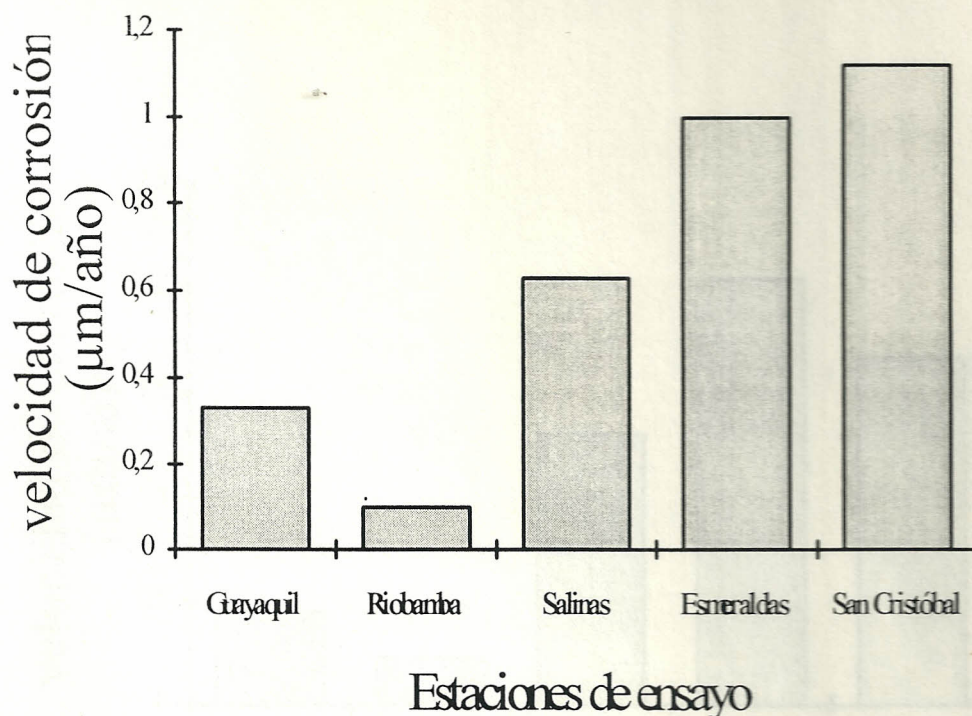


Fig. N° 34: Velocidad de corrosión del acero galvanizado en las estaciones de ensayo.

El gráfico nos indica que el acero galvanizado experimenta su mayor velocidad de corrosión en la estación de San Cristóbal, se observa también que en la estación de Esmeraldas el acero galvanizado tiene una velocidad de corrosión alta al igual que la estación en Salinas; mientras que, las estaciones de Guayaquil y Riobamba tienen una velocidad de corrosión menor.

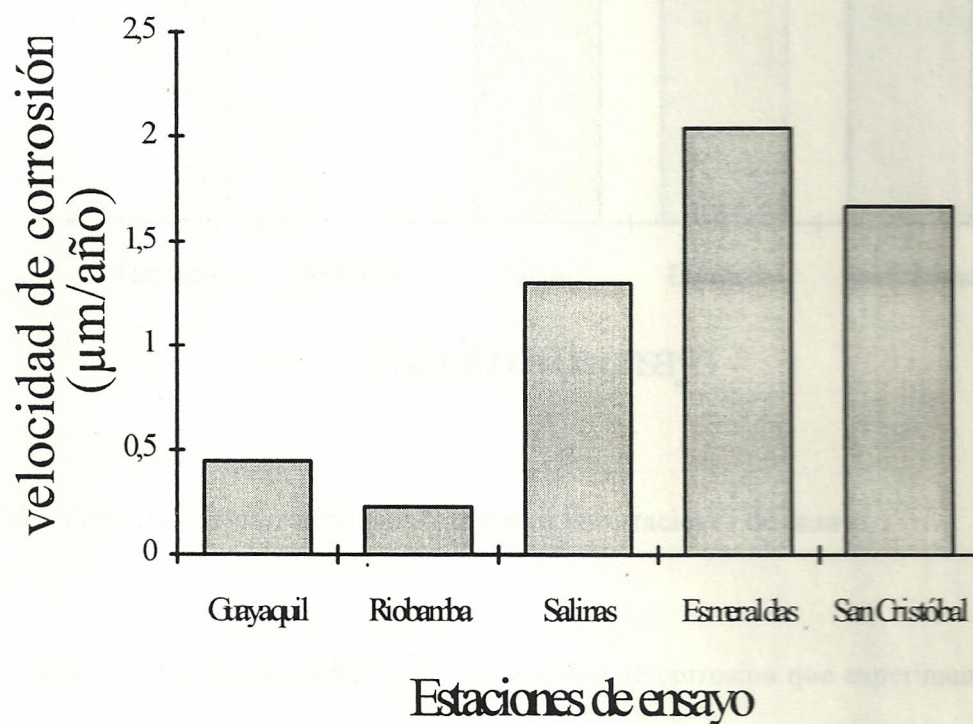


Fig. N° 35: Velocidad de corrosión del cobre en las estaciones de ensayo.

La gráfica nos indica que el cobre experimenta su mayor velocidad de corrosión en la estación de Esmeraldas, de igual forma en las estaciones de San Cristóbal y Salinas la velocidad de corrosión del cobre también es alta, no así, las estaciones de Guayaquil y Riobamba donde la velocidad de corrosión es insignificante.

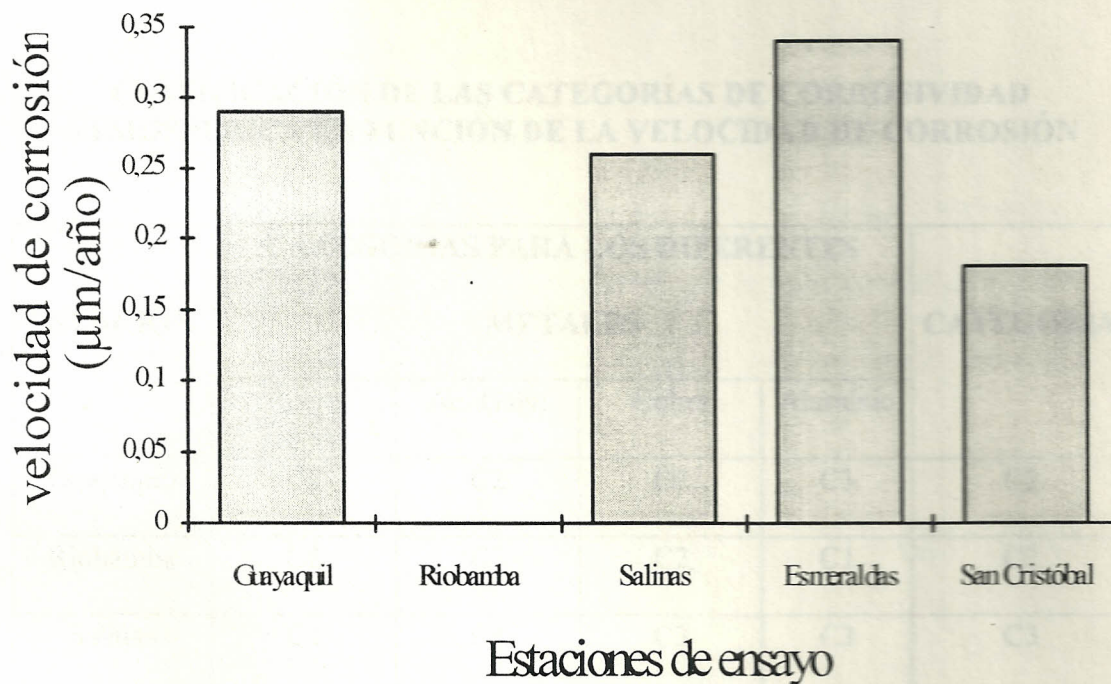


Fig. N° 36: Velocidad de corrosión del aluminio en las estaciones de ensayo.

La gráfica nos muestra que la variación de la velocidad de corrosión que experimenta el aluminio en todas las estaciones de ensayo es poca, por lo tanto, presentan una velocidad de corrosión casi igual, no así, la estación de Riobamba donde la velocidad de corrosión en dicho metal es despreciable.

De acuerdo a la norma ISO 9223 (3), a cada metal le corresponde una clasificación para las categorías de corrosividad dependiendo de su velocidad de corrosión. En la Tabla N° XVIII se presentan las categorías que tiene cada metal en las diferentes estaciones de ensayo, así como también, la clasificación general de cada estación.

TABLA N° XVIII

**CLASIFICACIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE CORROSIVIDAD
ATMOSFÉRICA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN**

ESTACIÓN	CATEGORÍAS PARA LOS DIFERENTES METALES				CATEGORÍA
	Acero	Ac. Galv.	Cobre	Aluminio	
Guayaquil	C2	C2	C2	C3	C2
Riobamba	C2	C2	C2	C1	C2
Salinas	C3	C2	C3	C3	C3
Esmeraldas	C4	C3	C4	C3	C3-C4
Galápagos	C3	C3	C4	C3	C3

Esta clasificación es válida de acuerdo a la Tabla N° VII del capítulo III para rapidez de velocidad de corrosión al primer año de exposición que experimentan los 4 metales. De aquí que solo se presentan en las figuras anteriores los resultados del primer año de exposición atmosférica.

6.5. Proyección futura de la evaluación

En general, la variación de peso experimentada por los materiales expuestos a la atmósfera no varía linealmente con el tiempo de exposición. Para estudiar este efecto del tiempo de exposición, se representan gráficamente los valores de disminución de peso de probetas de igual fecha de inicio de exposición y

distintos tiempos de ensayo. Esto sugiere la posibilidad de expresar la variación de peso mediante una ecuación de tipo:

$$C = At^n$$

donde C es la corrosión (en μm) al cabo de t años de exposición atmosférica, A es la corrosión (en μm) durante el primer año de exposición y n, un exponente, generalmente inferior a la unidad, función, a su vez, del tipo de atmósfera y composición del metal.

Los valores numéricos de estas constantes se calculan mediante análisis de regresión lineal.

De acuerdo con esta ecuación, los datos referentes a la corrosión anual sirven también para hacer extrapolaciones del comportamiento para períodos de tiempo mucho más largos.

El conocimiento del dato de corrosión atmosférica a largo plazo (10, 20 o más años) constituye una información de enorme interés para los ingenieros de diseño y expertos en corrosión a la hora de realizar distintos cálculos de ingeniería de la estructura metálica y dictaminar las medidas más adecuadas de protección anticorrosiva.

En las Tablas XIX al XXII se presenta el procedimiento seguido para obtener la ecuación para cada metal en las cinco estaciones de ensayo.

TABLA N° XIX

OBTENCION DE LA ECUACION $C=At^n$ PARA EL ACERO EN LAS CINCO ESTACIONES DE ENSAYO

ESTACION	Perdida de masa C(μm)	Tiempo exposición t(años)	ln C	ln t	ln A	A	n
Guayaquil	8.91	0.5	2.19	-0.69	2.57	13.07	0.55
	13.12	1	2.57	0			
Riobamba	2.22	0.5	0.80	-0.69	1.46	4.31	0.96
	4.31	1	1.46	0			
Salinas	27.46	0.5	3.31	-0.69	3.80	44.70	0.71
	44.76	1	3.80	0			
Esmeraldas	39.28	0.5	3.67	-0.69	4.07	58.56	0.58
	58.41	1	4.07	0			
San Cristóbal	11.2	0.5	2.42	-0.69	3.40	29.96	1.42
	29.82	1	3.40	0			

TABLA N° XX

OBTENCION DE LA ECUACION $C=At^n$ PARA EL ACERO GALVANIZADO EN LAS CINCO ESTACIONES DE ENSAYO

ESTACION	Perdida de masa C(μm)	Tiempo exposición t(años).	ln C	ln t	ln A	A	n																																								
Guayaquil	0.12	0.5	-2.12	-0.69	-1.11	0.33	1.46																																								
	0.33	1	-1.11	0				Riobamba	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Salinas	0.39	0.5	-0.94	-0.69	-0.46	0.63	0.70	0.63	1	-0.46	0	Esmeraldas	0.66	0.5	-0.42	-0.69	0	1	0.61	1.00	1	0	0	San Cristóbal	0.38	0.5	-0.97	-0.69	0.11	1.12	1.57
Riobamba	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----																																								
Salinas	0.39	0.5	-0.94	-0.69	-0.46	0.63	0.70																																								
	0.63	1	-0.46	0				Esmeraldas	0.66	0.5	-0.42	-0.69	0	1	0.61	1.00	1	0	0	San Cristóbal	0.38	0.5	-0.97	-0.69	0.11	1.12	1.57	1.12	1	0.11	0																
Esmeraldas	0.66	0.5	-0.42	-0.69	0	1	0.61																																								
	1.00	1	0	0				San Cristóbal	0.38	0.5	-0.97	-0.69	0.11	1.12	1.57	1.12	1	0.11	0																												
San Cristóbal	0.38	0.5	-0.97	-0.69	0.11	1.12	1.57																																								
	1.12	1	0.11	0																																											

TABLA N° XXI

OBTENCION DE LA ECUACION $C=At^n$ PARA EL COBRE EN LAS CINCO ESTACIONES DE ENSAYO

ESTACION	Perdida de masa C(μm)	Tiempo exposición t(años)	ln C	ln t	ln A	A	n																																												
Guayaquil	0.28	0.5	-1.27	-0.69	-0.80	0.45	0.68																																												
	0.45	1	-0.80	0				Riobamba	0.12	0.5	-2.12	-0.69	-1.47	0.23	0.94	0.23	1	-1.47	0	Salinas	0.80	0.5	-0.22	-0.69	0.26	1.30	0.70	1.30	1	0.26	0	Esmeraldas	1.31	0.5	0.27	-0.69	0.71	2.03	0.64	2.04	1	0.71	0	San Cristóbal	0.74	0.5	-0.30	-0.69	0.51	1.67	1.17
Riobamba	0.12	0.5	-2.12	-0.69	-1.47	0.23	0.94																																												
	0.23	1	-1.47	0				Salinas	0.80	0.5	-0.22	-0.69	0.26	1.30	0.70	1.30	1	0.26	0	Esmeraldas	1.31	0.5	0.27	-0.69	0.71	2.03	0.64	2.04	1	0.71	0	San Cristóbal	0.74	0.5	-0.30	-0.69	0.51	1.67	1.17	1.67	1	0.51	0								
Salinas	0.80	0.5	-0.22	-0.69	0.26	1.30	0.70																																												
	1.30	1	0.26	0				Esmeraldas	1.31	0.5	0.27	-0.69	0.71	2.03	0.64	2.04	1	0.71	0	San Cristóbal	0.74	0.5	-0.30	-0.69	0.51	1.67	1.17	1.67	1	0.51	0																				
Esmeraldas	1.31	0.5	0.27	-0.69	0.71	2.03	0.64																																												
	2.04	1	0.71	0				San Cristóbal	0.74	0.5	-0.30	-0.69	0.51	1.67	1.17	1.67	1	0.51	0																																
San Cristóbal	0.74	0.5	-0.30	-0.69	0.51	1.67	1.17																																												
	1.67	1	0.51	0																																															

TABLA N° XXII

**OBTENCION DE LA ECUACION $C=At^n$ PARA EL ALUMINIO EN
LAS CINCO ESTACIONES DE ENSAYO**

ESTACION	Perdida de masa C(μ m)	Tiempo exposición t(años)	ln C	ln t	ln A	A	n
Guayaquil	0.019	0.5	-3.96	-0.69	-1.23	0.29	3.96
	0.29	1	-1.23	0			
Riobamba	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Salinas	0.015	0.5	-4.20	-0.69	-1.35	0.26	4.13
	0.26	1	-1.35	0			
Esmeraldas	0.14	0.5	-1.97	-0.69	-1.08	0.34	1.29
	0.34	1	-1.08	0			
San Cristóbal	0.16	0.5	-1.83	-0.69	-1.71	0.18	0.17
	0.18	1	-1.71	0			

Las expresiones matemáticas de la corrosión en las estaciones de ensayo en el primer año de exposición son:

1.- Velocidad de corrosión del acero

ESPOL - Guayaquil	$C = 13.07t^{0.55}$
ESPOCH - Riobamba	$C = 4.31t^{0.96}$
BASE NAVAL - Salinas	$C = 44.7t^{0.71}$
REE - Esmeraldas	$C = 58.56t^{0.58}$
BASE NAVAL - San Cristóbal - Galápagos	$C = 29.96t^{1.42}$

2.- Velocidad de corrosión del acero galvanizado

ESPOL - Guayaquil	$C = 0.33t^{1.46}$
BASE NAVAL - Salinas	$C = 0.63t^{0.70}$
REE - Esmeraldas	$C = t^{0.61}$
BASE NAVAL - San Cristóbal - Galápagos	$C = 1.12t^{1.57}$

3.- Velocidad de corrosión del cobre

ESPOL - Guayaquil	$C = 0.45t^{0.68}$
ESPOCH - Riobamba	$C = 0.23t^{0.94}$
BASE NAVAL - Salinas	$C = 1.3t^{0.7}$
REE - Esmeraldas	$C = 2.03t^{0.64}$
BASE NAVAL - San Cristóbal - Galápagos	$C = 1.67t^{1.17}$

4.- Velocidad de corrosión del aluminio

$$\text{ESPOL - Guayaquil} \quad C = 0.29t^{3.96}$$

$$\text{BASE NAVAL - Salinas} \quad C = 0.26t^{4.13}$$

$$\text{REE - Esmeraldas} \quad C = 0.34t^{1.29}$$

$$\text{BASE NAVAL - San Cristóbal - Galápagos} \quad C = 0.18t^{0.17}$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Durante este primer año de exposición atmosférica se puede concluir lo siguiente:

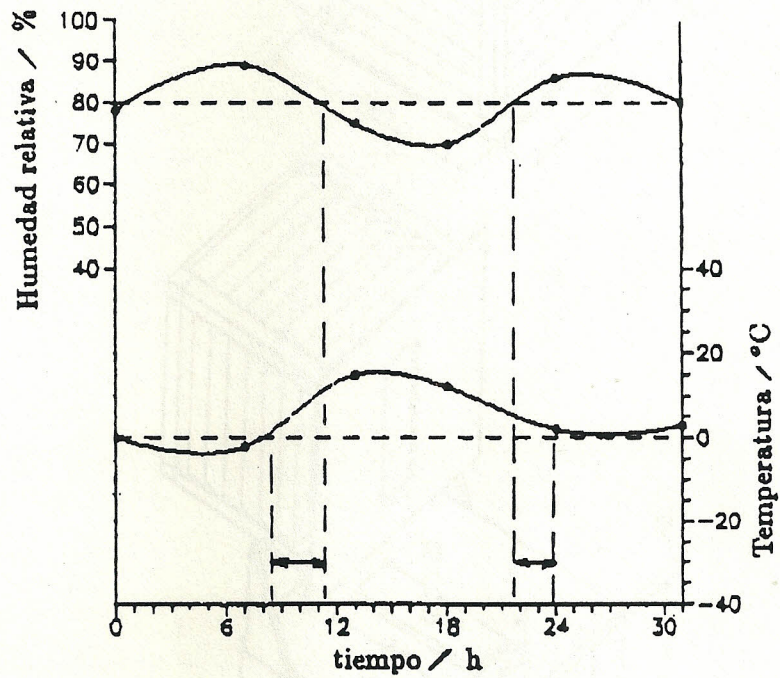
- La variable que ha influido principalmente en este período de exposición en la caracterización de la agresividad de la atmósfera, ha sido el tiempo de humectación (τ).
- Por su ubicación geográfica, las estaciones de Guayaquil y Riobamba no presentan niveles de concentración significativos de contaminantes (cloruros y sulfatos), como los obtenidos en Salinas, Esmeraldas y San Cristóbal en relación a cloruros y sulfatos respectivamente.
- En todas las estaciones de ensayo, la velocidad de corrosión observada en el acero es mayor que para los otros materiales expuestos.
- La rapidez de corrosión obtenida para los metales analizados en las tres estaciones que presentan presencia de contaminantes (Salinas, Esmeraldas y San cristóbal) es relativamente mayor al compararla con las estaciones de Guayaquil y Riobamba.

- La estación de Esmeraldas ubicada en la Refinería de esta ciudad, registra los valores más altos de agresividad de la atmósfera tanto por influencia de factores medio ambientales como por lo obtenido en el cálculo de la velocidad de corrosión de los metales expuestos.
- La diferencia observada en la caracterización de la agresividad de una atmósfera en términos medio ambientales y de velocidad de corrosión, se debe al corto periodo de exposición de los metales en estudio. Es de esperar que a dos o tres años se establezca definitivamente la categoría de corrosividad de las atmósferas con la recopilación de nuevos datos medioambientales y pérdidas de masa de los materiales evaluados. Sin embargo, quedan ecuaciones empíricas que el tiempo se encargará de su aceptación o rechazo.

RECOMENDACIONES

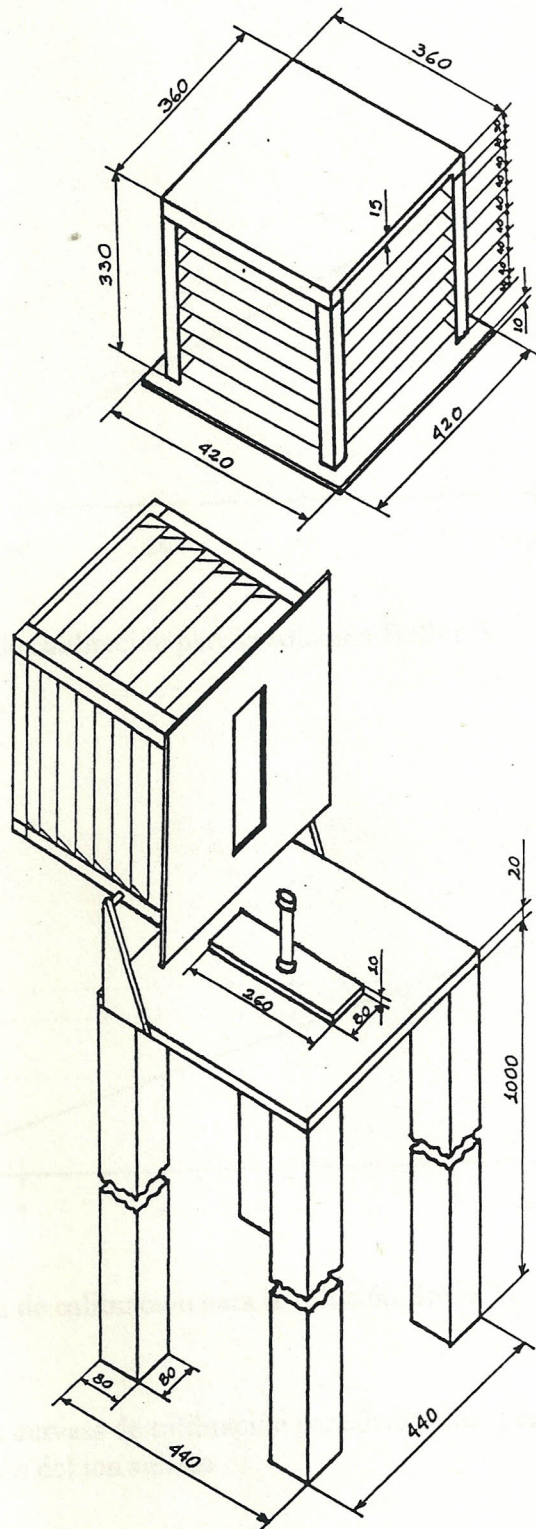
- Seguir con la evaluación de la corrosión de los metales expuestos en las cinco estaciones de ensayo a fin de poder determinar exactamente la ecuación que servirá de gran ayuda para poder determinar las medidas más adecuadas de protección anticorrosiva.
- Para evaluar la velocidad de corrosión en probetas galvanizadas, hay que asegurarse que estas tengan el recubrimiento necesario dentro del período de exposición, con la finalidad de no presenciar óxidos de hierro del metal base, lo cual resultará en un resultado falso al compararlo con otras estaciones.

ANEXO I



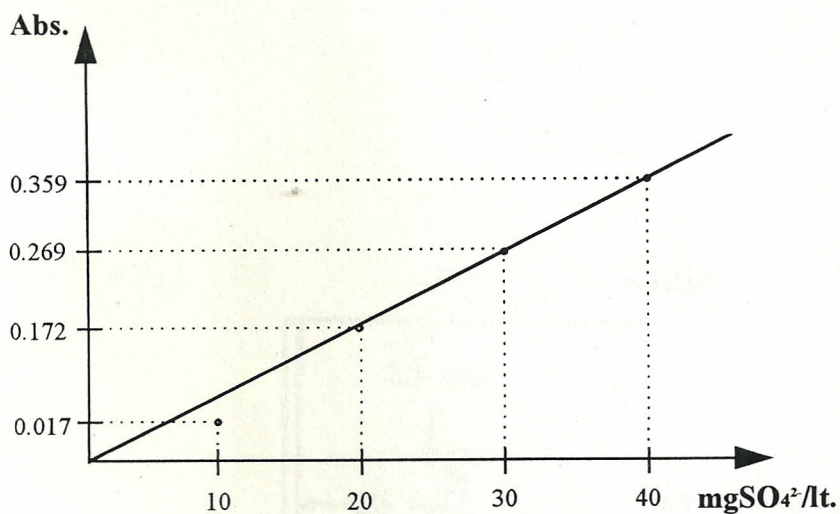
Gráficas para el cálculo del TDH a partir de datos de HR y T a diferentes horas del día.

ANEXO II

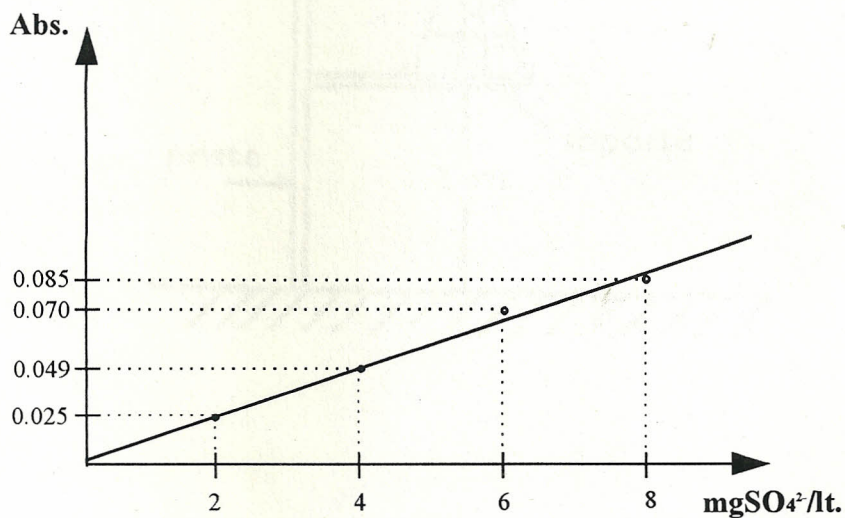


Esquema del soporte y candela del peróxido de plomo.

ANEXO III



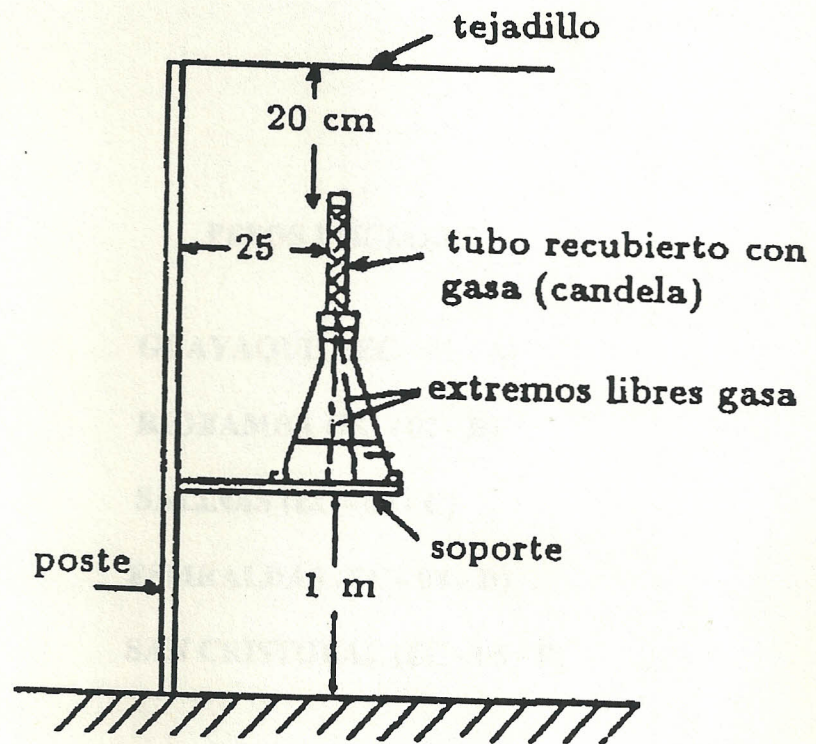
Curva de calibración para la solución Buffer A.



Curva de calibración para la solución Buffer B.

Gráficas de las curvas de calibración para determinar periódicamente la concentración del ion sulfato.

ANEXO IV



Esquema del método de la candela húmeda para captación de cloruros

ANEXO V

PESOS INICIALES

GUAYAQUIL (EC - 01 - A)

RIOBAMBA (EC - 02 - B)

SALINAS (EC - 03 - C)

ESMRALDAS (EC - 04 - D)

SAN CRISTOBAL (EC - 05 - E)

PESOS INICIALES

ACERO		AC. GALVANIZADO		COBRE		ALUMINIO	
ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]
A1F	234.7	A1G	165.11	A1C	179.67	A1A	185.20
A2F	235.9	A2G	167.68	A2C	180.10	A2A	183.54
A3F	234.9	A3G	161.29	A3C	185.66	A3A	186.56
A4F	233.4	A4G	126.85	A4C	179.58	A4A	184.49
A01F	233.9	A01G	166.97	A01C	180.11	A01A	183.66
A02F	234.1	A02G	165.99	A02C	180.15	A02A	184.81
A03F	231.4	A03G	162.17	A03C	181.16	A03A	181.02
A04F	232.5	A04G	163.07	A04C	181.06	A04A	183.88
A05F	233.0	A05G	161.87	A05C	181.11	A05A	186.08
A06F	234.1	A06G	165.26	A06C	181.32	A06A	182.72
A07F	235.1	A07G	162.84	A07C	182.58	A07A	184.24
A08F	234.8	A08G	166.12	A08C	181.52	A08A	178.94
A09F	236.0	A09G	163.29	A09C	181.59	A09A	183.74
A10F	233.7	A10G	164.02	A10C	178.27	A10A	181.78
A11F	235.3	A11G	164.41	A11C	180.02	A11A	184.23
A12F	234.6	A12G	164.09	A12C	180.63	A12A	181.40
A13F	234.5	A13G	164.72	A13C	180.11	A13A	182.87
A14F	236.1	A14G	162.85	A14C	179.71	A14A	184.15
A15F	237.4	A15G	163.21	A15C	180.30	A15A	184.00
A16F	235.7	A16G	167.27	A16C	180.24	A16A	182.05
A17F	231.3	A17G	126.82	A17C	180.15	A17A	183.86
A18F	233.5	A18G	127.74	A18C	179.96	A18A	185.16
A19F	235.6	A19G	125.57	A19C	179.72	A19A	185.05
A20F	234.4	A20G	128.87	A20C	180.96	A20A	185.39

PESOS INICIALES

ACERO		AC. GALVANIZADO		COBRE		ALUMINIO	
ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]
B1F	548.20	B1G	162.75	B1C	441.81	B1A	117.73
B2F	358.67	B2G	164.70	B2C	455.85	B2A	118.94
B3F	527.17	B3G	159.90	B3C	442.71	B3A	116.43
B4F	695.78	B4G	161.22	B4C	496.18	B4A	120.94
B01F	181.95	B01G	163.67	B01C	444.65	B01A	127.38
B02F	184.58	B02G	160.55	B02C	473.71	B02A	118.17
B03F	185.21	B03G	161.85	B03C	454.87	B03A	120.55
B04F	189.15	B04G	163.30	B04C	446.08	B04A	116.28
B05F	184.79	B05G	162.41	B05C	483.11	B05A	115.54
B06F	186.50	B06G	161.05	B06C	479.65	B06A	116.81
B07F	187.69	B07G	163.12	B07C	453.70	B07A	118.43
B08F	187.31	B08G	162.99	B08C	459.95	B08A	120.17
B09F	185.31	B09G	164.75	B09C	481.50	B09A	119.54
B10F	183.71	B10G	163.25	B10C	453.91	B10A	118.18
B11F	182.51	B11G	159.82	B11C	450.29	B11A	120.58
B12F	185.75	B12G	162.94	B12C	449.99	B12A	125.06
B13F	185.79	B13G	162.62	B13C	183.59	B13A	188.30
B14F	187.42	B14G	159.62	B14C	182.29	B14A	185.85
B15F	187.71	B15G	160.34	B15C	181.35	B15A	186.10
B16F	190.35	B16G	162.50	B16C	182.72	B16A	185.01
B17F	232.40	B17G	356.05	B17C	180.89	B17A	181.56
B18F	230.50	B18G	355.45	B18C	181.01	B18A	184.08
B19F	232.60	B19G	355.41	B19C	181.28	B19A	186.16
B20F	232.30	B20G	353.61	B20C	180.02	B20A	180.68

PESOS INICIALES

ACERO		AC. GALVANIZADO		COBRE		ALUMINIO	
ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]
C1F	237.5	C1G	127.69	C1C	179.90	C1A	182.87
C2F	234.8	C2G	128.18	C2C	182.58	C2A	185.50
C3F	230.9	C3G	164.94	C3C	180.96	C3A	186.43
C4F	235.6	C4G	164.20	C4C	178.79	C4A	183.92
C01F	235.2	C01G	165.91	C01C	180.25	C01A	121.26
C02F	236.0	C02G	163.06	C02C	181.51	C02A	121.39
C03F	235.5	C03G	162.80	C03C	181.79	C03A	122.17
C04F	236.2	C04G	166.59	C04C	178.93	C04A	120.95
C05F	236.8	C05G	162.71	C05C	180.57	C05A	121.60
C06F	234.2	C06G	164.56	C06C	179.06	C06A	122.55
C07F	232.6	C07G	164.43	C07C	179.86	C07A	120.40
C08F	236.2	C08G	164.09	C08C	179.60	C08A	122.38
C09F	235.9	C09G	163.86	C09C	180.23	C09A	122.67
C10F	231.5	C10G	164.38	C10C	180.56	C10A	121.58
C11F	235.1	C11G	164.43	C11C	180.05	C11A	121.77
C12F	235.4	C12G	164.25	C12C	180.86	C12A	120.48
C13F	233.8	C13G	163.40	C13C	180.02	C13A	121.88
C14F	233.8	C14G	165.13	C14C	180.69	C14A	121.22
C15F	236.0	C15G	165.38	C15C	182.53	C15A	122.63
C16F	236.9	C16G	165.13	C16C	180.81	C16A	124.91
C17F	232.2	C17G	164.50	C17C	180.86	C17A	120.51
C18F	235.5	C18G	165.91	C18C	179.12	C18A	123.35
C19F	234.4	C19G	165.85	C19C	179.85	C19A	121.70
C20F	232.6	C20G	165.28	C20C	181.39	C20A	121.33

PESOS INICIALES

ACERO		AC. GALVANIZADO		COBRE		ALUMINIO	
ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]
D1F	236.47	D1G	127.57	D1C	179.67	D1A	185.58
D2F	237.81	D2G	127.09	D2C	180.38	D2A	185.36
D3F	233.21	D3G	126.84	D3C	179.47	D3A	182.52
D4F	236.83	D4G	127.40	D4C	179.68	D4A	183.90
D01F	234.80	D01G	162.93	D01C	180.90	D01A	122.19
D02F	230.66	D02G	165.54	D02C	180.54	D02A	121.71
D03F	235.96	D03G	162.44	D03C	179.57	D03A	121.71
D04F	234.54	D04G	160.98	D04C	178.17	D04A	121.71
D05F	235.45	D05G	161.83	D05C	179.24	D05A	120.79
D06F	232.98	D06G	164.23	D06C	180.57	D06A	121.39
D07F	237.06	D07G	163.32	D07C	178.00	D07A	120.76
D08F	236.75	D08G	163.28	D08C	184.90	D08A	122.17
D09F	237.88	D09G	162.93	D09C	181.52	D09A	120.70
D10F	235.10	D10G	161.83	D10C	179.10	D10A	120.28
D11F	236.14	D11G	163.78	D11C	180.59	D11A	119.85
D12F	236.14	D12G	161.91	D12C	177.88	D12A	121.01
D13F	236.06	D13G	160.84	D13C	181.40	D13A	120.67
D14F	236.32	D14G	163.07	D14C	179.71	D14A	121.08
D15F	235.86	D15G	164.59	D15C	181.29	D15A	120.91
D16F	237.35	D16G	162.94	D16C	180.88	D16A	122.41
D17F	231.20	D17G	163.66	D17C	180.14	D17A	121.81
D18F	234.60	D18G	163.74	D18C	181.27	D18A	120.93
D19F	233.60	D19G	162.47	D19C	180.37	D19A	121.76
D20F	232.20	D20G	163.86	D20C	179.18	D20A	121.73

PESOS INICIALES

ACERO		AC. GALVANIZADO		COBRE		ALUMINIO	
ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]	ID.	PESO[gr]
E1F	235.6	E1G	128.08	E1C	180.97	E1A	182.10
E2F	233.1	E2G	127.07	E2C	178.84	E2A	184.24
E3F	235.4	E3G	128.86	E3C	181.13	E3A	182.60
E4F	231.9	E4G	127.85	E4C	180.42	E4A	185.55
E01F	234.6	E01G	160.97	E01C	180.91	E01A	122.14
E02F	236.1	E02G	165.46	E02C	180.25	E02A	120.00
E03F	235.6	E03G	163.30	E03C	179.29	E03A	122.30
E04F	237.6	E04G	162.50	E04C	180.23	E04A	120.84
E05F	237.0	E05G	162.26	E05C	179.49	E05A	122.01
E06F	234.8	E06G	163.49	E06C	179.83	E06A	122.37
E07F	238.4	E07G	164.52	E07C	180.55	E07A	122.39
E08F	233.3	E08G	163.42	E08C	179.19	E08A	121.85
E09F	237.9	E09G	163.26	E09C	179.56	E09A	121.78
E10F	236.3	E10G	166.16	E10C	179.73	E10A	122.96
E11F	236.3	E11G	163.15	E11C	180.54	E11A	122.59
E12F	235.8	E12G	165.66	E12C	181.65	E12A	121.84
E13F	234.9	E13G	166.75	E13C	179.19	E13A	121.40
E14F	232.3	E14G	165.31	E14C	180.23	E14A	122.02
E15F	233.3	E15G	164.23	E15C	180.52	E15A	123.70
E16F	234.6	E16G	163.15	E16C	180.82	E16A	122.81
E17F	237.1	E17G	166.87	E17C	181.10	E17A	121.68
E18F	236.4	E18G	166.21	E18C	181.00	E18A	120.47
E19F	238.2	E19G	163.80	E19C	180.38	E19A	122.93
E20F	236.1	E20G	150.15	E20C	179.43	E20A	122.07

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- N. D. Tomashov, "Theory of corrosion and proteccion of metals", MacMillan Co., Nueva York (1966), pág. 367.
- 2.- ISO/TC 156/WG4/N131, "Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. The collaborative testing programme (ISOCORRAG). Technical manual (1986)".
- 3.- ISO/DP 9223, "Corrosion of metals and alloys. Classification of corrosivity of atmospheres". International Standards Organization, 1991.
- 4.- ISO/DP 9224, "Corrosion of metals and alloys. Guiding values for the corrosivity categories of atmospheres". International Standards Organization, 1991.
- 5.- ISO/DP 9225, "Corrosion of metalas and alloys. Corrosivity of atmospheres. Methods of measurement of pollution". International Standards Organization, 1991.
- 6.- ISO/DP 9226, "Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Method of determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity". Intenational Standards Organization, 1991.
- 7.- Carlos Blandin Landivar, "El clima sus aplicaciones y sus características en el Ecuador". Quito (1976), pág. 8, 19, 29, 37, 38, 53, 54.

- 8.- Ermel Aguirre González, "Atlas del Ecuador". Quito (1987), pág. 12 - 29.
- 9.- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, "Atlas Climatológico del Ecuador". Quito (1987), pág. 9, 21, 27.
- 10.- M. Morcillo y S. Feliu, "Mapas de España de corrosividad atmosférica". Madrid (1993), pág., 3 - 7.
- 11.- MICAT A - 18, "Estimación del tiempo de humectación a partir de datos de temperatura y humedad relativa".
- 12.- ASTM D 2010-65, "Evaluation of total sulfation in atmosphere by the lead peroxide candle". pág., 533 - 536.
- 13.- "Standard methods for the examination of water and wastewater", 16 th edition (1985), pág., 287, 288, 467, 468.
- 14.- ASTM D 516, "Standard methods of test for sulfate ion in water and waste water", pág.430 - 432.
- 15.- J. A. González, "Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión". pág. 81 - 84.
- 16.- J.A. González y J. M. Bastidas, "Corrosión atmosférica del Al, Cu, Fe y Zn: (I) Su importancia, mecanismos y métodos de estudio". Madrid. pág. 11 - 14.
- 17.- Denny A. Jones, "Principals and prevention of corrosion". pág. 406.
- 18.- ASTM 650. "Practice for conducting atmospheric corrosion test on metals", (1984).
- 19.- MICAT A - 22, "Cálculo de la velocidad de corrosión atmosférica por la técnica de pérdida de masa".