

# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

## **ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

### **SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

Análisis Fractal de las Trayectorias de Descargas Eléctricas Superficiales en Aislamiento Polimérico Considerando Diferentes Niveles de Contaminación.

# **T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS  
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**PRESENTA**

**Arturo Palacios López**

**MÉXICO D. F.**

**2002**



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 16 del mes de ENERO del 2002 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. para examinar la tesis de grado titulada:

**“ ANÁLISIS FRACTAL DE LAS TRAYECTORIAS DE DESCARGAS ELECTRICAS SUPERFICIALES EN AISLAMIENTO POLIMERICO CONSIDERANDO DIFERENTES NIVELES DE CONTAMINACIÓN”**

**PALACIOS**  
Apellido paterno

**LOPEZ**  
materno

**ARTURO**  
nombre(s)

Con registro: 

9	7	1	4	9	5
---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Director de tesis

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA.

DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

DR. JOSE MANUEL DE LA ROSA VAZQUEZ

DR. RAFEL ESCARELA PEREZ

DR. ALEXANDER BALANKIN



M. en C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

**EL PRESIDENTE DEL COLEGIO**

DR. DAVID ROMERO ROMERO

# CONTENIDO

<i>Resumen</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>Glosario</i>	<i>iii</i>
<i>Lista de símbolos</i>	<i>iv</i>
<i>Lista de figuras</i>	<i>v</i>
<i>Lista de tablas</i>	<i>vi</i>

## **CAPÍTULO 1**

Introducción	
1.1 Presentación	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	3
1.4 Estado del arte	3

## **CAPÍTULO 2**

Fractales	
2.1 Introducción	8
2.2 Concepto de Fractal	10
2.3 La idea de dimensión.	10
2.4 Propiedad aditiva de los Fractales.	11
2.5 Amplificación de un objeto	12
2.6 Movimiento Browniano.	15
2.7 Transformación de similitud.	17
2.8 Un fractal no tiene derivada	18
2.9 Obtención de la dimensión fractal de un objeto auto afin	18

## **CAPÍTULO 3**

Metodología experimental	
3.1. Introducción	20
3.2 Material y equipo utilizado	21
3.2.1 Fuente de C.A.	21
3.2.2 Divisor de Tensión	23
3.4 Procesamiento de las imágenes.	30
3.4.1 Método de conteo de cuadros (Box Counting)	31
3.4.2 Método de análisis R/S (R/S Analysis)	33
3.4.3 Método de Variograma	36

## **CAPÍTULO 4**

Análisis de resultados	
4.1. Introducción	39
4.2 Imágenes encontradas en el laboratorio	40
4.3 Cálculo de la dimensión fractal y el coeficiente de Hurst H	40
4.4 Conclusiones	54
4.5 Recomendaciones para trabajos futuros	55

<b>Referencias</b>	<b>56</b>
--------------------	-----------

### **Apendice A: Materiales Aislantes**

A.1 Introducción	60
A.2 Silicón	61
A.3 Importancia de los polímeros en la industria eléctrica	67
A.4 Propiedades de los polímeros	67
A.5 Envejecimiento del material	69
A.6 Tracking y Resistencia a la Erosion	70
A.7 Proceso de flameo de un aislamiento de hule silicón	71
A.7.1 Proceso de flameo de un aislador convencional	73

<b>Apendice B: Imágenes obtenidas en las pruebas de descargas eléctricas superficiales en aislamiento de hule silicón</b>	<b>77</b>
---	-----------

<b>Apendice C: Dimensión fractal obtenida por los métodos utilizados</b>	<b>93</b>
--	-----------

# Resumen

En el presente trabajo se inducen descargas eléctricas superficiales en un aislamiento polimérico de Hule Silicón, el arreglo experimental que se utiliza es punta-punta con base en la norma ASTM D 2303-85 y los niveles de contaminación con base en la norma IEC 507.

Se reportan los valores experimentales de la Dimensión Fractal para cada caso de contaminación, se utilizó el método auto similar de conteo de cuadros, para el cálculo de la Dimensión Fractal y para métodos auto afines se utilizó análisis R/S y variograma.

Con los resultados obtenidos se concluye que la trayectoria de la descarga eléctrica superficial en un polímero de Hule Silicón es auto similar y su valor no depende del grado de contaminación, el cual es equivalente a la concentración de gramos de sal por litro de agua o a la densidad de sal depositada (DESD), en la superficie de un aislador.

# Abstract

In this thesis tree patterns of superficial breakdown in polymeric insulator of Silicon Rubber are generated. Experimental arrangement rod-rod was used on the basis of norm ASTM D 2303-85. Pollution levels on the basis of norm IEC 507 were also used.

The experimental values of Fractal Dimension for each case of pollution were reported. A self similar method called Box Counting for the fractal dimension calculus and for the self affine methods an R/S Analysis and Variogram were used.

According to the results, it was concluded that the tree patterns of superficial electric breakdown in Silicon Rubber is self similar and its value does not depend on the degree of pollution, that is equivalent to the concentration of salt for liter of water or to the Equivalent Salt Deposition Density (ESDD), in the surface of an insulator.

# Glosario

**Auto afin.**- Propiedad de algunos objetos fractales que responden a características de reescalado no proporcional  $f(x, y) = f(ax, a^H y)$ , en donde  $H$  es el coeficiente de Hurst.

**Auto similar.**- Propiedad de algunos objetos fractales que responden a características de reescalado proporcional  $f(x, y) = f(ax, ay)$ .

**Coefficiente de Hurst.**- Coeficiente de escalado, este exponente es usualmente escrito por  $H$ .

**Descarga parcial.**- Es una región ionizada que presenta pequeñas descargas sin alcanzar el flameo total en un aislador.

**Dieléctrico.**- Material en el cual sus electrones están firmemente unidos a sus respectivos átomos; es decir no poseen electrones libres. Por tanto, no será posible el desplazamiento de carga eléctrica libre a través de su cuerpo.

**Efecto Joule.**- Consiste en la transformación de energía eléctrica en energía térmica en una resistencia recorrida por una corriente.

**Erosion.**- Es el desprendimiento de material, después de retirar carbón de la superficie de un aislador es un proceso muy lento de degradación.

**Fractal.**- Conjunto de formas que generalmente por un proceso de repetición, se caracterizan por poseer detalle a toda escala, por tener longitud infinita, por no ser diferenciables y por exhibir dimensión fraccional.

**Hidrofobicidad.**- Propiedad que tienen los materiales poliméricos para no permitir que se forme sobre ellos una capa uniforme de agua cuando son humectados, sino pequeñas gotas sobre su superficie.

**Hule silicón.**- Polímero utilizado en la industria eléctrica como aislante. Es un polímero de peso molecular elevado en los que la unidad siloxánica forma la estructura continua.

**Puncture.**- Ruptura eléctrica, la cual perfora un aislamiento.

**Streamer.**- Canal ionizado originado por la conexión sucesiva de avalanchas electrónicas.

**Tracking.**- Es la formación de una capa de carbón que hace conductora la superficie de un aislador.

# Lista de símbolos

$D_T$ .- Dimensión topológica

$D_f$ .- Dimensión Fractal

$D$ .- Dimensión de Hausdorff-Besicovitch

$d_c$ .- Dimensión topología de un objeto que divide a un objeto en dos partes

$H$ .- Coeficiente de Hurst

$D_H$ .- Dimensión Fractal de un objeto auto afin

$D_b$ .- Dimensión Fractal por el Método de Conteo de Cuadros.

$D_{rs}$ .- Dimensión Fractal por el Método de Análisis R/S.

$D_v$ .- Dimensión Fractal por el Método de Variograma.

$H_B$ .- Coeficiente de Hurst calculado a partir del método de conteo de cuadros

$$H_B = 2 - D_b$$



# Lista de figuras

Fig. 1.- Ejemplo de la función de amplificación, utilizando la curva de Koch.	13
Fig. 2.- Ejemplo de la transformación de similitud.	17
Fig. 3.- Ejemplo de cómo obtener la dimensión fractal auto afin.	18
Fig. 4.- Consola de control Fuente de C.A.	21
Fig. 5.- Partes que constituyen la Fuente de C.A.	22
Fig. 6.- Divisor de Tensión RC.	23
Fig. 7.- Muestra de Hule Silicón cubierta con caolín.	25
Fig. 8.- Muestra de Hule Silicón cubierta con caolín y con los electrodos de tungsteno.	26
Fig. 9.- Arreglo experimental de la prueba de ruptura superficial.	27
Fig. 10.- Figura que guarda todos los detalles en el cristal sin daño.	27
Fig. 11.- Trayectoria eléctrica superficial ramificada.	28
Fig. 12.- Trayectoria eléctrica zigzagueante y que se termina uniendo.	28
Fig. 13.- Trayectoria eléctrica con ramificaciones y que no se une.	28
Fig. 14.- Trayectoria eléctrica peculiar.	29
Fig. 15.- Trayectoria eléctrica incompleta	29
Fig. 16.- Cálculo de la Df por el Método de Conteo de cuadros por medio del programa Benoit	32
Fig. 17.- Cálculo del coeficiente de Hurst por el Método de Análisis R/S mediante el programa Benoit.	35
Fig. 18.- Cálculo de el coeficiente de Hurst por el Método de Variograma mediante el programa Benoit.	38
Fig. 19.- Histograma de valores 5 grs. de sal.	41
Fig. 20.- Histograma de valores 10 grs. de sal.	42
Fig. 21.- Histograma de valores 20 grs. de sal.	42
Fig. 22.- Histograma de valores 50 grs. de sal.	43
Fig. 23.- Histograma de valores 160 grs. de sal.	43
Fig. 24.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S. 5 grs. de sal.	44
Fig. 25.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 10 grs. de sal.	45
Fig. 26.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 20 grs. de sal.	45
Fig. 27.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 50 grs. de sal.	46
Fig. 28.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 160 grs. de sal.	46
Fig. 29.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 5 grs. de sal.	47
Fig. 30.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 10 grs. de sal.	47
Fig. 31.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 20 grs. de sal.	48
Fig. 32.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 50 grs. de sal.	48
Fig. 33.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 50 grs. de sal.	49
Fig. 34.- Ajuste lineal. Método de conteo de cuadros, HB contra la concentración de sal.	49
Fig. 35.- Ajuste lineal. Método de conteo de cuadros, HB contra la conductividad.	50
Fig. 36.- Ajuste lineal. Método de conteo de cuadros, HB contra la DESD.	50
Fig. 37.- Ajuste lineal. Método de análisis R/S, HB contra la concentración de sal.	51
Fig. 38.- Ajuste lineal. Método de análisis R/S, HB contra la conductividad.	51
Fig. 39.- Ajuste lineal. Método de análisis R/S, HB contra la DESD.	52
Fig. 40.- Ajuste lineal. Método de variograma, HB contra la concentración de sal.	52
Fig. 41.- Ajuste lineal. Método de variograma, HB contra la conductividad.	53
Fig. 42.- Ajuste lineal. Método de variograma, HB contra la DESD.	53
Fig. 43.- Superficie con buena hidrofobicidad.	68
Fig. 44.- Superficie con una hidrofobicidad media.	68
Fig. 45.- Superficie con una hidrofobicidad mala.	68
Fig. 46.- Formación de gotas en la superficie aislante humectada.	71
Fig. 47.- Descargas parciales entre las gotas.	72
Fig. 48.- Flameo en el aislante.	72
Fig. 49.- Superficie del aislador contaminada.	73
Fig. 50.- Humectación de un aislador polimérico.	74
Fig. 51.- Corriente de fuga que se presenta en un aislador previamente humectado.	74
Fig. 52.- Evaporación del agua en la superficie del aislador.	75

Fig. 53.- Voltaje desplazado y formación de bandas secas.	75
Fig. 54.- Descargas parciales que se presentan en las bandas secas.	76
Fig. 55.- Las descargas parciales se concatenan, por lo tanto se presenta un flameo.	76

## Lista de tablas

Tabla 1.- Ejemplo de cómo se calcula la dimensión fractal apartir de la función de amplificación.	12
Tabla 2.- Niveles de conductividad, densidad equivalente de sal depositada y tipo de contaminación.	25
Tabla 3.- Valores de la Dimensión Fractal por el Método de Conteo de Cuadros.	40
Tabla 4.- Valores del coeficiente de Hurst H por el Método de Conteo de Cuadros.	41
Tabla 5.- Valores del coeficiente de Hurst H los Métodos de Análisis R/S y Variograma.	44

# CAPÍTULO

# 1

## Introducción

### 1.1 Presentación

Los aislamientos son indispensables en la industria eléctrica, estos van desde un simple papel que separa dos devanados en el interior de un transformador, hasta grandes cadenas de aisladores poliméricos en líneas de transmisión.

Los polímeros como aislamientos externos son muy importantes en la industria eléctrica por tener un excelente comportamiento en ambientes húmedos y contaminados. Una de las propiedades de los polímeros que contribuyen a su buen desempeño en intemperie es la hidrofobicidad superficial. La hidrofobicidad es la propiedad que tienen los materiales poliméricos para no permitir que se forme sobre ellos una capa uniforme de agua cuando son humectados, sino pequeñas gotas sobre su superficie.

Sin embargo, los polímeros al ser expuestos a la intemperie son atacados por los rayos ultravioleta, la humedad y descargas parciales. También la acumulación de residuos en su superficie los hace reaccionar químicamente y por lo tanto degradarse al paso del tiempo. Al estar expuestos a entornos que los dañan, comienzan a envejecer y como consecuencia pierden su hidrofobicidad.

Al perder hidrofobicidad los aislamientos poliméricos, permitirán que una gota de agua se expanda por su superficie formando una capa uniforme que mezclada con los contaminantes provocarán la formación de bandas secas en su superficie y pequeñas descargas parciales que se irán incrementando. Estas descargas superficiales dejan una trayectoria conductora de carbón conocida como *tracking*, lo cual es uno de los problemas más serios en los aislamientos poliméricos, ya que lo va degradando hasta que provoca una falla. Así como la *erosion* que es el desprendimiento del material.

Dichas descargas superficiales dejarán su recorrido plasmado sobre la superficie del material aislante (en este caso es hule silicón), lo cual es fotografiado y adquirido por una computadora personal para calcular su dimensión fractal y proceder a su análisis y clasificación de acuerdo al nivel de contaminación o conductividad.

## **1.2 Objetivo**

Desarrollar una metodología práctica que generar crear el fenómeno de descargas eléctricas superficiales y registrar la trayectoria que se produce en aislamientos de hule silicón considerando diferentes niveles de contaminación. Además caracterizar tales trayectorias a partir del valor de su dimensión fractal para conocer la naturaleza fractal que presenta, así como correlacionarlo con los niveles de contaminación.

### **1.3 Justificación**

Hasta la fecha no se han efectuado trabajos que reproduzca las trayectorias eléctricas superficiales en aislamientos de hule silicón, la mayoría de los experimentos se enfocan a la perforación del material aislante “puncture”, durante periodos largos de tiempo. Son pocos los estudios que reportan los valores de la dimensión fractal en las trayectorias de descargas eléctricas, pero ningún trabajo caracteriza dichas descargas.

La ruptura eléctrica superficial tiene una gran importancia en las líneas de transmisión y distribución que son afectadas por la contaminación de la ciudad, el mar y la industria entre otras.

Los polímeros tienen un excelente comportamiento en este tipo de ambientes, los aislamientos y cadenas de aisladores que están hechos de estos materiales no están exentos de fallas, siendo las más comunes el *tracking* y la *erosion*. Al presentarse una de estas fallas, se generan en la superficie del aislador la trayectoria eléctrica que siguió la falla. El estudio de esta trayectoria sirve para comprender aún más estos fenómenos.

### **1.4 Estado del arte**

Uno de los primeros trabajos en el cual se analizan las descargas eléctricas en aire fue realizado en el año de 1963 por Essam Nasser *et al.* [1], en sus experimentos utiliza un arreglo punta plano y con la ayuda de una emulsión fotográfica logra registrar imágenes de la trayectoria de los streamer debidos a tensiones de impulso positivo, encontrando que el crecimiento de los streamers va acompañado de ramificaciones y que el número de ramificaciones decrece conforme los streamers se alejan del electrodo punta.

En 1978, Akiro Kawashima *et al.* [2] realizó estudios de la descarga superficial en aislamientos sólidos: la descarga superficial se grabó con una cámara de alta velocidad. Este simple método fue muy útil en la investigación de la superficie de los aisladores. Para realizar este estudio tuvieron que encontrar las figuras de Lichtenberg en los diversos materiales. Estas figuras dan información muy útil acerca de las propiedades físicas de la descarga superficial, cuando son sometidos a voltajes pico, diferentes formas de onda y voltaje de impulso. Los materiales probados fueron: Baquelita, Vidrio, Resina Epoxica, Teflón, Hule y Polietileno.

D. B. Watson *et al.* [3] en 1980 sugiere que la forma geométrica del árbol que representa a la descarga se puede describir matemáticamente. Esto se usa para representar el inicio de la forma de la arborescencia útil para diferenciar entre la polaridad positiva y negativa del voltaje de impulso.

L. Niemeyer *et al.* [4] en 1984, obtiene las figuras de Lichtenberg que muestran una tendencia a ramificarse; además, se presenta evidencia de que estas descargas tienen propiedades fractales, el estudio se hace en dos dimensiones, trabajando en hexafloruro de azufre SF<sub>6</sub> gaseoso. Dan valores experimentales de la dimensión fractal que es de 1.7. También hacen una simulación de 5000 puntos de la descarga y obtienen algunos valores de la dimensión fractal que es de  $1.75 \pm 0.02$ .

L. Niemeyer *et al.* [5] en 1986, defiende su modelo (Dielectric Breakdown Model) para simular una descarga eléctrica y los valores que han obtenido, pero resaltan la importancia de estudiar a las descargas en tres dimensiones y el experimento cambia un poco, ahora es un disco de vidrio y en el fondo una película metálica que actuará como segundo electrodo y un electrodo más en el centro del vidrio.

M. N. Arbad *et al.* [6] presenta en el año de 1989 su trabajo en el cual indica que, al iniciar la descarga eléctrica en los aislantes sólidos crece el árbol de la trayectoria eléctrica, ésto se muestra como el resultado de los efectos de la ruptura eléctrica en los puntos donde se concentra el campo eléctrico. También el crecimiento del árbol es sensible a los esfuerzos mecánicos y a la exposición prolongada de las vibraciones causadas por las fuerzas electrostáticas.

La formación de la arborescencia se observa por un proceso que envuelve el desarrollo de finos canales en la estructura del aislador, ésto se da en los puntos donde hay una gran concentración de campo que esfuerza el material polimérico. Este canal es muy fino, delgado y crece hasta que atraviesa el material.

R. J. Xavier *et al.* [7] hace un estudio detallado en el año de 1990 de la distancia de fuga requerida para aisladores de CD y CA, utilizan la norma IEC 587 para hacer las pruebas de *tracking*, pero varían el ángulo de 5° hasta 45°; además, utilizan la norma IEC 507 para establecer los niveles de contaminación. Dice también que para el caso de CD en las pruebas de contaminación artificial no es adecuado su uso ya que el equipo no tiene la capacidad de soportar la ruptura eléctrica.

D. B. Watson *et al.* [8] estudia en el año de 1992 los sistemas de procesamiento de imágenes para medir la longitud del árbol y los ángulos de las ramificaciones en polimetilmetacrilato (PMMA). Con una distribución logarítmica de la longitud de los brazos se han encontrado valores entre las ramificaciones de 65.78 y el valor mínimo de longitud de árbol es de 2.4  $\mu\text{m}$ . El voltaje se aplica hasta que se inicia el árbol de la descarga, el valor de tensión es de alrededor de 6 kV. Cuando el voltaje es constante la formación del árbol es lenta.

En 1992, A. S. G. Alghamdi *et al.* [9] realizan pruebas para determinar el *tracking* y la *erosion*, dan los resultados del tiempo en que se forma el *tracking* y de cómo varía respecto a las variaciones del material (plastificación). Así mismo, la prueba de *erosion* muestra cómo avanza en la relación de mm<sup>3</sup>/h. Todas las pruebas se apegan a las especificaciones de las normas BS 5604-1986, IEC 587-1984, ASTM D 2303-79. Así concluyen que la resistencia a la *erosion* y el *tracking* dependen de las propiedades mecánicas del material.

R. Matsuoka *et al.* [10] artículo desarrollado en el año de 1996, describe los resultados de las investigaciones de los contaminantes no solubles conocidos como Tonoko o Caolín con respecto a los voltajes de flameo en pruebas de aisladores contaminados artificialmente

Chen Yuan *et al.* [11] en el año de 1997 explica en forma detallada el excelente comportamiento de un aislador de hule silicón en condiciones de contaminación artificial ante una ruptura superficial o flameo. Así mismo; cómo pierde su hidrofobicidad y explica en forma detallada el proceso de ruptura.

M. Naoe *et al.* [12] estudia y analiza en el año de 1997, el procedimiento de crecimiento del árbol en el diámetro de las muestras, el cual es generado por un electrodo con punta de alfiler, el análisis se efectúa con la teoría fractal. El material que se utiliza fueron bloques de PMMA. Determinan la dimensión fractal por medio del método de conteo de cuadros y después de tener la dimensión fractal, proceden a graficar sus resultados.



K. Kudo *et al.* [13] en el año de 1998, hace un análisis de los árboles eléctricos que se presentan en los aisladoras poliméricas en forma experimental, este estudio lo hace con varios métodos, destacan el método de conteo de cuadros que es uno de los métodos más usados por su sencillez, este estudio se hace en dos y tres dimensiones. Además, se hace una simulación de cómo se desarrollan los árboles eléctricos.

M. Ugur *et al.* [14] estudia en el año de 1998, la formación del *tracking* en muestras de resina de poliéster tipo C, apegándose a las normas IEC 587 y ASTM D 2303. Además, calculan la dimensión fractal, proponen un modelo capaz de producir la trayectoria que deja la descarga al pasar por la muestra.

C. H. Lee *et al.* [15] utiliza Etileno Propileno Dieno Monomero (EPDM) para realizar las pruebas de *tracking* de acuerdo a la norma IEC 587 con un voltaje de 4.5 kV con un tiempo de prueba de 6 horas, el grado de *erosion* es calculado por su peso antes y después de la prueba de *tracking*. La falla en esta prueba se define por la corriente de fuga que es sobre el valor de 60 mA para 2 segundos. Sin embargo, el carbón negro tiene un efecto negativo en las propiedades eléctricas de los materiales poliméricos aislantes.

Posteriormente en el año de 1999, M. Ugur *et al.* [16] se basa en la norma ASTM D-2303 para realizar pruebas de *tracking*, estas pruebas son a consecuencia de los factores ambientales los cuales son mecánicos, radiación de rayos UV y efectos del viento. Dichos factores afectan los tiempos de *tracking* debido a los esfuerzos, pérdida de hidrofobicidad y envejecimiento. Los tiempos de ruptura se disminuyen a más del 50 %.

# CAPÍTULO

# 2

## Fractales

### 2.1 Introducción

Al querer dibujar un paisaje boscoso o simplemente un atardecer con todo detalle utilizando únicamente un elemento de geometría clásica (círculos, líneas, esferas, etc.) es una tarea árdua y en ocasiones el resultado no es el adecuado. Cuando se desea saber cómo la Naturaleza hizo esa tarea tan compleja con formas tan diversas, surge la inquietud de volverlas a reproducir una y otra vez. Para representar figuras complejas como por ejemplo una playa vista por un satélite, una grieta en un material fracturado o un simple arbusto, las figuras clásicas no son las más adecuadas, ya que al ampliarse, comprimir o estirarse, pierden su estructura, si hacemos esto como por ejemplo con un círculo, tendremos una recta. Con la Naturaleza no pasa esto, por ejemplo, una grieta mantiene los mismos niveles de complejidad a varios niveles de amplificación con un microscopio

Es claro que estas formas geométricas nuevas son más complejas que las euclidianas clásicas, pero nos dan un resultado excelente para reproducir la realidad de las figuras en la Naturaleza que se ven tan sencillas. A este tipo de formas geométricas que entre otras propiedades, contienen una imagen de sí mismas en cada una de sus partes, se les llaman ahora Fractales. Las herramientas de la geometría fractal son, hoy en día, elementos insustituibles en el trabajo de muchos físicos (para estudiar movimientos aleatorios), químicos (en sus trabajos con polímeros), biólogos (para estudiar estructuras moleculares), economistas (para entender y tratar de predecir el comportamiento de la bolsa de valores), etc., pues les han permitido reformular viejos problemas en términos novedosos, y tratar complicados problemas de forma muy simplificada.

En el caso de la ingeniería eléctrica, se busca encontrar un técnica que nos permita registrar la trayectoria eléctrica superficial en poco tiempo. Con ayuda de una imagen, caracterizar la descarga y saber que factores influyen en ella.

Como entidades geométricas, los fractales tienen características peculiares: Imaginar curvas de longitud infinita que no se extienden en todo el espacio, o concebir un objeto con dimensión fraccional es el tipo de cosas que debemos estar dispuestos a enfrentar. La geometría fractal ha generado su propio lenguaje con representaciones mudas de enorme contenido visual. En realidad, se trata de operaciones geométricas para rotar, trasladar, escalar y deformar cualquier figura a nuestro antojo.

## 2.2 Concepto de Fractal.

Benoit Mandelbrot inventó en 1975 el término fractal [17] que proviene del adjetivo latín fractus, el verbo latín correspondiente es frangere que significa romper, para crear fragmentos irregulares. También fractus puede significar irregular. Un Fractal es un conjunto de formas que se generan normalmente por un proceso de repetición, se caracterizan por poseer detalle a toda escala, por tener longitud infinita, por ser no diferenciables y por exhibir dimensión métrica fraccionaria, diferente a la topológica.

## 2.3 La idea de dimensión.

La dimensión topológica [17,18] se denota por  $D_T$ , es siempre entera, pero la dimensión fractal  $D_f$  no necesariamente es entera. Otra dimensión fue formulada por Hausdorff en 1919 y puesta en su forma final por Besicovitch: la dimensión Hausdorff-Besicovitch se denota por  $D$ , y será explicada más adelante.

Dimensión Topológica  $D_T$ .

- 1) Postulado.- Un punto o conjuntos de puntos numerables tienen una  $D_T=0$ .
- 2) Un objeto tiene dimensión topológica  $D_T=d_c+1$ , donde  $d_c$  es la dimensión topológica de un objeto que divide al objeto original en dos partes.

ELEMENTO	Dimensión Topológica $D_T$
Punto	$D_T=0$
Línea	$D_T=0+1=1$
Superficie	$D_T=1+1=2$
Volumen	$D_T=2+1=3$

## Dimensión Métrica.

Esta dimensión es también llamada dimensión de superposición (cover dimension) [17,18], es utilizada para medir distancias, se refiere a la dimensión del espacio euclidiano en la cual un conjunto de unidades ya sean círculos o cuadrados se superponen sobre una línea para conocer su longitud.

### 2.4 Propiedad aditiva de los Fractales.

Esta propiedad nos dice que la longitud de una línea es igual a la suma de un conjunto de líneas, esto también se aplica a superficies y volúmenes.




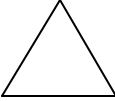

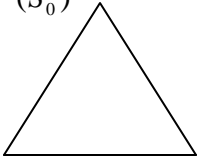
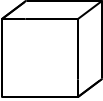

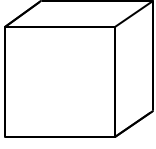
Dimensión Topológica	Características de los Elementos	Propiedad Aditiva
d=1	$f=L$	$L_T=L_1+L_2+\dots+L_n$
d=2	$f=S=L^2$	$S_T=S_1+S_2+\dots+S_n$
d=3	$f=V=L^3$	$V_T=V_1+V_2+\dots+V_n$
d=n	$f=L^d$	

La línea se caracteriza por su longitud, en tanto que la superficie se caracteriza por su área y por ultimo un cuerpo sólido se caracteriza por su volumen.

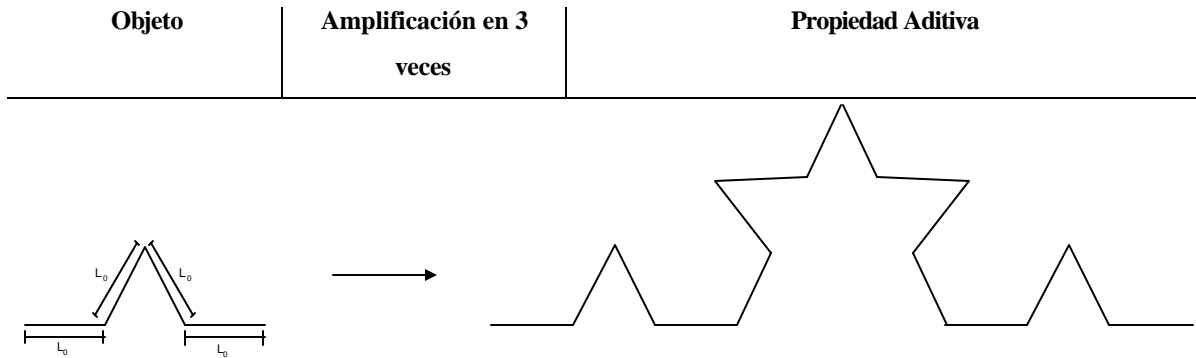
## 2.5 Amplificación de un objeto

La amplificación de un objeto se hace por medio de la función  $Lx = n^d L_0$ , se puede hacer a cualquier escala, la figura geométrica no perderá sus características. Si se hace una amplificación multiplicando la longitud en forma convencional en lugar de hacerlo con la función se tendrían resultados erróneos. En la tabla 1 se muestra como funciona la función de amplificación.

**Tabla 1.-** Ejemplo de cómo se calcula la dimensión fractal a partir de la función de amplificación.

Objeto	Amplificación en n veces	Propiedad Aditiva
		$Lx = 3^d (L_0)$ 
		$Sx = 3^d (S_0)$ 
		$Vx = 3^d (V_0)$ 

Un ejemplo de esta función aplicada a un fractal es la amplificación de la curva de Koch [17-19] que se muestra en la figura 1.



**Fig. 1.-** Ejemplo de la función de amplificación, utilizando la curva de Koch.

Posteriormente se calcula la dimensión fractal a la misma curva de Koch con un aumento de tres veces el original (únicamente multiplicación la longitud) y aumentando con la función de amplificación.

La curva de Koch tiene cuatro lados de una longitud  $L_0$ , que si la queremos ampliar de la manera tradicional nos dará un cálculo erróneo, si el número de segmentos de  $L_0$  es cuatro, entonces tendremos lo siguiente:

$$Lxn = nL_0 \quad , \quad Lx3 = 3L_0 \quad (2.1)$$

Ahora si aplicamos la definición, tendremos un cálculo correcto.

$$Lxn = n^D L_0 \quad , \quad Lx3 = 3^D L_0 \quad (2.2)$$

Para encontrar el valor de D, igualaremos las ecuaciones

$$4L_0 = 3^D L_0 \quad , \quad 4 = 3^D \quad (2.3)$$

Aplicando logaritmos tenemos lo siguiente.

$$\ln 4 = \ln(3^D) \quad , \quad \ln 4 = D \ln 3, \quad \therefore D = \frac{\ln 4}{\ln 3} = 1.2618 \quad (2.4)$$

El valor de D no necesariamente será un valor entero como sucedería en una figura euclidiana. Por lo que se hablaría de una geometría fraccional y esa es la principal característica para llamarlos fractales. A este tratamiento se le conoce como dimensión de Hausdorff-Besicovitch [17,18].

Pero hay otro tipo de fractales que no se apegan a estas características, ya que no son auto similares [17-19], sino auto afines [17-20] y sus características son diferentes, así como el método de cálculo de la dimensión fractal. Los fractales auto afines, no pueden ser ampliados como los auto similares, porque estos objetos se comportan de una manera muy diferente, su relación es no lineal, no aumentan lo mismo en el eje de las X que en el de las Y, la relación se da de la siguiente manera:

$$X' = aX \dots\dots\dots, \dots\dots\dots Y' = b^H Y \quad (2.5)$$

donde H es el coeficiente de Hurst.



## 2.6 Movimiento Browniano.

Una manera muy sencilla de reproducir este movimiento es de la siguiente manera: En un vaso con agua, dejamos caer semilla de alpiste, esta muestra se moverá de izquierda a derecha, causando un desplazamiento por unidad de longitud en cada dirección. El número de veces que se mueve no es fácil de determinar. Pero se le dará un valor de  $+1$  ó  $-1$ , si se va a la derecha o a la izquierda, tendremos una probabilidad de  $0.5$ . De este modo, en el promedio, el conjunto de desplazamientos puede ser cero.

En cambio, debemos considerar el cuadrado de los desplazamientos de los números no negativos. El promedio de estos desplazamientos cuadráticos se les llama desplazamiento cuadrático promedio y nos dice cuántas partículas están dispersas en un número de pasos dados. El resultado del cálculo es  $n$ , que es el número de veces que se mueven; de este modo, más pasos nos permite adoptar y desplegar partículas. Por otra parte, cuantificaremos esta relación: El promedio de la raíz cuadrada del desplazamiento es igual al número de pasos.

El desplazamiento después de un tiempo  $t$  es llamado variable aleatoria, posee una distribución de Gauss, la cual es especificada por la media cero y el desplazamiento cuadrático medio proporcional a la diferencia de tiempo  $t$ . Ejemplos de esta distribución, donde el valor cuadrático medio es normalizado en  $1$ , son llamados números aleatorios gaussianos. De esta observación es claro que la simulación del movimiento Browniano puede ser basado en los números aleatorios gaussianos, donde son equivalentes a los correspondientes desplazamientos para el mismo intervalo de tiempo.

Pero si queremos reproducir o escalar el movimiento Browniano a diferentes magnitudes, tendremos que éste también tiene un comportamiento similar a los fractales auto afines, ya que se extienden en forma diferente en la vertical que en la horizontal.

En general el movimiento Browniano fraccional se caracteriza por el exponente que ocurre en el factor de escala. Este exponente se escribe como  $H$  y es llamado el exponente de Hurst [17-19](debido a Hurst un hidrólogo que trabajó junto a Mandelbrot en las fluctuaciones de las propiedades de escala de los ríos). La propiedad de rango para el exponente 0 corresponde a una curva de fractal de rugosidad aleatoria, para 1 corresponde a fractales aleatorios mas bien vistos suaves o finos. De hecho existe una relación directa entre  $H$  y la dimensión fractal de la gráfica de cada fractal aleatorio.

## 2.7 Transformación de similitud.

Las imágenes auto similares pueden aumentar o disminuir su tamaño en forma lineal, ya que lo mismo se aumenta en el eje de las X, así como en el eje de las Y, en cambio en las figuras auto afines esta relación no se cumple, esta transformación sí se puede dar, pero bajo criterios de transformación específicos como se indicará en el ejemplo siguiente. Ver figura 2.

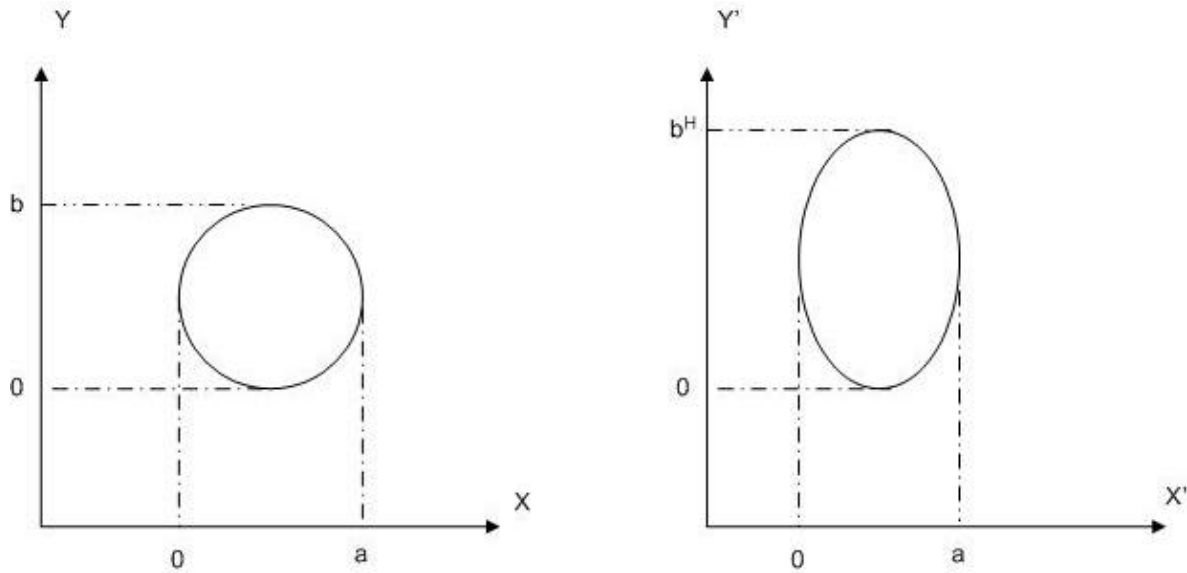


Fig. 2.- Ejemplo de la transformación de similitud.

Las relaciones de transformación son las siguientes:

$$X' = aX \dots\dots, \dots\dots Y' = b^H Y \quad (2.5)$$

donde :

a : Es el número de veces que aumenta la figura.

b : Es el número de veces que aumenta la figura

H : Es el coeficiente de Hurst

### 2.8 Un fractal no tiene derivada

La manera de comprobar dicha afirmación, se hace por medio de la función de Wierstrass que es continua, pero no tiene derivada o su derivada es infinita, la función es la siguiente y su resultado es infinito:

$$Z(x) = \sum_{k=0}^{\infty} I^{-kH} [1 - \text{Cos}(I^k x)] \tag{2.6}$$

### 2.9 Obtención de la dimensión fractal de un objeto auto afin

La manera de obtener la dimensión fractal de un fractal auto afin es la siguiente, un fractal auto afin lo cubrimos con una serie de cuadros, pero como sabemos, los fractales autosimilares no aumentan igual en el eje de las X, que en de las Y. Entonces tomamos un cuadrado que tiene por lado el valor  $a$ . y lo analizamos.

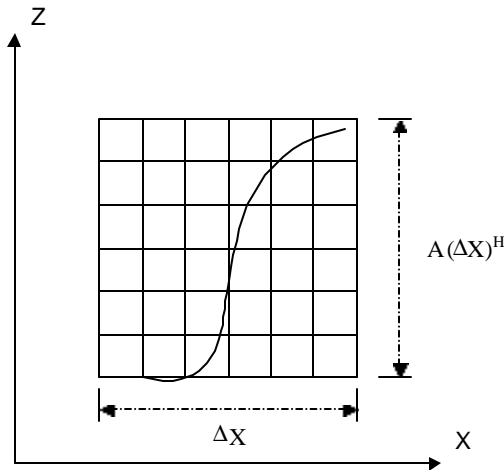


Fig. 3.- Ejemplo de cómo obtener la dimensión fractal auto afin.

Se toma un tramo  $\Delta X$ , como se muestra en la figura.



Ahora el incremento en el eje de las X es el siguiente:

$$N_x = \frac{\Delta X}{a} \quad (2.7)$$

Pero el incremento en el eje Z es diferente, ya que se ve afectado por el área de los cuadros y un incremento de “a”, el cual es igual a:  $(\Delta X)^H$ , por lo que tenemos lo siguiente:

$$\Delta Z = A(a) = A(\Delta X)^H \quad (2.8)$$

Para obtener el área total tenemos que multiplicar  $N_x$  y  $N_z$ .

$$N_x \cdot N_z = \frac{(\Delta X)A(\Delta X)^H}{a^2} \quad (2.9)$$

Sustituimos en la ecuación anterior el valor de “a”, se deduce que:

$$\frac{A(\Delta X)(\Delta X)^H}{(\Delta X)^{2H}} = \frac{A(\Delta X)}{(\Delta X)^H} \quad \text{es decir} \quad A(\Delta X)(\Delta X)^{-H} = A(\Delta X)^{1-H} \quad (2.10)$$

Pero como N está en función de  $\Delta X$ , entonces

$$N(\Delta X) = C(\Delta X)^{1-H} \Delta X = C(\Delta X)^{2-H} \quad (2.11)$$

Se tiene que multiplicar por una constante C y por  $\Delta X$ , debido al incremento  $\Delta X$ .

Aplicando la dimensión de Hausdorff-Besicovitch.

$$D_H = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\ln N(\Delta X)}{\ln(\Delta X)} = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \left[ \frac{\ln C}{\ln(\Delta X)} + (2-H) \frac{\ln(\Delta X)}{\ln(\Delta X)} \right] \quad (2.12)$$

Entonces la dimensión Fractal de un objeto auto afin es:

$$D_H = 2 - H \quad (2.13)$$

# CAPÍTULO

# 3

## Metodología experimental

### 3.1. Introducción

El campo es el mejor laboratorio, pero tiene la desventaja de requerir mucho tiempo para el estudio de un problema, por lo tanto, es necesario reducir el tiempo mediante métodos artificiales.

De acuerdo con estadísticas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) las fallas en los aisladores y la contaminación (salina, industrial, excremento de aves y la quema de vegetación), están catalogadas como la segunda causa de falla en las líneas de transmisión. Para las líneas de transmisión de 400 kV tenemos que las fallas que repercuten en los aisladores son: Contaminación 7.88%, Aisladores 2.42% y la quema de vegetación 24.24%. Para las líneas de 230 kV, los porcentajes son: Contaminación 26.56%, Aisladores 1.17% y la quema de vegetación 13.67% y finalmente para 161-115 kV los porcentajes son: Contaminación 5.39%, Aisladores 0.60% y la quema de vegetación 0.58% [21].

## 3.2 Material y equipo utilizado

### 3.2.1 Fuente de C.A.

La fuente que se utiliza en este trabajo es una fuente de C.A. marca Walter, fabricada en el año de 1969 es del tipo PRAV 25, se alimenta con un voltaje de 220 Volts, trabaja a una frecuencia de 50 a 60 Hz.

Consta de una consola de control, en la cual se muestran los botones para encender y apagar el equipo, así como un interruptor que sirve para aumentar el voltaje desde cero hasta el valor deseable, las escalas en las cuales trabaja que pueden ser 25, 50 ó 100 kV. Ver fig. 4.



**Fig. 4.-** Consola de control Fuente de C.A.

La fuente cuenta además con una resistencia de corriente de limitación, un transformador elevador de tensión de 25 kVA y una corriente de 0.25 A y una resistencia de 270 k $\Omega$  Ver fig. 5.



**Fig. 5.-** Partes que constituyen la Fuente de C.A.



### 3.2.2 Divisor de Tensión.

Se utiliza un divisor de tensión con un arreglo RC, marca Hipotronics de una capacidad de 400 kVA. Con valores nominales de resistencia de  $1200\text{M}\Omega$  y una capacitancia de  $200\text{ pF}$ . Ver fig. 6.



**Fig. 6.-** Divisor de Tensión RC.

### 3.3 Arreglo experimental

El arreglo de electrodos empleado en este experimento fue punta-punta. Con esta configuración se encontraron, las trayectorias eléctricas sobre las muestras; estos flameos causan *tracking* y en algunos casos erosión del material. El arreglo experimental se tomó como base al de la norma ASTM D-2303-85 [22].

Se usaron puntas de tungsteno de 1.5875 mm (1/16 de pulgada de diámetro) siendo el ángulo de la punta para este experimento despreciable.

Las muestras que se usaron para encontrar las trayectorias fueron de hule silicón translúcido. Sus dimensiones fueron de 4 cm de ancho por 10 cm de largo y un espesor de 3.175 mm (1/8 de pulgada).

Dichas muestras antes de ser sometidas a las pruebas fueron lavadas con agua y jabón teniendo cuidado de no dejar residuos. Ya que si queda un residuo sobre la muestra, se producirá una serie de descargas parciales en su vecindad y por lo tanto acelerará un flameo y la dirección de la descarga no será aleatoria.

También se emplearon vidrios de 6 cm de ancho por 12 cm de largo, limpios y sin ningún tipo de residuo.

Se empleó un electrolito que fue usado para contaminar las muestras y sirvió como medio conductor para el desarrollo de la descarga. La composición del electrolito fue de 40 grs. de caolín por litro de agua destilada con una cantidad de sal, según la cantidad de sal por litro de la composición es la conductividad[23]. Ver tabla 2.

**Tabla 2.-** Niveles de conductividad, densidad equivalente de sal depositada y tipo de contaminación.

Gramos de sal por litro	Conductividad Volumétrica, (S/m)	Densidad Equivalente de Sal Depositada, (mg/cm <sup>2</sup> ) DESD <sup>1</sup>	Tipo de contaminación
5	0.83	0.02085	Muy Ligera
10	1.60	0.04013	Ligera
20	3.00	0.07501	Media
50	6.85	0.17137	Alta
160	17.0	0.4250	Muy Alta

Además se usó caolín para crear una interfase conductora y eliminar la hidrofobicidad del polímero [8,9,22,24,25]. Ver fig. 7.



**Fig. 7.-** Muestra de Hule Silicón cubierta con caolín.

<sup>1</sup> La DESD, es la cantidad de sal, sobre la superficie de un aislador en miligramos por centímetro cuadrado que se requiere para producir una conductividad similar a la contaminación realmente depositada y disuelta en la misma cantidad de agua. Este método está normalizado e incluido en la norma IEC 507 [23].

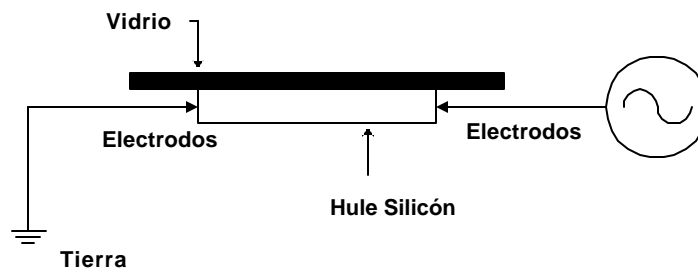
Las muestras del polímero fueron cubiertas de caolín, tratando de tener una capa uniforme en las mismas, se debe tener cuidado de no exceder la cantidad de caolín en las orillas. Posteriormente se aplica el electrolito de una manera uniforme sobre la muestra, de igual manera no se debe de exceder la cantidad de electrolito en las orillas, ya que si se derrama por los lados del material se tendrán las mismas condiciones de conductividad en la cara posterior de la muestra. A esto se le suman las impurezas de la mesa, sobre la cual se coloca la muestra, estas podrían ocasionar que la trayectoria de la descarga ocurra por la cara posterior del material.

Después se cubre la muestra con un vidrio, con la finalidad que el electrolito no se evapore rápidamente. Se colocan las puntas de tungsteno en la muestra, penetrándolo con mucho cuidado en cada lado de la misma. Una de las puntas se aterriza a tierra y la otra se conectó a la fuente de corriente alterna. Ver fig. 8.



**Fig. 8.-** Muestra de Hule Silicón cubierta con caolín y con los electrodos de tungsteno.

En la fig. 9 podemos ver la representación esquemática del arreglo experimental.



**Fig. 9.-** Arreglo experimental de la prueba de ruptura superficial.

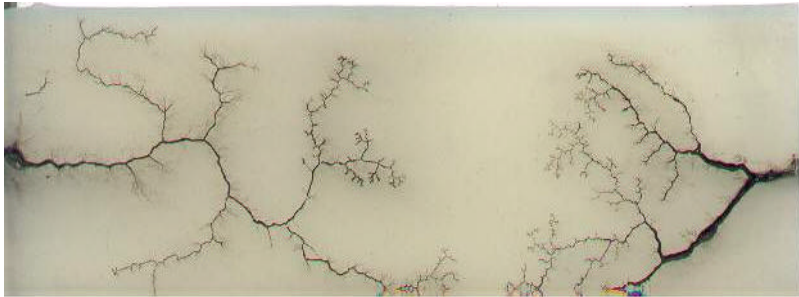
Por ultimo se aplica una tensión de 15 kV de CA por 10 segundos para generar la trayectoria de una descarga eléctrica superficial en una muestra de hule silicón.

Una vez que la muestra registra la trayectoria de la descarga eléctrica superficial, con mucho cuidado se retira el vidrio que en la mayoría de las ocasiones se rompe. Cuando esto no sucede el cristal se guarda y se le toma una foto, en este se aprecian mejor las descargas que en la muestra de silicón, ya que a veces al retirar el cristal, algunos pedazos de carbón se desprenden del silicón y se pierde el detalle de la figura. Como ejemplo tenemos la fig. 10.



**Fig. 10.-** Figura que guarda todos los detalles en el cristal sin daño.

Al finalizar las pruebas, las muestras se impregnan de tinta para salvaguardar la trayectoria que se plasmó sobre la superficie del hule silicón, para después fotografiarse. Las trayectorias pueden ser diversas y se pueden tener imágenes ramificadas y con muchas formaciones de árboles. Ver fig. 11.



**Fig. 11.-** Trayectoria eléctrica superficial ramificada.

Se tienen figuras que zigzaguean un poco y se unen las trayectorias que corren por cada uno de los extremos. Ver fig. 12.



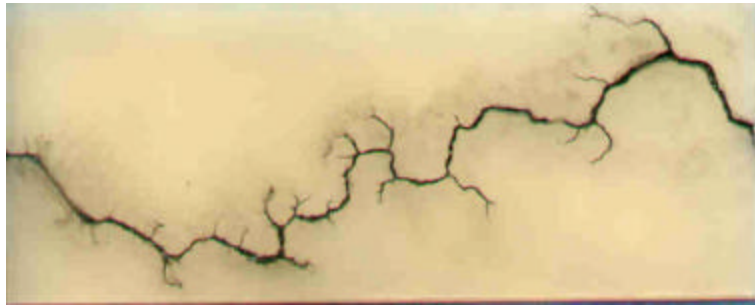
**Fig. 12.-** Trayectoria eléctrica zigzagueante y que se termina uniendo.

Hay trayectorias que no se unen pero tienen ramificaciones y no se alcanzan a juntar. Ver fig. 13.



**Fig. 13.-** Trayectoria eléctrica con ramificaciones y que no se une.

Se obtienen una infinidad de formas y figuras, algunas son caprichosas, por lo que no se pueden catalogar. Ver fig. 14.



**Fig. 14.-** Trayectoria eléctrica peculiar.

Hay otras en la que la trayectoria solo se desarrolla en uno de los electrodos y queda incompleta. Ver fig. 15.



**Fig. 15.-** Trayectoria eléctrica incompleta

Las imágenes obtenidas en los experimentos se muestran en su totalidad en el apéndice 2.

### **3.3 Procesamiento de las imágenes.**

Una vez teniendo las fotografías se procede a su adquisición digital, esto se hace por medio de un escáner.

A estas imágenes, se les a quita brillo y contraste para así resaltar la trayectoria en color negro, también se hace una limpieza de la imagen para quitar impurezas que no son parte de la trayectoria.

Después se transforma la imagen a un formato de un bit o blanco y negro. La trayectoria queda en color blanco porque el paquete Benoit [26] así la reconoce y se calcula la dimensión fractal.

Una vez que se tiene la figura en blanco y negro y con la extensión BMP, se procede al cálculo de la dimensión fractal por el método de conteo de cuadros (Box Counting) y se obtiene el valor del coeficiente de Hurst, que es igual a  $H_B = 2 - D_f$ , para los diferentes niveles de contaminación, concentración de sal y conductividad superficial.

Para obtener los valores del coeficiente de Hurst por métodos auto afines, se deben separar las figuras. Como ya se ha visto en los ejemplos las figuras crecen en ambos lados del polímero, por eso se dividen en dos. Se tiene un lado izquierdo y un lado derecho que a su vez se separa nuevamente en dos, esto se hace con la finalidad de tener las coordenadas de la trayectoria más predominante [27] y así meter esta información al paquete Benoit.

Los métodos que se utilizan son el método de análisis R/S (R/S Analysis) [26] y el de método variograma (Variogram) [26].



### 3.3.1 Método de conteo de cuadros (Box Counting).

La dimensión de conteo de cuadros (Box Counting) se define como el exponente  $D_b$  en la relación:

$$N(d) \approx \frac{1}{d^{D_b}} \quad (4.1)$$

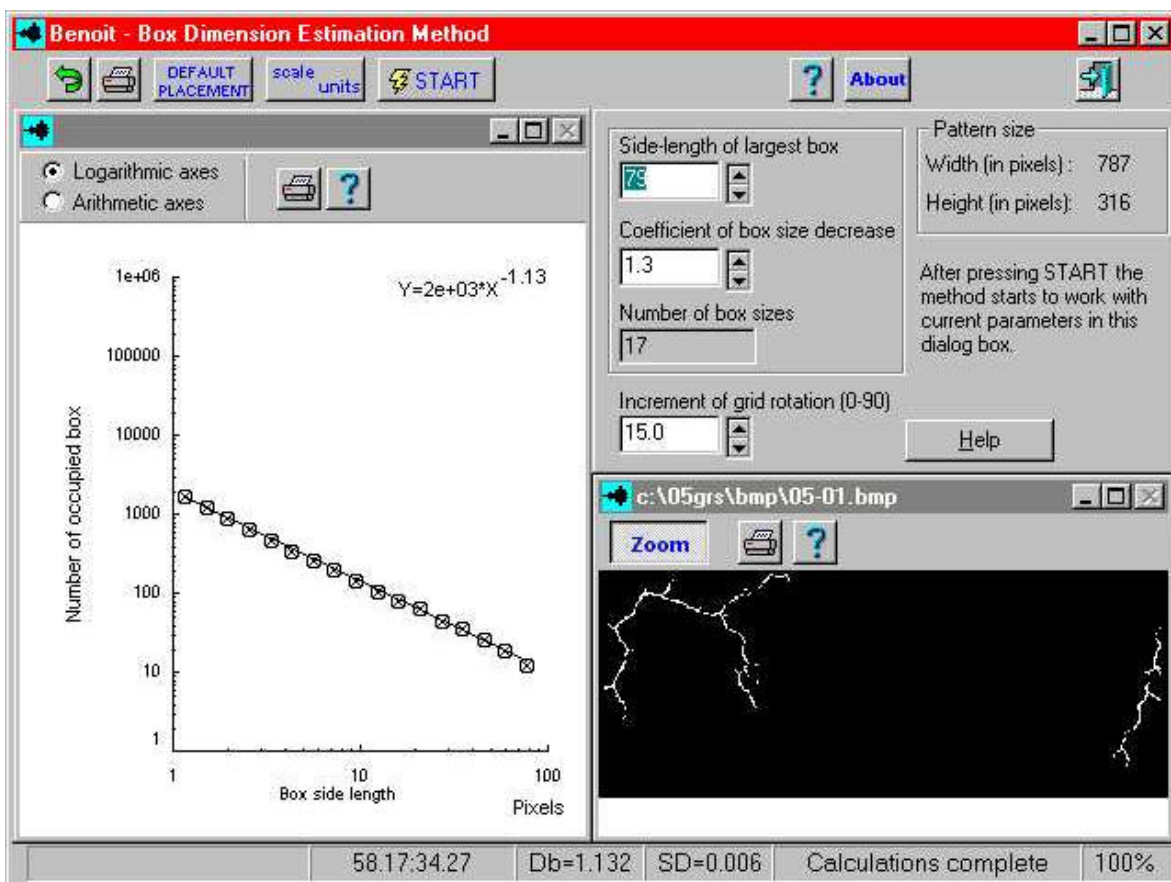
Donde  $N(d)$  es el número de cuadros de tamaño lineal  $d$  necesarios para cubrir un objeto o conjunto de puntos distribuidos en un plano bidimensional. La base de este método es que para euclidianos, la ecuación (4.1) define su dimensión. Es decir, se necesita un número de cuadros proporcionales a  $1/d$  para cubrir un conjunto de puntos que están sobre una curva, o  $1/d^2$  para cubrir un conjunto de puntos distribuidos en un plano y así sucesivamente.

Esta dimensión es algunas veces llamada dimensión de malla, debido a la conveniencia matemática de usar los cuadros en forma de rejilla. Se puede definir una dimensión de cuadros, superponiendo en cualquier posición y orientación y de esa manera minimizar el número de cuadros necesarios para cubrir el conjunto. Es obviamente un problema computacional muy difícil el encontrar la cantidad total de maneras posibles para cubrir el conjunto con cuadros de tamaño  $d$  que minimicen el conteo de  $N(d)$ .

En la práctica, para medir  $D_b$  se cuenta el número de cuadros de tamaño lineal  $d$  necesario para cubrir el conjunto y se grafica el logaritmo de  $N(d)$  en el eje vertical contra el logaritmo de  $d$  en el eje horizontal. Si el conjunto es desde luego fractal, ésta gráfica seguirá una línea recta con una pendiente negativa que es igual a  $-D_b$ . Para obtener puntos equidistantes en la gráfica logarítmica, es mejor seleccionar tamaños de cuadros  $d$  que sigan una progresión geométrica (por ejemplo,  $d = 1, 2, 4, 8, \dots$ ), o bien usar una progresión aritmética (por ejemplo,  $d = 1, 2, 3, 4, \dots$ ).

En la teoría, para cada tamaño de cuadro, la rejilla debería superponerse de tal manera que sea ocupado el número mínimo de cuadros. Esto se realiza en el programa Benoit al rotar la rejilla para cada tamaño de cuadros  $90^\circ$  y graficar el valor mínimo de  $N(d)$ . El programa Benoit permite que el usuario seleccione los incrementos angulares de rotación.

Este proceso lo podemos ver en la siguiente figura, la cual muestra cómo se calcula la Df por el Método de conteo de cuadros (Box Counting) y la presentación del cálculo por medio del programa Benoit. Ver fig. 16.



**Fig. 16.-** Cálculo de la Df por el Método de Conteo de cuadros por medio del programa Benoit

### 3.3.2 Método de análisis R/S (R/S Analysis).

Considere un intervalo o ventana de longitud  $w$  en un trazo. Dentro de esta ventana se pueden definir dos cantidades:

- 1)  $R(w)$ , el rango tomado por los valores de  $y$  en el intervalo. El rango se mide respecto a una tendencia en la ventana, donde la tendencia se estima simplemente como la línea que conecta el primero y el último punto dentro de la ventana. Así se deduce la tendencia promedio de la ventana.
- 2)  $S(w)$ , es la desviación estándar de las primeras diferencias ( $dy$ ) de los valores de  $y$  en algunas ubicaciones de  $x$  y en la ubicación previa sobre el eje  $x$ :

$$dy(x) = y(x) - y(x - dx) \quad (4.2)$$

donde  $(dx)$  es el intervalo de muestreo, es decir; el intervalo entre dos valores consecutivos de  $x$ .

Una medida confiable de  $S(w)$  requiere datos con un intervalo de muestreo constante  $dx$ , debido a que la diferencia esperada entre valores consecutivos de  $y$  es una función de la distancia que los separa.  $S(w)$  en el método de intervalo reescalado se usa para normalizar el intervalo  $R(w)$  y de ese modo permitir comparaciones de diferentes conjuntos de datos que tienen un intervalo de muestreo no constante.

El intervalo reescalado  $R/S(w)$  se define como:

$$R/S(w) = \left\langle \frac{R(w)}{S(w)} \right\rangle \quad (4.3)$$

Donde  $w$  es la longitud de ventana y el paréntesis angulado  $\langle R(w) \rangle$  denota el promedio de los valores de  $R(w)$ . La base del método es que a causa de auto afinidad, se espera que el intervalo tome valores de  $y$  en una ventana de longitud  $w$  proporcionales a la longitud de la ventana, la cual depende del exponente de Hurst  $H$ , es decir:

$$R/S(w) = w^H \quad (4.4)$$

En la práctica para una longitud determinada de ventana  $w$ , se subdividen un número de intervalos de longitud  $w$ , se mide  $R(w)$  y  $S(w)$  en cada intervalo, y se calcula  $R/S(w)$ , como la relación promedio  $R(w)/S(w)$ , esta relación se grafica.

Este proceso se repite para un número determinado de longitudes de ventana. El logaritmo de  $R/S(w)$  se grafica contra el logaritmo de  $w$ . Si el trazo es auto afin, esta gráfica deberá seguir una línea recta cuya pendiente es igual al exponente de Hurst  $H$ . La dimensión fractal del trazo puede entonces calcularse de la relación con el exponente de Hurst  $H$  en:

$$D_{rs} = 2 - H \quad (4.5)$$

Este proceso lo podemos ver en la siguiente figura la cual muestra cómo se calcula el coeficiente de Hurst por medio del Método de análisis R/S (R/S Analysis) y la presentación del cálculo por medio del programa Benoit. Ver fig. 17.

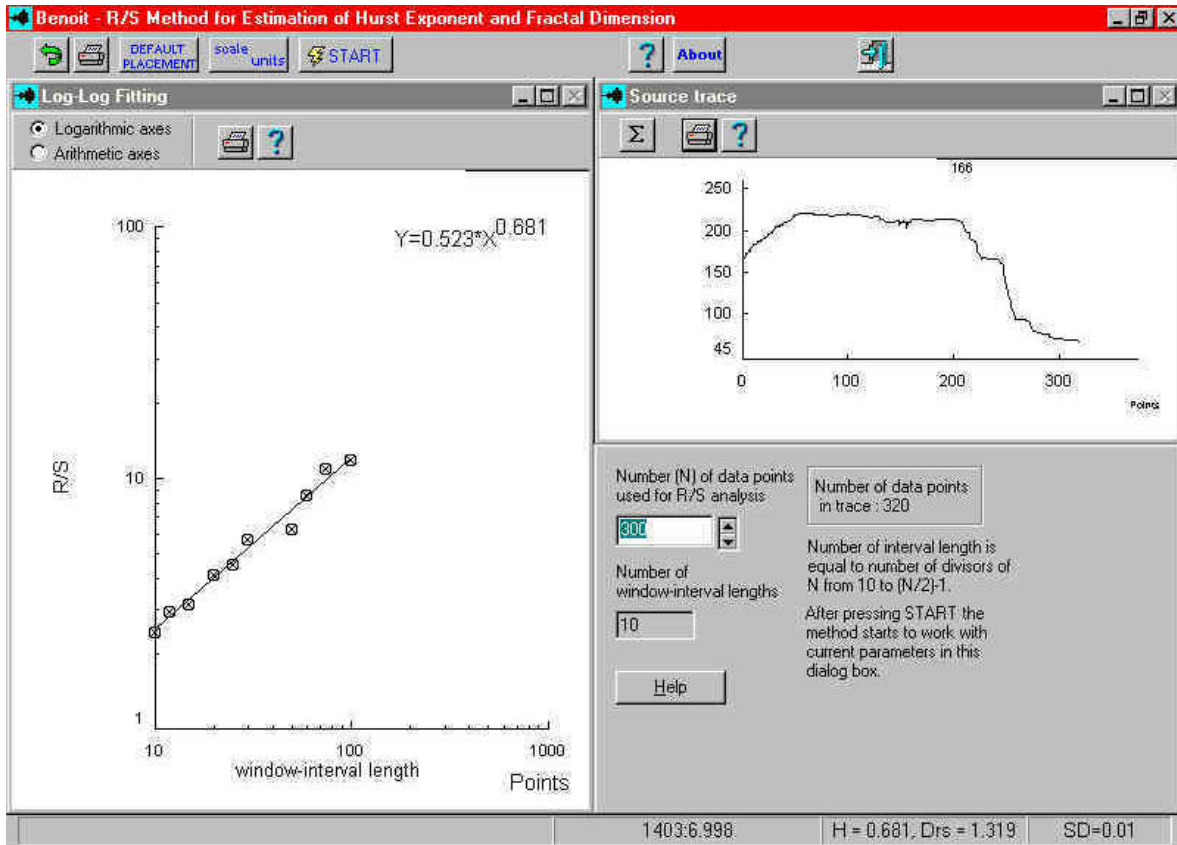


Fig. 17.- Cálculo del coeficiente de Hurst por el Método de Análisis R/S mediante el programa Benoit.

### 3.3.3 Método de Variograma.

Se define el método del variograma (también conocido como variación de los incrementos, o función estructura) como el valor esperado de la diferencia cuadrada entre dos valores de  $y$  en una traza separada por una distancia  $w$ . En otras palabras, el variograma de la muestra  $V(w)$  de una serie  $y(x)$  es medida como sigue:

$$V(w) = \left\langle [y(x) - y(x+w)]^2 \right\rangle \quad (4.6)$$

es decir  $V(w)$  es el valor promedio de la diferencia cuadrada entre pares de puntos a distancia  $w$ . Esta expresión para el variograma es a menudo dividido por dos en la literatura geoestadística para obtener el semi-variograma, el cual puede relacionarse inmediatamente a la función de auto covariancia. La distancia de separación  $w$  es llamada a menudo "retraso."

Para obtener la relación entre  $V(w)$  y el exponente de Hurst, se considera que pasa en una traza del movimiento Browniano fraccional. Si uno toma una distancia de longitud igual a  $w$ , el valor de la diferencia entre  $y(w)$  y  $y(0)$  normalmente se distribuye con una variación  $S(w)^2$  (donde  $S$  = la desviación normal) que es proporcional a  $w^{2H}$ . Si ahora uno toma la diferencia cuadrada, el valor esperado va a ser igual a  $S(w)^2$ , para que se pueda escribir:

$$V(w) \approx w^{2H} \quad (4.7)$$

En la práctica, para obtener una estimación de  $H$ , el promedio de la diferencia cuadrada entre todos los pares de puntos, separados por una distancia  $w$ , se calcula como  $V(w)$  en (4.6) para varios longitudes de la ventana, y los logaritmos de  $V(w)$  se grafican contra los logaritmos de  $w$ . Si la traza es auto afin, esta gráfica seguiría una línea recta cuya pendiente es igual a dos veces el exponente de Hurst  $H$ .

La dimensión fractal del trazo puede calcularse de la relación entre el exponente de Hurst  $H$  y la dimensión fractal  $D_v$ :

$$D_v = 2 - H \quad (4.8)$$

donde  $D_v$  es la dimensión del fractal estimada mediante el variograma.

Este método puede aplicarse a series que no tienen intervalos constantes de muestreo, si se toman puntos separados por distancias  $w \pm dw$ , donde  $dw$  es un porcentaje pequeño de  $w$ . Una medida de la amplitud de la trayectoria puede estimarse como la longitud de ventana  $wc$  donde  $V(wc)^{0.5} = wc$ . Como en el caso de aspereza de RMS, este valor de  $w$  no dará realmente una estimación de la escala de distancia.

Las consideraciones anteriores hacen claro por qué una tendencia se subtrae de los datos dentro de una ventana en el cálculo del rango  $R(w)$  y de la aspereza  $s(w)$  de RMS. El variograma precisamente mide el valor promedio cuadrado de esta tendencia que es proporcional a la longitud de la ventana y al exponente de Hurst como en (4.7). Si el promedio de la tendencia no se subtrae antes de que el rango o la aspereza sea estimada, la tendencia existente, agregará alguna cantidad a la estimación final de rango o aspereza. Esta cantidad no es un porcentaje constante, pero es proporcional a la longitud de la ventana, y por consiguiente la contribución esperada de una tendencia variará en diferentes longitudes de la ventana. Para hacer una comparación válida de rango o aspereza en ventanas de diferentes tamaños, es mejor primero eliminar tendencias.

Este proceso lo podemos ver en la siguiente figura la cual muestra cómo se calcula el coeficiente de Hurst por medio del Método de variograma y la presentación del cálculo por medio del programa Benoit. Ver fig. 18.

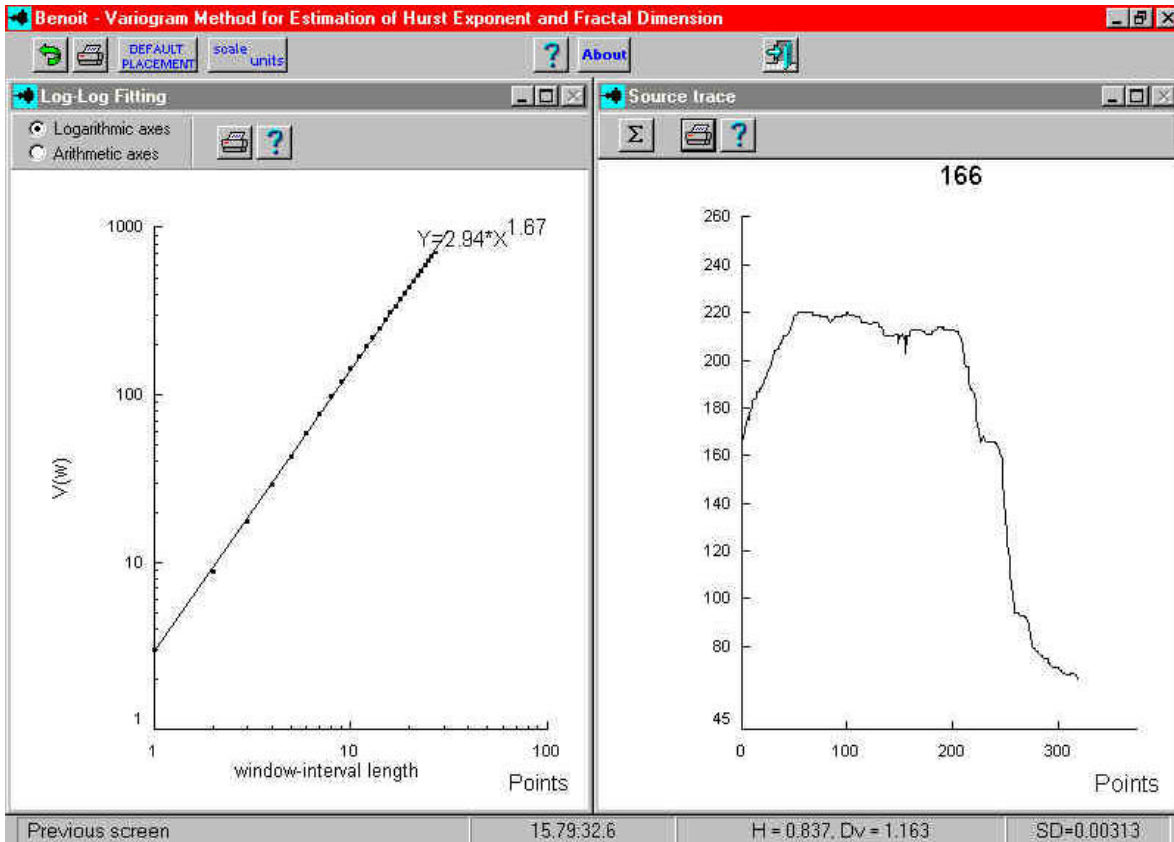


Fig. 18.- Cálculo de el coeficiente de Hurst por el Método de Variograma mediante el programa Benoit.



# CAPÍTULO

# 4

## Análisis de resultados

### 4.1. Introducción

Se presentan los resultados obtenidos en el cálculo de la dimensión fractal y el coeficiente de Hurst  $H$ , por los métodos que se describen en el Capítulo 3 y los histogramas de los valores obtenidos con cada una de los métodos aquí estudiados. Se presentan valores promedio además de un ajuste logarítmico para cada uno de los métodos y casos.

Todas las imágenes presentadas fueron obtenidas por el autor, al ver el apéndice 2 el lector puede darse una idea de las diversas formas que se presentan para encontrar una descarga eléctrica superficial en un nivel de contaminación dado (Concentración de sal, Conductividad superficial o DESD). Todas las imágenes fueron creadas con el mismo arreglo experimental. Lo único que varía es conductividad del electrolito.

## 4.2 Imágenes encontradas en el laboratorio.

Las imágenes que se encuentran en esta tesis, son imágenes ramificadas, continuas o casi rectas y son parecidas a otros eventos encontrados en la naturaleza. Por ejemplo una fractura en yeso, un alveolo pulmonar, el crecimiento de una descarga en un liquido aislante, el crecimiento de una arborescencia de descarga eléctrica en el interior de un polímero, una descarga eléctrica en aire, etc, solo por mencionar algunos.

Las imágenes de esta tesis son formas variadas, no obedecen un patrón definido y se presentan en su totalidad en el apéndice 2.

## 4.3 Cálculo de la dimensión fractal y el coeficiente de Hurst $H$ .

En el método de conteo de cuadros (Box Counting), se encontró que al calcular la dimensión fractal con la figura completa o la figura en dos partes cuadradas, se obtiene la misma dimensión fractal. Aquí se trabajó con los valores de las figuras completas. Los valores promedios para los diferentes casos de concentración se muestran en la tabla 3.

**Tabla 3.-** Valores de la Dimensión Fractal por el Método de Conteo de Cuadros.

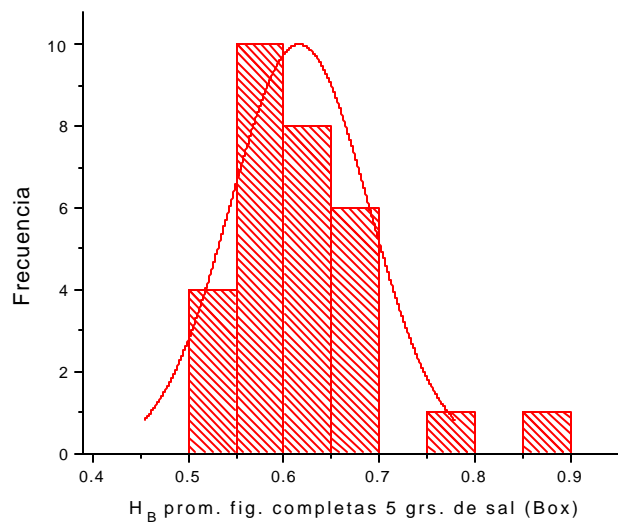
Concentración de sal.	$D_f$ promedio	Desviación estándar
5 grs.	1.3837	0.0725
10 grs.	1.4273	0.0344
20 grs.	1.4179	0.0529
50 grs.	1.4056	0.0677
160 grs.	1.4901	0.0471

Al tener los valores de la dimensión fractal, debemos de encontrar el valor de coeficiente de Hurst  $H$ , por medio de la relación:  $H_B = 2 - D_f$ . Posteriormente se puede clasificar a las trayectorias de las descargas eléctricas superficiales; Saber si son auto similares o auto afines. Los valores del exponente de Hurst  $H$  para cada caso se presentan en la tabla 4.

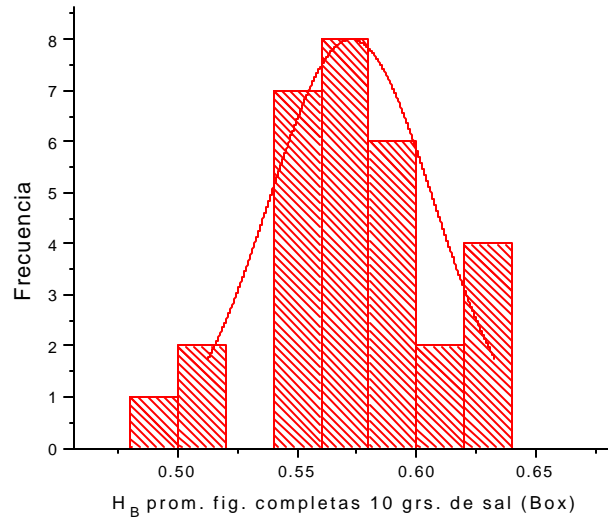
**Tabla 4.-** Valores del coeficiente de Hurst  $H$  por el Método de Conteo de Cuadros.

Concentración de sal.	$H$ promedio	Desviación estándar
5 grs.	0.6163	0.0725
10 grs.	0.5726	0.0344
20 grs.	0.5820	0.0529
50 grs.	0.5944	0.0677
160 grs.	0.5098	0.0471

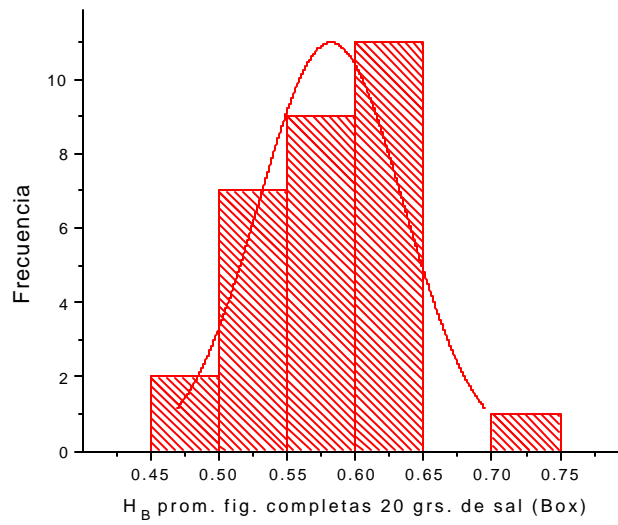
La distribución y la frecuencia del exponente de Hurst  $H$  de los 30 valores de las muestras analizadas se ilustran en las figuras 19-23. Los histogramas nos presentan la frecuencia de los valores dentro de rangos que establece cada curva así como una distribución normal que en su valor más alto nos indica el promedio de la familia de valores.



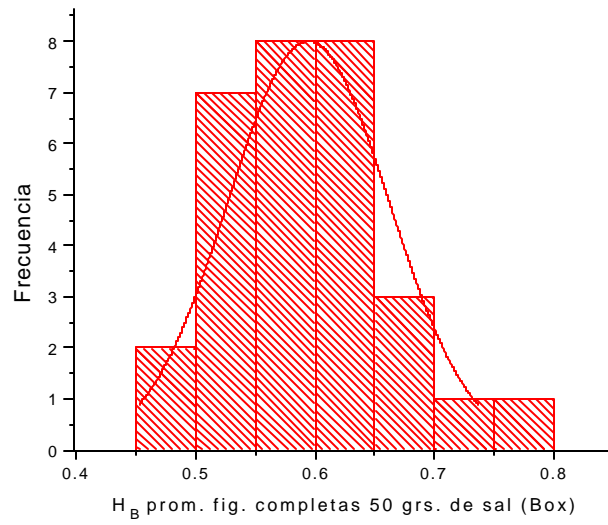
**Fig. 19.-** Histograma de valores 5 grs. de sal.



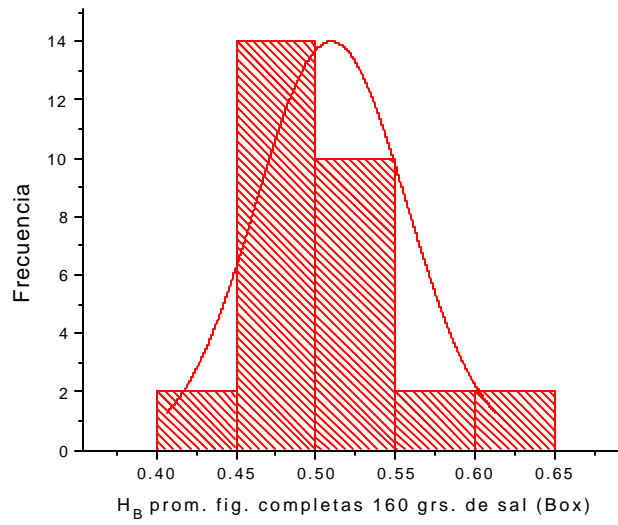
**Fig. 20.-** Histograma de valores 10 grs. de sal.



**Fig. 21.-** Histograma de valores 20 grs. de sal.



**Fig. 22.-** Histograma de valores 50 grs. de sal.



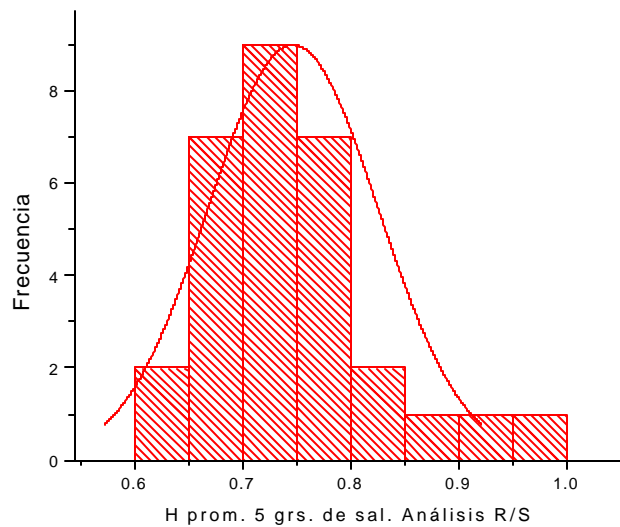
**Fig. 23.-** Histograma de valores 160 grs. de sal.

Para los métodos auto afines, Análisis RS y Variograma, se tienen los siguientes resultados. Ver tabla 5.

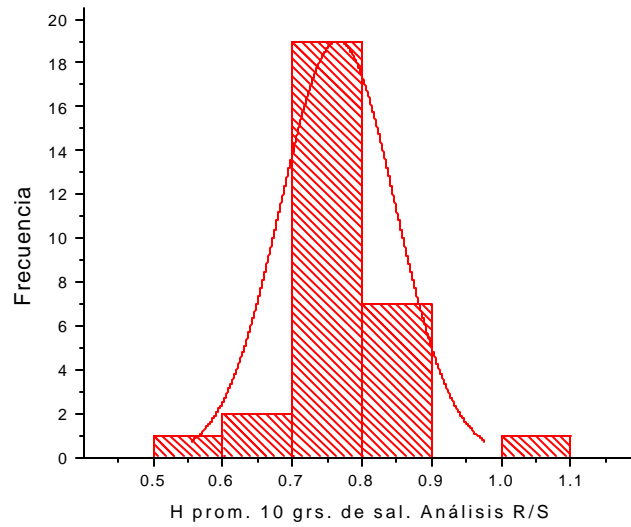
**Tabla 5.-** Valores del coeficiente de Hurst  $H$  los Métodos de Análisis R/S y Variograma.

Concentración de sal.	$H$ promedio Análisis R/S	Desviación estándar Análisis R/S	$H$ promedio Variograma	Desviación estándar Variograma
5 grs.	0.7462	0.0785	0.7352	0.0495
10 grs.	0.7654	0.0824	0.7206	0.0509
20 grs.	0.7643	0.0821	0.7258	0.0561
50 grs.	0.7170	0.1217	0.6818	0.0813
160 grs.	0.7691	0.0780	0.7535	0.0548

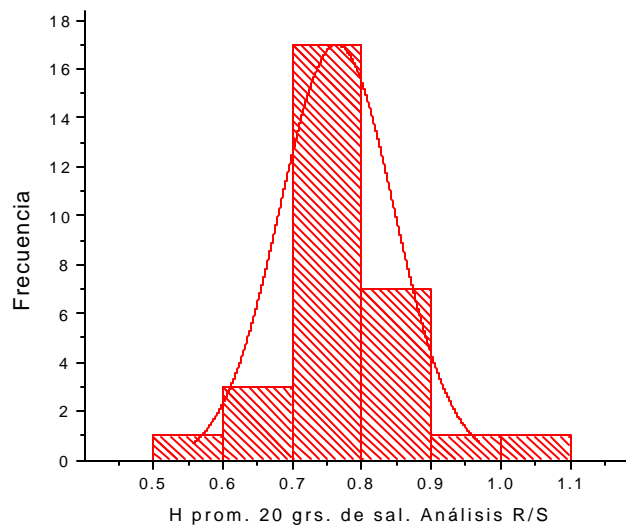
Se presentan los variogramas de los dos métodos auto afines que se utilizan en este trabajo. Ver figuras 24-33.



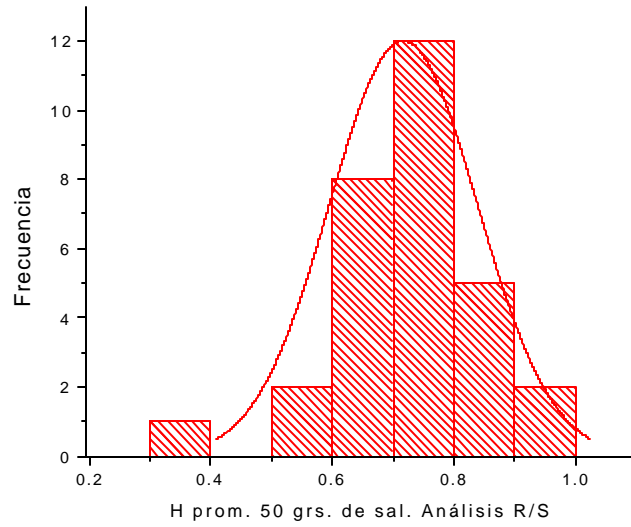
**Fig. 24.-** Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S. 5 grs. de sal.



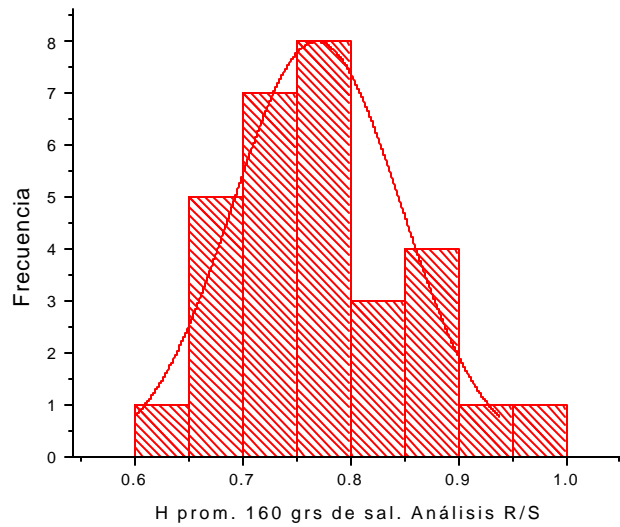
**Fig. 25.-** Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 10 grs. de sal.



**Fig. 26.-** Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 20 grs. de sal.

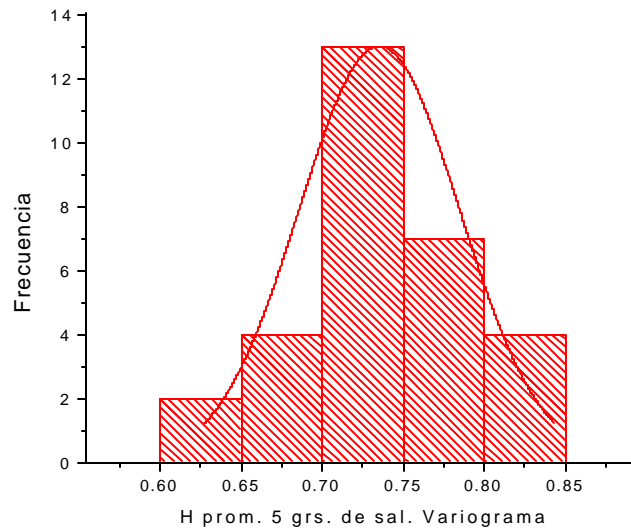


**Fig. 27.-** Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 50 grs. de sal.

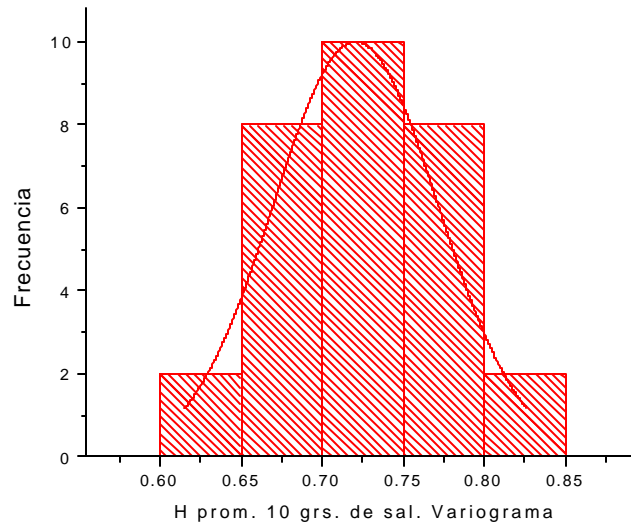


**Fig. 28.-** Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de análisis R/S 160 grs. de sal.





**Fig. 29.-** Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 5 grs. de sal.



**Fig. 30.-** Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 10 grs. de sal.

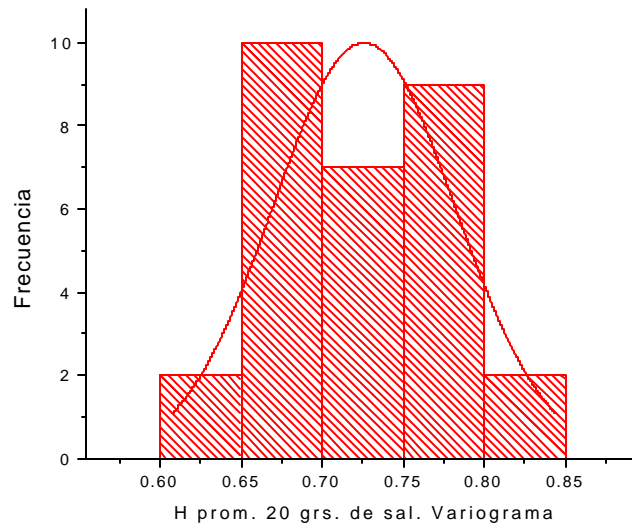


Fig. 31.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 20 grs. de sal.

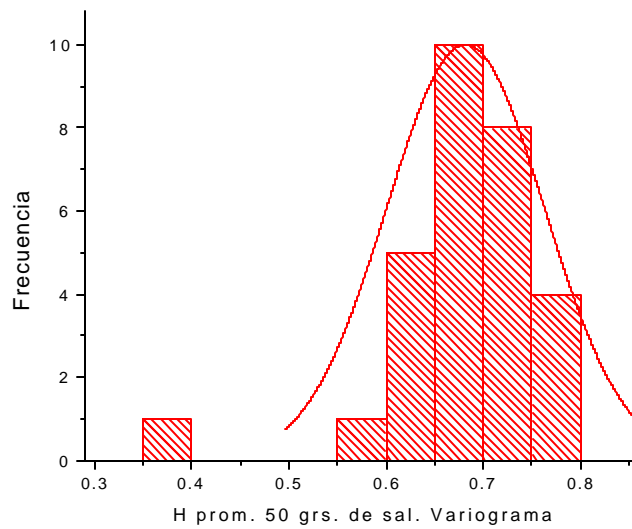


Fig. 32.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 50 grs. de sal.

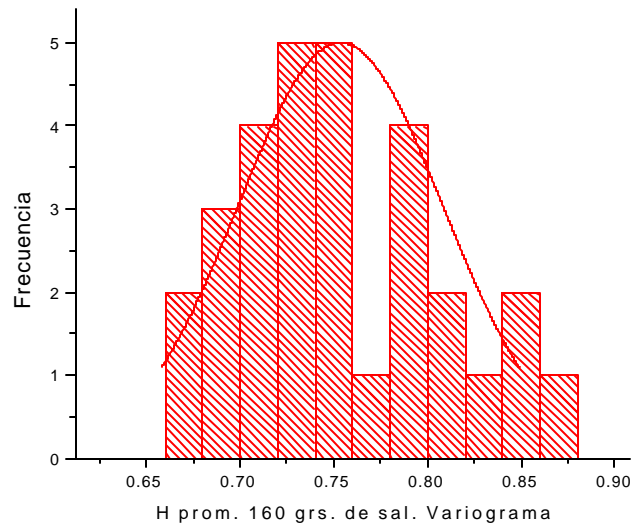


Fig. 33.- Histograma de los valores del coeficiente de Hurst por el método de variograma 50 grs. de sal.

Las familias de valores para cada concentración de sal se grafican y ajustan por medio de una línea de tendencia lineal para tratar de observar su comportamiento, se hacen diferentes gráficas con todos los parámetros y métodos que se utilizan. Ver fig. 34-42.

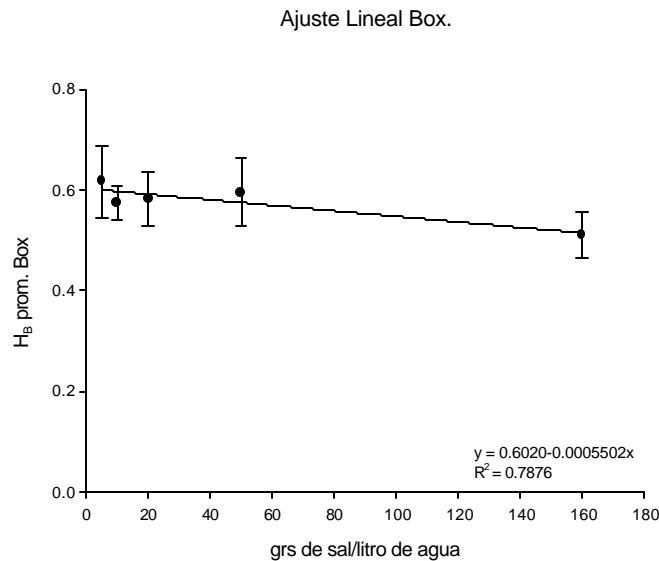
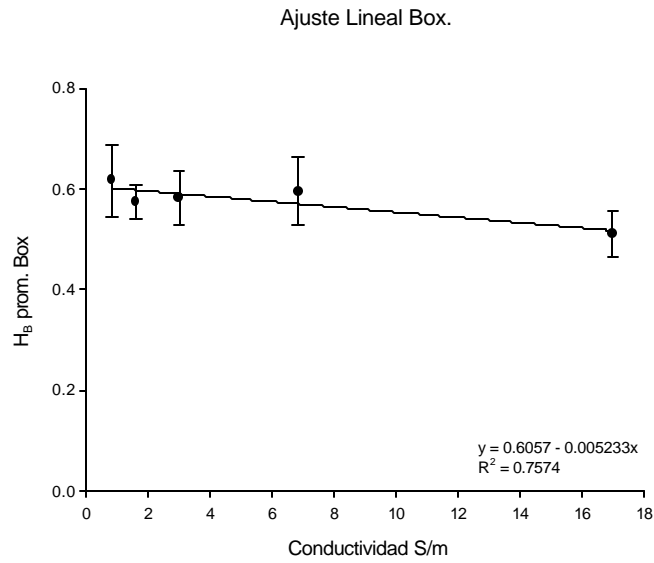
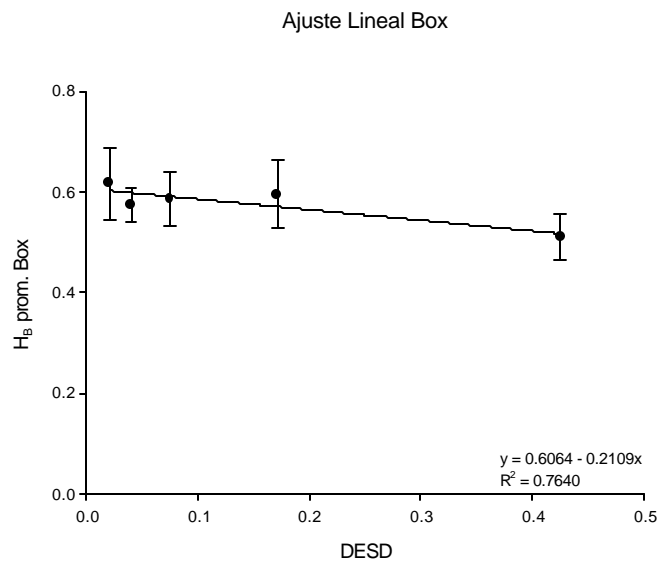


Fig. 34.- Ajuste lineal. Método de conteo de cuadros, H<sub>B</sub> contra la concentración de sal.



**Fig. 35.-** Ajuste lineal. Método de conteo de cuadros, H<sub>B</sub> contra la conductividad.



**Fig. 36.-** Ajuste lineal. Método de conteo de cuadros, H<sub>B</sub> contra la DESD.

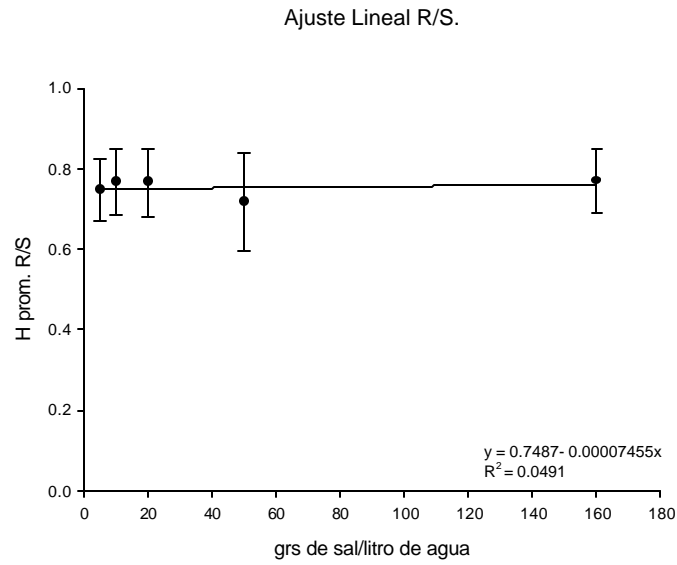


Fig. 37.- Ajuste lineal. Método de análisis R/S,  $H_B$  contra la concentración de sal.

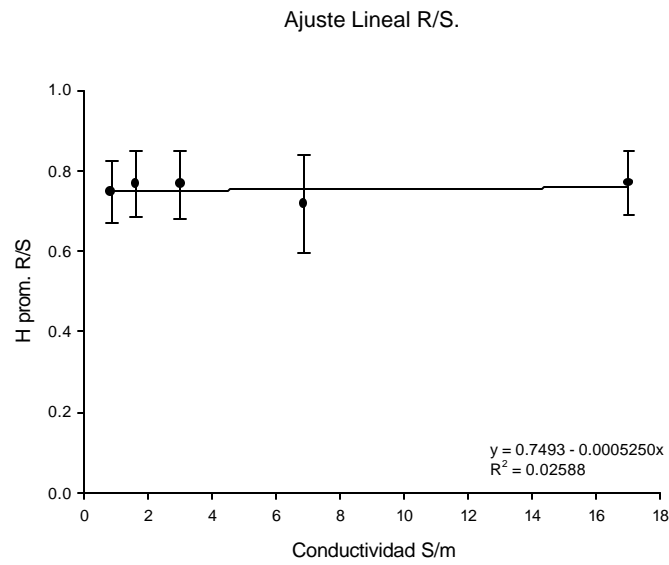
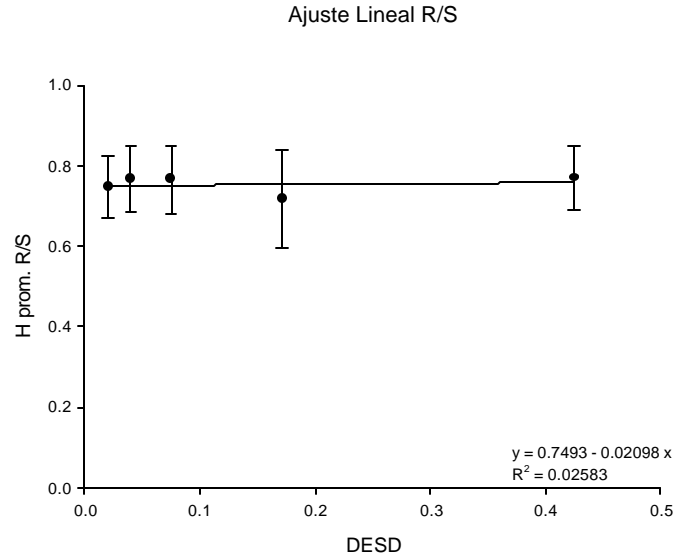
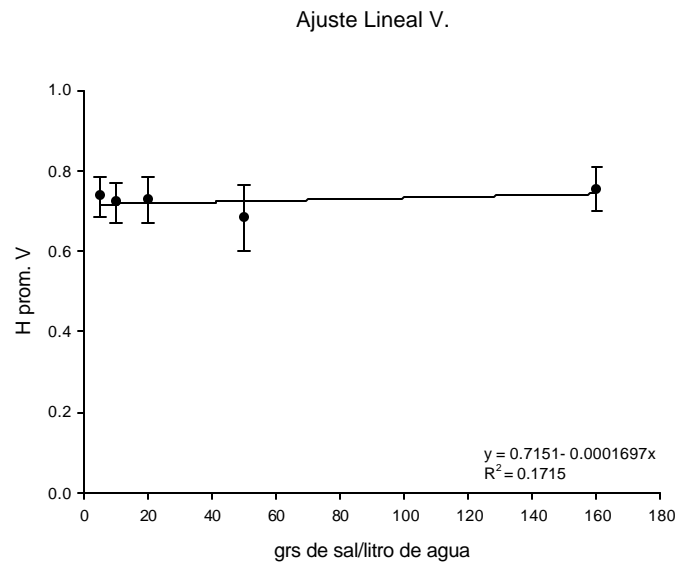


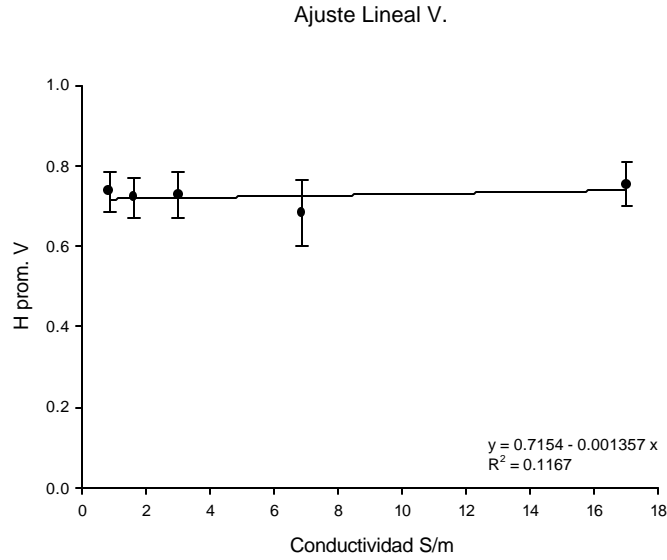
Fig. 38.- Ajuste lineal. Método de análisis R/S,  $H_B$  contra la conductividad.



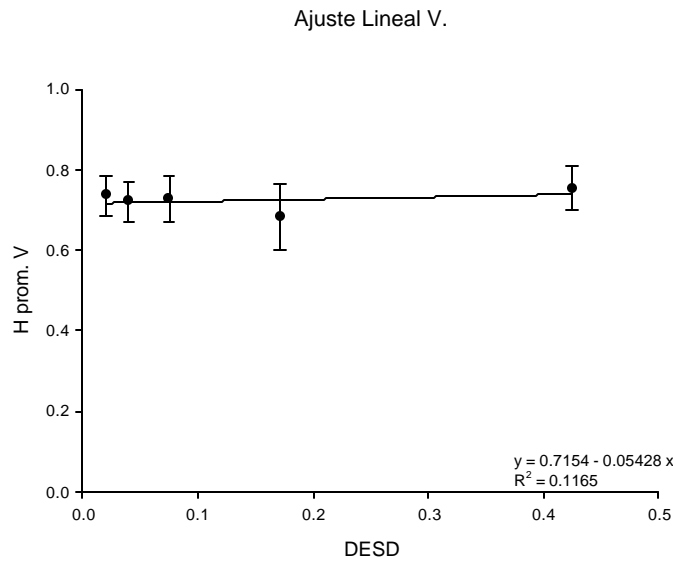
**Fig. 39.-** Ajuste lineal. Método de análisis R/S,  $H_B$  contra la DESD.



**Fig. 40.-** Ajuste lineal. Método de variograma,  $H_B$  contra la concentración de sal.



**Fig. 41.-** Ajuste lineal. Método de variograma,  $H_B$  contra la conductividad.



**Fig. 42.-** Ajuste lineal. Método de variograma,  $H_B$  contra la DESD.

En estas gráficas que ajustan los valores de los diferentes niveles de concentración de sal, conductividad y DESD, se puede observar que el coeficiente de Hurst no varía, es más, la línea del ajuste casi es una línea recta en todos los casos. Por lo que la dimensión fractal y el coeficiente de Hurst no depende de ningún parámetro.

#### 4.4 Conclusiones.

Se logró obtener la trayectoria de una descarga eléctrica superficial, en un polímero de hule silicón en 10 segundos, aplicando un voltaje de 15 kV. En la literatura no se había reportado algo similar, ya que los trabajos se basan más en el crecimiento de los árboles eléctricos en el interior de diferentes aislantes empleados.

Los valores promedio del coeficiente de Hurst  $H$ , calculados por el método de conteo de cuadros y comparados con los valores de  $H$  calculados por los métodos auto afines, son menores en todos los niveles de contaminación. Estos valores son importantes para determinar la naturaleza auto similar o auto afin de la trayectoria eléctrica superficial, de acuerdo a la relación  $H_B^{-1} H$ .

Si los valores promedio de los coeficientes de Hurst son iguales, las figuras serán auto afines. Pero la relación anterior no se cumple ya que  $H_B^{-1} H$ ; por lo tanto, las trayectorias de las descargas eléctricas superficiales son auto similares.

Se observa que la dimensión fractal y por lo tanto el coeficiente de Hurst  $H$ , no depende de la concentración de sal (Contaminación, Conductividad y DESD), ya que es una constante universal [28,29].

Cabe señalar que la tesis de Yáñez [27], reporta para descargas en aire valores de  $H$  que presentan un comportamiento auto afin, pero no demuestra con propiedad dicha afirmación.



#### **4.5 Recomendaciones para trabajos futuros.**

Se recomienda mejorar la adquisición de las imágenes de las trayectorias eléctricas superficiales, con la ayuda de cámaras más sofisticadas y filtros que permitan que la trayectoria resalte.

Hacer pruebas con más niveles de concentración de sal (contaminación), para que el estudio esté más completo.

Hacer pruebas a más materiales poliméricos que se utilicen en la industria eléctrica, más que nada en aisladores de alta tensión, por ejemplo EPDM ó PMMA. En diferentes colores, grados de vulcanización y polimerización.

Extender este estudio a las trayectorias en aire y aislantes líquidos, tanto en dos como tres dimensiones.

## Referencias

- [1] E. Nasser y L. Loeb, “Impulse Streamer Braching from Lichtenberg Figure Studies”, Journal of Applied Physics, Vol. 34, N. 11, November 1963.
- [2] A. Kawashima y S. Hoh, “Lichtenberg on Various Electrical Insulating Materials”, IEEE Trans. Electr.Insulation,Vol EI-13, N 1, February 1978.
- [3] D. B. Watson y P. C. Morrin, “Numerical Description of Treeing in PMMA”, IEE Proc. A. 1980
- [4] L. Niemeyer, L. Pietronero y H. J. Wiesmann “Fractal Dimension of Dielectric Breakdown”, Physical Review Letters, Vol 52, N. 12, March 1984
- [5] L. Niemeyer, L. Pietronero y H. J. Wiesmann “Discussion”, Physical Review Letters, Vol 57, N. 5, August 1986
- [6] M. N. Arbad y D. W. Aukland, “ Growth of Electrical Trees in Solid Insulation”, IEE Proc. A. 1989
- [7] R. J. Xavier y Y. Narayana Rao, “Surface on Porcelain Insulating Material and Determination of DC Pollution Performance of Insulators”,Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 1990.
- [8] D. B. Watson y M. I. Barber, “Image-Procesing Technique for Investigation Dielectric Break Trees”, IEE Proc. A. March 1992
- [9] A. S. G. Alghamdi, D. W. Aukland, “The Influence of Mechanichal Properties on the Surface Tracking of Poliester Resin”, IEEE 1992

[10] R. Matsuoka, K. Kondo, K. Naito y M. Ishii, “Influence of Nonsoluble Contaminants on the Flashover Voltages of Artificially Contaminated Insulators” IEEE Trans. On Power Delivery ,Vol 11, N 1, January 1996

[11] Chen Yuan, Guan Zhicheng y Liang Xiodong, “Analysis of Flashover on the Contaminated Silicone Rubber Composite Insulator”, Procc of the 5<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Seoul, Korea, May. 25-30, 1997

[12] M. Naoe, Y. Ebara, H. Kishida y T. Ito, “Fractal Analysis of the Tree Pattern and the Discharge luminescence Pattern”, IEEE Annual Report “Conference on Electric Insulation and Dielectric Phenomena”, October 1997

[13] K. Kudo “Fractal Analysis of Electrical Trees”, IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, N. 5, October 1998

[14] M. Ugur y B. R. Varlow, “Analysis and Modeling The 2D Surface Tracking Patterns of Polimeric Insulation Materials”, IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 5, N 6, December 1998

[15] C. H. Lee y S. W. Kim, “Effects of Compounding Ingredients on Surface Tracking of EPDM”, Proc of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation Materials, Toyohashi, Japan, Sep. 27-30, 1998

[16] M. Ugur, A. Kuntman y A. Merev, “Investigation the Effect of Environmental Factors on the Performance of Polymeric Outdoor Insulation”, “Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena” 1999

**[17]** Mandelbrot, B. B. “The Fractal Geometry of Nature”. W.H. Freeman and Compay. New York 1983.

**[18]** Heinz-Otto Peintgen, Hartmut Jürgens, Dietmar Saupe. “Fractals for the classroom, Part One: Introduction to Fractals and Chaos”. Springer-Verlag. New York 1992.

**[19]** Armin Bunde, Shlomo Havlin. “Fractal in Science”. Springer-Verlag. New York 1994.

**[20]** Mandelbrot, B. B., IBM and Harvard. “Self-affine fractal sets I: The basics fractal dimensions”. Fractals in Physics, 1986, pp 3-15.

**[21]** Santander Velásquez, Francisco. “Síntesis de Fallas de Líneas de Transmisión 1998”. Revista anual publicada por la gerencia de subestaciones y líneas de la coordinadora de transmisión de la CFE, con la participación de las nueve áreas de transmisión y transformación. México, D.F., Febrero de 1999.

**[22]** ASTM D-2303-85, “Standard test Methods for Liquid-Contaminant, Inclined-Plane Tracking and Erosion of Insulating Materials”; November (1985).

**[23]** IEC 507, “Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be Used on C.A. Systems”; (1991)

**[24]** Gorur, R.S. *et al* “Outdoor Insulator”, Ravi S. Gorur, Inc., Phoenix, Arizona 85044, 1999

[25] Lee, C.H. *et al* “Effects of Compounding Ingredients on Surface Tracking on EPDM”, Proc. of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, September 1998.

[26] [www.trusoft-international.com](http://www.trusoft-international.com)

[27] Yáñez Mendoza David, “Dimensión Fractal de Trayectorias de Descargas Eléctricas en Aire”. Tesis de maestría. IPN-ESIME-SEPI. 1999.

[28] Meakin, Paul. “Fractals, scaling and growth far from equilibrium”. Cambridge Nonlinear Science Series 5. Cambridge University Press. 1998.

[29] Bunde, Armin, Havlin, Shlomo. “Fractals and Disordered Systems”. Springer. 1999

[30] Gorur, R.S. *et al* “Sudden Flashover of Nonceramic Insulators in Artificial Contamination Tests”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 4, N. 1, February 1997

[31] Jeffrey Mackevich, Stephanie Simmons, R. J. Chang y Minesh Shah, “Polymer Outdoor Insulation Materials Part I, II, III”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 13, N. 3, 4 y 5

[32] Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley and Sons, Third Edition, Vol. XIII.

# Apéndice A

## Materiales Aislantes

### A.1 Introducción

Los materiales aislantes más utilizados en la industria eléctrica son los polímeros, en este trabajo se utilizó hule silicón, este polímero es uno de los materiales aislantes más usados debido a las propiedades que posee. El hule silicón es empleado en la fabricación de aisladores de alta tensión. Las propiedades de los aisladores de hule silicón cobran importancia en ambientes contaminados en donde los aisladores flamean y paulatinamente se van degradando por efecto de la contaminación y el flameo, por estos problemas las líneas salen de servicio.

Los problemas de la contaminación en aisladores eléctricos ocurren cuando el medio que los rodea lleva diversas sustancias, polvo, fertilizantes, contaminación industrial y salina. Estas sustancias se depositan sobre los aisladores creando una capa que en condiciones secas no causan mayores problemas, pero ante la presencia de humedad, rocío, neblina o lluvia ligera, reducen sus características dieléctricas, lo cual puede

llegar a causar fallas en el aislamiento. El problema de la contaminación es muy severo en algunos casos pero los aislamientos poliméricos tienen un excelente comportamiento en ambientes de polución y sus características son las siguientes: peso ligero, buen comportamiento en ambientes de contaminación [11,24,30,31], facilidad de manejo en la instalación, resistencia al vandalismo y la más importante, la hidrofobicidad [10,11,16,24,25,30,31].

## **A.2 Silicón**

Cuando se compara la tecnología de los silicones con la química de los compuestos del silicio, la diferencia en terminología es una de las primeras diferencias que se observan. Por lo común, en la práctica industrial no se toman en cuenta los términos silano, siloxano, silcarbano, etc., y el término silicón ha llegado a ser un término genérico que incluye a todos los compuestos que contiene en su molécula silicio y grupos orgánicos, siempre que el silicio se halle en cantidad suficiente para poder afectar las propiedades en grado medible.

La mayoría de los silicones del comercio son polímeros de peso molecular elevado en los que la unidad siloxánica,  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ , forma la estructura continua. A cada átomo de silicio están unidos casi siempre uno o dos grupos orgánicos.

Las propiedades de los polímeros se deben:

- 1) A su magnitud molecular.
- 2) Al número y tipo de los grupos orgánicos ligados al silicio.
- 3) A la configuración de la molécula.

El término configuración se refiere al modo como la macromolécula (o polímero) está constituida, ya se trate de una cadena sencilla, ya de una estructura más complicada con enlaces cruzados entre las cadenas. Los polímeros en forma de cadena lineal son de ordinario sustancias líquidas, mientras que los compuestos que tienen enlaces cruzados casi siempre tienen caracteres de resinas.

Los silicones polímeros tienen propiedades extraordinarias y útiles. Algunas de éstas son:

- 1) Estabilidad notable a temperatura elevadas (son estables por tiempo indefinido entre 150-200°C.; algunos tienen larga vida a 250°C.
- 2) Adhesividad, o capacidad para actuar como agente liberador o separador de moldes en el moldeo o vaciado de plásticos o de metales.
- 3) Acción depresora de la espuma en diversos medios.
- 4) Capacidad para rechazar el agua (hidrofobicidad), que puede aplicarse a productos inorgánicos y orgánicos, desde muros hasta textil.
- 5) Caracteres especiales a bajas temperaturas, que permiten se les aplique provechosamente para trabajar a temperaturas hasta de  $-73^{\circ}\text{C}$ .
- 6) Inactividad fisiológica, que, en combinación con sus propiedades físicas extraordinarias, ha activado la investigación del uso de estos compuestos en Medicina y Farmacia.

Estas variadas propiedades y las muchas formas en que se presentan los silicones (líquidos, grasas, resinas, cauchos) explican su uso tan difundido en gran diversidad de aplicaciones, procedimientos e industrias, e indican una gama muy amplia de usos potenciales.



El desarrollo tan rápido de los silicones en volumen de fabricación y en aplicaciones aumenta el interés por hallarles nuevos usos. La mayor parte de los trabajos de desarrollo se han hecho en productos siloxánicos.

No obstante la abundante propaganda comercial, los informes técnicos y los artículos de divulgación, no parece existir una comprensión amplia acerca de los silicones y sus potencialidades. La diseminación de dichos conocimientos lleva tiempo, y a medida que se difundan estos conocimientos se ampliarán también los usos que se den a estos materiales.

### **Preparación de los silicones polímeros.**

La preparación de los silicones poliméricos comprenden dos fases: Preparación de productos intermedios y polimerización de estos productos [32].

### **Silicones líquidos.**

Los silicones líquidos han recibido esta designación en lugar de ser llamados aceites, con el fin de evitar la implicación de que sean primeramente lubricantes.

Sus propiedades: Son buenos lubricantes en condiciones extremas de temperatura, es un buen agente dieléctrico hasta 200°C., antiespumantes, estables al calor, repelencia al agua, etc. [32].

En la actualidad se pueden adquirir dos tipos de silicones líquidos: el dimetílico y el metilfenílico [32].

### **Compuestos de silicones (Grasas).**

Los compuestos, que tienen el aspecto y el tacto de las grasas, reciben este nombre para diferenciarlos de las grasas lubricantes. Éstas se formulan para aprovechar su acción lubricante y se usan casi enteramente por esta propiedad.

Los compuestos de silicones se preparan añadiendo a los líquidos dimetílicos un porcentaje bajo de sílice finamente molida [32].

Uno de los silicones más conocidos en los laboratorios es la grasa de silicones para llaves de vidrio esmerilado. Como su viscosidad no es afectada por la temperatura, la grasa continúa obrando como lubricante y material oclisor para uniones de vidrio aún en condiciones adversas.

La primera aplicación importante en la industria eléctrica de los compuestos de silicones fue como relleno para los conductores de alto voltaje en los aviones. Forman un cierre contra la humedad y se elimina la descarga de corona en los vuelos a grandes alturas. También se utilizan para impregnar y empaquetar bombas que han de trabajar a temperaturas altas o en atmósfera corrosiva. Además es antiespumante, se usan para liberar moldes, etc. [32].

## **Resinas de silicón.**

Las resinas se forman por hidrólisis y condensación (polimerización) de mezclas de alquilclorosilanos bifuncionales y trifuncionales [32]

En el medio comercial existen muchas resinas de silicones. Las propiedades difieren algo, según el uso a que están destinadas las resinas. Las siguientes propiedades son dignas de atención especial: estabilidad al calor, repelencia del agua (hidrofobicidad), buenas propiedades dieléctricas, resistencia a muchas sustancias químicas, resistencia a la intemperie. La adhesión es buena, mediana o mala, según la base que se aplica. Aunque algunas de las resinas se secan al aire, todas requieren cierto horneado o tratamiento térmico si es que han de desarrollar sus propiedades óptimas.

Casi todas las resinas de los silicones tienen que ser horneadas a una temperatura relativamente alta después de haber sido aplicadas y después de que el disolvente se haya evaporado de la pieza tratada. La intensidad del tratamiento en el horno varía con las diversas resinas, y este tratamiento puede reducirse notablemente (aunque con ello se abrevie la duración de la vida útil de la resina) incorporando catalizadores para curarlas, tales como naftento de cobre u óxido de plomo [32].

Aunque la resistencia al petróleo y a los aceites vegetales es buena, estas resinas son poco resistentes a los disolventes en la mayoría de los casos. Por lo común, no tienen mucha resistencia a la abrasión. La dureza y la resistencia al desgaste pueden mejorarse por la incorporación de ciertas resinas orgánicas, pero sacrificando con ello algo de su resistencia térmica.

Se distinguen siete variedades de resinas, pero hay algunas que pueden aplicarse de varias maneras, como son: resinas para revestimientos, para laminar, para separar moldes, resinas hidrófugas para obras de albañilería y hormigón, moldeo, en forma de espuma, etc. Las características de las resinas eléctricas son las siguientes.

**Mayor resistencia térmica.**- En la actualidad se reconocen tres clases de materiales aislantes de la electricidad, tomando como base sus temperaturas máximas de operación: clase A, 105° C; clase B, 130° C; clase H;180° C. Las resinas de silicón tienen mayor resistencia térmica, resisten temperaturas diez veces mayor que la catalogada en la clase H y en algunos casos mayores.

**Repelencia al agua (hidrofobicidad).**- El carácter hidrofóbico de los aislamientos hechos de silicones les permite funcionar en sitios húmedos o mojados.

**Incombustibilidad.**- Este tipo de aislamiento no se inflama y es utilizado en motores o aparatos eléctricos que son de uso industrial y continuo.

### **Cauchos para silicones.**

El caucho de silicones puede obtenerse en una variedad casi infinita de formas, desde hojas muy delgadas hasta formas macizas capaces de ser moldeadas. Hay cauchos en forma de pasta, ya sea suave y blanda, ya sea espesa y tenaz como la masilla, que necesita ser aplicada mediante espátula fuerte.

Tanto las pastas como los cauchos sólidos pueden dispersarse en disolventes orgánicos para formar líquidos que fluyen libremente y que pueden aplicarse por medio de brocha, atomización o inmersión. No obstante la temperatura tan alta que se requiere para curarlo, es posible recubrir tejidos de algodón u otros de carácter orgánico. Para tal fin se preparan cauchos especiales que se curan rápidamente y que se fijan sin que el tejido llegue a dañarse por el calor.

### **A.3 Importancia de los polímeros en la industria eléctrica**

Los aislamientos poliméricos son de gran importancia en la industria eléctrica por tener características muy peculiares que los hacen muy superiores. La experiencia operacional indica que los aisladores no cerámicos particularmente el hule silicón, se comporta mejor que los aisladores cerámicos en áreas de polución [11,16,24,30,31]. Sin embargo, la contaminación genera descargas superficiales que pueden destruirlo. Este fenómeno se ha observado con más frecuencia en aisladores de EPDM, los cuales pierden su propiedad hidrofóbica después de unos años de operación.

### **A.4 Propiedades de los polímeros**

Las principales características de los polímeros [11,24,30,31].son: Peso ligero, excelente comportamiento en condiciones de contaminación, Alta resistencia al vandalismo, Alta resistencia mecánica con relación al peso, Propiedades dieléctricas y por último la hidrofobicidad.

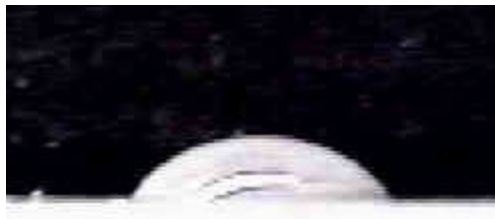
La constante dieléctrica varía con la viscosidad y la temperatura; fluctúa entre 2.2 y 2.8. El factor de potencia varía desde 0.0001 a  $10^3$  ciclos hasta 0.0006 a  $10^8$  ciclos. Los cambios de temperatura entre  $-17^{\circ}$  C y  $83^{\circ}$  C tienen poco o ningún efecto. La resistencia dieléctrica medida a un espesor de 10 milésimas de pulgada (0.254 mm)es de la magnitud de 984-1181 volts/0.1 mm. La resistividad de volumen es mas o menos es, más o menos, de  $10^{14}$   $\Omega$ -cm y permanece relativamente constante a temperaturas hasta  $200^{\circ}$  C.

La hidrofobicidad superficial es una de las propiedades más importantes de los polímeros. En una superficie hidrofóbica se forman gotas de agua inhibiendo la formación de una capa continua de agua. Las descargas superficiales y las descargas parciales pueden destruir la hidrofobicidad superficial. A continuación se muestra

cómo un material polimérico va perdiendo su hidrofobicidad y una gota de agua se extiende a través de la superficie del material. Si se sigue perdiendo la hidrofobicidad, la gota forma una película uniforme. Ver figuras 43-45.



**Fig. 43.-** Superficie con buena hidrofobicidad.



**Fig. 44.-** Superficie con una hidrofobicidad media.



**Fig. 45.-** Superficie con una hidrofobicidad mala.

Las propiedades eléctricas y el comportamiento de los aisladores poliméricos dependen principalmente de sus propiedades superficiales (Hidrofobicidad) y de los cambios de estas propiedades debidas a la exposición a la intemperie (envejecimiento). Así mismo, dicho comportamiento depende también de un diseño adecuado al reducir el número de interfaces donde se pueden presentar arcos y donde puede ocurrir una degradación acelerada.

## A.5 Envejecimiento del material

Al exponerse los materiales poliméricos a los elementos naturales se ha demostrado que los envejece, existe una gran experiencia que sugiere que la vida del aislador está más relacionada con diseños de pobre desempeño y un mal control de calidad durante el proceso de fabricación. El envejecimiento se refiere al proceso que causa la falla del aislador para no poder cumplir con su función.

Hay muchos factores involucrados en el envejecimiento de los aisladores poliméricos. La humedad y la contaminación juegan los papeles más importantes, estos factores provocan un incremento en la corriente de fuga sobre la superficie aislante. La corriente de fuga en los aisladores poliméricos indica pérdida de la hidrofobicidad en el material. Si la corriente de fuga es suficientemente alta puede ocasionar descargas en forma localizada que sería la causante de *erosion* o carbonización (*tracking*) [11,14-16,22,25].

Los aisladores poliméricos están sujetos a diferentes condiciones ambientales y de contaminación, por lo que el material debe ser capaz de soportar los efectos degradantes de las descargas superficiales (*erosion* y *tracking*) y diversos mecanismos de falla que pueden presentarse en campo.

## A.6 Tracking y Resistencia a la Erosion

Los materiales poliméricos son materiales orgánicos que consisten de moléculas que no son depositadas apretadamente para cada una de sus moléculas, como los materiales inorgánicos como son la porcelana y el vidrio. Por lo tanto, estos pueden ser degradados por menos temperatura en comparación con los inorgánicos. Bajo condiciones de degradación, se forma una capa de carbón que hace a la superficie conductora (*tracking*) y tiene como consecuencia una falla eléctrica o flameo como el aislador no puede soportar el aguante del voltaje aplicado.

La remoción de las pistas de carbón conductor deja una trayectoria erosionada. Si la *erosion* del material es significativa, entonces esto puede potencialmente ocasionar una falla en el aislador por la pérdida de material, si esta falla se presenta en un aislador de suspensión en una línea de transmisión, la pérdida del material puede ocasionar una falla en el aislador por la exposición del núcleo de fibra de vidrio al medio ambiente. La *erosion* es un proceso muy lento de degradación, en cambio el *tracking* no lo es [11,14-16,22,25].

El *tracking* y la resistencia a la *erosion* dependen de la química del polímero. En algunos polímeros como el poliéster, polietileno, etc. el carbón se forma por degradación. Otros polímeros tales como el hule silicón, el carbón se produce como subproducto gaseoso debido a la degradación.

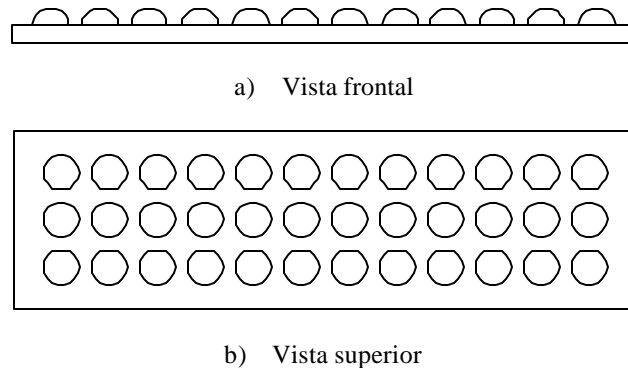
El *tracking* y la resistencia a la *erosion* del polímero base se puede obtener de la estructura química, ciertos enlaces químicos liberan carbono cuando se rompen dichos enlaces, mientras que otros remueven el carbono como producto gaseoso.



## A.7 Proceso de flameo de un aislamiento de hule silicón

El proceso de flameo de un aislamiento polimérico de hule silicón [11] se puede dividir en siete partes:

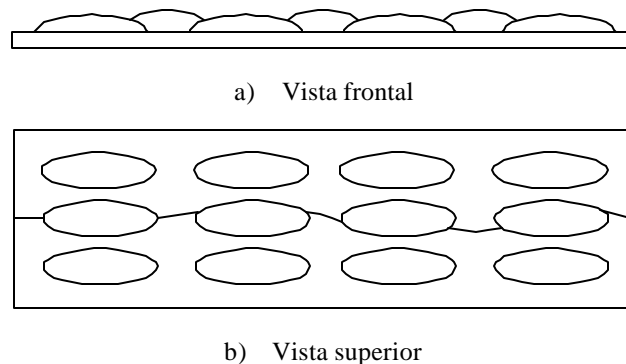
- 1) Acumulación de contaminación: Una capa uniforme de contaminante se forma en la superficie del aislante de hule silicón.
- 2) Difusión de las cadenas de bajo peso molecular del polímero: Las cadenas poliméricas de bajo peso molecular en el hule silicón difunden su masa en la capa contaminante y lo hace hidrofóbico.
- 3) Humectación de la superficie: Como se muestra en la figura 46, se forman unas discretas gotas en la capa hidrofóbica contaminante bajo condiciones altas de humedad. El contaminante y las gotas se esparcen sobre la capa del aislante, pero también dejan áreas secas que tienen una resistencia alta.



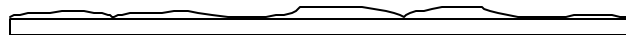
**Fig. 46.-** Formación de gotas en la superficie aislante humectada.

- 4) Efecto del campo eléctrico en las gotas: Al humectarse el área del aislante por un tiempo prolongado se refuerza el campo eléctrico entre las gotas, el cual hace que se colapsen las gotas vecinas dentro de una cadena a lo largo de la trayectoria del flameo.

- 5) Descargas parciales: La formación de cadenas incrementa más el campo eléctrico entre las cadenas adyacentes y causan descargas parciales entre ellas.
- 6) Pérdida de hidrofobicidad: Las descargas parciales en parte destruyen la superficie hidrofóbica, entonces la difusión entre la capa contaminante y las cadenas se refuerzan. Por lo tanto la conductividad eléctrica de las cadenas se incrementa y las cadenas pequeñas impulsan el colapso dentro de las cadenas largas y las regiones húmedas.
- 7) Flameo: Como se muestra en la figura 47, las cadenas y las regiones secas proveen la trayectoria de la formación y el desarrollo de los arcos. Las descargas viaja rápidamente a través de la superficie de la capa del electrolito y causan flameo, Ver fig. 48.



**Fig. 47.-** Descargas parciales entre las gotas.



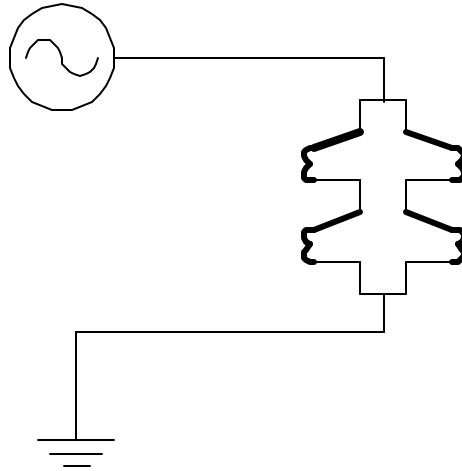
**Fig. 48.-** Flameo en el aislante.

Este flameo nos provoca que sobre la superficie del aislamiento se origine el fenómeno conocido como *tracking* y en ocasiones *erosion*. Una vez que ya se conoce la ruptura en un aislamiento de hule silicón, se presenta el proceso de flameo en un aislador convencional.

### A.7.1 Proceso de flameo de un aislador convencional

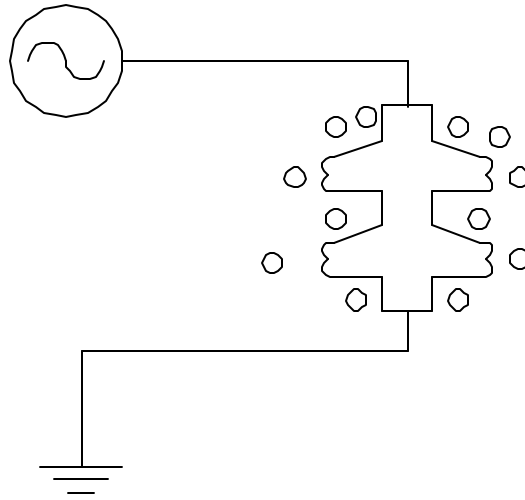
El flameo de un aislador debido a la contaminación es un fenómeno dinámico que se presenta en varias etapas, las etapas principales del fenómeno se indican a continuación en forma resumida [24] y en forma esquemática en las siguientes figuras 49-55.

- a) Sobre la superficie del aislamiento expuesto al medio ambiente se deposita una capa de partículas contaminantes. La formación de esta capa depende principalmente del tamaño de las partículas y su composición, las fuerzas que se ejercen sobre las partículas, el acabado superficial y el perfil del aislamiento, por lo que la capa no es homogénea. Ver fig. 49.



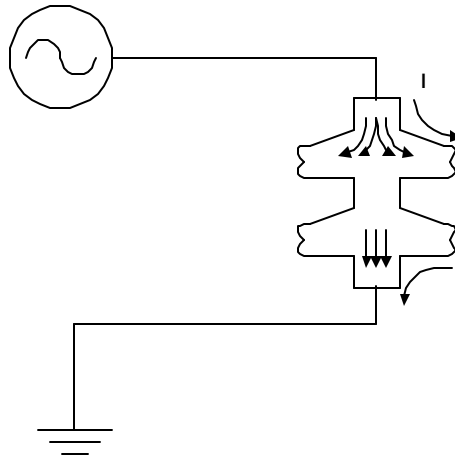
**Fig. 49.-** Superficie del aislador contaminada.

- b) Se presenta un proceso de humectación de la capa conveniente debido a la niebla, rocío o lluvia ligera. Ver fig. 50.



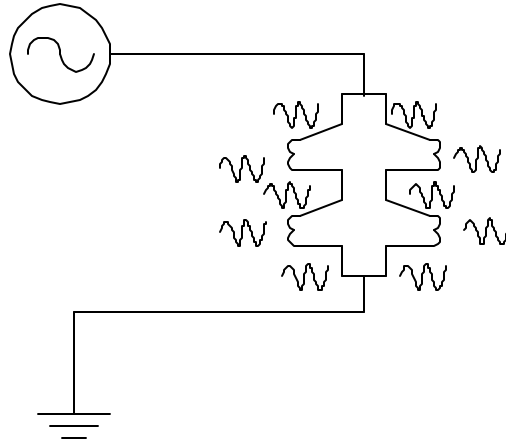
**Fig. 50.-** Humectación de un aislador polimérico.

- c) Cuando la contaminación está húmeda, empieza a circular una corriente sobre la capa, cuya magnitud depende de la conductividad del contaminante húmedo. Ver fig. 51.



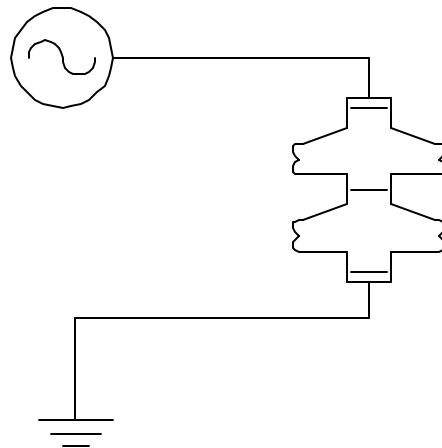
**Fig. 51.-** Corriente de fuga que se presenta en un aislador previamente humectado.

- d) La circulación de corriente genera una disipación de calor por efecto Joule, lo cual se manifiesta por la evaporación de agua en la superficie del aislador, se incrementa en las zonas de mayor densidad de corriente. Ver fig. 52.



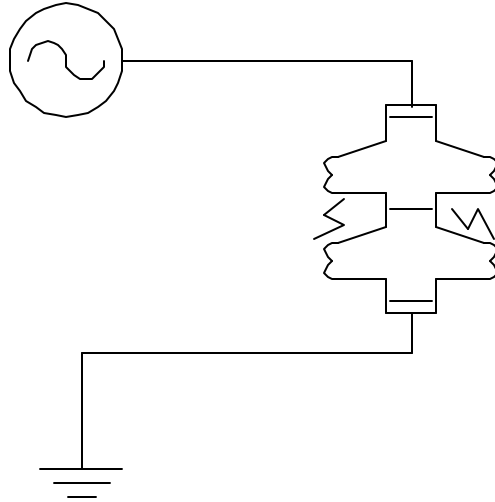
**Fig. 52.-** Evaporación del agua en la superficie del aislador.

- e) Se forman zonas o bandas secas de alta resistencia eléctrica en donde hubo mayor evaporación de humedad. El voltaje aplicado en las terminales del aislamiento se desplaza y concentra en los extremos de las bandas secas causando elevados gradientes de voltaje. Ver fig. 53.



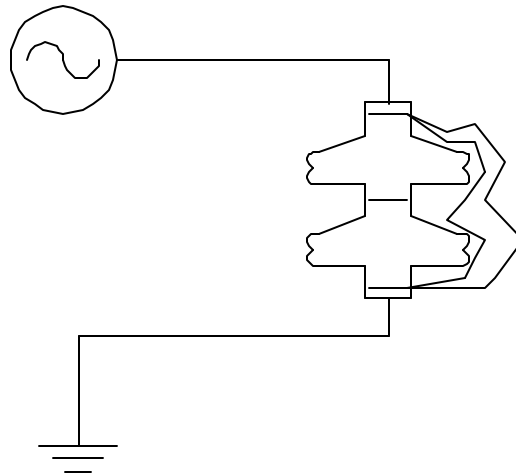
**Fig. 53.-** Voltaje desplazado y formación de bandas secas.

- f) Se generan descargas eléctricas en las bandas secas debido al esfuerzo eléctrico concentrado en las mismas. Estas descargas implican picos de corriente que pueden mantenerse o provocar la formación de otras bandas secas, en las cuales también se presentan descargas. Ver fig. 54.



**Fig. 54.-** Descargas parciales que se presentan en las bandas secas.

- g) Cuando las descargas se concatenan se presenta la falla de fase a tierra (flameo) causando la salida de la línea. Ver fig. 55.



**Fig. 55.-** Las descargas parciales se concatenan, por lo tanto se presenta un flameo.

# Apéndice B

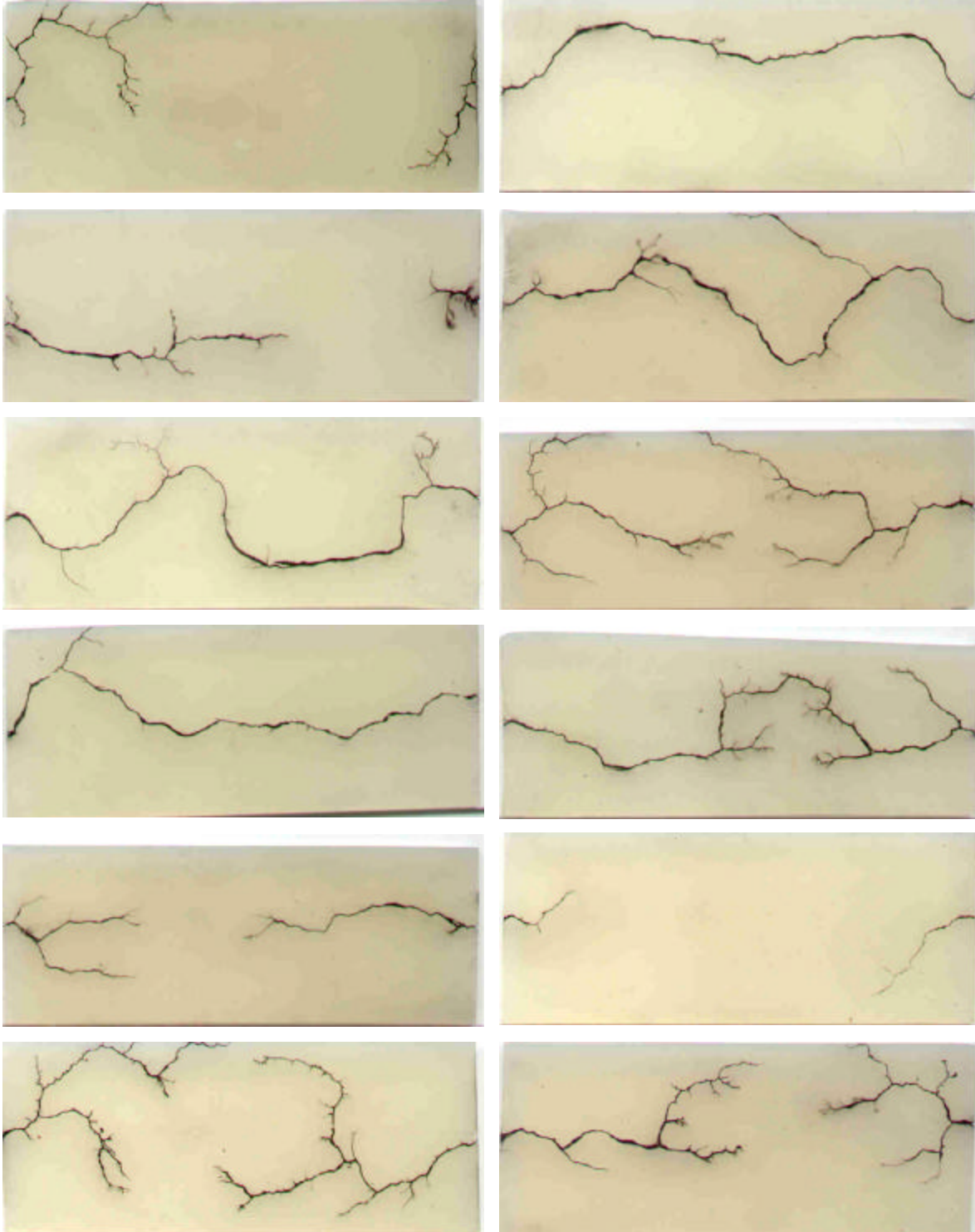
## Imágenes obtenidas en las pruebas de descargas eléctricas superficiales en el aislamiento de Hule Silicón.

Se muestra la totalidad de las figuras que se obtuvieron en el laboratorio, para los diferentes niveles de conductividad y de contaminación que se presentan, todas las imágenes que se exhiben son originales y no se repiten.

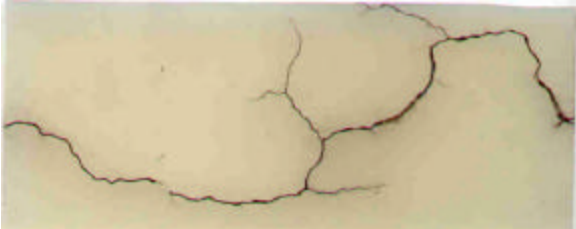
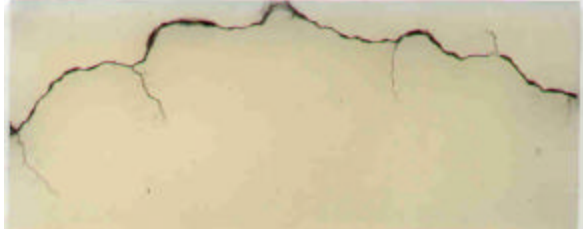
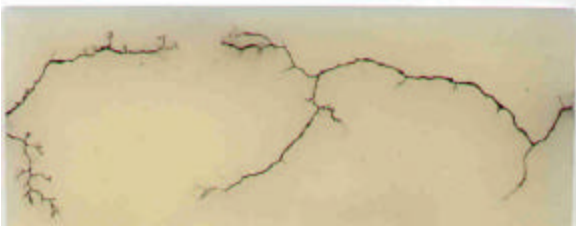
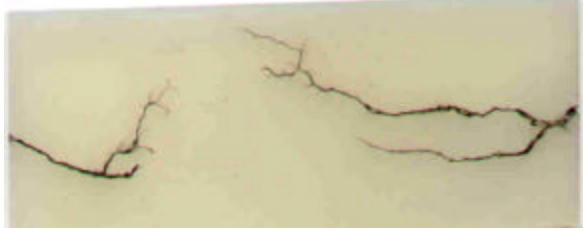
En el Capítulo 3 se muestran solo unas imágenes características, pero en este apéndice se presenta en su totalidad dichas imágenes.

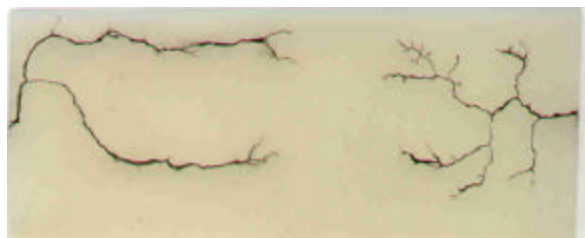
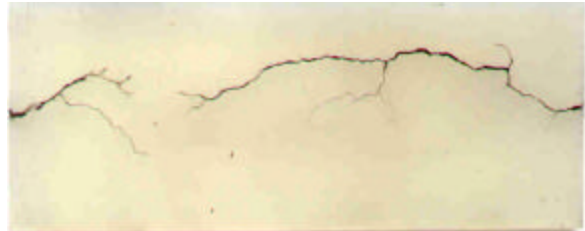
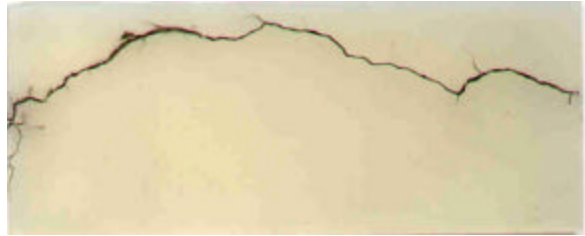
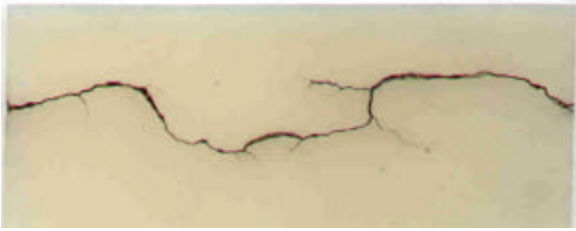
Las imágenes se indican en cinco secciones, las cuales se diferencian por la mezcla de agua con sal que se usa en el electrolito, el nivel de conductividad que tiene el electrolito que se utiliza durante la prueba y el nivel de contaminación que representa la densidad de sal depositada.

**Sección 1:** Mezcla de agua y 5 grs. de sal, Conductividad volumétrica de 0.83 S/m y una densidad de sal depositada de 0.02085 mg/cm<sup>2</sup>.

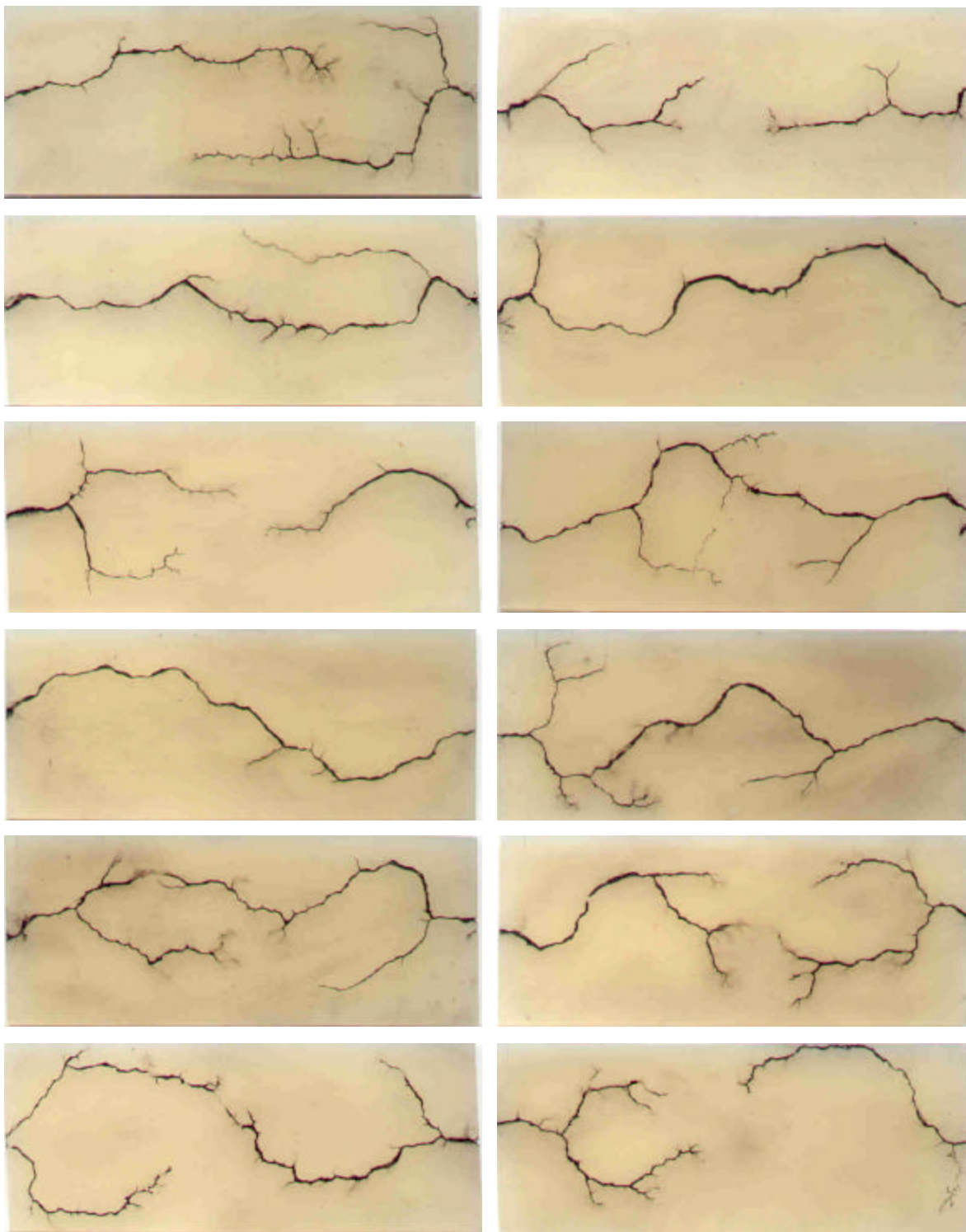


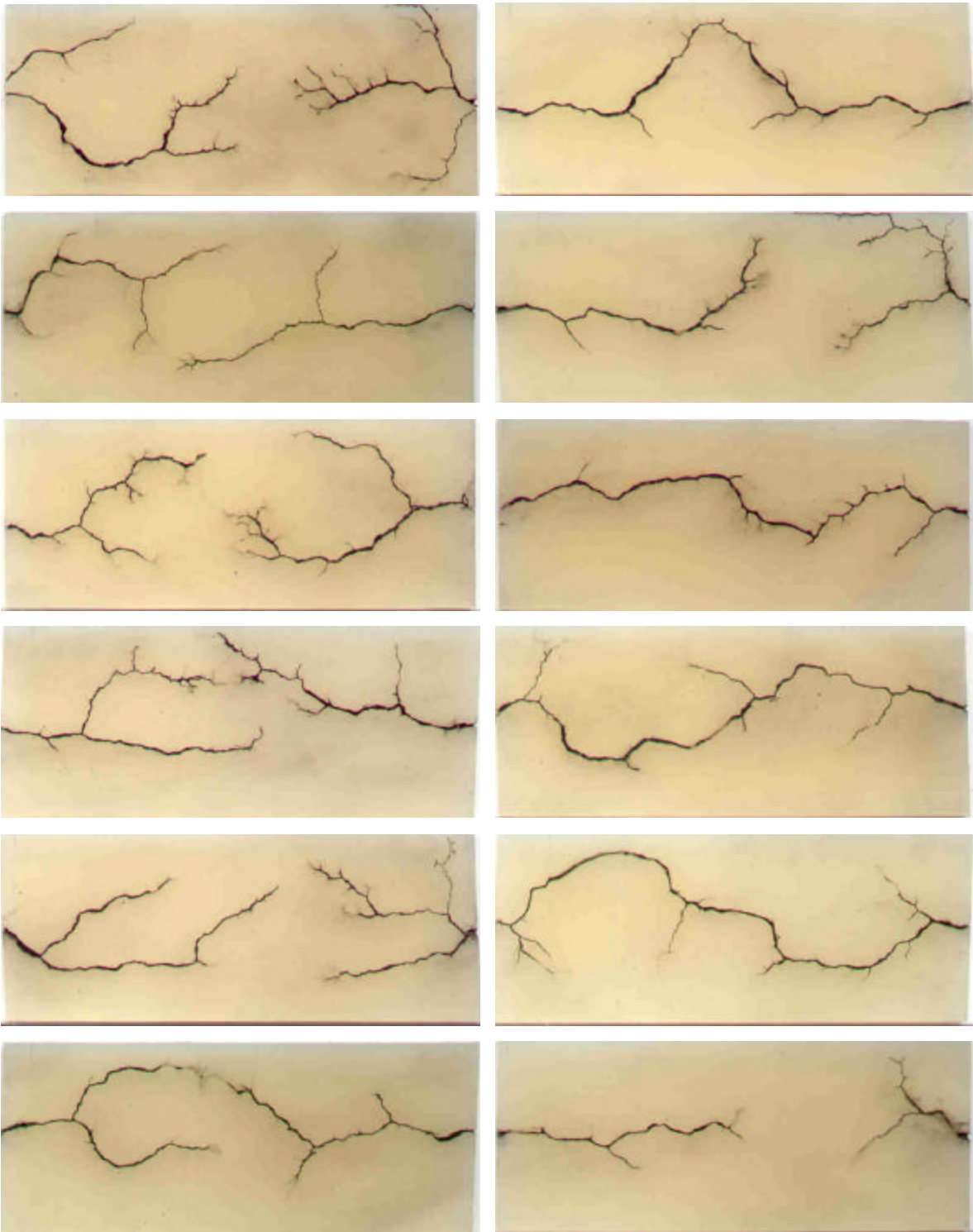




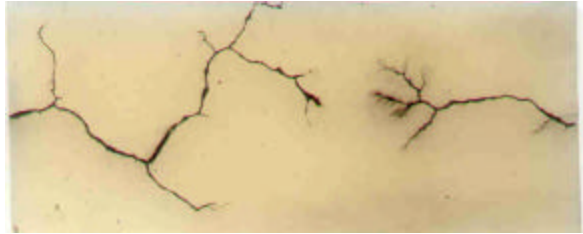
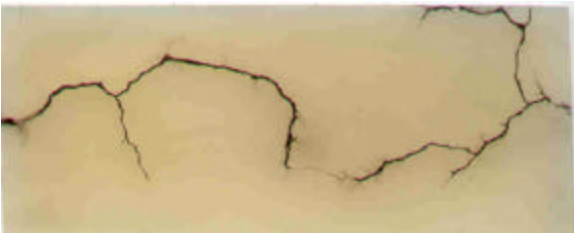
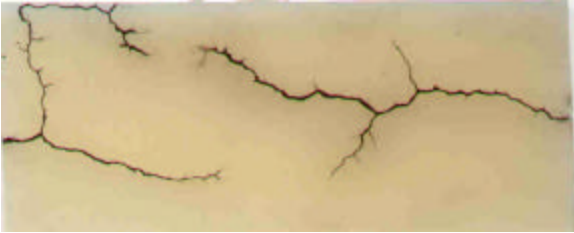
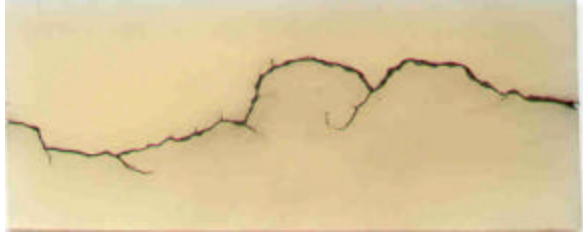


**Sección 2 :** Mezcla de agua y 10 grs. de sal, Conductividad volumétrica de 1.6 S/m y una densidad de sal depositada de 0.04013 mg/cm<sup>2</sup>.

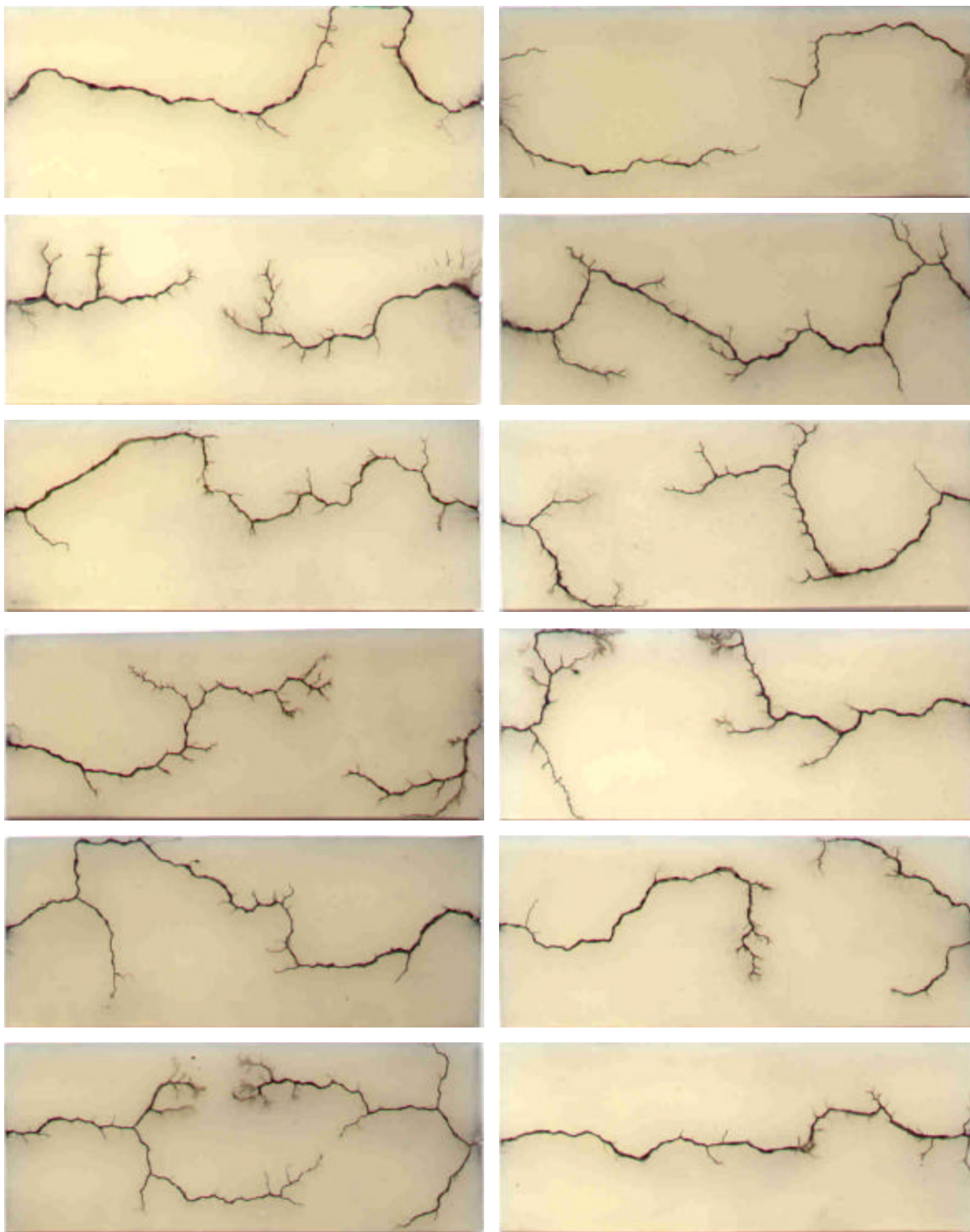


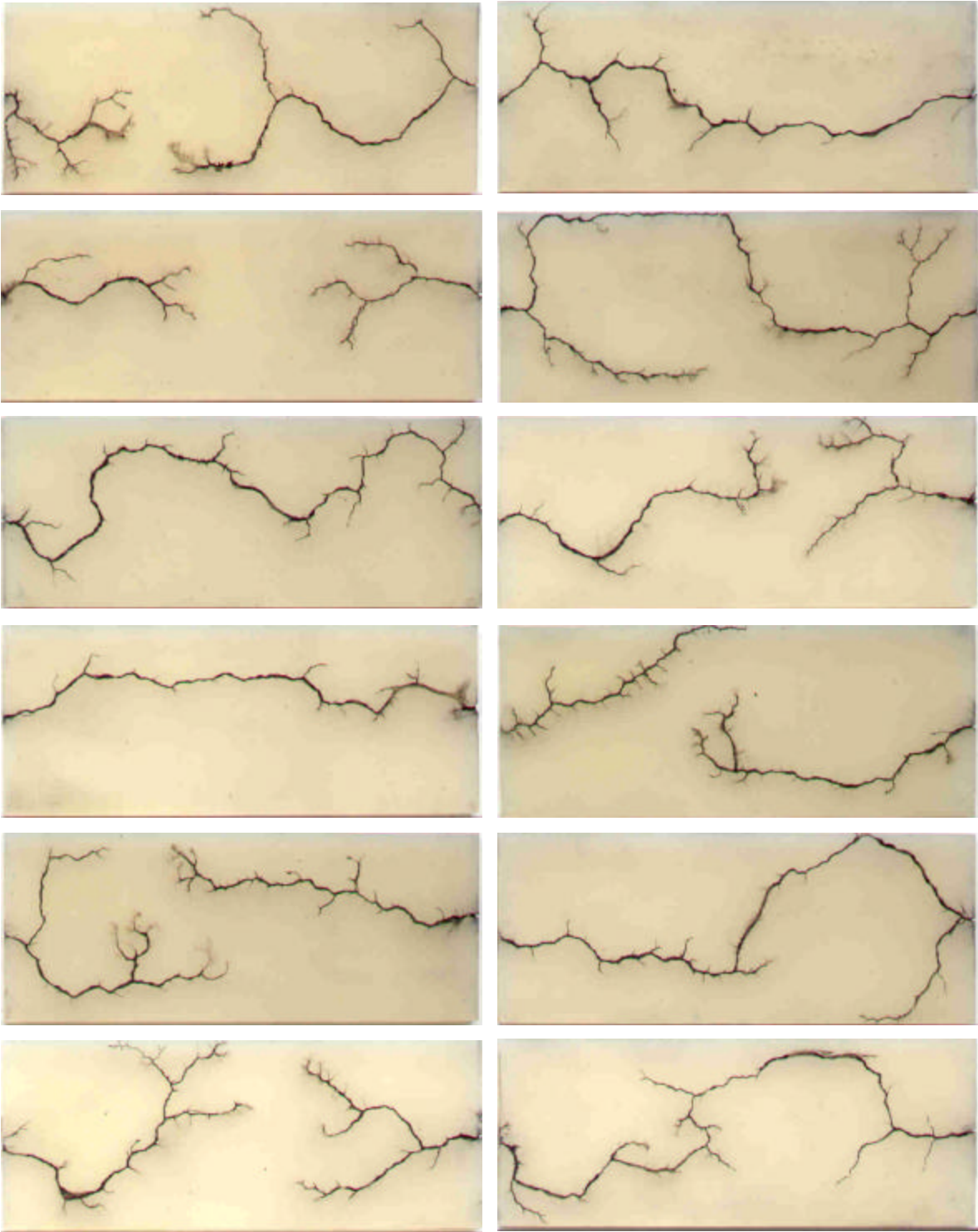


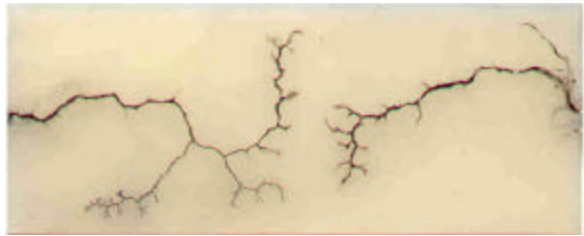
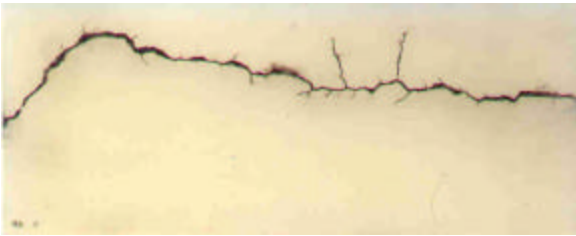
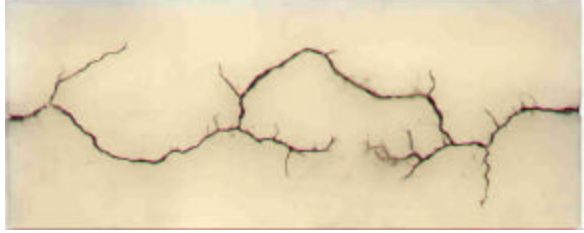
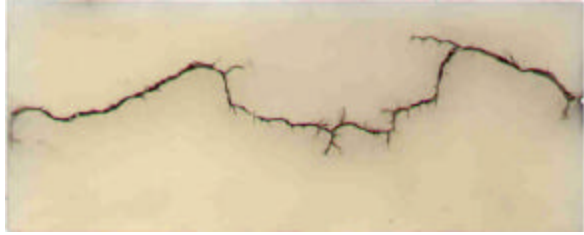




**Sección 3 :** Mezcla de agua y 20 grs. de sal, Conductividad volumétrica de 3.0 S/m y una densidad de sal depositada de 0.07501 mg/cm<sup>2</sup>.

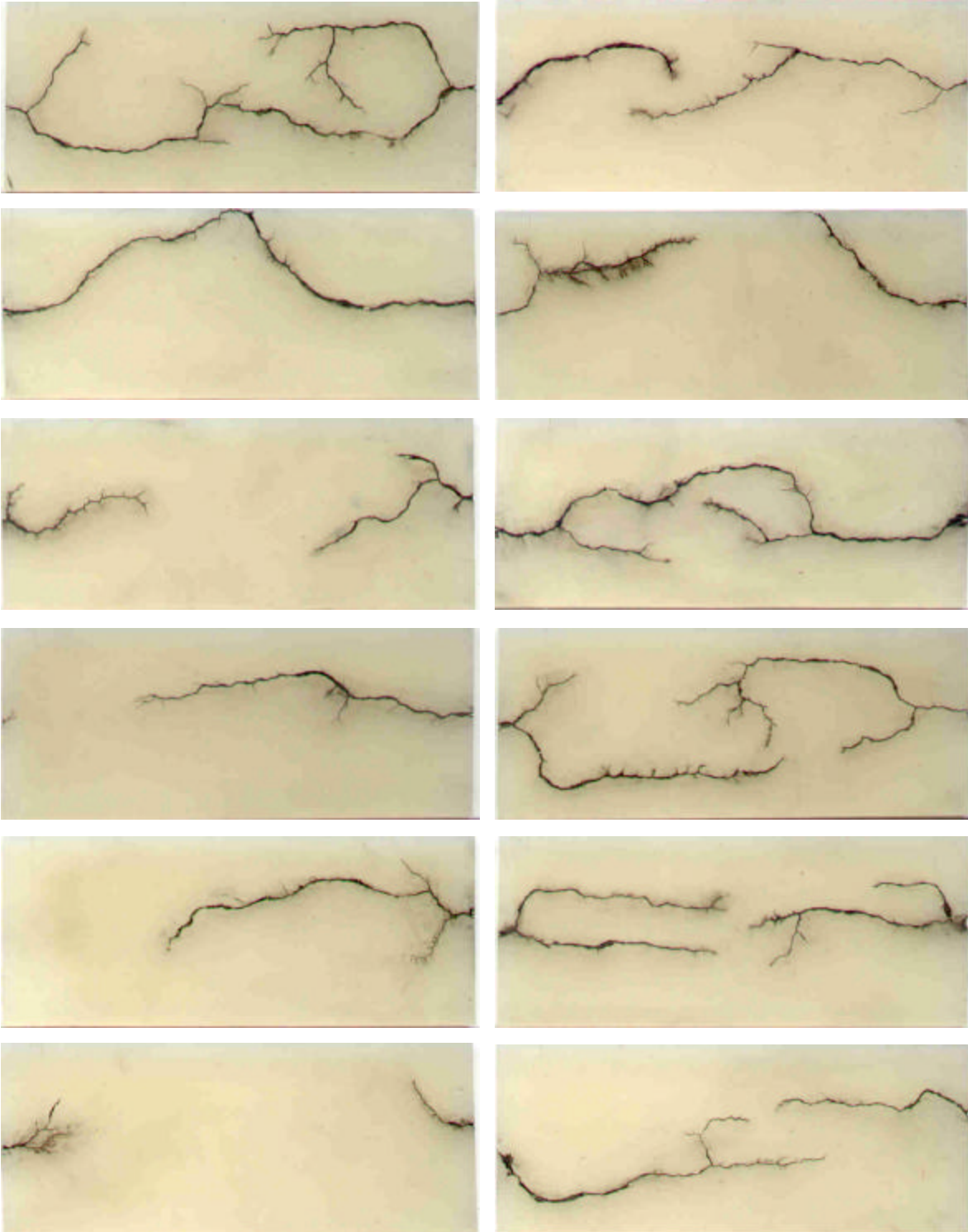




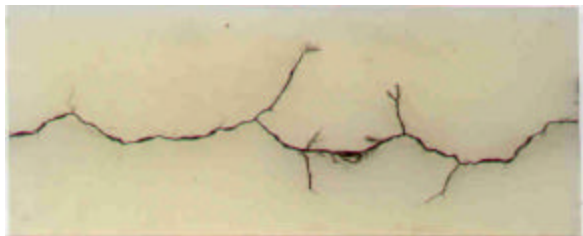




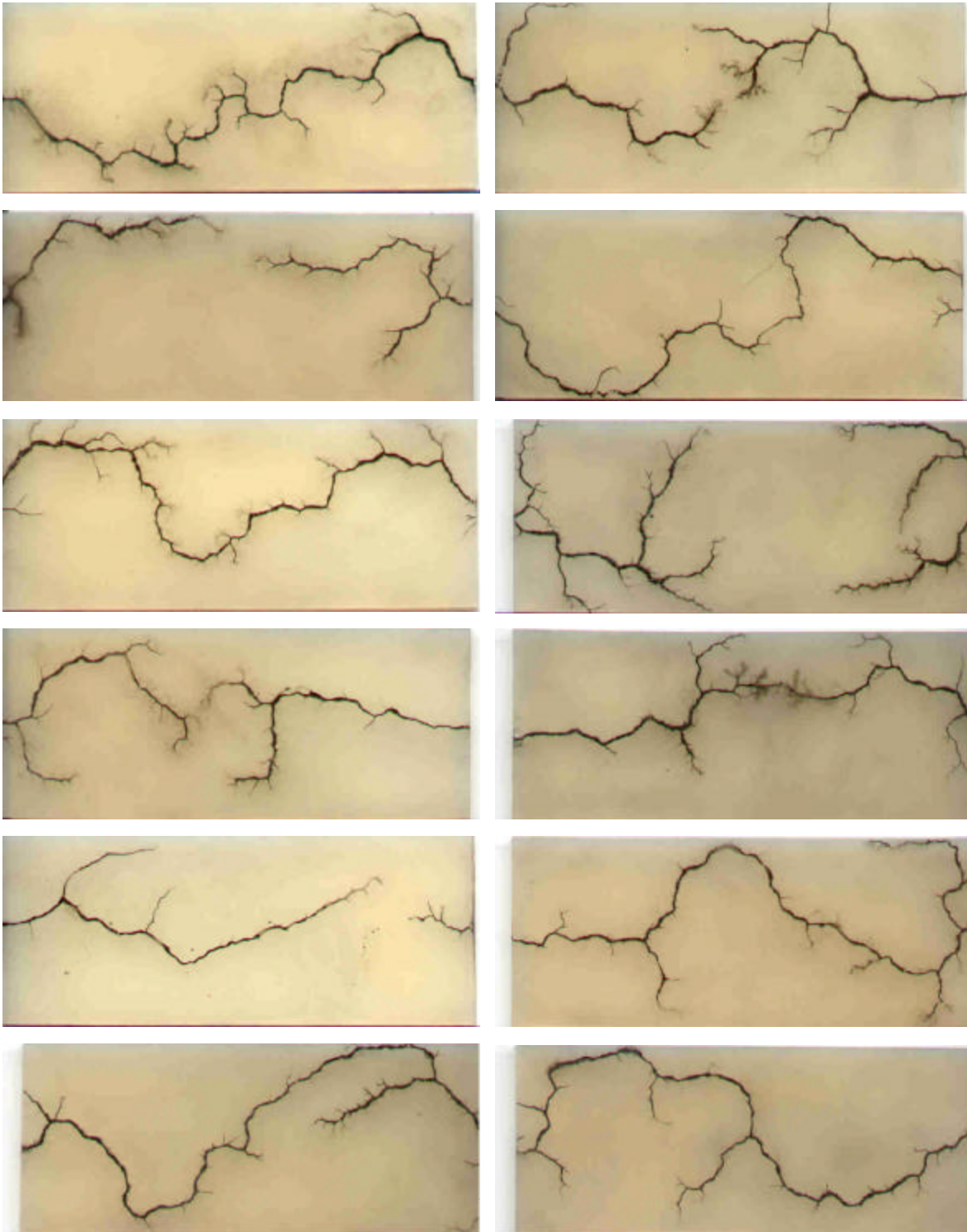
**Sección 4 :** Mezcla de agua y 50 grs. de sal, Conductividad volumétrica de 6.85 S/m y una densidad de sal depositada de 0.17137 mg/cm<sup>2</sup>.



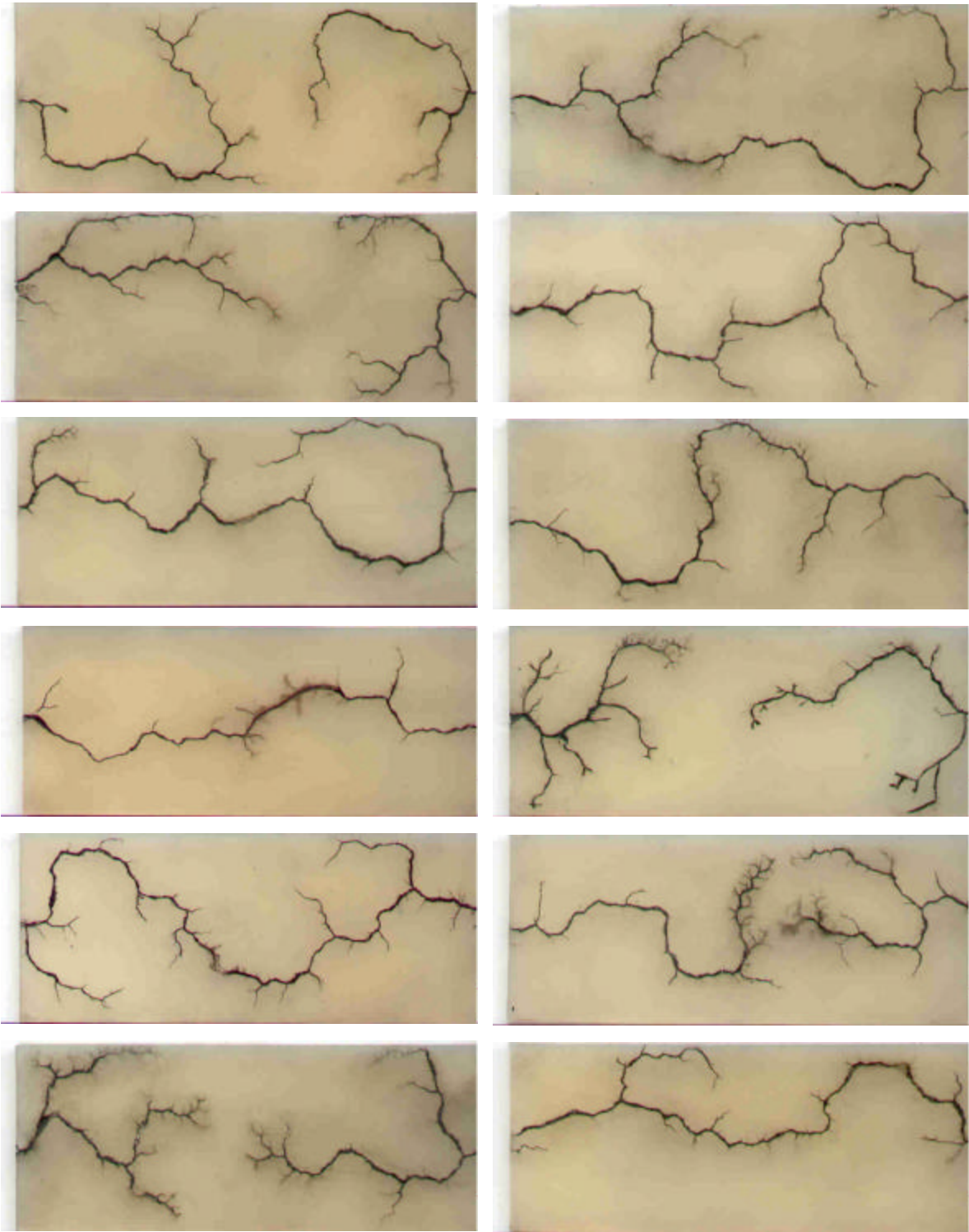


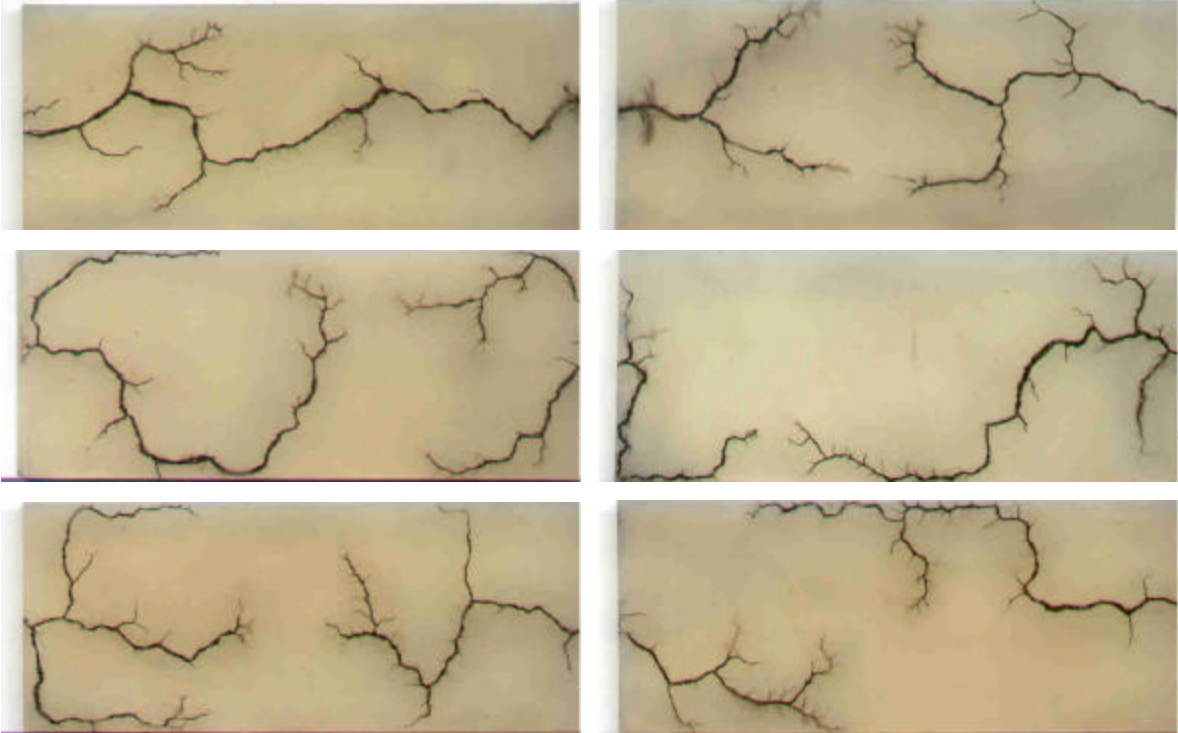


**Sección 5 :** Mezcla de agua y 160 grs. de sal, Conductividad volumétrica de 17.0 S/m y una densidad de sal depositada de 0.4250 mg/cm<sup>2</sup>.









# Apéndice C

Dimensión fractal obtenida  
por los métodos utilizados.

En este apéndice se muestran los valores de la dimensión fractal por todos los métodos que fueron utilizados, así como para cada concentración de sal. Son 30 valores para cada caso.

También se muestra su valor promedio, desviación estándar, valor máximo y su valor mínimo.

1.142	0.858
1.384	0.616
1.399	0.601
1.416	0.584
1.339	0.661
1.448	0.552
1.406	0.594
1.495	0.505
1.409	0.591
1.400	0.600
1.430	0.570
1.300	0.700
1.379	0.621
1.307	0.693
1.433	0.567
1.454	0.546
1.399	0.601
1.470	0.530
1.302	0.698
1.376	0.624
1.395	0.605
1.445	0.555
1.338	0.662
1.423	0.577
1.240	0.760
1.457	0.543
1.389	0.611
1.338	0.662
1.405	0.595
1.393	0.607

**D<sub>f</sub>**                      **H<sub>B</sub>**

**Método conteo de cuadros. Toda la figura, 05 gramos de sal.**

**D<sub>f</sub>**

Media	<i>1.3837</i>
Desviación STD	<i>0.07255</i>
Valor Máximo	<i>1.142</i>
Valor Mínimo	<i>1.495</i>

**H<sub>B</sub>**

Media	<i>0.6163</i>
Desviación STD	<i>0.07255</i>
Valor Máximo	<i>0.858</i>
Valor Mínimo	<i>0.505</i>

Longitud del lado del box más grande	79
Coefficiente de depreciación del box	1.3
Numero de tamaño de boxes	17
Incremento de rotación del grid	15°



1.423	0.577
1.432	0.568
1.454	0.546
1.415	0.585
1.513	0.487
1.419	0.581
1.415	0.585
1.409	0.591
1.380	0.620
1.375	0.625
1.422	0.578
1.451	0.549
1.432	0.568
1.452	0.548
1.397	0.603
1.422	0.578
1.402	0.598
1.386	0.614
1.440	0.560
1.487	0.513
1.433	0.567
1.441	0.559
1.450	0.550
1.434	0.566
1.409	0.591
1.449	0.551
1.378	0.622
1.487	0.513
1.451	0.549
1.362	0.638

**D<sub>f</sub>**

**H<sub>B</sub>**

**Método conteo de cuadros. Toda la figura, 10 gramos de sal.**

**D<sub>f</sub>**

Media	1.42733
Desviación STD	0.03445
Valor Máximo	1.513
Valor Mínimo	1.362

**H<sub>B</sub>**

Media	0.57267
Desviación STD	0.03445
Valor Máximo	0.638
Valor Mínimo	0.487

Longitud del lado del box más grande	79
Coefficiente de depreciación del box	1.3
Numero de tamaño de boxes	17
Incremento de rotación del grid	15°

1.423	0.577
1.432	0.568
1.454	0.546
1.415	0.585
1.513	0.487
1.419	0.581
1.415	0.585
1.409	0.591
1.380	0.620
1.375	0.625
1.422	0.578
1.451	0.549
1.432	0.568
1.452	0.548
1.397	0.603
1.422	0.578
1.402	0.598
1.386	0.614
1.440	0.560
1.487	0.513
1.433	0.567
1.441	0.559
1.450	0.550
1.434	0.566
1.409	0.591
1.449	0.551
1.378	0.622
1.487	0.513
1.451	0.549
1.362	0.638

$D_f$   $H_B$

**Método conteo de cuadros. Toda la figura, 20 gramos de sal.**

**$D_f$**

Media	1.42733
Desviación STD	0.03445
Valor Máximo	1.513
Valor Mínimo	1.362

**$H_B$**

Media	0.57267
Desviación STD	0.03445
Valor Máximo	0.638
Valor Mínimo	0.487
Longitud del lado del box más grande	79
Coefficiente de depreciación del box	1.3
Numero de tamaño de boxes	17
Incremento de rotación del grid	15°

1.404	0.596
1.387	0.613
1.477	0.523
1.427	0.573
1.485	0.515
1.451	0.549
1.506	0.494
1.499	0.501
1.453	0.547
1.468	0.532
1.422	0.578
1.336	0.664
1.368	0.632
1.356	0.644
1.355	0.645
1.395	0.605
1.423	0.577
1.494	0.506
1.341	0.659
1.427	0.573
1.379	0.621
1.504	0.496
1.336	0.664
1.424	0.576
1.422	0.578
1.362	0.638
1.363	0.637
1.215	0.785
1.289	0.711
1.400	0.600

**D<sub>f</sub>**

**H<sub>B</sub>**

**Método conteo de cuadros. Toda la figura, 50 gramos de sal.**

**D<sub>f</sub>**

Media	1.4056
Desviación STD	0.06776
Valor Máximo	1.506
Valor Mínimo	1.215

**H<sub>B</sub>**

Media	0.5944
Desviación STD	0.06776
Valor Máximo	0.785
Valor Mínimo	0.494

Longitud del lado del box más grande	79
Coefficiente de depreciación del box	1.3
Numero de tamaño de boxes	17
Incremento de rotación del grid	15°

1.506	0.494
1.471	0.529
1.513	0.487
1.464	0.536
1.401	0.599
1.395	0.605
1.444	0.556
1.512	0.488
1.545	0.455
1.524	0.476
1.517	0.483
1.465	0.535
1.468	0.532
1.528	0.472
1.517	0.483
1.501	0.499
1.480	0.520
1.481	0.519
1.481	0.519
1.497	0.503
1.521	0.479
1.568	0.432
1.550	0.450
1.511	0.489
1.535	0.465
1.524	0.476
1.452	0.548
1.452	0.548
1.362	0.638
1.520	0.480

$D_f$                        $H_B$

**Método conteo de cuadros. Toda la figura, 160 gramos de sal**

**$D_f$**

Media	<i>1.49017</i>
Desviación STD	<i>0.04714</i>
Valor Máximo	<i>1.568</i>
Valor Mínimo	<i>1.362</i>

**$H_B$**

Media	<i>0.50983</i>
Desviación STD	<i>0.04714</i>
Valor Máximo	<i>0.638</i>
Valor Mínimo	<i>0.432</i>

Longitud del lado del box más grande	79
Coefficiente de depreciación del box	1.3
Numero de tamaño de boxes	17
Incremento de rotación del grid	15°

0.6965
0.7183
0.7670
0.8240
0.7153
0.6953
0.7388
0.7380
0.7268
0.7970
0.7704
0.7005
0.6750
0.7593
0.6578
0.7093
0.7490
0.8180
0.7123
0.6448
0.7558
0.6570
0.6413
0.8533
0.9460
0.6913
0.7920
0.9685
0.7763
0.6925

**Método de análisis R/S 5 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7462</b>
Desviación estándar	<b>0.0785</b>
Valor máximo	<b>0.9685</b>
Valor mínimo	<b>0.6413</b>

0.72625
0.808
0.65525
0.71575
0.81225
0.53025
0.743
0.7405
0.818125
0.7705
0.73225
0.67125
0.7055
0.82325
0.7935
0.75
0.74625
0.72525
0.76025
0.886
0.80475
0.78775
0.80425
0.7795
0.7955
0.795
0.7515
1.0395
0.72025
0.77

**Método de análisis R/S 10 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7654</b>
Desviación estándar	<b>0.0824</b>
Valor máximo	<b>1.0395</b>
Valor mínimo	<b>0.53025</b>

0.802
0.80075
0.7235
0.67475
0.8335
0.794
0.72025
0.8655
0.73025
0.90625
0.737
0.7195
0.7925
0.72675
0.71025
0.648
0.77225
0.8185
0.74525
0.723
0.7505
0.751
0.8165
0.81625
0.5765
0.79275
1.02175
0.673
0.7375
0.749

**Método de análisis R/S 20 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7643</b>
Desviación estándar	<b>0.0821</b>
Valor máximo	<b>1.02175</b>
Valor mínimo	<b>0.5765</b>

0.71375
0.71175
0.6155
0.71825
0.6655
0.73475
0.6775
0.71775
0.70675
0.793
0.341
0.6055
0.82325
0.701
0.7485
0.8435
0.59275
0.551
0.64175
0.6445
0.75825
0.84725
0.805
0.648125
0.7465
0.71425
0.9155
0.9885
0.87425
0.66425

**Método de análisis R/S 50 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7170</b>
Desviación estándar	<b>0.1217</b>
Valor máximo	<b>0.9885</b>
Valor mínimo	<b>0.341</b>



0.62325
0.7415
0.78475
0.882
0.91725
0.670375
0.8575
0.6655
0.69425
0.801
0.75625
0.77675
0.65325
0.75625
0.731
0.75375
0.74575
0.795
0.73125
0.79375
0.76875
0.68625
0.7295
0.74475
0.80975
0.71775
0.80875
0.8515
0.9525
0.8725

**Método de análisis R/S 160 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7691</b>
Desviación estándar	<b>0.0780</b>
Valor máximo	<b>0.9525</b>
Valor mínimo	<b>0.62325</b>

0.74825
0.6595
0.73775
0.73525
0.763
0.66225
0.6215
0.731
0.7435
0.82575
0.728375
0.7045
0.688875
0.768
0.751
0.7575
0.71675
0.763
0.74225
0.69175
0.83125
0.77425
0.6435
0.72125
0.7665
0.7305
0.7355
0.80125
0.803
0.7105

**Método de Variograma 5 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7352</b>
Desviación estándar	<b>0.0495</b>
Valor máximo	<b>0.8313</b>
Valor mínimo	<b>0.6215</b>

0.734
0.692
0.69175
0.69975
0.71425
0.828
0.75325
0.7505
0.784625
0.753
0.6825
0.733
0.7065
0.76475
0.62675
0.70675
0.60425
0.665
0.784
0.6545
0.72425
0.71825
0.73275
0.6775
0.716
0.784
0.7565
0.80075
0.669
0.7105

**Método de Variograma 10 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7206</b>
Desviación estándar	<b>0.0509</b>
Valor máximo	<b>0.828</b>
Valor mínimo	<b>0.60425</b>

0.755375
0.71425
0.70025
0.61825
0.62775
0.7505
0.8115
0.8435
0.79475
0.74625
0.68
0.69875
0.72725
0.689
0.72525
0.784
0.7765
0.7795
0.796
0.77675
0.74475
0.67425
0.6575
0.66725
0.68925
0.7305
0.76325
0.7
0.65125
0.69975

**Método de Variograma 20 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7258</b>
Desviación estándar	<b>0.0561</b>
Valor máximo	<b>0.8435</b>
Valor mínimo	<b>0.61825</b>

0.71025
0.68275
0.669
0.7345
0.676
0.641
0.70225
0.68975
0.73425
0.6695
0
0.58375
0.78425
0.6595
0.74525
0.723
0.358
0.62025
0.66225
0.62625
0.7205
0.772
0.60025
0.733125
0.688
0.694
0.64625
0.7825
0.7655
0.69725

**Método de Variograma 50 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.6818</b>
Desviación estándar	<b>0.0813</b>
Valor máximo	<b>0.78425</b>
Valor mínimo	<b>0.358</b>

0.739
0.676
0.70375
0.84775
0.7995
0.72875
0.85525
0.707625
0.6605
0.73475
0.7565
0.8605
0.69125
0.79625
0.7585
0.774
0.78275
0.81175
0.70025
0.75225
0.72025
0.6915
0.7
0.782
0.75925
0.727
0.810875
0.75225
0.825
0.70125

**Método de Variograma 160 grs. de sal.**

Valores del coeficiente de Hurst H.

Promedio	<b>0.7535</b>
Desviación estándar	<b>0.0548</b>
Valor máximo	<b>0.8605</b>
Valor mínimo	<b>0.6605</b>