

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“EVALUACIÓN, PREVENCIÓN Y CONTROL DE
PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA EN EL ESTADO DE
VERACRUZ”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :

MAESTRO EN INGENIERÍA

AMBIENTAL - AIRE

P R E S E N T A

LCA. ADRIÁN MARÍN HERNÁNDEZ

TUTOR:

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA

2009





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Humberto Bravo Álvarez
Secretario: Dr. Armando Aguilar Márquez
Vocal: Dr. Rodolfo Sosa Echeverría
1^{er}. Suplente: Dr. Juan Genescá Llongueras
2^{do}. Suplente: M.C. Vicente Fuentes Gea

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

TUTOR DE TESIS:
Dr. Rodolfo Sosa Echeverría



FIRMA

Agradecimientos:

Al Dr. Rodolfo Sosa Echeverría por ser un gran apoyo y guía durante todo este tiempo.

Al Dr. Humberto Bravo Álvarez por haberme aceptado en la SCA-CCA, y permitirme realizar mi tesis en este lugar, además de sus valiosas aportaciones al presente trabajo.

De manera muy especial a la Q. Ana Luisa Alarcón Jiménez por todo su trabajo analítico, sin el cual no hubiera sido posible alcanzar todos mis objetivos, su ayuda resultó indispensable para la elaboración del presente trabajo, además por su amistad brindada a lo largo de estos años.

Al Dr. Jonathan Kahl, por sus comentarios y dudas resueltas respecto al manejo de HYSPLIT.

A los integrantes de mi comité tutorial Dr. Armando Aguilar y M.C. Vicente Fuentes Gea, por sus valiosas observaciones.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A CONACYT y al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) por el soporte económico brindado.

Al Biol. Pablo Sánchez Álvarez, al Sr. Roberto Galicia, al Sr. Alejandro Santés García, al Sr. Enrique López Barradas, por su colaboración y ayuda en la recolección, manejo y traslado de las muestras.

A mis amigos de la SCA-CCA Iris, Maga, Celia, Sandra, Gaby, Mónica, Gil, Fidel, por su amistad y apoyo no solo en la maestría sino en muchas otras actividades.

A todos mis amigos de la maestría, que hicieron muy amenos estos años en la UNAM.

Al Dr. Javier Reyes y la M.C. Evangelina Ramírez por sus consejos.

A mi madre, por haberme apoyado siempre en cada una de las etapas de mi vida.

ÍNDICE

RESUMEN	16
ABSTRACT	18
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	20
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	26
2.1 Definición de lluvia ácida	27
2.2 Precursores de lluvia ácida	29
2.2.1 Óxidos de Nitrógeno	29
2.2.2 Óxidos de azufre	30
2.3 Procesos de formación de lluvia ácida	31
2.3.1 Arrastre	32
2.3.2 Lavado	32
2.4 Efectos de la lluvia ácida	33
2.5 Lluvia ácida en México	35
2.6 Emisiones de precursores	38
2.7 Acciones para la reducción de emisiones en otros países	42
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	44
3.1 Descripción de la zona de estudio	45
3.1.1 El Tajín	46
3.1.2 El Morro de La Mancha	48
3.2 Muestreo	49
3.3 Análisis químico de las muestras	53
3.3.1 Medición de pH	54

3.3.2 Medición de conductividad	54
3.3.3 Cuantificación de aniones y cationes por HPLC	55
3.4 Modelos de trayectorias de retroceso	58
3.4.1 Modelos estadísticos	59
3.4.2 Modelos Lagrangianos	59
3.4.2.1 HYSPLIT	60
3.4.2.2 FLEXPART	65
3.4.3 Modelos Eulerianos	65
3.4.4 Aplicación de modelos de trayectorias en estudios de lluvia ácida en México	66
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	68
4.1 Aseguramiento de la calidad de la información	69
4.2 Análisis estadístico de pH y conductividad	71
4.3 Análisis estadístico de aniones y cationes	79
4.3.1 Contenido del ión sodio en agua de lluvia	79
4.3.2 Contenido del ión amonio en agua de lluvia	81
4.3.3 Contenido del ión potasio en agua de lluvia	82
4.3.4 Contenido del ión magnesio en agua de lluvia	83
4.3.5 Contenido del ión calcio en agua de lluvia	85
4.3.6 Contenido del ión cloruro en agua de lluvia	86
4.3.7 Contenido del ión nitrato en agua de lluvia	88
4.3.8 Contenido del ión sulfato en agua de lluvia	93
4.3.9 Intercomparación de pH, conductividad y concentración de iones ..	99
4.4 Factor de enriquecimiento y neutralización ..	103
4.4.1 Factor de enriquecimiento	103

4.4.2 Factor de neutralización	107
4.5 Fuentes potenciales de precursores	110
4.6 Trayectorias aplicadas	112
4.7 Fuentes localizadas	117
4.8 Medidas de prevención y control	120
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
Recomendaciones	128
ANEXOS	130
I.- Resumen de las condiciones meteorológicas en los sitios de muestreo	130
II.- Valores de pH, conductividad y concentración de aniones y cationes de las muestras colectadas en ambas estaciones	142
III.- Prueba estadística de Shapiro – Willks aplicada a los valores de concentración de iones, pH y conductividad	153
IV.- Trayectorias realizadas para los eventos de lluvia de las dos estaciones	162
BIBLIOGRAFÍA	188

Índice de figuras.

Figura 1.1 Funciones y responsabilidades de la SCA-CCA-UNAM	23
Figura 2.1.- Formación de lluvia ácida por rain out (arrastre)	32
Figura 2.2.- Formación de lluvia ácida por wash out (lavado)	33
Figura 3.1.- Localización de los sitios de muestreo	45
Figura 3.2.- Pirámide de los Nichos, El Tajín	47
Figura 3.3. Centro de Investigaciones Costeras La Mancha (Cicolma), Veracruz	49
Figura 3.4.- Esquema de cadena de custodia del material y de las muestras de depósito húmedo	50
Figura 3.5.- Colector de depósito húmedo y seco, estación meteorológica y pluviómetro ubicados en El Tajín	51
Figura 3.6.- Etiquetas colocadas para la identificación de muestras	52
Figura 3.7.- Potenciómetro y conductímetro utilizados para las mediciones de pH y conductividad	54
Figura 3.9.- Cromatógrafo empleado para la cuantificación de aniones	56
Figura 3.10.- Esquema del proceso de determinación de iones por HPLC	57
Figura 3.11.- Trayectoria inversa del evento de lluvia del día 10 de julio de 2006 para El Tajín	61
Figura 3.12.- Campo de viento generado por el programa PCGRIDS	62
Figura 3.13.- Esquema de una fracción de malla meteorológica con valores de viento ..	64
Figura 4.1 Grafico de cajas de los valores de pH para El Tajín y La Mancha	71
Figura 4.2.- Promedio ponderado anual de pH para El Tajín y La Mancha	72
Figura 4.3.- Promedios ponderados mensuales de pH 2003-2007 para El Tajín y La Mancha	73
Figura 4.4.- Promedios ponderados mensuales de pH 2003-2007 para El Tajín	74
Figura 4.5.- Comportamiento promedio y observado de los valores de pH 2003-2007 para El Tajín	76
Figura 4.6.- Promedios ponderados mensuales de pH 2003-2007 para La Mancha	76

Figura 4.7.- Comportamiento promedio y observado de los valores de pH 2003-2007 para La Mancha	77
Figura 4.8.- Gráfico de cajas de los valores de conductividad para El Tajín y La Mancha	78
Figura 4.9.- Promedio ponderado anual de conductividad para El Tajín y La Mancha 2006-2007	78
Figura 4.10.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión sodio para El Tajín y La Mancha	80
Figura 4.11.- Promedio ponderado anual de concentración de ión sodio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	80
Figura 4.12.- Gráfico de cajas de los valores de concentración de ión amonio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	81
Figura 4.13.- Promedio ponderado anual de concentración de ión amonio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	82
Figura 4.14.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión potasio para Tajín y La Mancha 2006-2007	82
Figura 4.15.- Promedio ponderado anual de la concentración del ión potasio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	83
Figura 4.16.- Gráfico de cajas de los valores de la concentración del ión magnesio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	84
Figura 4.17.- Promedio ponderado anual de la concentración del ión magnesio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	84
Figura 4.18.- Gráfico de cajas de los valores de la concentración del ión calcio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	85
Figura 4.19.- Promedio ponderado anual de concentración del ión calcio para El Tajín y La Mancha 2006-2007	86
Figura 4.20.- Gráfico de cajas de los valores de la concentración del ión cloruro para El Tajín y La Mancha 2006-2007	87
Figura 4.21.- Promedio ponderado anual de concentración del ión cloruro para El Tajín y La Mancha 2006-2007	87
Figura 4.22.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión nitrato para El Tajín y La Mancha 2006-2007	88

Figura 4.23.- Promedio ponderado anual de concentración del ión sulfato para El Tajín y La Mancha 2006-2007	89
Figura 4.24.- Promedios ponderados mensuales de la concentración del ión nitrato 2003-2007 para El Tajín y La Mancha	90
Figura 4.25.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión nitrato 2003-2007 para El Tajín	90
Figura 4.26.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión nitrato 2003-2007 para El Tajín	91
Figura 4.27.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión nitrato 2003-2007 para La Mancha	92
Figura 4.28.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión nitrato 2003-2007 para La Mancha	92
Figura 4.29.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión sulfato para El Tajín y La Mancha 2006-2007	93
Figura 4.30.- Promedio ponderado anual de concentración del ión sulfato para El Tajín y La Mancha 2006-2007	94
Figura 4.31.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión sulfato 2003-2007 para El Tajín y La Mancha	94
Figura 4.32.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión sulfato 2003-2007 para El Tajín	95
Figura 4.33.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión sulfato 2003-2007 para El Tajín	96
Figura 4.34.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión sulfato 2003-2007 para La Mancha	97
Figura 4.35.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión sulfato 2003-2007 para La Mancha	97
Figura 4.36.- Comportamiento mensual del pH, nitrato y sulfato del para El Tajín 2003-2007	98
Figura 4.37.- Comportamiento mensual del pH, nitrato y sulfato para La Mancha 2003-2007	99
Figura 4.38.- Gráfico de cajas de los valores del balance iónico de las muestras de lluvia para El Tajín y La Mancha	110

Figura 4.39.- Ubicación de las fuentes potenciales de precursores de lluvia ácida para los sitios de estudio	112
Figura 4.40.- Trayectorias representativas de los eventos de lluvia para El Tajín	114
Figura 4.41.- Trayectorias representativas de los eventos de lluvia para La Mancha	116
Figura 4.42.- Descripción del tratamiento en los Complejos Procesadores de Gas	119
Figura 4.43.- Descripción del proceso de recuperación de azufre	119
Figura 4.44.- Esquema del proceso de eliminación de azufre en corriente gaseosa	122
Figura I.1.- Promedio mensual de temperatura de El Tajín 2006-2007	132
Figura I.2.- Promedio mensual de presión para El Tajín 2006-2007	132
Figura I.3.- Promedio mensual de precipitación para El Tajín 2006-2007	132
Figura I.4.- Rosa de los vientos de El Tajín para los meses Enero – Junio 2006	133
Figura I.5.- Rosa de los vientos de El Tajín para los meses Julio – Diciembre 2006	134
Figura I.6.- Rosa de los vientos de El Tajín para los meses Enero – Mayo 2007	135
Figura I.7.- Promedio mensual de temperatura de La Mancha 2007	138
Figura I.8.- Promedio mensual de presión y humedad relativa de La Mancha 2007	138
Figura I.9.- Promedio mensual de precipitación de La Mancha 2006 – 2007	139
Figura I.10.- Rosa de los vientos de La Mancha para los meses Febrero–Junio 2007 ..	140
Figura I.11.- Rosa de los vientos de La Mancha para los meses Julio–Diciembre 2007.....	141
Figura III.1.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de El Tajín 2006	154
Figura III.2.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de El Tajín 2006	155
Figura III.3.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de El Tajín 2007	156
Figura III.4.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de El Tajín 2007	157
Figura III.5.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de La Mancha 2006	158

Figura III.6.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de La Mancha 2006	159
Figura III.7.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de La Mancha 2007	160
Figura III.8.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de La Mancha 2007	161
Figura IV.1.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero – Abril 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas	163
Figura IV.2.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Mayo – Junio 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas	164
Figura IV.3.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Julio 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas	165
Figura IV.4.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Agosto - Septiembre 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas	166
Figura IV.5.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Octubre 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas	167
Figura IV.6.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Noviembre - Diciembre 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas	168
Figura IV.7.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero - Febrero 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas	169
Figura IV.8.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Marzo - Junio 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas	170
Figura IV.9.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Julio - Agosto 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas	171
Figura IV.10.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Septiembre - Octubre 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas	172
Figura IV.11.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Noviembre - Diciembre 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas	173
Figura IV.12.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero - Abril 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas	174
Figura IV.13.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Mayo 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas	175

Figura IV.14.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Junio 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas	176
Figura IV.15.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Julio 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas	177
Figura IV.16.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Agosto 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas	178
Figura IV.17.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Septiembre 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas	179
Figura IV.18.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Octubre - Diciembre 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas	180
Figura IV.19.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero – Abril 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas	181
Figura IV.20.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Mayo - Junio 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas	182
Figura IV.21.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Julio 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas	183
Figura IV.22.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Agosto 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas	184
Figura IV.23.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Septiembre 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas	185
Figura IV.24.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Octubre 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas	186
Figura IV.25.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Noviembre - Diciembre 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas	187

Índice de tablas.

Tabla 2.1: Media de los promedios ponderados mensuales de pH. Fuente: (Herrera, C., 2007)	36
Tabla 2.2.-Cantidad y porcentaje de muestras por debajo del valor de 5.65 de pH	37
Tabla 2.3.- Resumen del INEM por Entidad Federativa (Ton/año)	40
Tabla 2.4.- Valores en porcentaje de la cantidad de emisiones respecto al total nacional de los Estados del Golfo de México	41
Tabla 2.5.- Lugar que ocupa el Estado de Veracruz a nivel nacional en cuanto a emisiones de los compuestos establecidos en el INEM	41
Tabla 3.1.- Coordenadas geográficas de la Zona Arqueológica de “El Tajín”	46
Tabla 3.2.- Coordenadas geográficas de La Mancha	48
Tabla 3.3.- Límites de detección y precisión de cada uno de los iones	56
Tabla 3.4.- Sales utilizadas en la preparación de la soluciones patrón	57
Tabla 4.1.- Resumen de la cantidad de muestras analizadas y validadas	70
Tabla 4.2.- Factor de correlación de Spearman para El Tajín 2006-2007	100
Tabla 4.3.- Factor de correlación de Spearman para La Mancha 2006-2007	100
Tabla 4.4.- Resumen de la prueba no paramétrica de suma de rangos de Wilcoxon	101
Tabla 4.5.- Factor de Enriquecimiento para El Tajín 2006	104
Tabla 4.6.- Factor de enriquecimiento para El Tajín 2007	105
Tabla 4.7.- Factor de enriquecimiento para La Mancha 2006	106
Tabla 4.8.- Factor de enriquecimiento para La Mancha 2007	107
Tabla 4.9.- Factores de neutralización para El Tajín y La Mancha 2006-2007	108
Tabla 4.10.- Emisiones de los municipios con fuentes potenciales de precursores de lluvia ácida para los sitios de estudio	111
Tabla 4.11.- Valores de pH, conductividad, aniones y cationes de las muestras de lluvia por región de procedencia de trayectorias	117
Tabla I.1.- Promedio anual de variables atmosféricas para El Tajín	131
Tabla I.2.- Promedio anual de variables atmosféricas para La Mancha	137

Tabla II.1.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para El Tajín 2006	143
Tabla II.2.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para El Tajín 2007	144
Tabla II.3.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para La Mancha 2006	145
Tabla II.4.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para La Mancha 2007	146
Tabla II.5.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para El Tajín 2006	147
Tabla II.6.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para El Tajín 2007	148
Tabla II.7.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para La Mancha 2006	149
Tabla II.8.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para La Mancha 2007	150
Tabla II.9.- Promedios ponderados mensuales de pH, conductividad y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) para El Tajín 2006 – 2007	151
Tabla II.10.- Promedios ponderados mensuales de pH, conductividad y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) para La Mancha 2006 – 2007	152

GLOSARIO DE TÉRMINOS

CFE	Comisión Federal de Electricidad
CICOLMA	Centro de Investigaciones Costeras La Mancha
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
ECMWF	Centro Europeo de Predicción Numérica del Tiempo a Mediano Plazo
EPA	Environmental Protection Agency
FE	Factor de Enriquecimiento
FN	Factor de Neutralización
FNM	Factor No Marino
FSM	Factor de Sal Marina
HPLC	Cromatografía de Líquidos de Alta Eficiencia
HYSPLIT	Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model
INE	Instituto Nacional de Ecología
INECOL	Instituto de Ecología, A.C.
INEM	Inventario Nacional de Emisiones
NADP	National Atmospheric Deposition Program
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOx	Óxidos de Nitrógeno
PEMEX	Petróleos Mexicanos
QA/QC	Programa de Aseguramiento y Control de Calidad
SCA-CCA-UNAM	Sección de Contaminación Ambiental del Centro de ciencias de la Atmósfera – UNAM
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistema de Información Geográfica
SOx	Óxidos de Azufre
UNECE	Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México

RESUMEN.

Por definición la lluvia ácida es el agua de lluvia con un valor de pH inferior a 5.65. Debido a la dilución del CO_2 en el agua de lluvia, se tiene la formación de ácido carbónico, el cual genera que el pH natural del agua de lluvia tenga cierto grado de acidez.

Sin embargo las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x); conocidos también como precursores de lluvia ácida; que se tienen ya sea de manera natural o antropogénica; al reaccionar con la humedad atmosférica pueden generar ácido nítrico y ácido sulfúrico respectivamente, los cuales son ácidos fuertes y logran bajar el pH del agua de lluvia.

De acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones de México 1999 (INEM), el Estado de Veracruz ocupa el tercer y segundo lugar a nivel nacional en las emisiones de NO_x y SO_x respectivamente, lo cual lo hace vulnerable a presentar precipitación ácida. Es por esto que se ha elegido a esta entidad para realizar el presente estudio.

La Zona Arqueológica de El Tajín y la Estación de Ecología Costera El Morro de La Mancha, fueron los sitios elegidos para el desarrollo del proyecto, ya que se contaba con la infraestructura adecuada así como las instituciones responsables: el INAH y el instituto de Ecología A.C. Además estos sitios representan dos sistemas vulnerables a la presencia de lluvia ácida.

En estos sitios se colocaron colectores automáticos de deposición húmeda y seca. Las muestras fueron envasadas, etiquetadas y transportadas hasta el laboratorio de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera (SCA-CCA) para la medición de pH, conductividad y la composición iónica (Cl^- , NO_3^- , SO_4^- , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}). Además se obtenía información de volumen de lluvia, así como la fecha y hora del evento.

Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente para observar diferencia significativa entre estaciones y años consecutivos, para lo cual se recurrió a la prueba estadística no paramétrica de Wilcoxon. Además se

obtuvieron los Factores de Enriquecimiento y Neutralización correspondientes para determinar si había fuentes antropogénicas ligadas a los nitratos y sulfatos encontrados en el agua de lluvia.

Se realizaron trayectorias de retroceso para determinar la ruta seguida por las masas de aire que dieron origen al evento de lluvia, con esta herramienta se puede observar en que regiones pudieron haberse incorporado los precursores que acidificaron los eventos muestreados. Las trayectorias fueron realizadas mediante la aplicación del modelo HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model).

Mediante las trayectorias, así como en el apoyo de los factores de enriquecimiento y neutralización; y el análisis estadístico de los valores de iones, se identificaron las fuentes más probables causantes de la acidificación del agua de lluvia muestreada en los sitios de estudio.

Las fuentes identificadas se ubican en la región de Altamira-Cd. Madero, en Tamaulipas; la zona Poza Rica-Tuxpan, en el Estado de Veracruz; y la sonda de Campeche, en el Golfo de México.

A través de este estudio se proponen medidas de prevención y control de precursores de lluvia ácida, las cuales de aplicarse podrían mitigar el problema que se presenta en los sitios de muestreo, y con ello reducir el impacto que se tiene tanto en los ecosistemas como en el patrimonio cultural de México.

ABSTRACT

Acid rain, by definition is rainwater with pH below the value of 5.65. Due to the dilution of CO_2 in the rainwater, carbonic acid is formed, which causes that natural rainwater has certain acidity.

Nevertheless, the natural or anthropogenic emissions of nitrogen oxides (NO_x) and sulfur oxides (SO_x), known both as precursors of acid rain, react with atmospheric humidity and can generate nitric acid and sulfuric acid, which are both strong acids, and tend to low the rainwater pH.

According to the National Emissions Inventory (INEM), the State of Veracruz has the 3rd and 2nd place in emissions of NO_x and SO_x respectively; which makes the State vulnerable to the presence of acid rain. The big amount of emissions of NO_x and SO_x to the atmosphere is the principal reason to have chosen this State in the present study.

The archeological zone of El Tajín and the Coastal Ecology Station of El Morro de La Mancha, were the sites selected for the developing of the present study, due to the fact that both sites have the proper installations and the support of the institutions responsible of these sites (INAH and Instituto de Ecología A.C.). Besides, these sites represent two different systems vulnerable to the presence of acid rain.

In both sites were installed automatic collectors of dry and wet deposition. The samples were collected, packed and transported to the laboratory of the Environmental Pollution Section of the Centre of Atmospheric Sciences (SCA-CCA-UNAM), to be analyzed for pH, conductivity and ionic composition (Cl^- , NO_3^- , SO_4^- , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}). Also, in the sites was collected information like amount of rain, date and time of the rain event.

Results were analyzed statistically to observe significant difference between sites and consecutive years of pH, conductivity and ionic composition; this was made with the application of the non parametric Wilcoxon rank sum test. Besides,

enrichment factors and neutralizing factors were obtained to determine the origin (natural or anthropogenic) of the sulfates and nitrates found in rainwater.

Backward trajectories were obtained for every rain event to determine the path followed by the air masses; with the application of backward trajectories to studies of acid rain, source regions of NO_x and SO_x can be identified. These trajectories were made with the Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model (HYSPLIT).

With the aim of backward trajectories, enrichment factors, neutralizing factors and statistical analysis of ionic composition of the samples; the most probable source regions of SO_x and NO_x that cause the acidification of rainwater in the sampling sites were identified.

These sources are located in the regions of Altamira-Cd. Madero, Poza Rica-Tuxpan and the Sonda de Campeche.

As byproduct of this research work, prevention and control techniques of atmospheric pollutants are offered, which if applied can reduce the problem of acid rain in the sampling region, and to reduce the impacts of acid rain in ecosystems and the cultural heritage of Mexico.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.

La lluvia ácida se presenta cuando el agua de lluvia tiene un pH inferior a 5.6. Su estudio debe extenderse cada vez más a lo largo de todo el país con la meta de determinar los efectos potenciales que genera tanto a nivel local y regional, e identificar las fuentes de sus precursores para tomar las medidas de prevención y control requeridas.

La contaminación atmosférica es la causa de este fenómeno, ya que los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x), al ser emitidos por distintas fuentes, tanto naturales como antropogénicas, reaccionan con el agua de la atmósfera formando ácido nítrico y ácido sulfúrico respectivamente. Debido al transporte atmosférico de las emisiones, el lugar donde se emiten los precursores no es necesariamente donde se presenta el fenómeno de lluvia ácida.

El estado de Veracruz posee diferentes industrias entre las que destacan complejos petroquímicos, centrales termoeléctricas, ingenios azucareros, así como varias fábricas que emiten diariamente sustancias contaminantes a la atmósfera.

De acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones (*SEMARNAT, 2006*), el Estado de Veracruz emite una cantidad de 342,391.8 ton/año de SO_2 y 110,519.8 ton/año de NO_x , que lo ubica en el segundo lugar a nivel nacional con respecto a SO_2 y en el tercero con respecto a NO_x , de ahí el interés de poner atención a este problema en este Estado. Además la contaminación atmosférica no reconoce fronteras, por lo cual también se analizarán fuentes potenciales de precursores aun fuera de los límites del Estado.

Lo anterior plantea la necesidad de reducir las emisiones para evitar las afectaciones que se tienen en el estado, tanto a los ecosistemas como a las construcciones, especialmente al patrimonio cultural (*Bravo, et al, 2006*).

Debido a la importancia que tiene la conservación del patrimonio natural y cultural de los mexicanos, y considerando que gran parte de las construcciones prehispánicas es de material calizo, que es un material vulnerable a ser deteriorado por la lluvia ácida, es necesario llevar a cabo estudios que permitan entender y prevenir dicho deterioro que es influenciado por distintos factores ambientales, y en especial aquellos que son producto de las actividades humanas.

Asimismo la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA-CCA-UNAM), en el año 2001 puso en operación una red de cuatro estaciones para el estudio de la deposición húmeda y seca en el Estado de Veracruz (*Bravo et al, 2005*).

A partir de la información sobre eventos de lluvia ácida y su composición química generada en estas estaciones, se aplicarán modelos de trayectorias de retroceso para identificar las regiones y fuentes potenciales de precursores que pudieron haber influido en los eventos registrados. Una vez identificadas las fuentes potenciales de precursores más importantes, se establecerán las medidas de prevención y control necesarias para minimizar su impacto, de esta manera la presente investigación considerará e integrará aspectos fundamentales de la Ingeniería Ambiental, como son la evaluación, prevención y control de la contaminación atmosférica, llegando a la propuesta de soluciones al problema de la lluvia ácida en el Estado de Veracruz.

El presente trabajo de investigación forma parte del proyecto global: “Deposición ácida en el Estado de Veracruz. Identificación de su distribución espacial y evaluación de sus efectos potenciales”, a cargo de la SCA-CCA-UNAM, bajo la supervisión del Dr. Humberto Bravo Álvarez, donde además participan las siguientes instituciones:

- Instituto de Ecología, A.C.
- Universidad Veracruzana
- Instituto Nacional de Ecología
- Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental

- Universidad de Cincinnati
- Universidad de Wisconsin-Milwaukee.

Las actividades realizadas para llevar a cabo este proyecto destacan:

- Colección de muestras
- Transporte de muestras
- Análisis químico tanto de deposición húmeda como seca

Las actividades anteriores fueron posibles gracias al apoyo del personal de la SCA-CCA-UNAM:

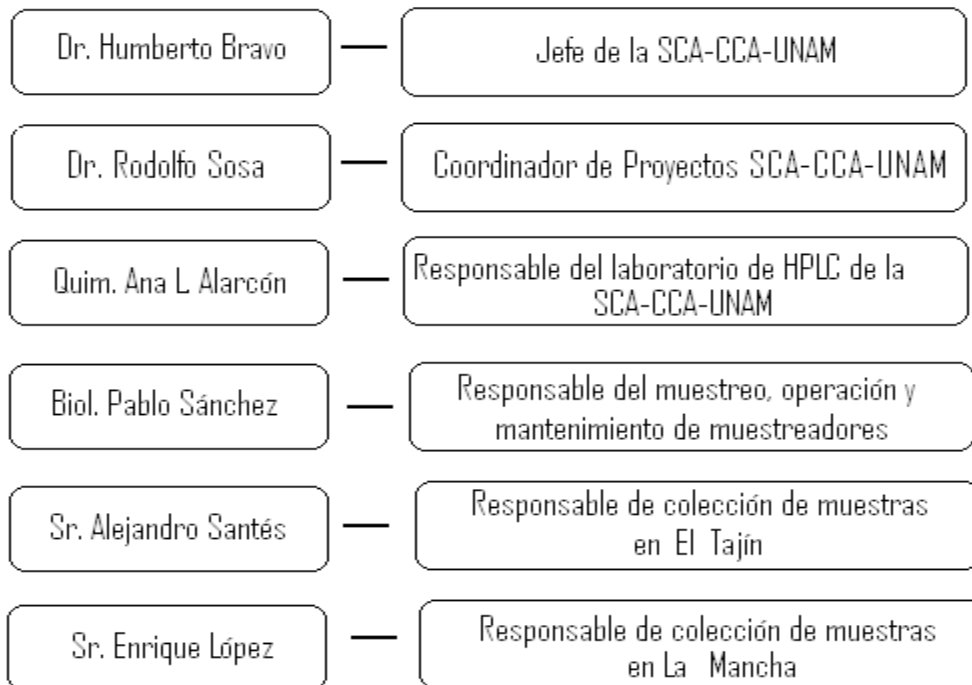


Figura 1.1.- Funciones y responsabilidades de la SCA-CCA-UNAM

- Q. Ana Luisa Alarcón Jiménez: Responsable del Laboratorio de Cromatografía de Líquidos de la SCA-CCA-UNAM.
- Biol. Pablo Sánchez Álvarez: Responsable del muestreo, mantenimiento y operación de los muestreadores automáticos de deposición húmeda y seca y de las estaciones meteorológicas automáticas en los sitios de estudio.

- Sr. Alejandro Santés García y Sr. Enrique López Barradas: Responsables de la colección de las muestras en El Tajín y La Mancha respectivamente.

A partir de la información generada en la red de monitoreo de lluvia ácida en el Estado de Veracruz, se analizó la información del periodo 2006 – 2007, la cual es la parte medular del presente estudio. Las actividades efectuadas con la información generada incluyen:

- Validación de la información
- Análisis estadístico
- Evaluación de la información mediante pruebas estadísticas no paramétricas
- Obtención de Factores de Enriquecimiento y Neutralización
- Elaboración de trayectorias de retroceso
- Propuesta de medidas de prevención y control para las fuentes localizadas.

El presente trabajo de investigación tuvo como base la siguiente:

Meta

Determinar las fuentes de precursores de la lluvia ácida presente en el Estado de Veracruz y generar estrategias que permitan la prevención, minimización y control de estas emisiones.

Objetivos

- Analizar la información de emisiones de precursores de la lluvia ácida presente en el Estado de Veracruz, tomando como punto de partida el Inventario Nacional de Emisiones.
- Identificar la presencia de lluvia ácida en el Estado de Veracruz con base en los resultados de los muestreos de deposición húmeda que la Sección

de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA-CCA-UNAM), lleva a cabo en dicho Estado.

- Seleccionar periodos de eventos de lluvia ácida para conocer su trayectoria; basados en la información generada a partir de los muestreos de deposición húmeda.
- Aplicar modelos de trayectoria de retroceso para identificar las regiones y fuentes de donde provienen los precursores que dan lugar al problema de lluvia ácida en el Estado de Veracruz.
- Proponer medidas de prevención, minimización y control en las fuentes de precursores de lluvia ácida.

CAPÍTULO 2
ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.

2.1 DEFINICIÓN DE LLUVIA ÁCIDA.

Por definición la lluvia ácida es toda aquella precipitación cuyo pH es menor a 5.65 (<http://www.epa.gov/>), este valor es inferior a 7; el cual se considera como neutro, esto nos indica que la lluvia tiene cierto grado de acidez.

Esta acidez se debe a la presencia del CO_2 que se encuentra normalmente en la atmósfera, de tal forma que al combinarse con el agua reacciona para formar ácido carbónico, que es un ácido débil.



El ácido carbónico a su vez puede disociarse en el ión hidronio y bicarbonato; el ión bicarbonato a su vez puede liberar un ión hidronio más y el ión carbonato:



Las constantes de equilibrio para las reacciones mencionadas anteriormente son:

$$\frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} = k_1 = 4.47 \times 10^{-7} \text{ mol/L} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

$$\frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = k_2 = 4.68 \times 10^{-11} \text{ mol/L} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Mediante la ley de Henry podemos establecer cuál es la concentración de CO_2 que puede contener el agua, con este valor se estima el pH del agua de lluvia que es de 5.65.

Esta ley establece que la solubilidad de un gas en agua está dada por una constante y la presión parcial del gas en cuestión:

$$[CO_2] = K_H P \quad \text{Ec. (2.6)}$$

El valor de la constante de Henry para el CO₂ a 25°C es de 0.033 mol/L•atm y la presión parcial de este gas es de 0.00036 atm⁻¹ (Masters, G, 1998).

$$[CO_2] = (0.033 \text{ mol/L}\cdot\text{atm}) (0.00036 \text{ atm}^{-1}) = 1.18 \times 10^{-5} \text{ mol/L} \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Suponiendo que todo el CO₂ disuelto en agua de lluvia pasa a formar ácido carbónico y se disocian los iones hidronio; además de que no influyen otros gases presentes en la atmósfera, se puede igualar la concentración de iones hidronio a la suma de la concentración de iones carbonato, bicarbonato e hidroxilo:

$$[H^+] = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] \quad \text{Ec. (2.8)}$$

La disociación del ión bicarbonato en carbonato e hidronio es más difícil de alcanzar, por lo tanto, se puede suponer que la concentración de carbonato es muy pequeña, dejando a la Ec 2.8 de la siguiente forma:

$$[H^+] = [HCO_3^-] + [OH^-] \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Otra ecuación que se debe satisfacer es la siguiente:

$$[H^+][OH^-] = k_w = 10^{-14} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Despejando el valor de concentración del ión bicarbonato de la Ec. 2.4, así como la concentración del ión hidroxilo de la Ec. 2.10 y sustituyéndolos en la Ec. 2.9, se tiene:

$$[H^+] = \frac{k_1[H_2CO_3] + k_w}{[H^+]} \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Bajo la suposición que todo el CO₂ pasa a formar ácido carbónico, su concentración está dada por la Ec. 2.7. Sustituyendo todos los valores en la Ec. 2.11 se tiene:

$$[H^+]^2 = (4.47 \times 10^{-7}) \times (1.18 \times 10^{-5}) + (10^{-14}) = 5.2 \times 10^{-12} (\text{mol/L})^2 \quad \text{Ec. (2.12)}$$

$$[H^+] = 2.2 \times 10^{-6} \text{ mol/L} \quad \text{Ec. (2.13)}$$

Obteniendo el logaritmo negativo de la concentración de iones hidronio, que es la definición de pH, de la ecuación 2.13, se tiene un valor de 5.65.

2.2 PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA

Diariamente se emiten a la atmósfera una gran cantidad de contaminantes producto de las actividades humanas, algunos de estos reaccionan para formar nuevos compuestos los cuales pueden ocasionar efectos diferentes a los contaminantes emitidos originalmente.

Dentro de las sustancias emitidas tenemos a los precursores de lluvia ácida, los cuales son compuestos de nitrógeno y azufre que se generan en mayor medida por la combustión de combustibles fósiles.

2.2.1 ÓXIDOS DE NITRÓGENO.

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son compuestos de nitrógeno y oxígeno que se forman en las combustiones a altas temperaturas. El término óxido de nitrógeno incluye a cualquiera de los siguientes compuestos (<http://www.epa.gov>):

- Óxido nítrico monóxido de nitrógeno (NO).
- Dióxido de nitrógeno (NO_2).

El monóxido de nitrógeno es un gas a temperatura ambiente de olor dulce penetrante, fácilmente oxidable a dióxido de nitrógeno. Mientras que el dióxido de nitrógeno tiene un fuerte olor desagradable. El dióxido de nitrógeno es de color marrón-amarillento; es un gas tóxico, irritante y precursor de la formación de partículas de nitratos ($\text{PM}_{2.5}$) en el aire ambiente. Afecta principalmente al sistema respiratorio. La exposición a corto plazo en altos niveles causa daños en las células pulmonares, mientras que la exposición a más largo plazo en niveles bajos

de óxido de nitrógeno (IV) puede causar cambios irreversibles en las vías respiratorias similares a un enfisema (*Seinfeld, et al, 1998*).

Los óxidos de nitrógeno son generados de manera natural mediante las bacterias que se encuentran en el suelo al descomponer la materia orgánica, también las descargas eléctricas contribuyen a su formación. Además de estos fenómenos, el amoníaco puede oxidarse fotoquímicamente dando lugar a los NO_x .

Los óxidos de nitrógeno también tienen fuentes antropogénicas, como lo son la quema de combustibles fósiles, ya sea para la generación de energía eléctrica o bien por motores de combustión interna. Mediante la fabricación de materiales que contienen nitrógeno puede haber pequeñas emisiones al ambiente y también durante procesos como la soldadura por arco, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita.

2.2.2 ÓXIDOS DE AZUFRE.

Los óxidos de azufre, son gases incoloros de un característico olor asfixiante. Se incluyen bajo esta denominación el dióxido de azufre (SO_2) y el trióxido de azufre (SO_3) (*www.eea.europa.eu*). La vida media en la atmósfera del SO_2 llega a ser de 50 a 120 horas. (*Seinfeld, J., 1986*)

Estos compuestos se emiten de manera natural mediante las erupciones volcánicas, la erosión de suelos, los océanos y también algunas bacterias que logran reducir cierta clase de sulfatos.

Los combustibles fósiles como el petróleo, gas natural, carbón, combustóleo, etc., contienen cantidades importantes de azufre, que al momento de efectuarse la combustión, tienen como subproducto al dióxido de azufre. La cantidad de azufre liberada hacia la atmósfera mediante la combustión de hidrocarburos es casi la misma que se encontraba en ellos antes de ser utilizados.

Estas emisiones, producto de la actividad humana, no se limitan únicamente a la combustión de energéticos, sino que además se emiten en los procesos de extracción y procesamiento de los mismos.

Uno de los procesos que más emite SO_x es la generación de electricidad en las termoeléctricas, de donde proviene la mayor cantidad de energía eléctrica que se consume en el mundo.

El SO_2 es un gas irritante y tóxico que tiene un efecto nocivo en el sistema respiratorio, afectando sobre todo las mucosidades y los pulmones provocando ataques de tos. La exposición de altas concentraciones por cortos períodos de tiempo puede irritar el tracto respiratorio, causar bronquitis y congestionar los conductos bronquiales de los asmáticos, siendo estas personas y las que padecen bronquitis crónica las más afectadas (<http://www.epa.gov/>).

2.3 PROCESOS DE FORMACIÓN DE LLUVIA ÁCIDA.

Los precursores de lluvia ácida, una vez en la atmósfera, se disocian por la acción de la radiación electromagnética proveniente del sol y generan iones nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}), que al interactuar con la humedad presente en el medio ambiente forman ácido nítrico (HNO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), que son ácidos fuertes. La dilución de estos ácidos con el agua de lluvia baja el pH de ésta, tornándola ácida. También el SO_2 puede absorberse de manera directa con el agua y formar ácido sulfúrico, proceso que casi es instantáneo (*Seinfeld, J., 1986*)

La interacción de los precursores con la humedad atmosférica puede darse de dos formas: arrastre (rain out) y lavado (wash out) (*Legge, et al, 1990*).

2.3.1 ARRASTRE

Este proceso se da al interior de las nubes, las cuales son alimentadas por las corrientes ascendentes que se saturan de vapor de agua y condensan. Dentro del aire de las corrientes ascendentes se encuentran también los precursores que al entrar en contacto con el agua reaccionan y se disuelven.



Figura 2.1.- Formación de Lluvia ácida por rain out (arrastre). Fuente: Modificada de www.readeratwork.blogspot.com/acid-rain.html

Una vez que se han formado las nubes estas pueden viajar varios kilómetros de su lugar de formación, llevándose los precursores y devolviéndolos al ambiente en forma de lluvia ácida lejos de donde fueron emitidos (*Legge, et al, 1990*).

2.3.2 LAVADO

Cuando comienza a llover, el aire que se encuentra por debajo de la nube tiene una humedad relativa menor al 100%. Al caer las gotas de la nube, estas tienden a evaporarse por efecto de la fricción del viento y la diferencia de humedad entre el aire que se encuentra debajo y el de la nube.

Conforme se va evaporando el agua de lluvia, el aire alcanza una humedad del 100%, una vez alcanzado este valor la condensación comienza a darse, se forman gotas y precipitan.

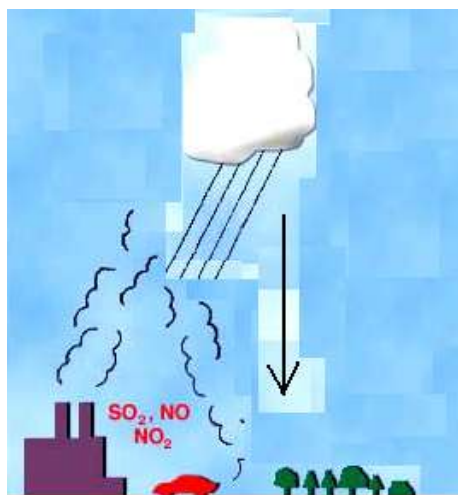


Figura 2.2.- Formación de Lluvia ácida por wash out (lavado)

Si por debajo de las nubes hay presencia de SO_x y NO_x, estos se mezclan con las gotas recién formadas, se acidifica el agua de lluvia y precipita. De esta forma la lluvia “lava” al aire que contenía a los precursores (*Martin, A., 1984*).

Mediante este proceso, los precursores no viajan grandes distancias de tal modo que los contaminantes emitidos pueden impactar cerca de las fuentes de emisión.

2.4 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA.

La lluvia ácida causa una gran variedad de efectos nocivos tanto en ecosistemas como sobre diversos materiales usados en construcciones.

La deposición húmeda puede aumentar la acidez del agua de ríos y lagos, ocasionando daños en la vida acuática, tanto animal como vegetal. Aumenta la acidez de los suelos, lo cual provoca cambios en la composición de los mismos, propiciando la lixiviación de nutrientes importantes para las plantas y movilizandolos metales tóxicos, como el cadmio, níquel, manganeso, plomo, aluminio y mercurio, que de esta forma se introducen en las corrientes de agua.

Al disminuir la cantidad de nutrientes en el suelo el crecimiento de plantas e incluso de árboles grandes se inhibe, lo que ocasiona que ciertas áreas con vegetación abundante se vuelvan estériles. Esto es más común de observar en suelos con una baja alcalinidad, es decir, con un bajo contenido de calcio que permita amortiguar la acidez del agua de lluvia (*Turco, R., 1995*)

La vegetación expuesta directamente a la lluvia ácida no sólo sufre las consecuencias del deterioro del suelo, sino también un daño directo que puede llegar a ocasionar incluso la muerte de muchas especies.

El aluminio presente en las rocas, suelo y sedimentos de los ríos y lagos, al disminuir el pH comienza a disolverse, este metal es tóxico para los peces aún en bajas concentraciones.

Uno de los efectos más importantes de la lluvia ácida en los sistemas acuáticos es el descenso en ciertas poblaciones de peces. Aunque los peces pueden morir a causa de la acidificación, lo más común es que dejan de reproducirse; teniéndose cada año una población más vieja, hasta que la especie termina por desaparecer del lago o la corriente (*Canter, L., 1986*)

La trucha y el salmón del Atlántico, por ejemplo, son particularmente sensibles a los niveles bajos de pH, los cuales interfieren con sus procesos reproductivos y con frecuencia dan origen a deformaciones en su esqueleto.

Debido a la introducción de metales pesados al sistema acuático los peces tienen concentraciones altas de estos en su carne, y algunos de éstos son para consumo humano.

También las poblaciones de algunos grupos de zooplancton, algas y plantas acuáticas se ven disminuidas, lo cual trastorna la cadena alimenticia global de los lagos.

El daño que ocasiona la lluvia ácida a ciertos materiales de construcción es más evidente, ya que día con día los monumentos, estatuas, edificios, casas habitación y muy en especial los sitios arqueológicos sufren un desgaste debido al intemperismo, que se agrava con la presencia de este tipo de lluvia.

La piedra caliza que se ha utilizado en la construcción de monumentos mayas y totonacas sufre un desgaste producido por el pH ácido de la lluvia, que reacciona con el carbonato de calcio disolviéndolo; esto genera un desgaste superficial anual de 4.4 y 4.57 $\mu\text{m}/\text{año}$ para la zona maya y totonaca respectivamente. (*Bravo, et al, 2003; Bravo, et al, 2004*)

Otro de los materiales que se ve afectado por este tipo de lluvia es el mármol, presente en gran cantidad de monumentos y estatuas que se encuentran al aire libre. También la pintura de los automóviles y metales como el bronce se desgastan por este mismo motivo.

2.5 LLUVIA ÁCIDA EN MÉXICO.

En los años sesenta fue cuando se iniciaron los primeros estudios de lluvia ácida en nuestro país, específicamente en Puerto Vallarta, Jalisco. Pero no es sino hasta los años 80 que su estudio se lleva de una manera continua, siendo la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) una de las que más datos tiene disponibles acerca de este fenómeno (*Bravo, H. 1964; Aguilar, S. 1981*).

En el Golfo de México del 20 de julio al 22 de agosto de 1986, se llevó a cabo una investigación oceanográfica por parte de instituciones de México y Estados Unidos para recabar información acerca de la química atmosférica y la lluvia ácida en las zonas costeras (*Parungo, et al, 1990*).

En el año de 1995 se realizó un estudio en la ciudad de Xalapa para determinar las características químicas del agua de lluvia y hacer una evaluación de la misma. Durante este estudio se encontró que los valores de pH más bajos se registraron durante el invierno (*Báez, et al., 1997*).

Más tarde en la misma década, se realizaron estudios sobre las zonas arqueológicas de Tulum y Palenque, para determinar la presencia de lluvia ácida (*Bravo, et al, 2003*).

Cuatro cruceros de investigación en colaboración con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, ha realizado la SCA-CCA-UNAM en el Golfo de México a partir del año 2002, con el fin de evaluar la calidad del aire en la región. En estos cruceros de investigación se hicieron mediciones de las concentraciones de hidrocarburos totales, NOx, SOx y partículas, además de los muestreos de lluvia, los cuales revelan que la mayor parte de los eventos de precipitación presentan características ácidas dando un promedio ponderado de pH de 4.94 (Bravo, et al, 2006).

En el año 2002 la SCA-CCA-UNAM puso en operación una red de cuatro estaciones para el estudio de la deposición húmeda y seca (Bravo et al, 2005), en el Estado de Veracruz. Estas cuatro estaciones se localizan en la zona arqueológica de El Tajín, la Fortaleza de San Juan de Ulúa, ambos a cargo del INAH; otro en la Estación de Ecología Costera de El Morro de La Mancha del Instituto de Ecología A.C., y uno más en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Veracruzana.

Para cada uno de los sitios se determinó el pH de las muestras de lluvia (llevado a cabo por la Q. Ana Luisa Alarcón en la SCA-CCA). Los resultados de los valores de pH obtenidos se muestran a continuación en la tabla 2.1:

Tabla 2.1.- Media de los promedios ponderados mensuales de pH. Fuente: (Herrera, C., 2007)

Año	TAJ	LMH	SJU	UV-MOC
	media	media	media	media
2003	4.64	5.16	5.7	5.08
2004	4.56	5.11	5.5	5.08
2005	4.83	4.9	4.9	4.9

A su vez en la tabla 2.2 se tiene el número total de muestras y los porcentajes de muestras cuyo pH es menor y mayor a 5.65.

Tabla 2.2.-Cantidad y porcentaje de muestras por debajo del valor de 5.65 de pH.

SITIO	AÑO	MUESTRAS	TOTAL	Ácidas (pH<5.65)	No ácidas (pH>5.65)
TAJIN	2003	51	162	90.75%	9.25%
	2004	68			
	2005	43			
LMH	2003	72	203	87.69%	12.31%
	2004	57			
	2005	74			
SJU	2003	86	244	66%	34%
	2004	80			
	2005	78			
UV-MOC	2003	57	168	88.70%	11.30%
	2004	56			
	2005	55			

El Gobierno del Distrito Federal a través de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), ha puesto en marcha a partir del 2003 una red de 16 estaciones donde se colecta la lluvia ácida. Los análisis de las muestras son realizados en la SCA-CCA-UNAM.

En los Estados de Campeche y Nuevo León también se operan estaciones de monitoreo de lluvia ácida, cuyo manejo corresponde a la Universidad Autónoma de Campeche y de la Universidad Autónoma de Nuevo León, a cargo del Dr. Javier Reyes y de la M.C. Evangelina Ramírez respectivamente. En estos sitios el agua de lluvia presenta características alcalinas, y son pocos los eventos cuyo pH cae por debajo de 5.65. Además la presencia de calcio es mayor comparada con la observada en otros sitios, lo cual puede elevar el valor de pH y neutralizar la mayor parte de los sulfatos y nitratos (*Ramírez, et al, 2007; Torres, et al, 2009*).

2.6 EMISIONES DE PRECURSORES

El Programa del Inventario Nacional de Emisiones de México (*SEMARNAT, 2006*) comenzó en 1995, con la participación del Instituto Nacional de Ecología (INE), la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos y la Asociación de Gobernadores del Oeste de Estados Unidos (*Western Governors' Association, WGA*). En el año 2000, se adicionaron a estas instituciones la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA) de América del Norte y la Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), para trabajar hacia la integración del primer Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM).

El INEM contiene las estimaciones de emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), amoníaco (NH₃) y partículas suspendidas (PS) con diámetros aerodinámicos menores a 10 µm (PM₁₀) y 2.5 µm (PM_{2.5}) correspondientes a 1999.

La cobertura geográfica del INEM abarca toda la República Mexicana; y reporta también las emisiones a escala estatal y municipal.

El año base del Primer Inventario Nacional de Emisiones de México es 1999, en el que se consideró que la mayoría de las dependencias gubernamentales contarían con información completa respecto a ese año, a fin de integrar el inventario.

Las emisiones generadas se dividen en cinco tipos específicos de fuentes de emisión:

- **Fuentes fijas.** Son los establecimientos industriales estacionarios, regulados por la SEMARNAT o las autoridades ambientales estatales o municipales correspondientes. Se establecieron umbrales de emisión para determinar si las emisiones de un establecimiento dado se considerarían dentro del inventario de fuentes fijas (es decir, emisiones superiores al umbral establecido) o bien en el inventario de fuentes de área (es decir, emisiones por abajo del umbral).

- **Fuentes de área.** Esta categoría incluye pequeños establecimientos industriales que no se clasifican como fuentes fijas; incluye actividades dispersas, como el lavado en seco y el uso comercial y doméstico de solventes, y también fuentes fugitivas de gases o partículas, por ejemplo, las actividades de agricultura y ganadería, los vehículos que circulan en caminos no pavimentados y el polvo transportado por el viento. Asimismo, las fuentes de área incluyen vehículos como locomotoras, aeronaves y embarcaciones marítimas comerciales.
- **Vehículos automotores.** Corresponden a las emisiones del escape de los vehículos automotores que circulan por carreteras y calles, incluidos automóviles particulares, motocicletas, taxis, microbuses, autobuses y camiones de carga pesada que utilizan ya sea diesel o gasolina.
- **Fuentes móviles que no circulan por carreteras.** Corresponden a las emisiones de maquinaria agrícola y de construcción.
- **Fuentes naturales.** Esta categoría incluye las emisiones naturales de COV generadas por la vegetación, de NOx provenientes de los suelos; SO₂ y partículas producidas por la actividad volcánica.

Las emisiones de cada uno de los contaminantes que se tomaron en cuenta para la elaboración del INEM, desglosado por Estado se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.3.- Resumen del INEM por Entidad Federativa (Ton/año)

Entidad Federativa	NOx	SOx	COV	CO	PM 10	PM 2.5	NH 3
Aguascalientes	9,668	7,060	27,593	54,848	3,560	1,895	22,917
Baja California	41,213	44,401	85,071	162,207	10,780	8,500	10,363
Baja California Sur	13,042	20,600	8,515	17,443	2,166	1,649	5,669
Campeche	43,236	151,756	19,795	74,437	10,814	8,045	14,650
Coahuila	157,200	175,090	65,201	147,824	31,609	29,328	26,839
Colima	22,959	192,149	13,654	27,502	12,495	8,773	6,163
Chiapas	22,411	94,126	108,030	380,490	50,804	39,204	93,976
Chihuahua	64,782	91,301	91,021	222,901	23,450	16,592	41,975
Distrito Federal	89,549	6,389	213,084	769,830	7,114	6,202	9,783
Durango	20,796	27,342	50,671	101,912	12,664	7,994	45,967
Guanajuato	50,102	134,055	106,184	269,784	24,132	16,784	52,624
Guerrero	31,622	191,124	77,017	250,905	35,060	28,112	52,280
Hidalgo	63,323	358,640	54,430	154,950	35,675	26,312	25,058
Jalisco	84,237	39,560	172,690	607,440	33,753	20,824	138,024
México	113,950	47,311	327,553	999,795	32,671	24,906	49,105
Michoacán	47,362	30,976	87,060	254,970	30,734	22,407	75,909
Morelos	14,610	13,863	35,639	88,760	8,320	5,553	11,974
Nayarit	9,826	2,856	19,135	54,942	7,603	4,635	23,987
Nuevo León	77,114	99,901	137,352	407,386	18,650	15,627	23,104
Oaxaca	32,155	61,820	95,963	332,013	45,595	35,911	61,770
Puebla	36,109	18,134	129,347	361,073	37,691	30,261	61,225
Querétaro	13,158	8,717	34,344	79,215	7,525	5,571	15,413
Quintana Roo	12,247	3,136	19,856	65,578	6,221	4,717	4,897
San Luis Potosí	30,232	85,457	57,515	180,805	25,669	18,338	34,390
Sinaloa	38,946	105,531	50,614	141,443	23,591	14,055	62,128
Sonora	41,279	159,775	54,187	148,133	41,804	23,335	49,155
Tabasco	28,805	148,836	58,576	137,538	29,218	19,306	40,841
Tamaulipas	56,592	155,267	92,847	173,518	19,683	12,196	37,514
Tlaxcala	10,010	5,631	24,338	65,714	5,337	3,826	8,342
Veracruz	110,520	342,392	209,048	547,964	129,871	93,646	124,393
Yucatán	20,402	29,828	45,367	142,937	15,151	13,000	36,372
Zacatecas	17,172	3,495	27,958	69,656	14,942	6,887	38,637
Total	1,424,628	2,856,516	2,599,654	7,493,909	794,349	574,387	1,305,442

El Estado de Veracruz emite la cantidad de 110, 519.8 toneladas de NO_x anualmente; esta cantidad representa el 7.76 % de las emisiones de todo el país,

colocándose en el tercer lugar a nivel nacional (Tabla 2.5), solo después de Coahuila y el Estado de México.

Tabla 2.4.- Valores en porcentaje de la cantidad de emisiones respecto al total nacional de los Estados del Golfo de México.

Estado	NOx	SOx	COV	CO	PM10	PM2.5	NH3
Veracruz	7.76	11.99	8.04	7.31	16.35	16.30	9.53
Tamaulipas	4.18	5.44	3.57	2.32	2.47	2.12	2.87
Tabasco	2.02	5.21	2.25	1.84	3.68	3.34	3.13
Campeche	3.03	5.31	0.76	0.99	1.36	1.40	1.12
Yucatán	1.43	1.04	1.75	1.91	1.91	2.26	2.79

Debido a la gran actividad petrolera en el Estado de Veracruz, que involucra procesos de extracción, refinación, petroquímica, así como la generación de energía mediante termoeléctricas y la actividad industrial; se ocupa el segundo lugar a nivel nacional en la emisión de óxidos de azufre, generando cada año un total de 342, 391.8 toneladas, de acuerdo con el INEM. El Estado de Hidalgo es el que ocupa el primer lugar, con un valor solo 5% mayor al de Veracruz.

Como se observa, este Estado produce una gran cantidad de precursores, es por esto que surge la necesidad de prestar atención a este problema en este Estado.

Tabla 2.5.- Lugar que ocupa el Estado de Veracruz a nivel nacional en cuanto a emisiones de los contaminantes establecidos en el INEM.

Compuesto	NOx	SOx	COV	CO	PM10	PM2.5	NH3
Lugar	3°	2°	3°	4°	1°	1°	2°

2.7 ACCIONES PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN OTROS PAISES

El tema de lluvia ácida ha generado atención a nivel internacional, y se ha logrado llevar a cabo acciones que permitan su reducción. Un buen ejemplo es el llevado a cabo por el gobierno de Estados Unidos, al incluir una sección de Control de la Deposición Ácida en el Clean Air Act (*US-EPA, 2004*).

EL Clean Air Act es una ley que regula la calidad del aire en Estados Unidos y en uno de sus apartados aborda el problema de la deposición ácida, lo más destacado para prevenir este problema es:

- Limitar la emisión de SO₂ en las principales fuentes, como las termoeléctricas.
- Elaborar un Inventario de Emisiones
- Implementar un programa de reducción de emisiones a la atmósfera a largo plazo
- Incentivar fiscalmente a industrias que reduzcan emisiones
- Multar a las empresas que excedan las emisiones establecidas
- Promover el uso de combustibles menos contaminantes en la generación de energía eléctrica
- Incentivar la investigación respecto a la deposición ácida, capacidad buffer de cuerpos de agua, agentes neutralizantes y riesgo ambiental; así como en tecnologías que minimicen las emisiones.

De la misma forma, en Europa se han tomado medidas para la reducción de emisiones de precursores de lluvia ácida. Debido a la cercanía entre los diversos países, las emisiones de un país pueden afectar a otros países, por lo cual en 1979 la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) organizó la Convención sobre Contaminación Transfronteriza, pero no fue hasta 1985 que se firmó el Protocolo de Reducción de Emisiones de Azufre, fijando como meta la reducción de un 30% de las emisiones de 1980 para 1993, la cual se alcanzó aún por países que no firmaron el acuerdo. En 1994 se firmó un nuevo tratado con una meta de reducción entre el 40 y 80 % (dependiendo del país) de emisiones del mismo año de referencia. (www.unece.org/)

El Protocolo de Sofía fue firmado en 1988 por varios países Europeos para la reducción de óxidos de nitrógeno, sin embargo el cumplimiento de este protocolo no pudo alcanzarse por todos los países debido al aumento de vehículos de combustión interna.

En 1999 a través de la UNECE se ha logrado firmar el Protocolo de Gothenburg, diseñado para abatir la Acidificación, Eutroficación y Ozono troposférico, las metas establecidas en este documento son una reducción de 63% en las emisiones de SO_x, 41% de NO_x, 40% de COV y 17% de amonio comparado con lo emitido en 1990 para el año 2010; para lo cual establece límites específicos de emisión para diferentes tipos de fuentes

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La red de estaciones de lluvia ácida de la SCA-CCA-UNAM en el Estado de Veracruz, ha tenido operando 4 estaciones, de las cuales hasta la fecha dos operan en condiciones óptimas:

- Zona arqueológica de “El Tajín”, y
- Estación de Ecología Costera “El Morro de La Mancha” del Instituto de Ecología A.C.

La selección de los lugares está basada en los criterios establecidos por la EPA para un sitio de muestreo de precipitación de tipo regional, (US-EPA, 1994); además en ambos sitios se cuenta con la infraestructura adecuada y personal laborando en el sitio, lo cual ofrece seguridad y una constante vigilancia de la operación adecuada del equipo de muestreo y de la toma de muestra. En la figura 3.1 se muestra la ubicación de ambos sitios del muestreo.



Figura 3.1.- Localización de los sitios de muestreo.

3.1.1 EI TAJÍN

La Zona Arqueológica de “El Tajín” se localiza en el Municipio de Papantla de Olarte, al Norte del Estado de Veracruz. Las coordenadas geográficas del sitio se enlistan en la tabla 3.1:

Tabla 3.1.- Coordenadas geográficas de la Zona Arqueológica de “El Tajín”

Latitud	20°26'31.1” N
Longitud	97°22'37.6” W
Altitud	118 msnm

La Zona cuenta con un clima de tipo Aw1(x'); de acuerdo a la clasificación climática de Köpen modificada (García, 1988); el cual es de tipo cálido subhúmedo, con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual. La temperatura media anual es de 24.1°C, siendo junio el mes más caluroso con 28.1°C y enero el más frío con 18.8°C de temperatura media mensual. La precipitación promedio es de 1186 mm al año, siendo climatológicamente agosto el mes más lluvioso, y marzo el mes que presenta una menor precipitación. Siendo una zona con poca altitud y cercana al mar la humedad relativa se mantiene alta a lo largo del año con un promedio de 80%.

El Municipio de Papantla limita al norte con Cazones de Herrera; al este con Tecolutla y Gutiérrez Zamora; al sureste con Martínez de la Torre; al sur con el Estado de Puebla; al oeste con Espinal, Coatzintla y Poza Rica; al noroeste con Tihuatlán. Tiene una superficie de 1,199.26 Km.2, cifra que representa 1.65% total del Estado (www.veracruz.gob.mx). La topografía es irregular, con cerros de poca altura y con predominancia de valles. Se encuentra regado por pequeños ríos que derivan del Tecolutla y Texistepec; además cuenta con 17 kilómetros de costa (www.papantlaver.gob.mx).

El 68% del territorio municipal es dedicado a la agricultura, un 11% a la ganadería, un 13% a viviendas, un 4% al comercio y el 4% restante se destina a oficinas y espacios públicos. Sus habitantes viven de la Ganadería, la agricultura, el comercio y la fabricación artesanal. Actualmente se trata de impulsar grandemente al turismo, ya que cuenta con playas, zonas arqueológicas, además de otros atractivos.

Tajín es una palabra totonaca y significa trueno. Su nacimiento se remonta al año 1000 a.C. cuando la zona empieza a ser habitada por sus primeros pobladores, aunque las primeras construcciones se remontan al año 100 de nuestra era. Es a partir de entonces que surge una comunidad que habría de seguir ganando importancia en la región hasta alcanzar su plenitud y auge en el 600 d.C., dentro del horizonte Clásico. (*Zaleta, L., 2001*).



Figura 3.2.- Pirámide de los Nichos, El Tajín.

Después del año 1000 habría de empezar la decadencia de la urbe, misma que consumaría 200 años más tarde, cuando es abandonada por completo, sin haberse nunca consolidado como un núcleo importante de población totonaca.

3.1.2 EL MORRO DE LA MANCHA

El Instituto de Ecología, A.C. tiene a su cargo el Centro de Investigaciones Costeras llamado también CICOLMA, el cual está situado aproximadamente a 30 Km al noreste de ciudad José Cardel sobre la carretera federal número 180, en el municipio de Actopan.

Las coordenadas geográficas del sitio se muestran a continuación en la tabla 3.2:

Tabla 3.2.- Coordenadas geográficas de La Mancha

Latitud	19° 35' 21.6" N
Longitud	96° 22' 49.7" W
Altitud	2 msnm

La región cuenta con un clima de tipo Aw1, cálido subhúmedo con un porcentaje de lluvia invernal entre el 5 y 10.2% del total anual.

El Centro de Investigaciones Costeras La Mancha (CICOLMA) promueve la investigación multidisciplinaria en zonas costeras, tanto básica como aplicada, con un especial énfasis sobre la relación entre ecosistemas terrestres y costeros. Cuenta con una superficie de 70 hectáreas (www.inecol.edu.mx).

Desde el punto de vista geomorfológico, la zona de La Mancha corresponde a una sección de la planicie costera Sur del Golfo de México. La llanura litoral actual incluye: A) una depresión prelitoral con laguna y pantanos, B) dunas transversales C) una costa mixta de forma irregular que se alterna con playas estrechas de poco oleaje y acantilados.



Figura 3.3. Centro de Investigaciones Costeras La Mancha (CICOLMA), Veracruz.

Se presentan tres ambientes contrastantes: mar, laguna costera y comunidades terrestres. El manglar ocupa un área aproximada de 190 hectáreas, las dunas costeras son ejemplos de sistemas médanos del centro de Veracruz. Cicolma está situado en el límite de la provincia Biótica Veracruzana, y tiene una importancia zoogeográfica, las especies de vertebrados registrados son: anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Las aves migratorias provienen de Alaska, Canadá y Estados Unidos de Norteamérica. Tiene una zona de arrecifes donde la especie importante es el pulpo.

En el año de 1977, fue decretada zona de reserva. Aquí se estudia la descomposición y flujo de nutrientes, la vegetación interacción planta animal, organismos del suelo y reciclaje de desechos entre otros.

3.2 MUESTREO

Una de las partes más importantes para la realización del presente estudio es el muestreo, la logística a seguir debe ser la adecuada para garantizar que la calidad de la información obtenida es óptima.

La figura 3.4 muestra el protocolo para la recolección de las muestras hasta su llegada al laboratorio para su posterior análisis, cabe señalar que para el diseño

del muestreo se tomaron en cuenta los criterios establecidos por el National Acidic Deposition Program (NADP) y la EPA (NADP,2004;US-EPA,1994).

Los recipientes utilizados para la recolección de agua de lluvia son botellas de 250 ml, las cuales están fabricadas de polipropileno de alta densidad (Nalgene), el cual es un material inerte a los componentes del agua de lluvia.

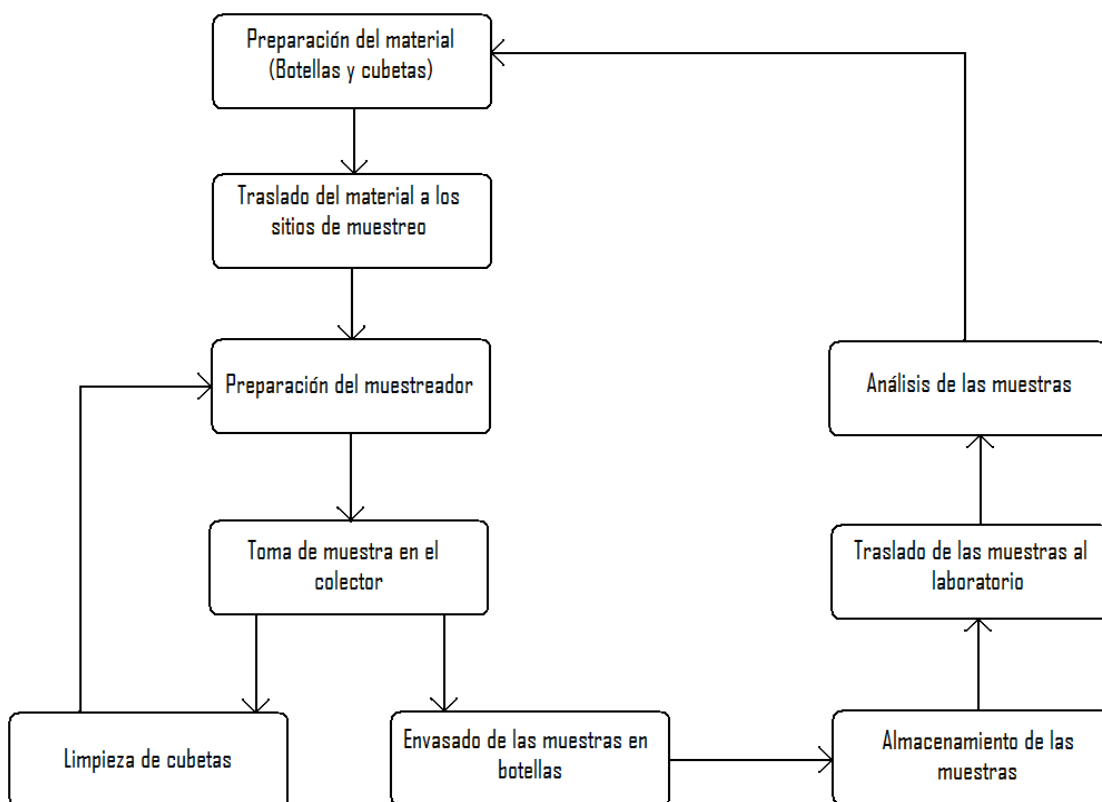


Figura 3.4.- Esquema de cadena de custodia del material y de las muestras de depósito atmosférico llevado a cabo en la SCA-CCA-UNAM

Antes de ser enviadas a los sitios de muestreo, las botellas son lavadas y enjuagadas con agua destilada y desionizada, para asegurar que la composición del agua de lluvia recolectada en las mismas no se vea alterada. Una vez limpias, se transportan a los puntos de estudio, se almacenan en un sitio limpio y se asegura que no estén cubiertas del polvo.

Los colectores utilizados para el muestreo de lluvia fueron Aerochem Metrics Modelo 301, que consisten en un dispositivo de dos cubetas en las cuales se colecta la deposición seca y húmeda en forma separada. Este sistema cuenta con un sensor, el cual al detectar la presencia de lluvia, activa un mecanismo el cual destapa la cubeta destinada al depósito húmedo y tapa la cubeta de depósito seco, una vez terminado el evento de lluvia, el sistema vuelve a su posición original; esto evita el mezclado de las partículas de polvos con la lluvia, ya que si se mezclan, no sería fácil distinguir qué proceso atmosférico incorporó las diferentes especies químicas, ya sea las gotas de lluvia o bien las partículas atmosféricas, asimismo se puede presentar una neutralización que en un momento dado no permitiría detectar la presencia de lluvia ácida.



Figura 3.5.- Colector de depósito húmedo y seco, estación meteorológica y pluviómetro ubicados en El Tajín Aerochem Metrics Modelo 301

En cada uno de los sitios se recolecta la muestra de lluvia por lo general a las 10 de la mañana. Una vez que la muestra ha sido recolectada, la persona encargada de recogerla, lava la cubeta con agua desionizada y la inserta de nuevo en el

colector. Este procedimiento se lleva a cabo cada vez que se tiene un evento de lluvia.

De manera simultánea se toma lectura del volumen de precipitación del pluviómetro acoplado al colector, también se mide el pH y en algunas ocasiones la conductividad de la muestra.

Una vez colectada la muestra en la botella, se etiqueta con los datos que se obtuvieron de las mediciones en campo en un formato mostrado en la figura 3.6, después son colocadas en un refrigerador a 4°C con el fin de evitar un cambio en la composición química de las muestras.

El formulario es rectangular con un borde doble. En la esquina superior izquierda hay un logo circular con el texto 'CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA' y 'UNAM' alrededor de una imagen de un paisaje con montañas y un sol. A la derecha del logo, el texto dice 'CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA' y 'Sección Contaminación Ambiental'. En el centro, está el título 'DEPOSICIÓN HÚMEDA' y el subtítulo 'IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA'. Abajo de esto, hay campos con líneas para escribir: 'Sitio de muestreo', 'Período de muestreo', 'Inicio del evento' y 'Temperatura' (con una línea para escribir), 'pH' y 'Precipitación pluvial' (con una línea para escribir y 'mm' al final), y 'Conductividad' (con una línea para escribir y 'µs' al final).

Figura 3.6.- Etiquetas colocadas para la identificación de muestras

Bimestralmente se realizan campañas de recolección de muestras en donde personal de la SCA-CCA-UNAM viaja a cada uno de los sitios para traer las muestras, este viaje es aprovechado también para bajar la información meteorológica, dar mantenimiento a los equipos y atender distintos problemas que pudieran presentarse. Durante el traslado las muestras siguen a baja temperatura mediante su transporte en hieleras.

Las muestras son recibidas en el laboratorio por la Química responsable del mismo (Quim. Ana Luisa Alarcón J., ver figura 1.1), quien realizará el análisis de las mismas. Además de las botellas con agua de lluvia, el responsable del laboratorio recibe un reporte donde se especifican los datos de las muestras recolectadas.

El reporte antes mencionado se va llenando después de recolectar el agua de lluvia de cada evento, por la persona encargada de la operación del muestreador en cada uno de los sitios; los datos que contiene el reporte son: volumen de lluvia, temperatura de la muestra, pH y conductividad medida en campo, fecha del evento, hora de inicio y fin del evento de lluvia; estos últimos resultan indispensables para la posterior aplicación del modelo de trayectorias de retroceso. Las muestras se van enumerando de acuerdo a la fecha en la que se van presentando los eventos; además se hacen observaciones acerca del estado del tiempo, o de algún evento que a criterio del operador deba ser tomado en cuenta.

Los reportes se hacen por triplicado, uno para el operador, otro para el encargado del laboratorio y uno más que se archiva en la SCA-CCA-UNAM, adicionalmente se lleva una bitácora en cada sitio con la información a detalle sobre el muestreo para aclarar dudas en caso necesario.

3.3 ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

El análisis químico de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio de la SCA-CCA-UNAM a cargo de la Química Ana Luisa Alarcón Jiménez.

Los parámetros a determinar son: pH, conductividad, aniones y cationes. Dentro de los aniones los que se cuantifican son: cloruro (Cl^-), nitrato (NO_3^-) y sulfato (SO_4^-). Los cationes analizados son los siguientes: sodio (Na^+), amonio (NH_4^+), potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}). Los parámetros antes mencionados son los recomendados por el protocolo del NADP en el rubro de deposición húmeda (*NADP,2004*). Se sugiere además el análisis de carbonatos y bicarbonatos, sin embargo, su presencia es baja en muestras con valores bajos de pH. De la información obtenida en años anteriores se decidió no cuantificar estos dos iones, ya que la gran mayoría de las muestras presentan valores de pH bajos; de esta forma se optimiza el tiempo de análisis.

3.3.1 MEDICIÓN DE pH.

La medición del pH de las muestras se realizó con la ayuda de un potenciómetro Corning pH meter modelo 420 Orion; a una temperatura de 25°C. El instrumento se calibra con tres soluciones buffer de pH=7, pH=4 y pH=10 respectivamente, a una temperatura de 25°C. El potenciómetro consta de un electrodo con una solución interna de cloruro de potasio, el cual mide la diferencia de potencial entre la solución y la muestra a analizar. Mediante la ley de Nernst se relaciona la diferencia de potencial observada con la concentración de H⁺, y una vez conocida esta concentración se calcula el pH.



Figura 3.7.- Potenciómetro y conductímetro utilizados para las mediciones de pH y conductividad.

3.3.2 MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD

Los valores de conductividad se obtuvieron mediante un conductímetro modelo HORIBA D-24, a una temperatura de 25°C. Este instrumento tiene un intervalo de medición que va de los 0.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 199.9 S/cm. La calibración previa a la medición se realiza con una solución estándar de cloruro de potasio (KCl), la cual tiene un valor de conductividad de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a una temperatura de 25°C.

El instrumento consta de una celda con dos electrodos, en donde se aplica una diferencia de potencial, lo cual genera una corriente eléctrica. Una vez conocidas estas dos variables (diferencia de potencial y corriente eléctrica) es posible

calcular la resistencia de la muestra. El valor de la resistencia es inversamente proporcional al valor de la conductancia que al multiplicarse por la constante de celda nos da la conductividad.

3.3.3 CUANTIFICACIÓN DE ANIONES Y CATIONES

La determinación de aniones y cationes de las muestras de agua de lluvia se realizó mediante la técnica de Cromatografía de Líquidos de Alta Eficiencia (HPLC); la cual es un método de separación de mezclas moleculares por medio de una fase móvil en estado líquido. Para este caso en particular se uso el método de intercambio iónico.

A continuación se describen las características de algunos componentes básicos del cromatógrafo utilizado:

- Bomba Waters, modelo 510 HPLC pump, de doble pistón, con un intervalo de presión de 0-6000 psig.
- Detector de conductividad Waters 432
- Integrador de datos. Waters 746
- Columnas:
 - a) Para aniones se utilizó una columna HAMILTON PRP-X100 de alta resolución, con un diámetro interno de 4.6 mm, un diámetro externo de 75 mm y 15 cm de longitud. El material e empaque es una resina de polimetacrilato con un grupo funcional de amonio cuaternario. El tamaño de la partícula es de 6 μm y la capacidad es de $(30 \pm 3) \mu\text{eq/ml}$.
 - b) Para cationes se utilizó una columna Waters cationes M/D, con diámetro interno de 4.6 mm, diámetro externo de 50mm y 15 cm de longitud, con tamaño de partícula de 10 μm y una capacidad de $(12.0 \pm 0.2) \mu\text{eq/L}$. El material de empaque es una resina de divinilbenceno-estireno con un grupo funcional de ácido sulfónico.



Figura 3.8.- Cromatógrafo empleado para la cuantificación de aniones.

Los límites de detección y la precisión para cada uno de los iones a determinar se presentan en la tabla 3.3:

Tabla 3.3.- Límites de detección y precisión de cada uno de los iones en PPM.

ión	Na⁺	NH₄⁺	K⁺	Mg²⁺	Ca²⁺	Cl⁻	NO₃⁻	SO₄⁼
Límite de detección	0.07	0.04	0.03	0.06	0.09	0.05	0.3	0.3
Precisión	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.007	0.004	0.005

El proceso a seguir para la determinación de los iones se ilustra de manera más clara con la ayuda de la siguiente figura:

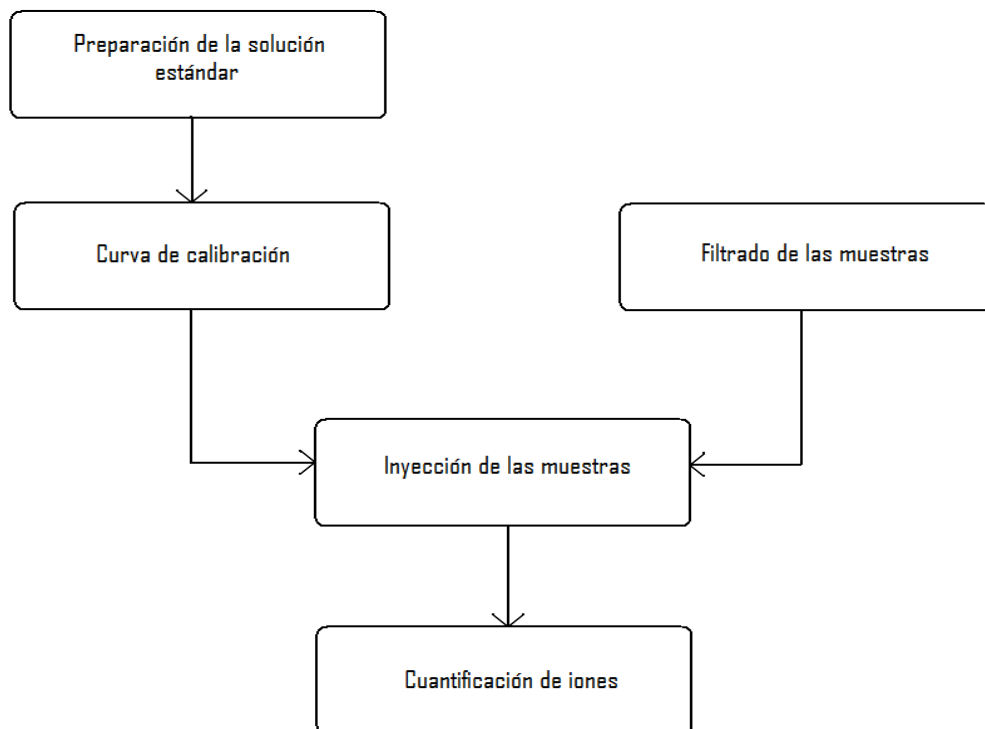


Figura 3.9.- Esquema del proceso de determinación de iones por HPLC

El primer paso es la preparación de las soluciones patrón, con las cuales se va a calibrar el cromatógrafo, estas soluciones se preparan a partir de sales (tabla 3.4) de cada uno de los compuestos a evaluar, las cuales son calidad de reactivo.

Tabla 3.4.- Sales utilizadas en la preparación de la soluciones patrón

Ion	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁼
Sal	NaCl	NH ₄ Cl	KCl	MgSO ₄ .7H ₂ O	CaCl ₂ .2H ₂ O	NaCl	NaNO ₃	Na ₂ SO ₄

Una vez obtenida una solución patrón de 10 ppm de cada uno de los iones, esta se diluye para obtener concentraciones de 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0 ppm. Estas soluciones son introducidas en el cromatógrafo a través de un inyector, cuya capacidad es de 0.1 ml, esta cantidad de muestra es llevada junto con la fase móvil hacia el interior de la columna; una vez que entran en contacto con la columna, los distintos iones se distribuyen entre la columna y la fase. Los que se

encuentran en la columna se empiezan a separar de ésta poco a poco, dependiendo de su afinidad a la misma; así, los más afines tardan más tiempo en salir o eluir que los que lo son menos. Los distintos iones se identifican según su tiempo de retención, el cual es el tiempo que permanecen en la columna; y se cuantifican mediante la altura o área integrada en el registro.

El área y/o la altura de los picos de los cromatogramas son proporcionales a la concentración del ión en las soluciones patrón. Para poder cuantificar adecuadamente la concentración de iones en las muestras esta relación debe tener un coeficiente de correlación de al menos 0.999.

Por otra parte, las muestras deben ser previamente filtradas a través de un filtro Millipore de 0.22 μm , para eliminar los sólidos en suspensión que pudieran dañar el equipo.

Con las muestras filtradas y la curva de calibración realizada, se pueden introducir las muestras al cromatógrafo; se inyectan 0.3 ml, de los cuales solo pasan 0.1ml, al término del tiempo de retención que es de 16 minutos. Los valores de área y altura que se observan, son comparados con aquellos obtenidos de las soluciones patrón para su cuantificación.

3.4 MODELOS DE TRAYECTORIAS DE RETROCESO.

Los modelos de trayectoria inversa o de retroceso son herramientas importantes para el estudio del transporte de contaminantes en la atmósfera. Se aplican regularmente para establecer la relación entre las regiones donde se localizan fuentes de emisión de contaminantes y las zonas receptoras de interés.

Este tipo de modelos los desarrolla la NOAA en Estados Unidos y la ECMWF en Europa. Con estos modelos se observa el desplazamiento de las masas de aire, el cual tiene como fin un uso en meteorología, que puede extrapolarse al campo de contaminación ambiental si suponemos que dentro de esas masas de aire también se transportan los contaminantes de interés emitidos por las actividades humanas.

Los modelos que se aplican para este tipo de análisis son de tres tipos y cada uno de ellos tiene diferentes variantes, y se usan ya sea de manera global o regional para una zona en particular.

3.4.1 MODELOS ESTADÍSTICOS

En estos modelos, se busca establecer las relaciones entre las fuentes de emisión y los sitios de deposición (*NAPAP, 1990*).

Este tipo de modelos proporcionan valores preliminares acerca de los efectos que ciertos cambios en los valores de emisión podrían producir en los sitios de deposición, además, no requieren sofisticados equipos de cómputo para su buen desempeño. Como ejemplos de estos modelos se tienen el STATMOD (*Clark, et al., 1987*) y el MODEL T (*Clark, et al., 1989*).

3.4.2 MODELOS LAGRANGIANOS.

Los modelos lagrangianos estudian el transporte de una parcela de aire desde su origen hasta el lugar en que se deposita. Estos modelos toman en cuenta además de las emisiones, la deposición seca, las transformaciones químicas y la deposición húmeda, estas últimas dos características son representadas mediante una razón de cambio de primer orden, es decir, las ecuaciones utilizadas para el desarrollo de este tipo de modelos son lineales, esto en particular es el punto débil de estos modelos, ya que en la realidad, el transporte en la atmósfera se da de manera no lineal (*NAPAP, 1990*).

Estos modelos no consideran la convergencia ni divergencia de la parcela de aire en la cual se encuentra el contaminante. A pesar de ser más complejos que los estadísticos, el grado de las ecuaciones no es tan elevado, por lo que no se requiere de mucho tiempo ni de sistemas computacionales tan sofisticados para llevar a cabo las corridas del modelo.

Debido a que se basan en modelos matemáticos linealizados y a la facilidad con que estos se pueden desarrollar mediante el uso de las computadoras existentes sin consumir demasiado tiempo, son los que más se utilizan. Ejemplos de este tipo de modelos se mencionarán a continuación.

3.4.2.1 HYSPLIT

El modelo HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) (Draxler, *et al.*, 2003), es un modelo completo que calcula tanto trayectorias simples como dispersión de contaminantes y también simulaciones de deposición.

Los cálculos de trayectoria muestran la dirección general, pero no es lo suficientemente preciso para identificar fuentes específicas puntuales. La razón de dispersión se calcula a partir del perfil de difusión vertical, la cizalladura y la deformación horizontal del campo de viento.

El modelo usa datos meteorológicos registrados en una base de datos, los cuales se pueden obtener de la National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos (NOAA). Este modelo tiene una resolución de 1° x 1° en la horizontal a escala global, y para el caso de Estados Unidos la resolución es de 40 x 40 Km.

Este programa puede ser usado libremente desde la red, y los resultados los podemos obtener en tres dimensiones. La escala vertical puede ser mostrada en milibares o en metros.

El uso de este modelo es simple, ya que casi todos los datos que necesita se encuentran archivados por la NOAA, y se actualiza constantemente. La información que se requiere es básicamente del sitio y se enlista a continuación:

- Latitud
- Longitud

- Altitud
- Fecha y hora del evento
- Determinar si la trayectoria es hacia adelante o hacia atrás

Como resultado se obtiene un mapa con la trayectoria que ha seguido la parcela antes de incidir sobre la región de estudio.(Figura 3.10)

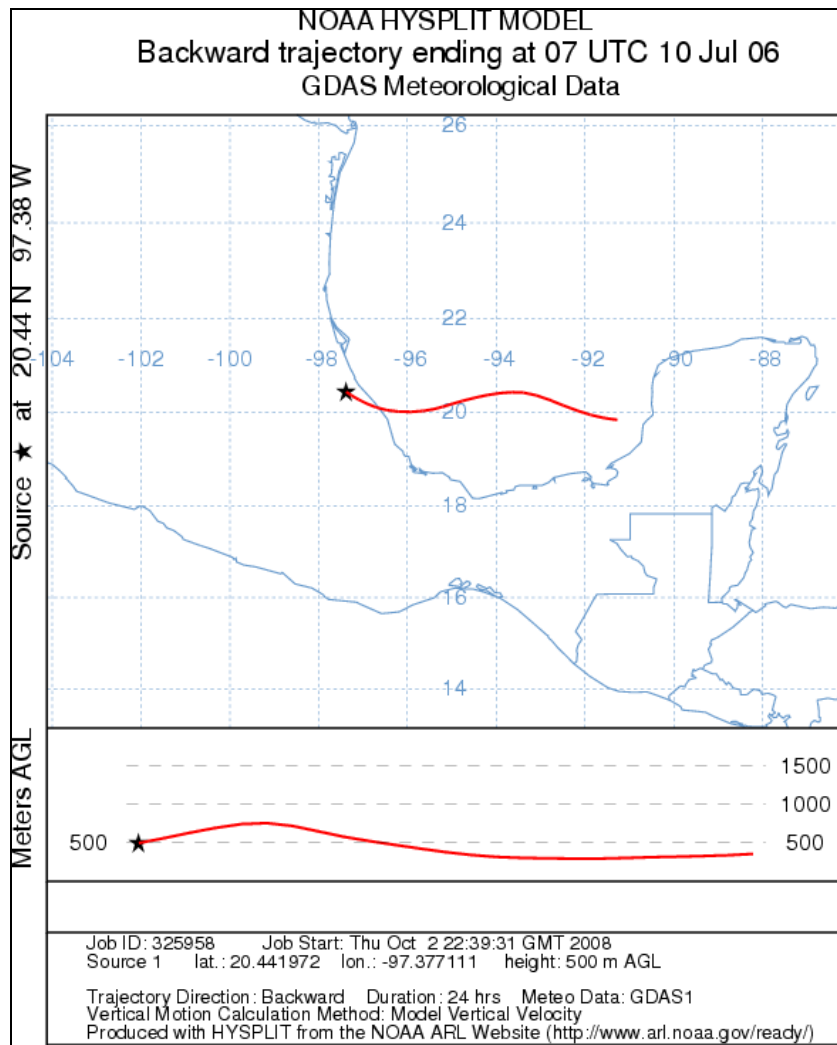


Figura 3.10.- Trayectoria inversa del evento de lluvia del día 10 de julio de 2006 para El Tajín

Debido a la gran cantidad de imágenes que se tienen que analizar por cada evento de lluvia, no es viable tener tantas imágenes, por lo cual es recomendable

general para temperatura y presión atmosférica (solo por citar algunos); se encuentran divididos en mallas, para nuestro caso de $1^\circ \times 1^\circ$ (~ 110 Km).

Cada uno de los puntos de la malla meteorológica se asocia a un valor de temperatura, presión, humedad, etc., y en particular un valor de velocidad del viento. Cabe señalar que el viento es un vector, con una magnitud, dirección y sentido. Dado que es un vector se puede desglosar en componentes unitarias; esto es:

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde u, v y w son las componentes zonal, meridional y vertical del viento respectivamente; i, j y k son los vectores unitarios asociados a cada valor.

Para el caso de la componente vertical de la velocidad del viento podemos usar tres opciones que el modelo nos proporciona:

- w.- La cual es la componente vertical de la velocidad propiamente dicha
- θ .- Suponemos que la parcela solo se moverá verticalmente de acuerdo al gradiente adiabático seco
- P.- La parcela se moverá en la vertical solo en un valor de presión constante.

Cada una de estas opciones tiene distintas suposiciones y se puede usar con diferentes objetivos, para el desarrollo del presente trabajo se usará la primera opción, donde se ocupa el valor de velocidad vertical que el modelo proporciona para estimar el movimiento en la vertical de la parcela de aire. Las otras opciones pueden ser usadas por ejemplo para seguir el patrón de una onda tropical que se presenta en un solo nivel de presión, o seguir la trayectoria de masas de de aire donde sabemos no hay condensación ($\theta=\text{cte}$).

Una forma simplificada de la ec. 3.1 sería solamente dejando las componentes horizontales; quedando de la siguiente manera:

$$\vec{V} = \vec{u} + \vec{v} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Si el movimiento se da en la horizontal, una fracción de la malla meteorológica sería como la mostrada en la figura 3.10, donde a cada punto se le asigna un valor de u y v .

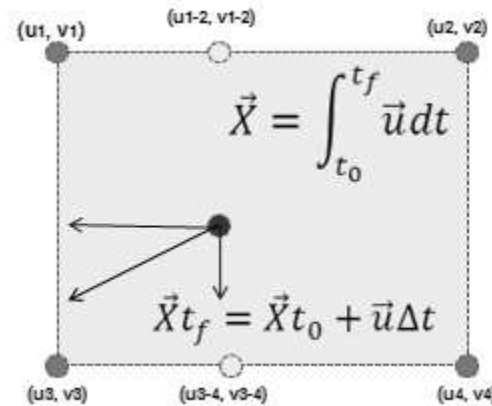


Figura 3.13.- Esquema de una fracción de la malla meteorológica con valores de viento.

Si se desea conocer el valor de la velocidad del viento en una parte dentro de la malla, se interpola de manera lineal partiendo de los valores ubicados en los extremos de la malla, ya que se conocen cuales son las componentes unitarias del vector solo se suman para conocer el valor de la velocidad en el punto deseado.

Si se requiere conocer cuál ha sido la trayectoria recorrida se necesita un paso adicional; si la dirección es hacia adelante, la posición de la parcela de aire es dada por:

$$\vec{X} = \int_{t_0}^{t_f} \vec{u} dt \tag{Ec. (3.3)}$$

Donde X es el vector de posición, t_0 y t_f el tiempo inicial y final. Al resolver la ecuación 3.3 se tiene:

$$\vec{X}_{t_f} = \vec{X}_{t_0} + \vec{u} \Delta t \tag{Ec. (3.4)}$$

Donde X_{t_f} , es la posición en el tiempo final, X_{t_0} la posición en el tiempo inicial; por lo que el recorrido va a estar determinado primordialmente por la velocidad en el tiempo t_0 y el tiempo que se estipule; HYSPLIT hace el cálculo del recorrido para

cada hora tomando en cuenta las tres componentes del viento, así como las variaciones en temperatura, presión y humedad de la parcela que puedan influir en el comportamiento de la misma.

La incertidumbre que proporciona el modelo es del orden del 10 al 15% de la distancia recorrida, por lo cual a distancias mayores, mayor es la incertidumbre que se tiene.

3.4.2.2 FLEXPART

FLEXPART (Stohl, *et al.*, 2005) es un modelo de dispersión cuya diferencia con los demás es que considera la dispersión por turbulencia.

Este modelo se deriva del modelo meteorológico usado por el Centro Europeo de Predicción Numérica del Tiempo a Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés); los datos que usa son los archivados en el ECMWF y se encuentran disponibles a través de internet. También pueden ser usados datos en cualquier formato GRIB, los cuales pueden obtenerse de la NOAA, el ECMWF o el NCAR.

FLEXPART puede desarrollarse solamente en computadoras que tengan un sistema operativo LINUX. El lenguaje en que fue creado este modelo es FORTRAN 77.

3.4.3 MODELOS EULERIANOS

Los modelos eulerianos incluyen las variaciones en el tiempo de las variables meteorológicas, las cuales pueden representarse en forma de mapas sucesivos, donde cada uno de ellos que corresponde a distintos tiempos de la distribución de la variable de interés.

La concentración de ciertas especies de contaminantes se define como función del espacio y del tiempo, y se relacionan mediante ecuaciones diferenciales, este modelo toma en cuenta el transporte horizontal y vertical del viento, así como las

reacciones químicas de los diferentes compuestos que se encuentran presentes en la atmósfera. Una de las desventajas es que al ser muy complejo, se necesita de más tiempo para llevar a cabo una corrida y también se requiere de un equipo adecuado.

3.4.4 APLICACIÓN DE TRAYECTORIAS EN ESTUDIOS DE LLUVIA ÁCIDA EN MÉXICO.

La incorporación de trayectorias de retroceso a la evaluación de la lluvia ácida se llevó a cabo en un estudio realizado en la SCA-CCA-UNAM donde se determinaron las consecuencias que la deposición ácida causaba al material de construcción de las pirámides de la zona arqueológica de El Tajín (*Bravo, et al., 2006*).

Las trayectorias se realizaron utilizando el modelo HYSPLIT. Se clasificaron las trayectorias en dos tipos de eventos, aquellos que presentaron valores de pH mayores a 5.6 y aquellos que presentaron pH menor a dicho valor. La cantidad de eventos ácidos fue mayor que la cantidad de eventos no ácidos.

Al revisar las trayectorias de las parcelas que dieron origen a esos eventos, se nota que no hay una tendencia definida ni clara respecto al origen de los precursores, lo que hace suponer que las fuentes regionales son las que ejercen una mayor influencia en la acidificación de la lluvia.

Posteriormente en un estudio más detallado que se llevó a cabo para determinar las características del transporte atmosférico hacia El Tajín (*Kahl, et al., 2007*). Se usó una gran cantidad de fuentes de información meteorológica que incluyeron campos globales de reanálisis, análisis de trayectorias y mediciones de viento local.

De igual forma el modelo utilizado en este estudio fue el HYSPLIT a un tiempo de recorrido de 120 horas. En el estudio se concluye de que en la zona predominan vientos de componente Este y Norte, aunque no se encontró una relación directa entre las rutas de transporte de la lluvia y su acidez.

Otra de las ocasiones en las que se ha recurrido al análisis de trayectorias, fue en el cuarto crucero de investigación en la parte sur del Golfo de México en el año 2003 (*Bravo, et al., 2006*). Este crucero oceanográfico se llevó a cabo del 3 de septiembre al 5 de octubre en el buque oceanográfico “Justo Sierra”, por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Para este estudio se contó la cooperación de la Secretaría de Marina y la SCA-CCA-UNAM.

La SCA-CCA-UNAM, fue responsable de la evaluación de la calidad del aire, y la evaluación de la deposición húmeda asociada a la contaminación atmosférica el Golfo de México, para lo cual se colectaron 12 muestras de lluvia de las cuales se obtuvo su trayectoria a un tiempo de 72 horas antes del evento.

Estas trayectorias fueron utilizadas para determinar la ruta del transporte de los contaminantes e identificar las fuentes potenciales de estas sustancias.

Se utilizaron tres niveles de referencia, 500, 1000 y 1500 m, que son las altitudes a las que las nubes precipitan normalmente. Cabe señalar que una trayectoria es representativa si la tendencia es la misma en los tres niveles, si difieren mucho entre sí, la confianza que se puede tener en ellas disminuye.

Para este estudio en particular, la dirección predominante de las trayectorias es del este, ya que durante esta temporada los vientos alisios, tienden a ser más intensos.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS

CAPÍTULO 4. RESULTADOS.

4.1 ASEGURAMIENTO DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN.

Como parte de todo trabajo de campo, debe existir un protocolo a seguir tanto en la medición como en la validación de la información, con el objetivo de tener datos confiables.

Para el presente trabajo de investigación, las etapas a seguir fueron:

- Determinar los objetivos a seguir
- Selección de los sitios de muestreo
- Preparación de los equipos de medición
- Recolección de muestras
- Medición de parámetros
- Validación de información
- Análisis estadístico

Cada una de estas etapas fue llevada a cabo conforme a los lineamientos establecidos en el Programa de Aseguramiento y Control de Calidad (QA/QC, por sus siglas en inglés), de la US-EPA. (*US-EPA, 1994*).

Una de las actividades más importantes emprendidas dentro del QA/QC, fue seleccionar y validar aquellas muestras que no hayan sido contaminadas por factores externos, tales como polvo y/o vegetación arrastrados por el viento durante el evento y/o manipulación inadecuada por parte de los operadores. Estos factores pudieron observarse en el contenido de los envases que llegaban al laboratorio, los cuales presentaban visiblemente polvo y/o restos de hojas y/o insectos. Estas muestras fueron descartadas para su medición.

En cuanto aquellas muestras que no presentaban rastros de polvo ni vegetación, se midieron los parámetros físicos y químicos. Una vez obtenidos los resultados, se procedió a seleccionar aquellos que presentaban signos de manipulación por parte de los operadores o contaminación por pequeñas cantidades de polvo

imperceptibles a simple vista, pero con un alto contenido en sales que indicaba su posible presencia.

En la tabla 4.1 se muestran la cantidad total de muestras recolectadas, analizadas y validadas. De un total de 226 muestras para las dos estaciones en los dos años de muestreo, se descartaron 24 para su medición por su apreciable contenido de polvo y/o vegetación, lo cual nos deja un total de 202; de estas, se descartaron 8 muestras más debido a sus altos valores en sodio y cloruro que indicaban manipulación por parte de los operadores, lo cual pudo darse ya sea por descuido o por no usar guantes de látex al momento de recolectar la muestra. La Mancha fue la estación de la cual más muestras fueron descartadas, principalmente por la presencia de vegetación en la muestra colectada.

Tabla 4.1.- Resumen de la cantidad de muestras analizadas y validadas.

Sitio	Año	Muestras recibidas	Muestras analizadas	Muestras validadas	pH<5.65	pH>5.65
El Tajín	2006	43	42	42	35	7
El Tajín	2007	43	38	38	32	6
El Tajín	2006-2007	86	80	80	67 (83.7%)	13 (16.3%)
La Mancha	2006	72	56	54	46	10
La Mancha	2007	68	66	60	48	18
La Mancha	2006-2007	140	122	114	94 (77%)	28 (23%)
Total	2006-2007	226	202	194	161 (79.7%)	41 (20.3%)

4.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE pH Y CONDUCTIVIDAD.

La característica principal que distingue a la lluvia ácida de la no ácida es sin duda el pH. De la tabla 4.1 se observa que para el caso de El Tajín más del 80% de los eventos de precipitación tienen un pH por debajo de 5.65, mientras que para La Mancha es de 77%.

Más a detalle, de acuerdo con la figura 4.1, la estación de El Tajín reporta más del 50% del total de sus datos con un pH por debajo de 5; lo cual nos da una idea de la acidez del total de las muestras. Para La Mancha en el año 2006 cerca del 75% de los datos se encontraron por arriba del valor de 5; mientras que en el 2007 cerca del 50% se encontró por debajo de este valor (parecido a El Tajín). Puede apreciarse también de la figura, que los valores de El Tajín son más uniformes para los dos años respecto a los de La Mancha.

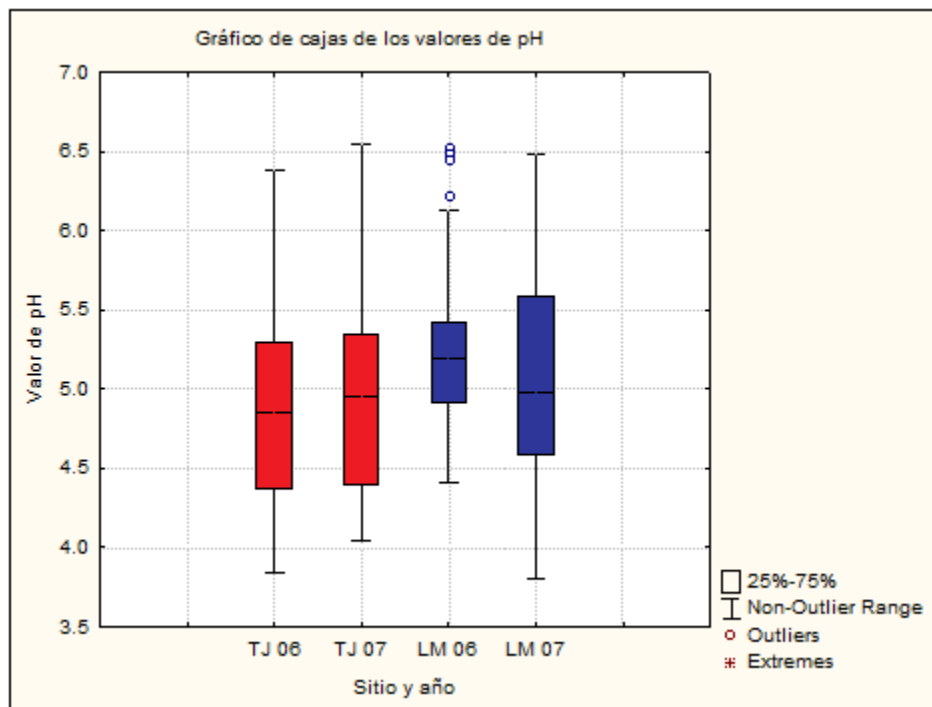


Figura 4.1 Gráfico de cajas de los valores de pH para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM)

Los valores de pH, así como de conductividad, aniones y cationes, de cada una de las muestras se encuentran en el Anexo II.

De los valores individuales de pH, se obtuvieron los promedios ponderados tanto mensuales como anuales, esta ponderación se realizó con los valores de precipitación de cada uno de los eventos.

En la figura 4.2 se observan los promedios anuales ponderados de las dos estaciones. El promedio más bajo corresponde a El Tajín 2006, con un valor de 4.58, mientras que el más alto es para La Mancha 2006 cuyo valor fue de 5.08.

En el periodo 2003-2005 el valor más bajo de pH había correspondido siempre a El Tajín, lo cual se repitió en 2006; sin embargo, para el año 2007 el pH para ambos sitios es muy similar, siendo 4.78 para La Mancha, y 4.79 para El Tajín.

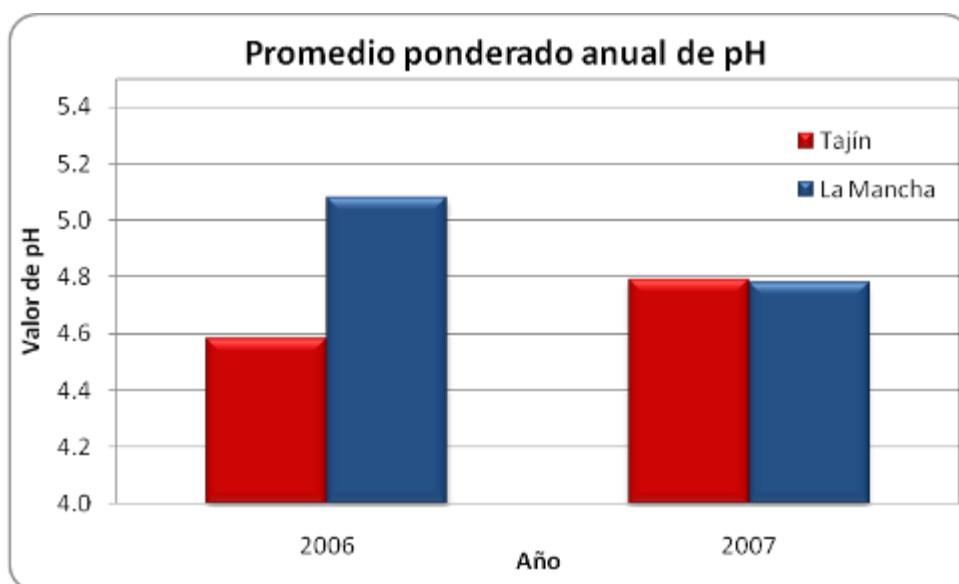


Figura 4.2.- Promedio ponderado anual de pH para El Tajín y La Mancha

Con el objetivo de hacer un análisis del comportamiento a lo largo del tiempo en el cual se ha estado monitoreando los sitios de estudio, se ha recurrido a utilizar los promedios ponderados mensuales de los años 2003-2007. De esta forma se puede apreciar cómo ha variado la acidez del agua de lluvia y si existen periodos en los cuales el valor de pH aumenta o disminuye de manera apreciable.

En la figura 4.3 se tienen los promedios ponderados mensuales de pH de ambos sitios para el periodo 2003-2007, en esta se puede observar que en la mayoría de los casos los valores de pH son mayores en la Mancha que en El Tajín, lo cual es

consistente con los promedios ponderados anuales de este periodo, a excepción de 2007.

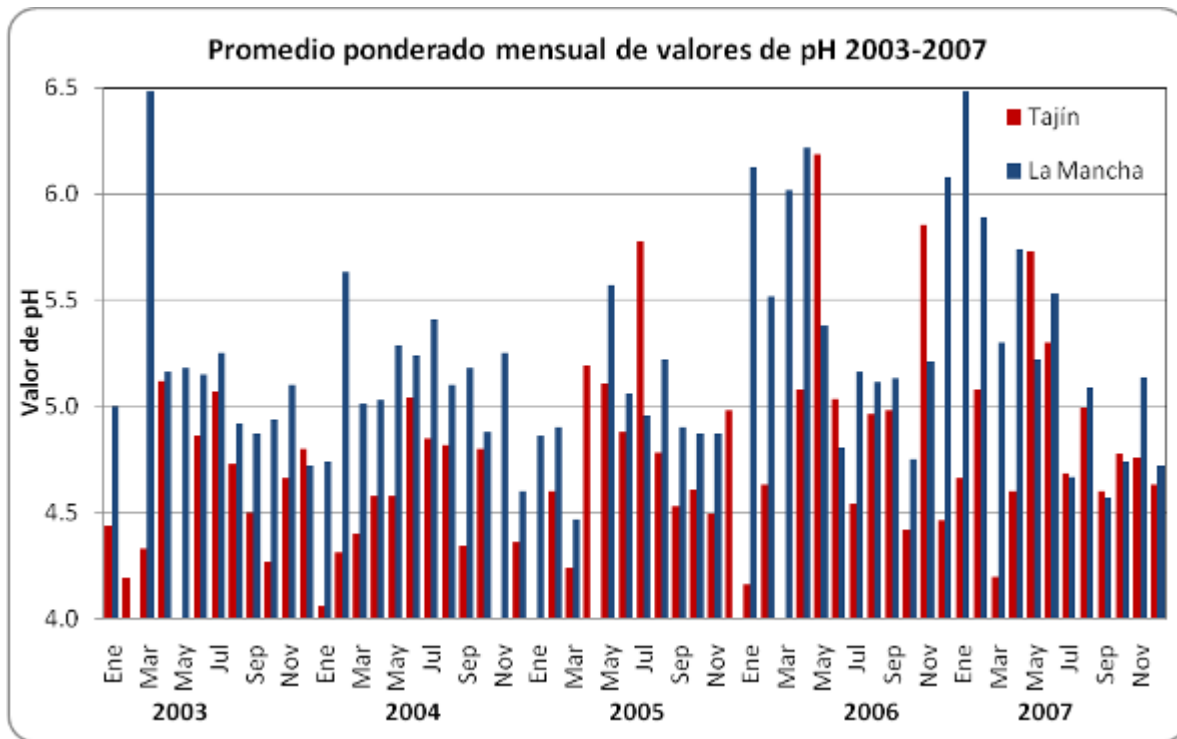


Figura 4.3.- Promedios ponderados mensuales de pH 2003-2007 para El Tajín y La Mancha

Se puede afirmar con base en esta figura, que el intervalo de los promedios ponderados mensuales para El Tajín se encuentra entre 4 y 5, mientras que para La Mancha es entre 4.5 y 5.5.

Una forma de obtener la información más suavizada, es la de presentar los datos en forma de media móvil (*Wonnacott, et al, 1981*); las figuras 4.4 y 4.6, muestran los promedios ponderados mensuales de pH para El Tajín y La Mancha respectivamente, a los cuales se les ha agregado una línea que representa la media móvil obtenida trimestralmente.

Cabe señalar que ante la falta de algunos datos se procedió a la imputación de los mismos, lo cual es la estimación de los datos faltantes; estos datos se obtuvieron mediante el promedio simple de pH de los mismos meses de diferentes años. Se

optó por este método debido a su sencillez y solo con el objetivo de observar tendencias en el comportamiento de pH durante el periodo de muestreo.

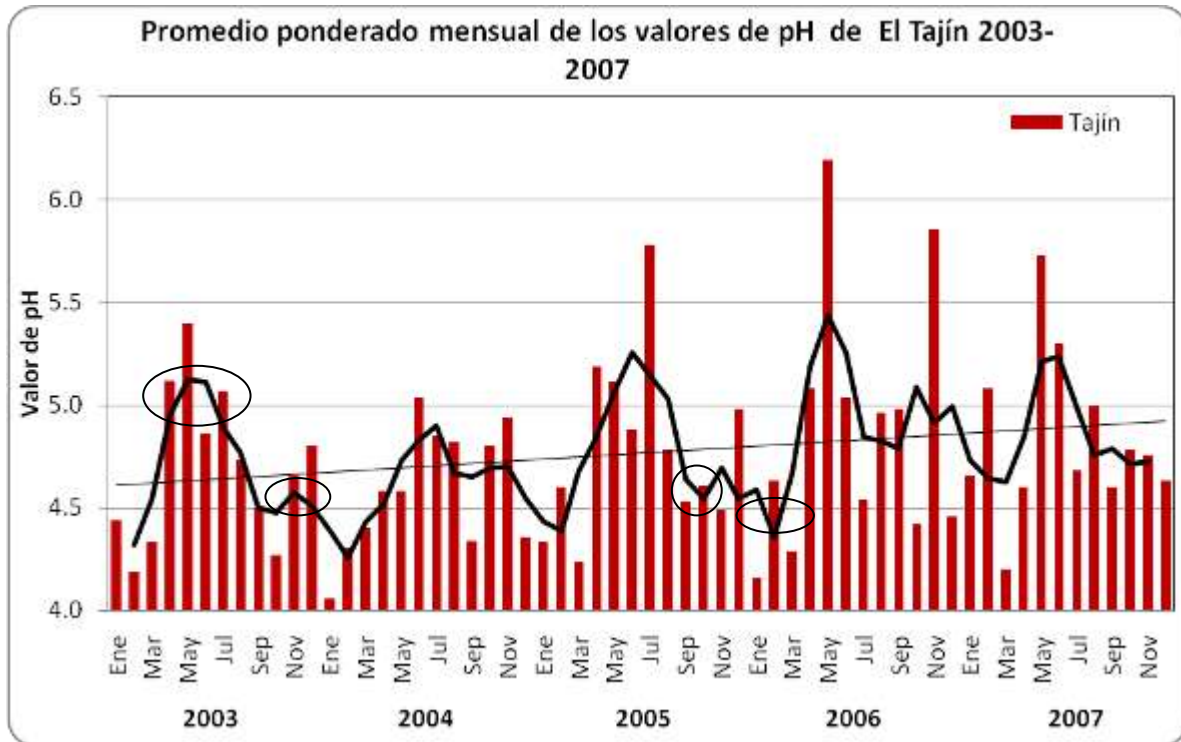


Figura 4.4.- Promedios ponderados mensuales de pH 2003-2007 para El Tajín

De la figura 4.4 se aprecia que existen dos máximos relativos de pH, uno de ellos en la temporada de secas y uno más al finalizar la temporada de lluvias; asimismo se tienen dos mínimos relativos, uno de ellos al iniciar el año y el segundo a la mitad de la temporada de lluvias.

La presencia de estos máximos para El Tajín puede deberse a que en la temporada de secas, al igual que al finalizar la temporada de lluvias, existe una menor cantidad de precipitación, lo cual agrega mas componentes de la deposición seca al agua de lluvia combinado con un menor volumen de dilución, causando una neutralización parcial, que se ve reflejada en el aumento de pH.

En lo que respecta a los mínimos, el que se tiene en la temporada invernal puede deberse a la forma en la que se da la precipitación en esta época del año, la cual es originada principalmente por frentes fríos conocidos regionalmente como “nortes” (*Tejeda, et al., 1989*). Una de las características de estos eventos es la súbita llegada de aire con velocidades que rebasan en ocasiones los 120 Km/hr, que van desplazando al aire en superficie y generando nubosidad y precipitación a su paso. Dado que existen fuentes que emiten precursores de lluvia ácida al norte del sitio, pueden ser estas las que propicien la acidez en esta época del año, este punto se analizará a detalle más adelante.

Durante el periodo de agosto-septiembre, en el cual se da el segundo mínimo, el patrón de vientos es totalmente diferente, ya que en esta temporada los vientos alisios se establecen con más fuerza, originando que la precipitación sea principalmente por el paso de ondas tropicales. Estas ondas por lo general tienden a pasar sobre el Golfo de México antes de llegar a los sitios de muestreo, por lo que se pondrá especial interés sobre las fuentes potenciales ubicadas en el mismo para su posterior análisis.

Se agregó una línea de tendencia a los valores mensuales de pH, para observar posibles cambios en el comportamiento de los valores; de esta se observa que ha habido un ligero incremento de pH, lo cual sugiere que la tendencia de la acidez es a disminuir a lo largo de los cinco años de muestreo.

En la figura 4.5 se aprecia el comportamiento de la media móvil para El Tajín, y además se obtuvo un comportamiento promedio del valor de pH a lo largo del año que se repite durante los cinco años de información que se tienen; estos valores se obtuvieron promediando las medias móviles de los mismos meses de diferentes años.

Es interesante observar que el comportamiento promedio tiene un patrón muy similar al observado y descrito anteriormente: dos máximos y mínimos relativos. Los máximos de los valores de pH se presentan en los meses de junio y

noviembre y los mínimos en febrero y septiembre. El comportamiento observado es periódico y se adecúa de buena manera con el promedio.

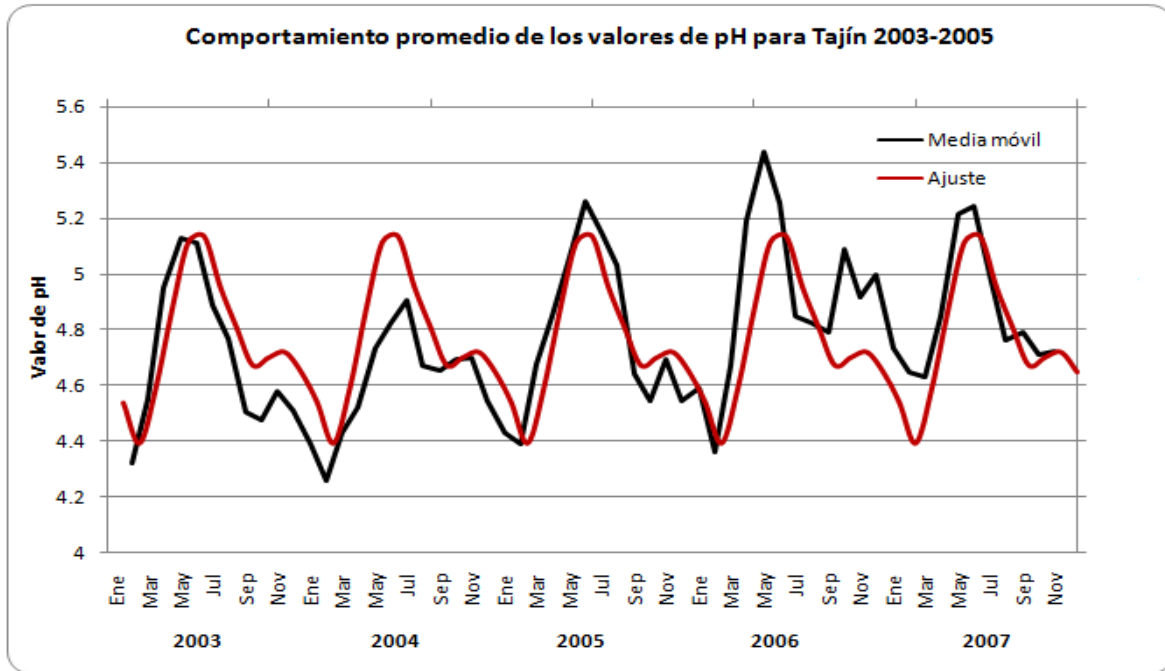


Figura 4.5.- Comportamiento promedio y observado de los valores de pH 2003-2007 para El Tajín

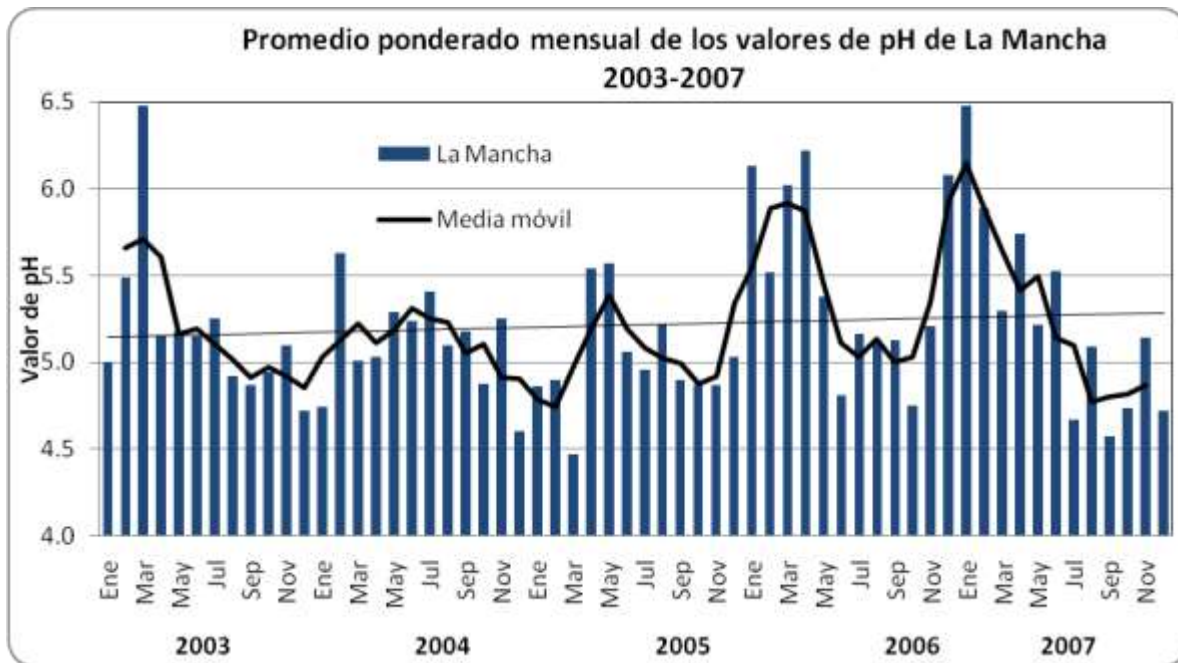


Figura 4.6.- Promedios ponderados mensuales de pH 2003-2007 para La Mancha

Para La Mancha se obtuvo también la media móvil, aunque para este sitio el patrón observado no es muy claro. En la figura 4.6 se observa de manera general un máximo y un mínimo. Este mínimo se tiene por lo general en la parte final de la temporada de lluvias (septiembre-noviembre). Durante esta temporada el patrón de vientos es primordialmente del Este, lo cual sugiere que las fuentes de precursores para La Mancha se localizan hacia el Este.

En la figura 4.7 se muestra el comportamiento promedio de los valores mensuales, observándose que el máximo se encuentra en el mes de marzo y el mínimo en septiembre, aunque el patrón calculado (línea azul) no coincide completamente con el observado.

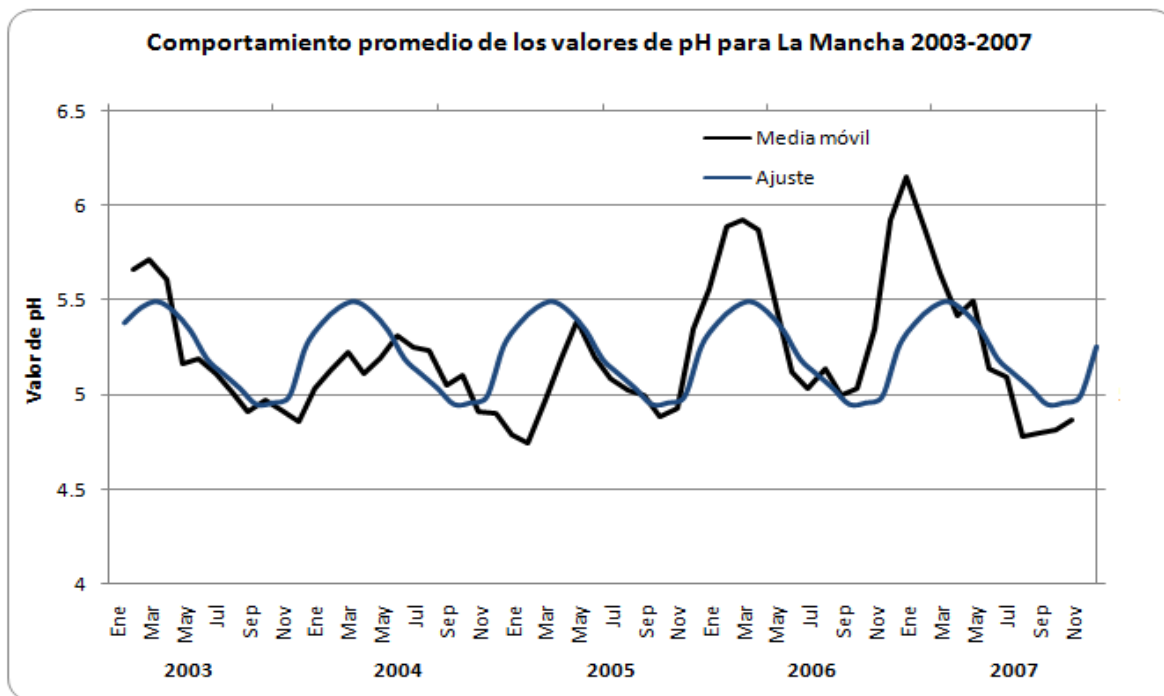


Figura 4.7.- Comportamiento promedio y observado de los valores de pH 2003-2007 para La Mancha

En lo que se refiere a conductividad, la mayoría de las muestras tienen valores por debajo de 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figura 4.8), presentando los valores más altos aquellas muestras con un alto contenido de sales, esto se da sobre todo en la temporada de secas, ya que la precipitación arrastra gran parte del contenido de aerosoles y

partículas provenientes del suelo o del mar al momento de la misma en una cantidad de lluvia pequeña; mientras que en la temporada de lluvias, la gran cantidad de agua disponible que se tiene logra una mejor dilución, lo cual se refleja en un valor más bajo de la conductividad.

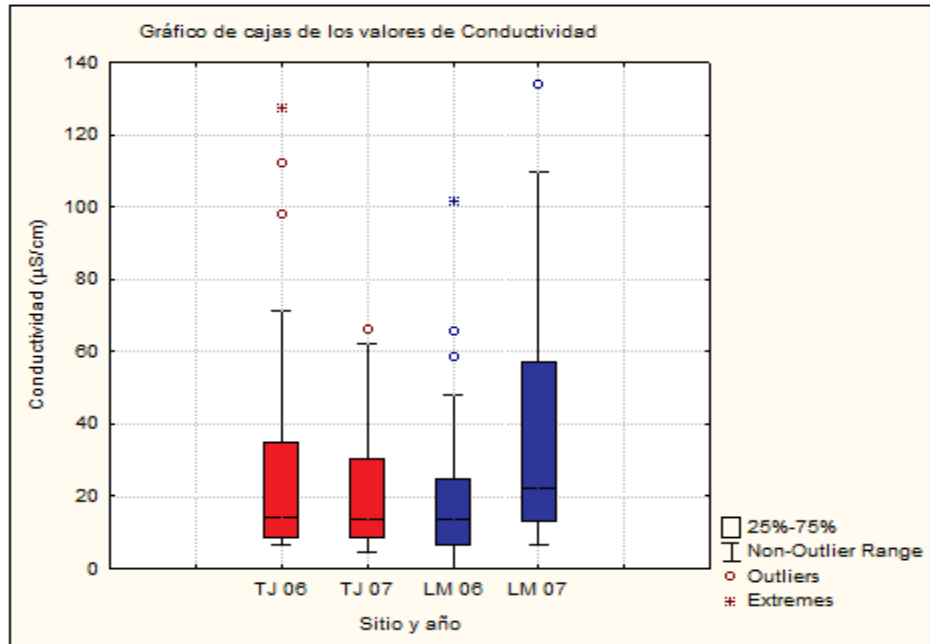


Figura 4.8.- Gráfico de cajas de los valores de conductividad para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM)

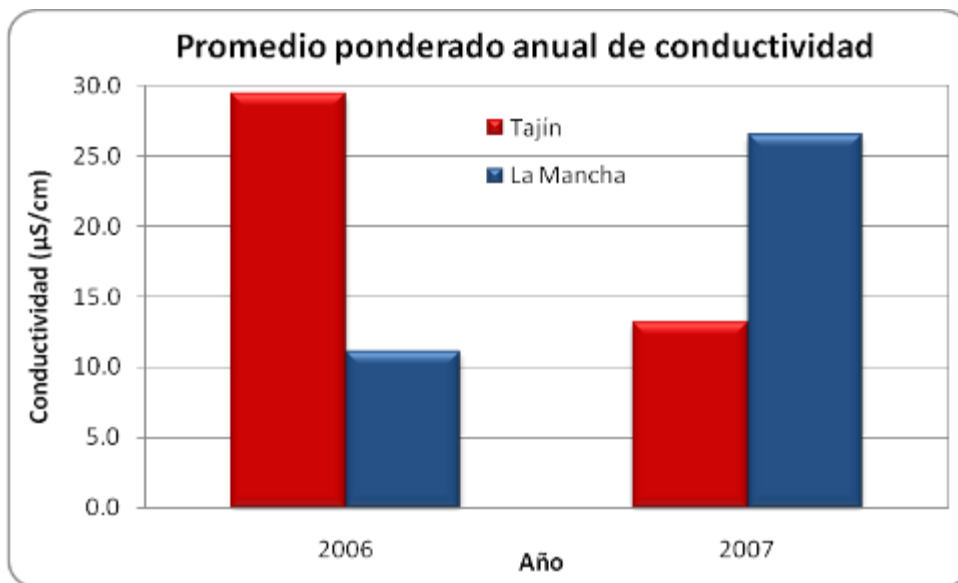


Figura 4.9.- Promedio ponderado anual de conductividad para El Tajín y La Mancha 2006-2007

En la figura 4.9 se muestran los promedios ponderados anuales de conductividad para El Tajín y La Mancha, esta variable no presenta un comportamiento uniforme en ambas estaciones, disminuyendo para El Tajín de un año a otro y aumentando para La Mancha. El valor más alto corresponde para El Tajín 2006, mientras que el más bajo para La Mancha en ese mismo año. Este contraste entre los valores de conductividad se debe a que, por ser un promedio ponderado con el volumen de lluvia, unos pocos eventos extremos en cuanto a volumen de precipitación que tengan un valor de conductividad elevado pueden subir el promedio ponderado.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ANIONES Y CATIONES.

Los cationes analizados en el presente trabajo fueron: sodio, amonio, potasio, magnesio y calcio; mientras que los aniones fueron: cloruro, nitrato y sulfato. A continuación se muestra el análisis del contenido de estos iones en el agua de lluvia obtenida en los sitios de estudio.

4.3.1 CONTENIDO DEL IÓN SODIO EN AGUA DE LLUVIA.

El primer catión a considerar es el sodio, del cual se muestran los valores obtenidos de las muestras en la figura 4.10, se observa que la mayoría de los valores están por debajo de los 100 $\mu\text{eq/L}$, siendo más bajos los valores para El Tajín que para La Mancha en general.

Los eventos extremos son pocos comparados con el total de muestras y se dan más en La Mancha que en El Tajín, esto por encontrarse La Mancha en un ambiente 100% marino.

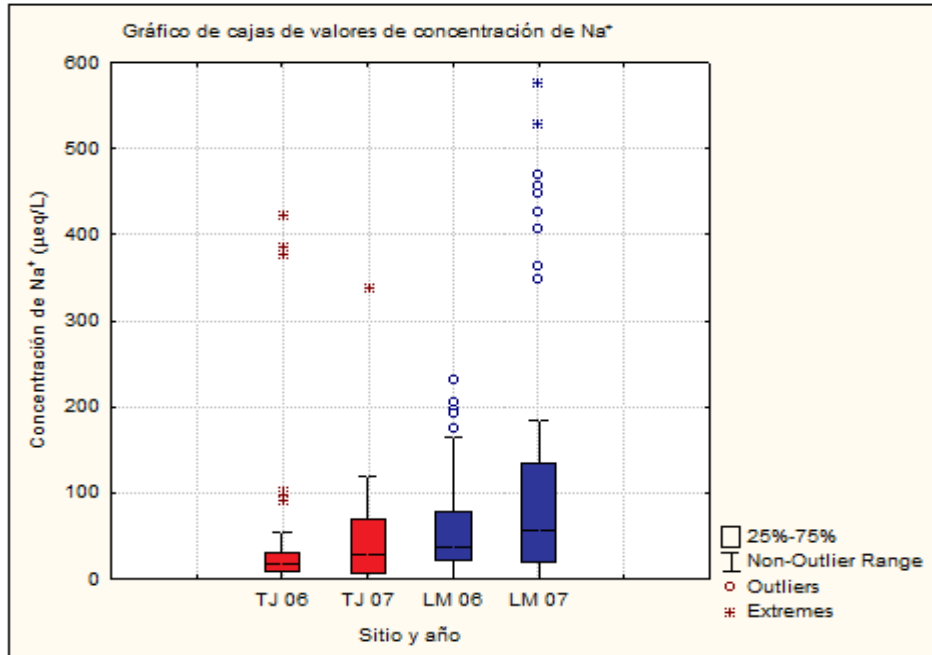


Figura 4.10.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión sodio para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM)

En la figura 4.11 se tiene el promedio ponderado anual del ión sodio para ambos sitios (El Tajín y La Mancha). La Mancha 2007 presenta el valor mayor de sodio, mientras que el Tajín para 2007 presenta el valor más bajo.

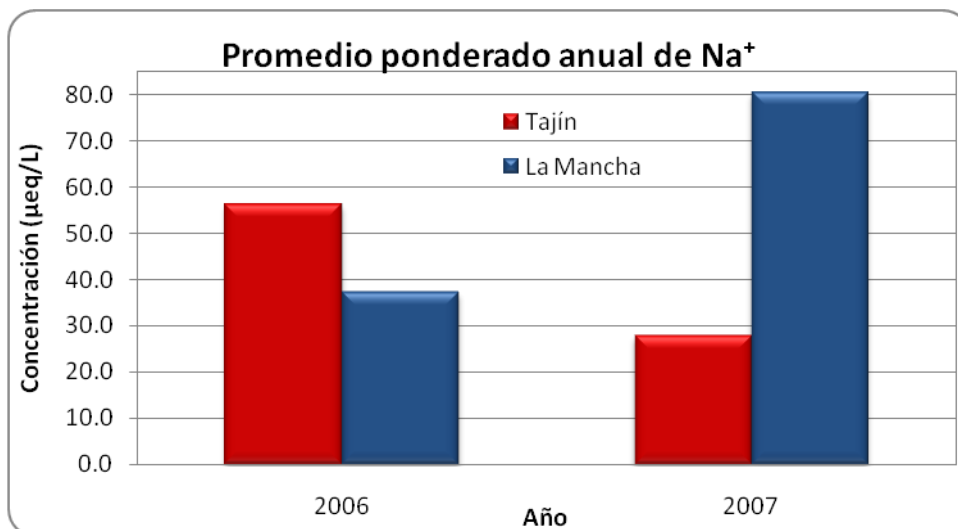


Figura 4.11.- Promedio ponderado anual de concentración de ión sodio para El Tajín y La Mancha 2006-2007

Este comportamiento en el valor ponderado anual de las concentraciones del ión sodio, es consistente con el comportamiento de la conductividad, ya que el sodio es uno de los iones con un alto valor de conductividad específico.

4.3.2 CONTENIDO DEL IÓN AMONIO EN AGUA DE LLUVIA.

La mayor parte de los valores de amonio se encuentran por debajo de los 40 $\mu\text{eq/L}$, siendo La Mancha el sitio que presenta valores más bajos comparados con El Tajín (figura 4.12). En relación al promedio ponderado anual es El Tajín donde se presenta el valor más alto para los dos años (figura 4.13), mientras que en La Mancha el promedio sube ligeramente para el 2007.

Esto puede deberse en parte a que algunas de las fuentes principales de amonio son la descomposición de la materia orgánica proveniente de la ganadería y las actividades agrícolas que incorporan fertilizantes al suelo. Dado que la zona arqueológica de El Tajín se encuentra rodeada por una gran región agropecuaria, el amonio presente en el agua de lluvia puede ser atribuido a fuentes locales.

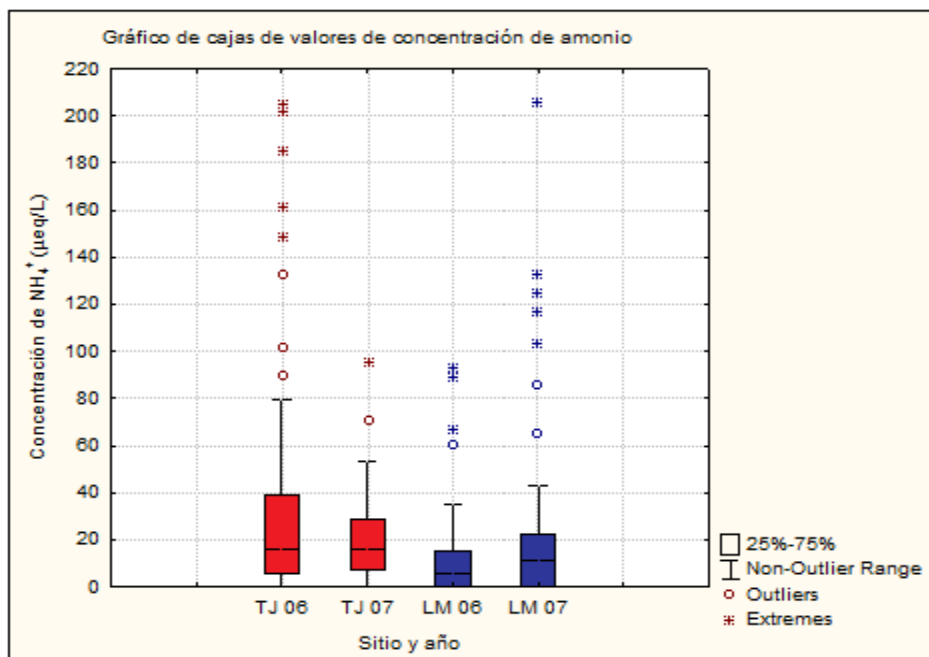


Figura 4.12.- Gráfico de cajas de los valores de concentración de ión amonio para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

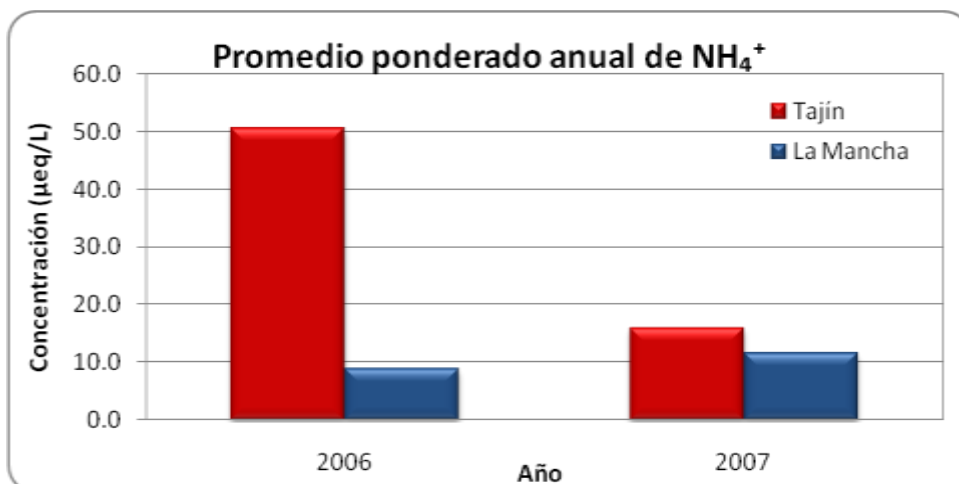


Figura 4.13.- Promedio ponderado anual de concentración de ión amonio para El Tajín y La Mancha 2006-2007

4.3.3 CONTENIDO DEL IÓN POTASIO EN AGUA DE LLUVIA

La concentración del ión potasio es más baja que los demás iones en las muestras analizadas, gran parte de ellas con un contenido menor a los 10 µeq/L; de la figura 4.14 se observa que al un 50% de las muestras de La Mancha tiene un contenido de potasio mayor al que 75 % de las muestras de El Tajín.

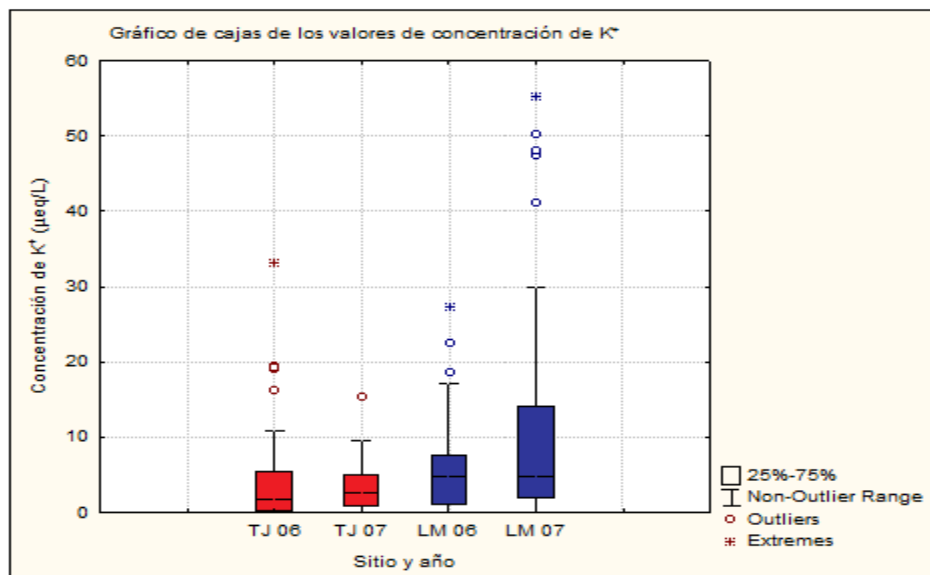


Figura 4.14.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión potasio para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

En cuanto el promedio ponderado anual, resulta una mayor contribución el año 2007 para La Mancha, mientras que el promedio más bajo se tiene en El Tajín para ese mismo año (figura 4.15).

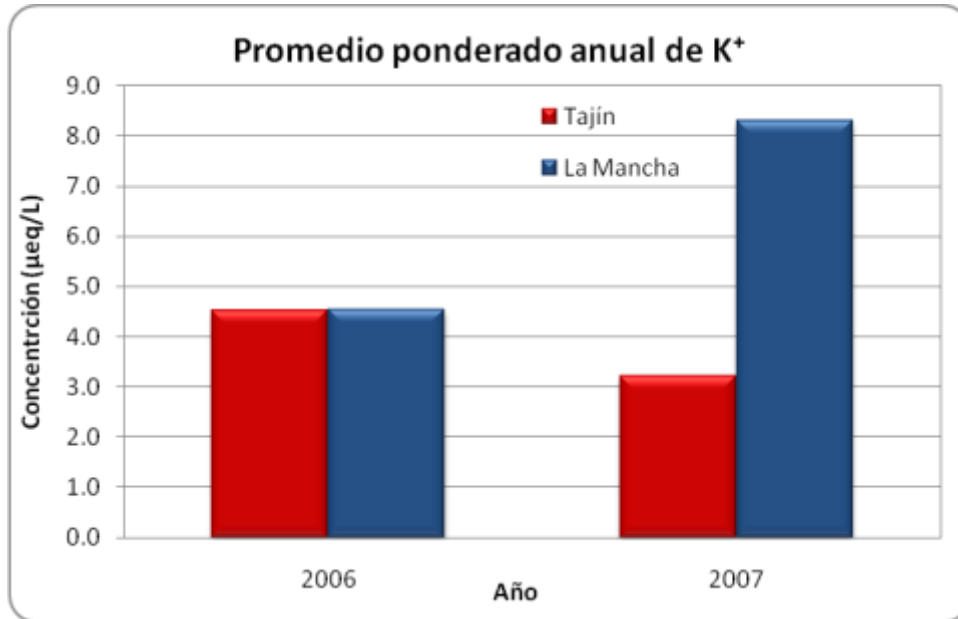


Figura 4.15.- Promedio ponderado anual de la concentración del ión potasio para El Tajín y La Mancha 2006-2007

4.3.4 CONTENIDO DEL IÓN MAGNESIO EN AGUA DE LLUVIA

Los valores de concentración de magnesio en las muestras de agua de lluvia, se mantienen bajos comparados con otros iones; sin embargo son un poco más altos que los de potasio. De manera similar al potasio, La Mancha es donde se presentan valores de concentración más altos que El Tajín (figura 4.16); esto se ve reflejado en el promedio ponderado anual, ya que el valor más alto para El Tajín, corresponde al año 2007, no logra rebasar el más bajo de La Mancha para ese mismo año (figura 4.17).

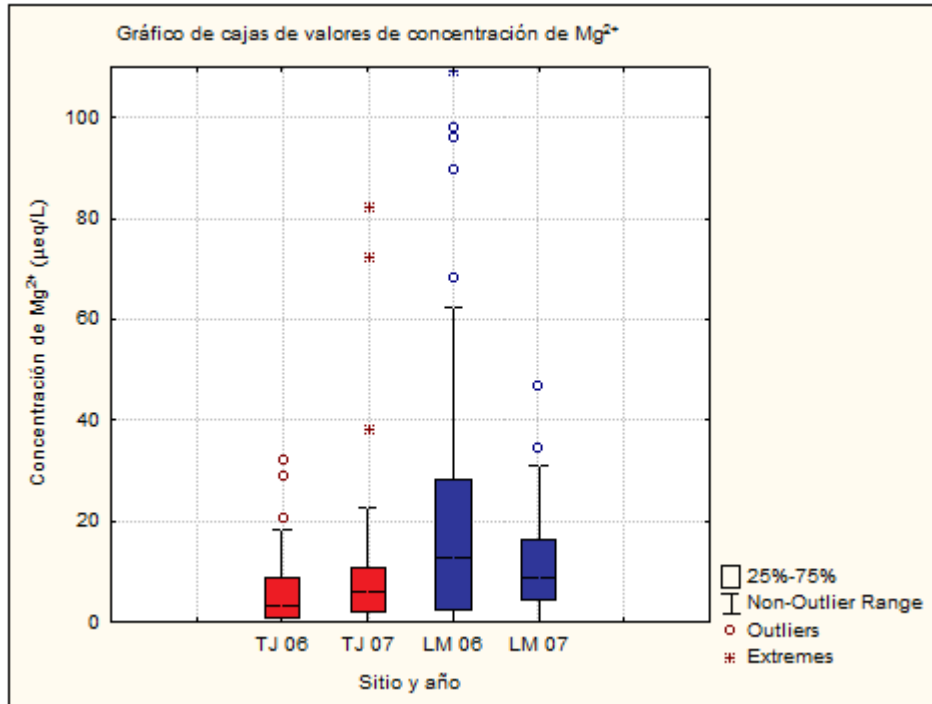


Figura 4.16.- Gráfico de cajas de los valores de la concentración del ión magnesio para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

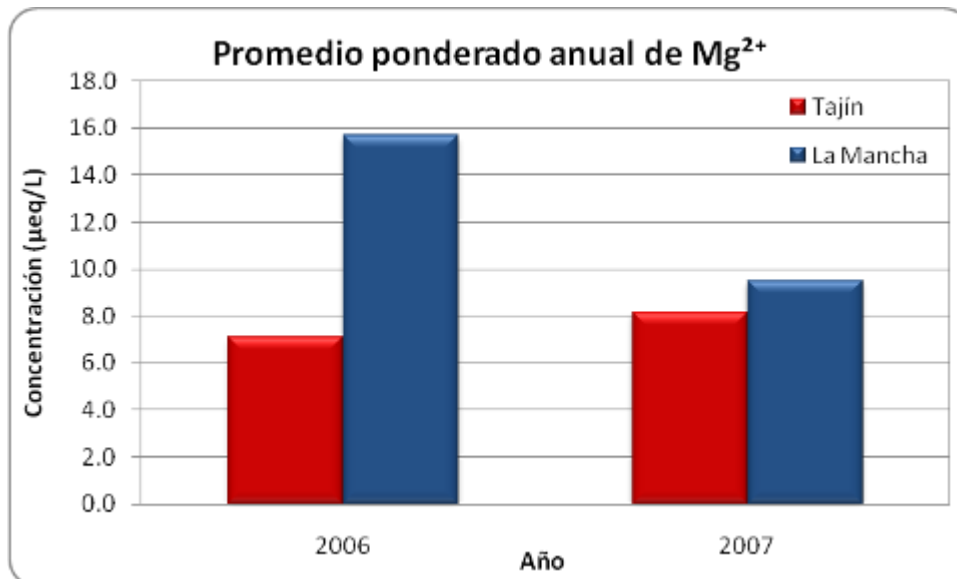


Figura 4.17.- Promedio ponderado anual de la concentración del ión magnesio para El Tajín y La Mancha 2006-2007

4.3.5 CONTENIDO DEL IÓN CALCIO EN AGUA DE LLUVIA

En la figura 4.18 se encuentran los valores de concentración del ión calcio para todas las muestras; las correspondientes a El Tajín parecen tener un comportamiento similar durante los dos años, mientras que este comportamiento no se presenta en La Mancha.

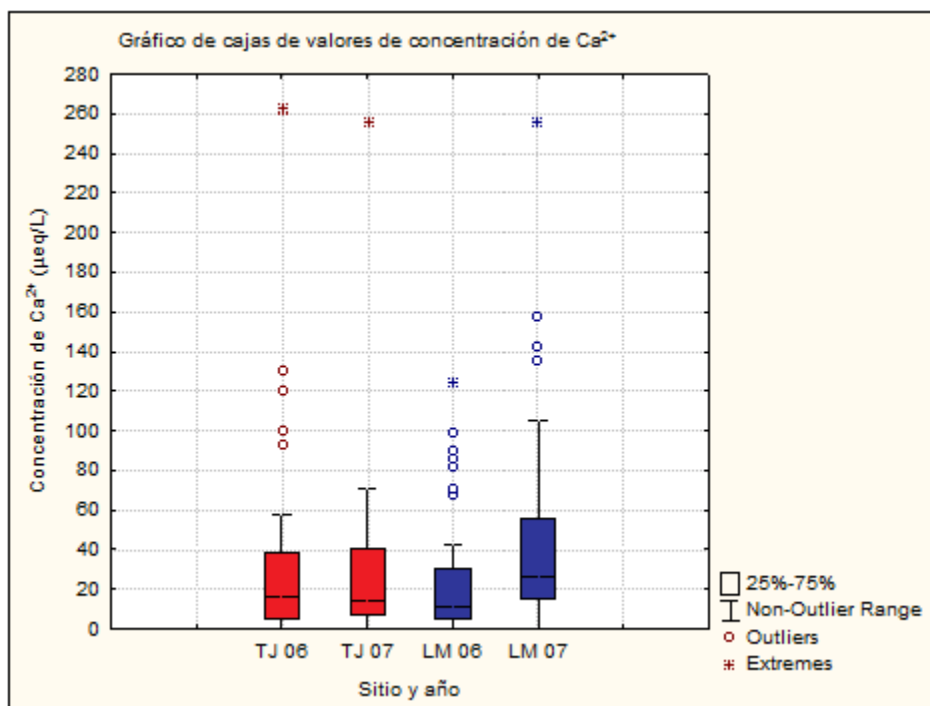


Figura 4.18.- Gráfico de cajas de los valores de la concentración del ión calcio para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

El promedio ponderado anual de las concentraciones del ión calcio para El Tajín en el año 2006 presenta la mayor contribución, mismo año en el que La Mancha tiene el menor valor, sin embargo en el 2007 se invierten estas posiciones al ser La Mancha donde se presenta una mayor aportación de calcio.

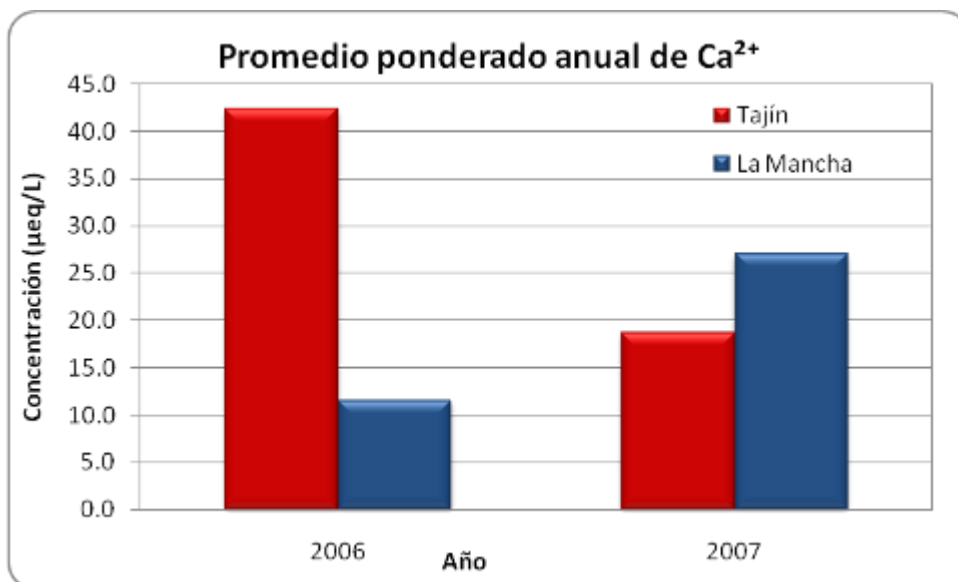


Figura 4.19.- Promedio ponderado anual de concentración del ión calcio para El Tajín y La Mancha 2006-2007

4.3.6 CONTENIDO DEL IÓN CLORURO EN AGUA DE LLUVIA

La concentración del ión cloruro en las muestras de agua de lluvia es junto con el sodio de los más elevados, en la figura 4.20 puede apreciarse que buena parte de los valores de La Mancha pasan los 50 µeq/L; por lo general los valores más altos se tienen en temporada de secas, ya que a un menor volumen de lluvia la concentración de iones aumenta.

En cuanto al promedio ponderado anual, es La Mancha en el 2007 la estación con una mayor aportación de cloruro, mientras que El Tajín en ese mismo año tiene la más baja. Este comportamiento es muy parecido al del ión sodio, debiéndose a que la mayoría del cloruro existente en el agua de lluvia está ligado al sodio, principalmente por el origen marino de la precipitación.

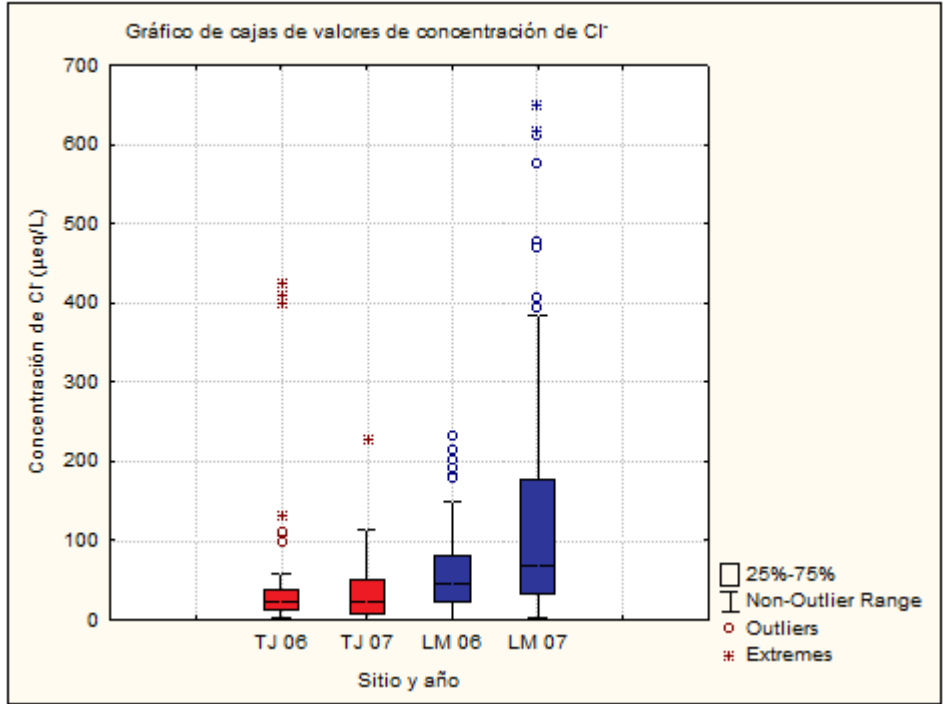


Figura 4.20.- Gráfico de cajas de los valores de la concentración del ión cloruro para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

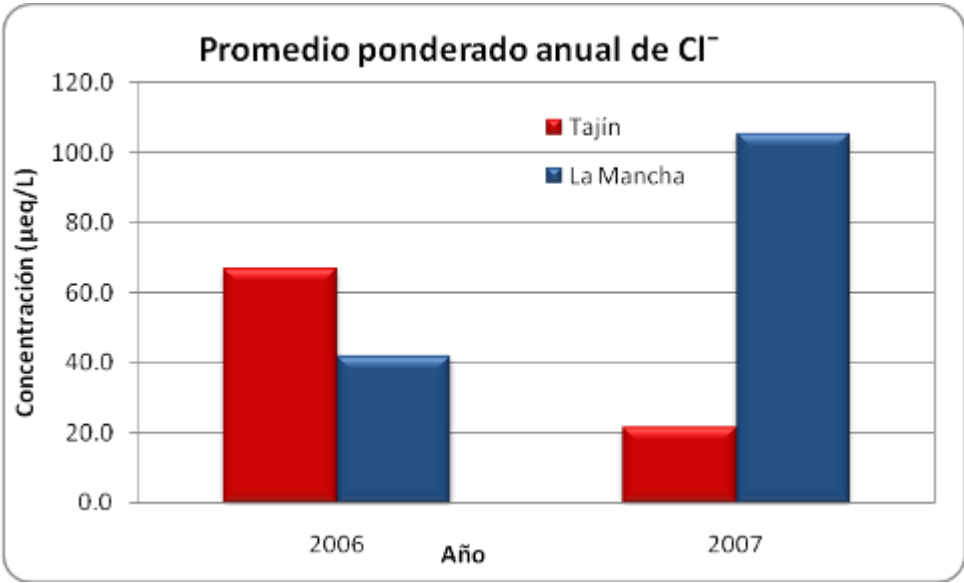


Figura 4.21.- Promedio ponderado anual de concentración del ión cloruro para El Tajín y La Mancha 2006-2007

4.3.7 CONTENIDO DEL IÓN NITRATO EN AGUA DE LLUVIA

El ión nitrato se obtiene al reaccionar los óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera, y que por ser estos precursores de lluvia ácida se les pondrá especial atención en cuanto a su comportamiento.

La figura 4.22 muestra los valores de concentración del ión nitrato en las muestras de agua de lluvia. Puede apreciarse que El Tajín tiene una mayor cantidad de muestras con valores altos de nitrato; mientras que en La Mancha los valores son más bajos.

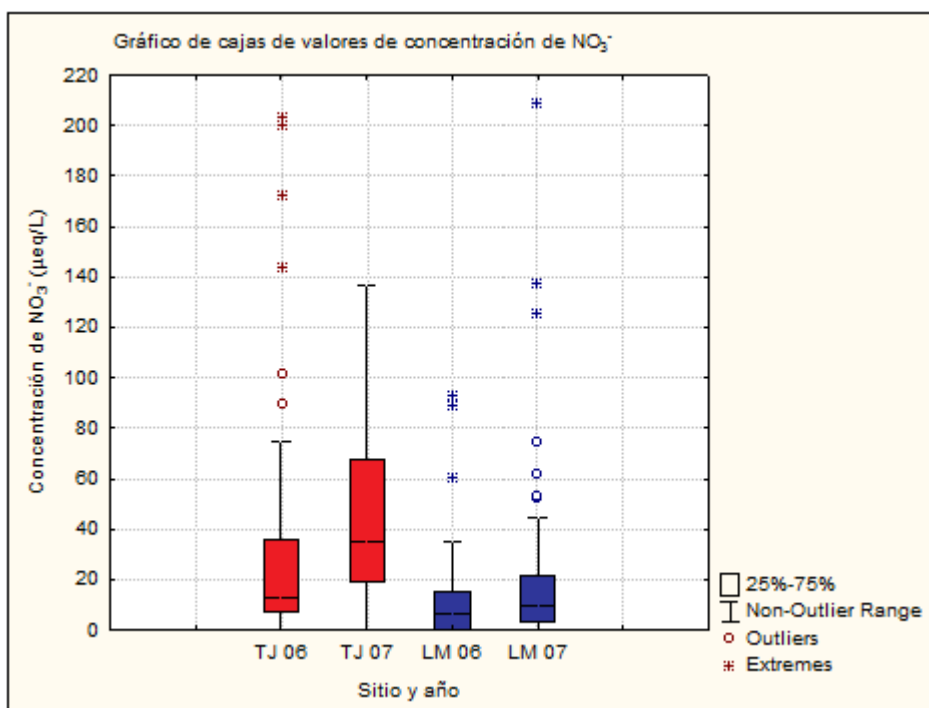


Figura 4.22.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión nitrato para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

En cuanto al promedio ponderado anual, los valores de El Tajín son más altos que los de La Mancha para los dos años, cabe señalar que en años anteriores los valores de nitratos en El Tajín se habían mantenido más bajos que los de 2006 y 2007, mientras que en La Mancha a pesar de su aumento de 2006 a 2007, permanecen en el mismo orden que en años anteriores.

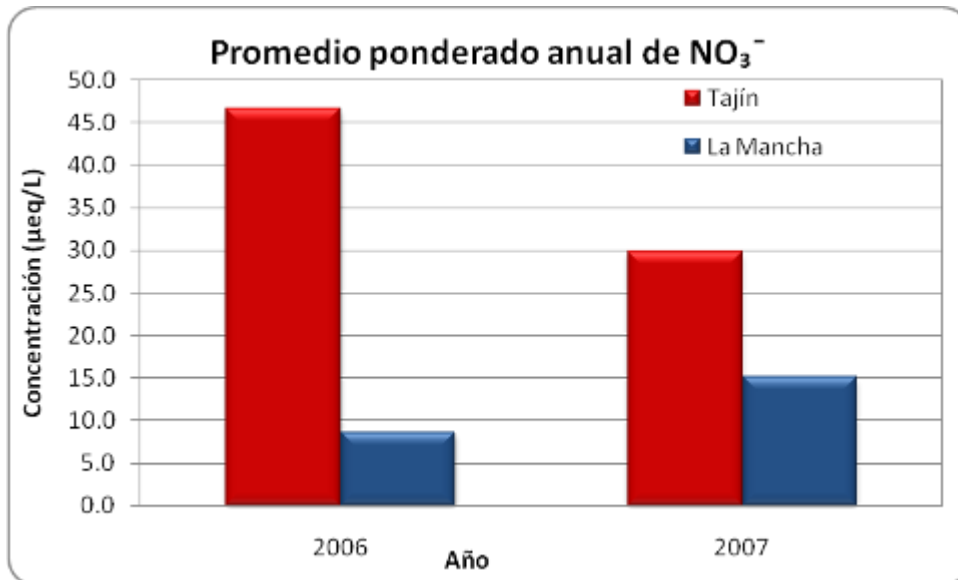


Figura 4.23.- Promedio ponderado anual de concentración del ión sulfato para El Tajín y La Mancha 2006-2007

Los valores ponderados mensuales para el periodo 2003-2007 son mostrados en la figura 4.24; podemos apreciar que los valores mensuales de El Tajín son en general del doble o más que los de La Mancha.

En la figura 4.25 se muestran solo los valores mensuales para El Tajín, la línea de tendencia agregada sugiere un aumento en la cantidad de nitratos a lo largo del periodo de muestreo, mismo que concuerda con el aumento en el promedio ponderado anual de los últimos años.

Con la media móvil de la misma figura se trata de suavizar la información para inferir un comportamiento cíclico, sin embargo este es casi imperceptible o inexistente.

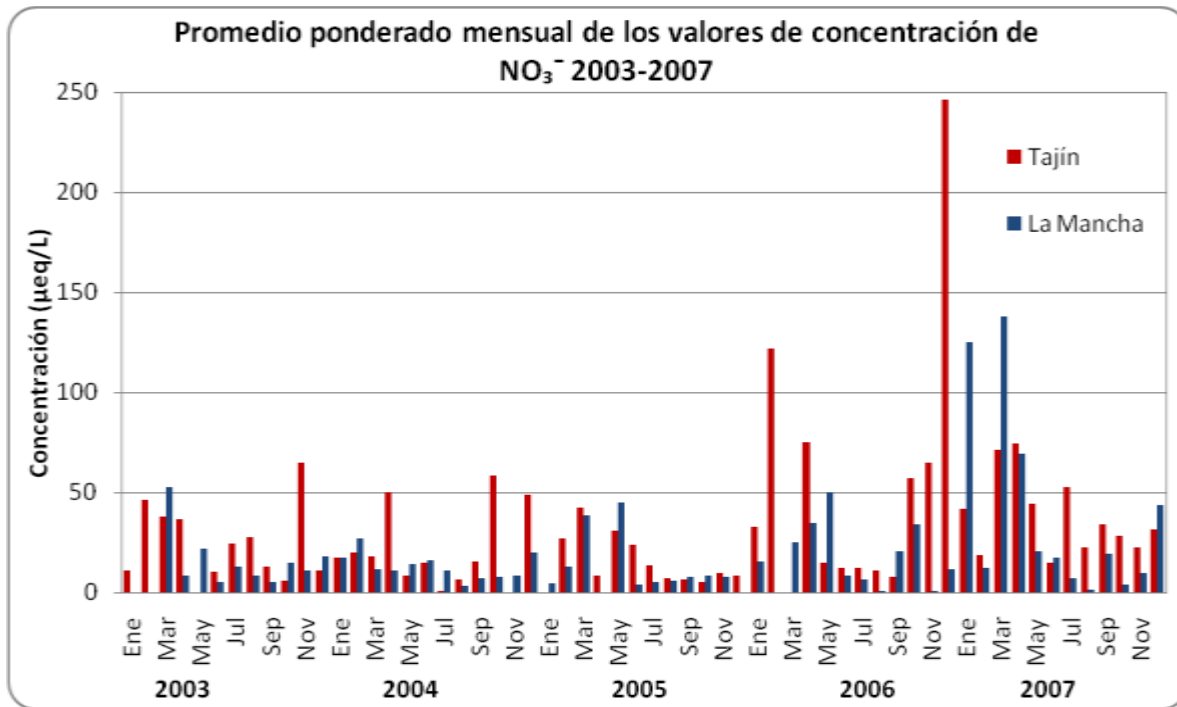


Figura 4.24.- Promedios ponderados mensuales de la concentración del ión nitrato 2003-2007 para El Tajín y La Mancha

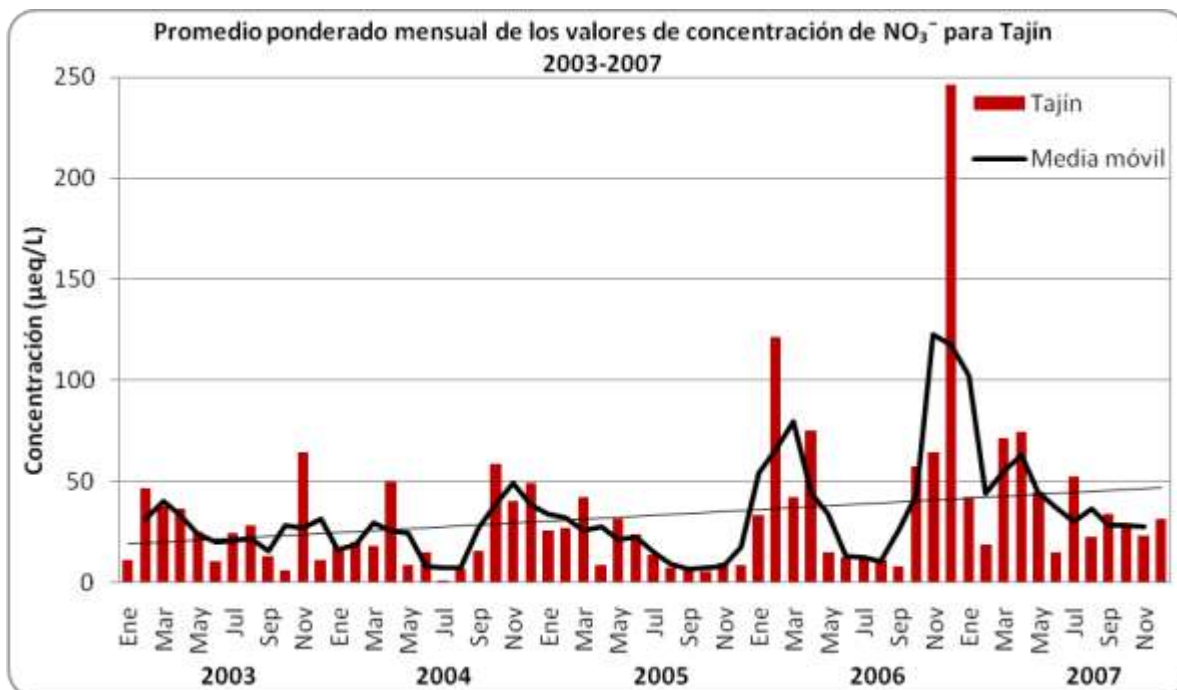


Figura 4.25.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión nitrato 2003-2007 para El Tajín

Lo anterior queda mejor expresado en la figura 4.26, en la que se muestran los valores mensuales promediados junto con los observados. La única coincidencia es en el mes con el valor más bajo, que es julio, y puede observarse para todos los años que el valor de concentración de nitratos tiende a bajar alrededor de este mes.

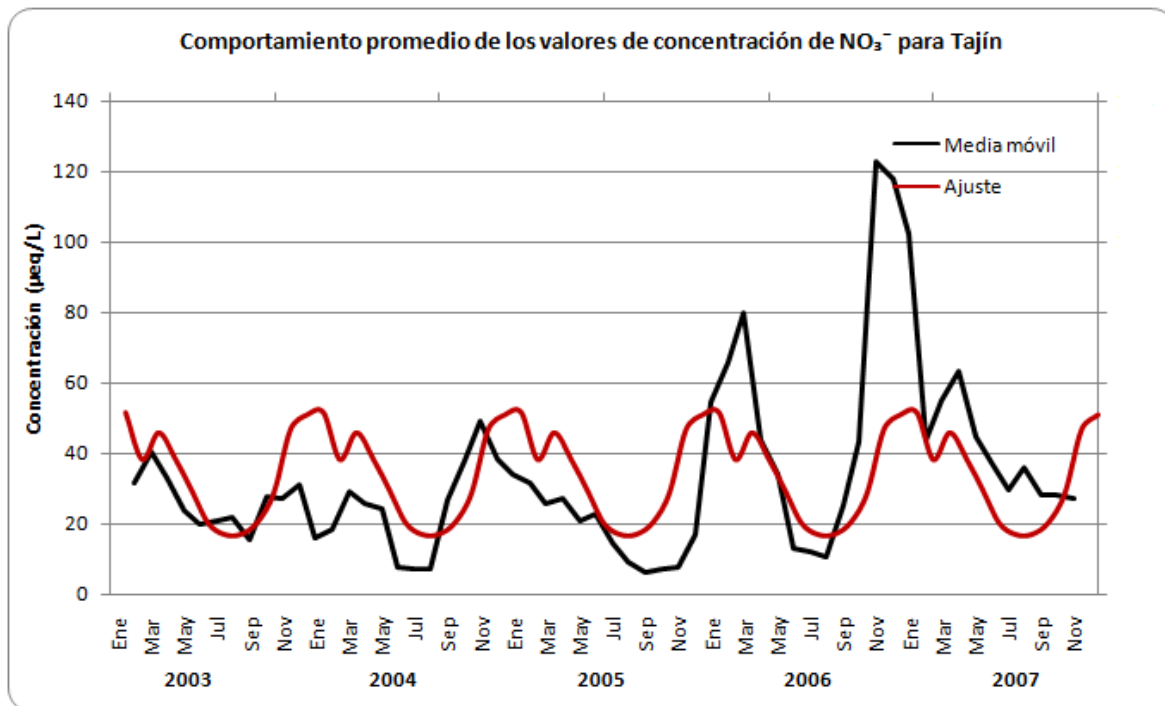


Figura 4.26.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión nitrato 2003-2007 para El Tajín

De la misma manera que en El Tajín, en La Mancha la línea de tendencia muestra que ha habido un ligero aumento en el contenido de nitratos (figura 4.27).

La figura 4.28 contiene el comportamiento promedio de los datos de nitratos comparados con los observados, a diferencia de El Tajín este comportamiento promedio se ajusta de mejor manera. De acuerdo a este patrón, el mes con mayor contenido de nitrato es abril, mientras que el de menor contenido es julio, similar a El Tajín, esta similitud puede deberse más que nada a la cantidad de lluvia que hace que la concentración baje.

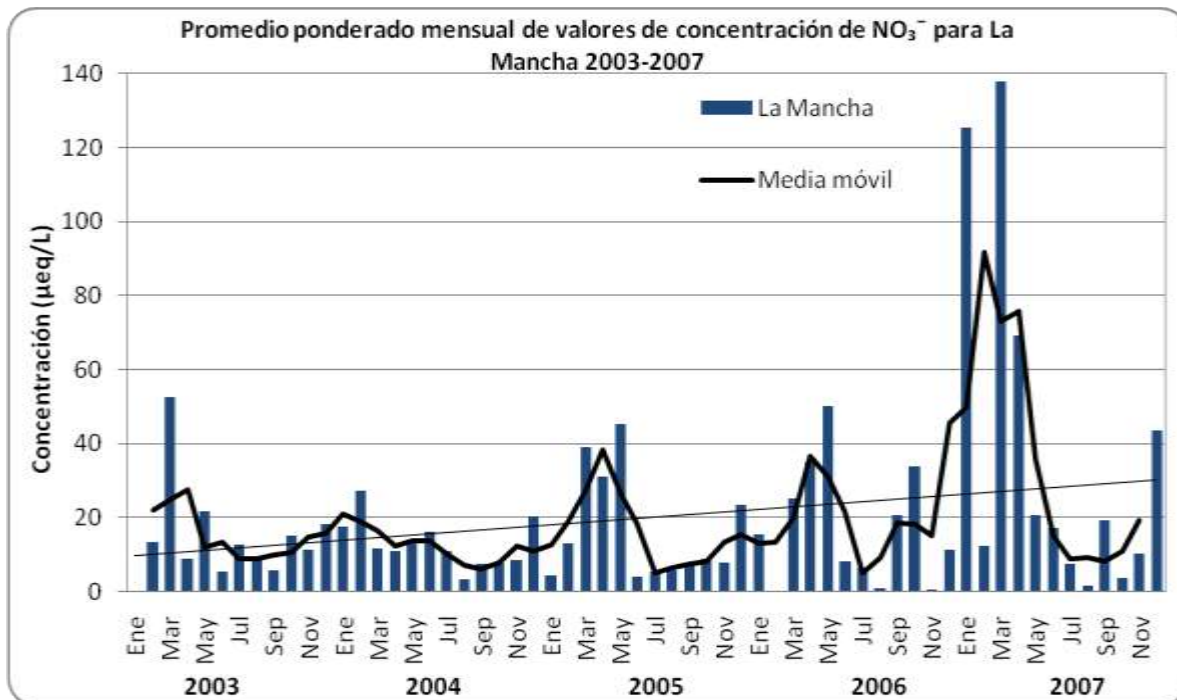


Figura 4.27.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión nitrato 2003-2007 para La Mancha

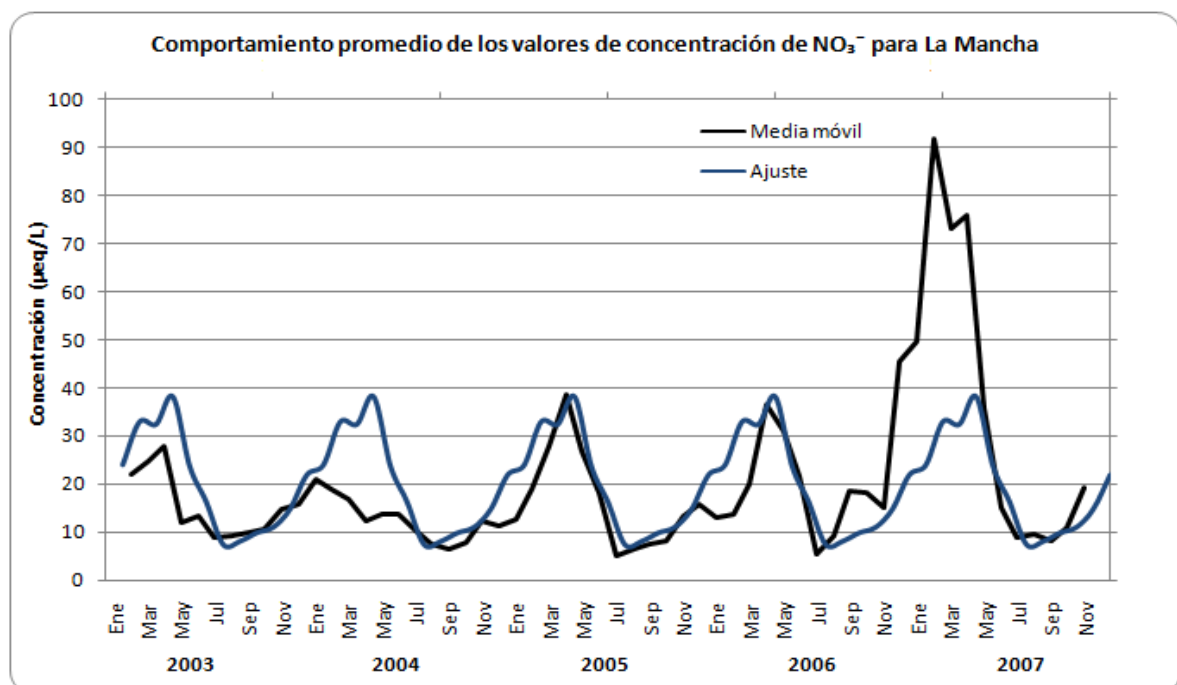


Figura 4.28.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión nitrato 2003-2007 para La Mancha

4.3.8 CONTENIDO DEL IÓN SULFATO EN AGUA DE LLUVIA

Otro de los aniones más importantes en lo que a lluvia ácida respecta es el sulfato; al igual que el nitrato, contribuye a la acidificación de la precipitación. Los valores de concentración son más altos en El Tajín que en La Mancha (figura 4.29) para ambos años; sin embargo, si se observa el promedio ponderado anual (figura 4.30), la diferencia entre El Tajín y La Mancha en el año 2007 es mínima.

Este mismo patrón se presenta en el comportamiento de pH, sugiriendo que los óxidos de azufre, precursores de sulfatos tienen un papel preponderante en la acidificación del agua de lluvia más que el nitrato. Para La Mancha el contenido de Sulfato aumentó de 2006 a 2007, mientras que para El Tajín disminuyó en casi un 50%.

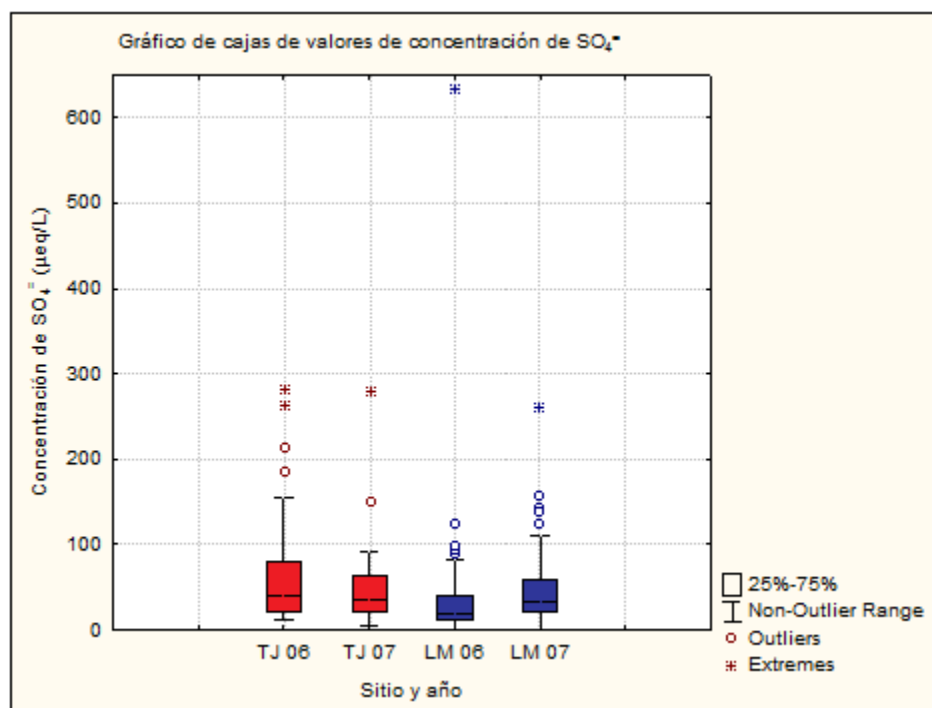


Figura 4.29.- Gráfico de cajas de los valores de concentración del ión sulfato para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

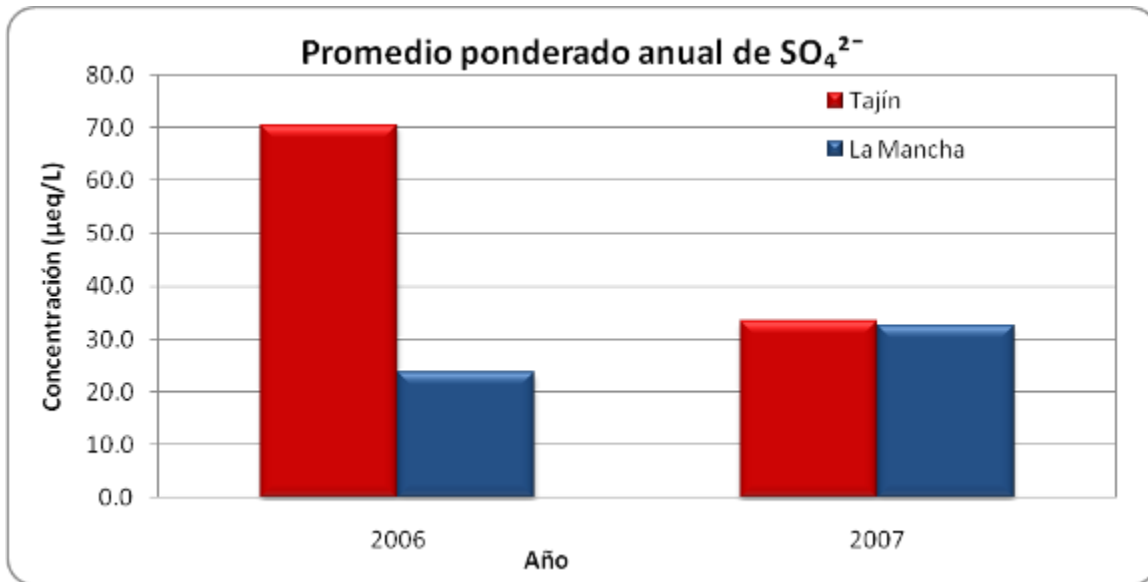


Figura 4.30.- Promedio ponderado anual de concentración del ión sulfato para El Tajín y La mancha 2006-2007

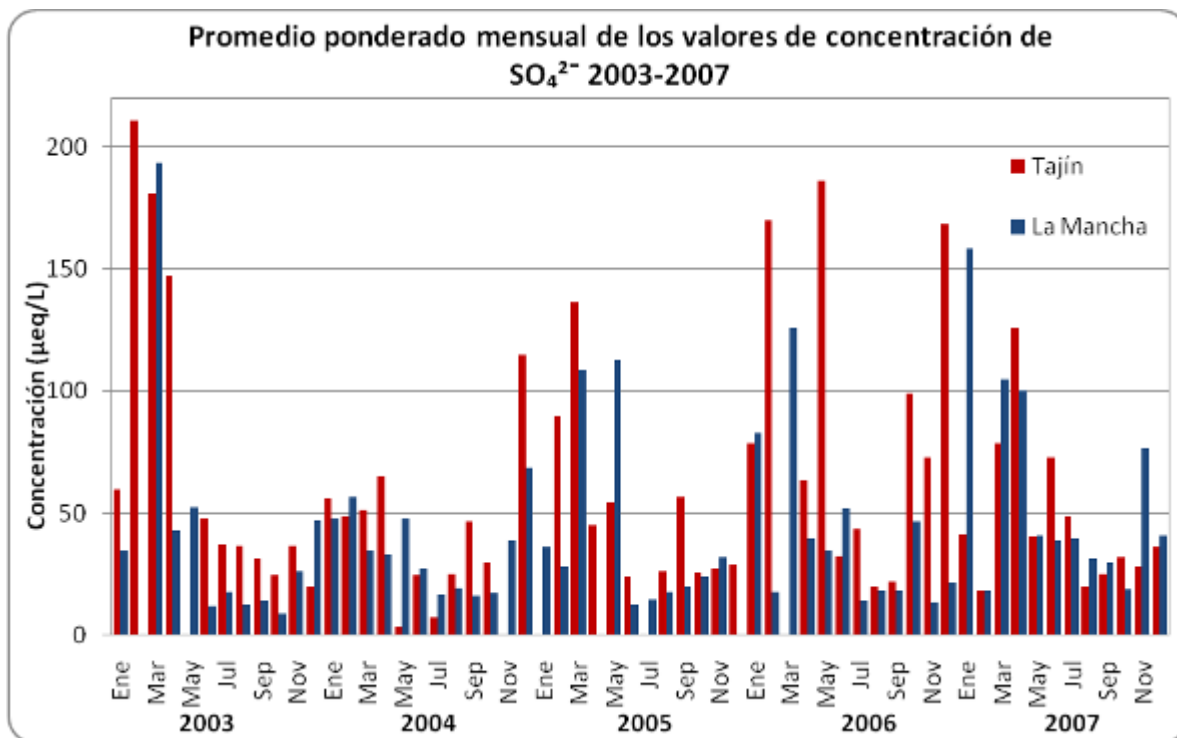


Figura 4.31.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión sulfato 2003-2007 para El Tajín y La Mancha

En la figura 4.31 se tienen los promedios ponderados mensuales para el periodo 2003-2007, de esta se observa que los valores de El Tajín son mayores a los de La Mancha para casi todos los meses.

Durante este periodo la tendencia es ligera hacia la baja en el contenido de sulfato en el agua de lluvia para El Tajín (figura 4.32). Los primeros meses del año muestran los valores más altos, mientras que en la temporada de lluvias la concentración tiende a disminuir.

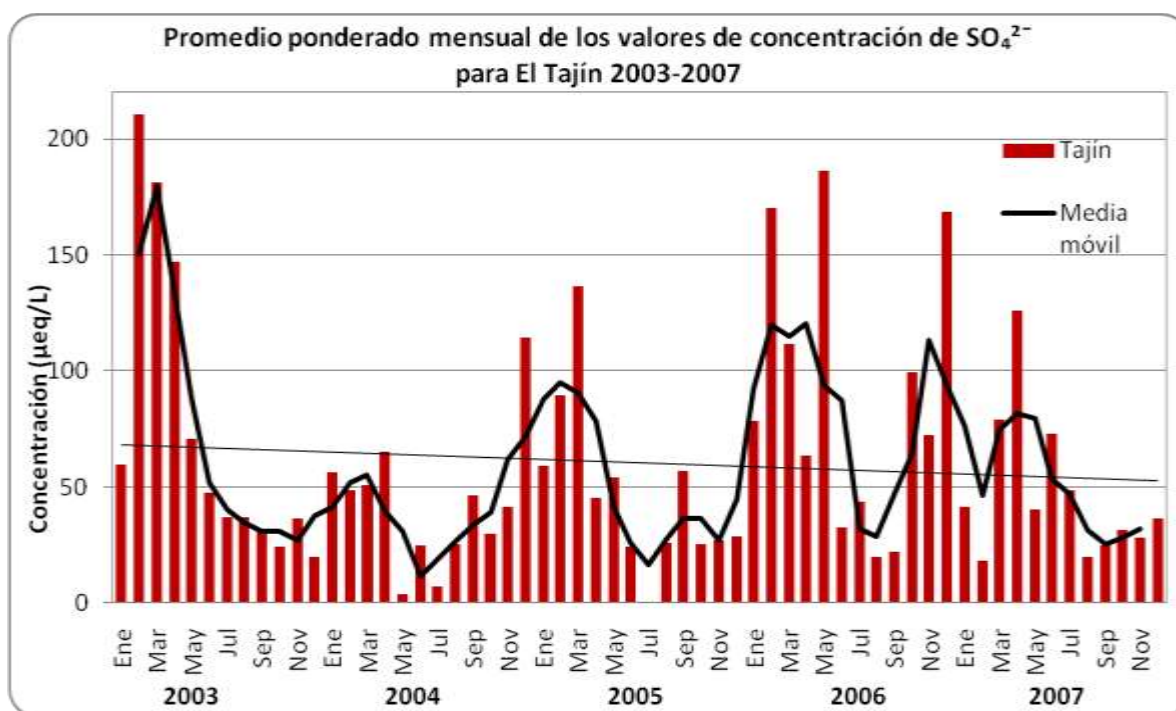


Figura 4.32.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión sulfato 2003-2007 para El Tajín

De acuerdo al patrón promedio de los valores de sulfato (figura 4.33), los valores máximos y mínimos, se dan en el mes de agosto y abril respectivamente, y los observados se dan alrededor de los meses mencionados.

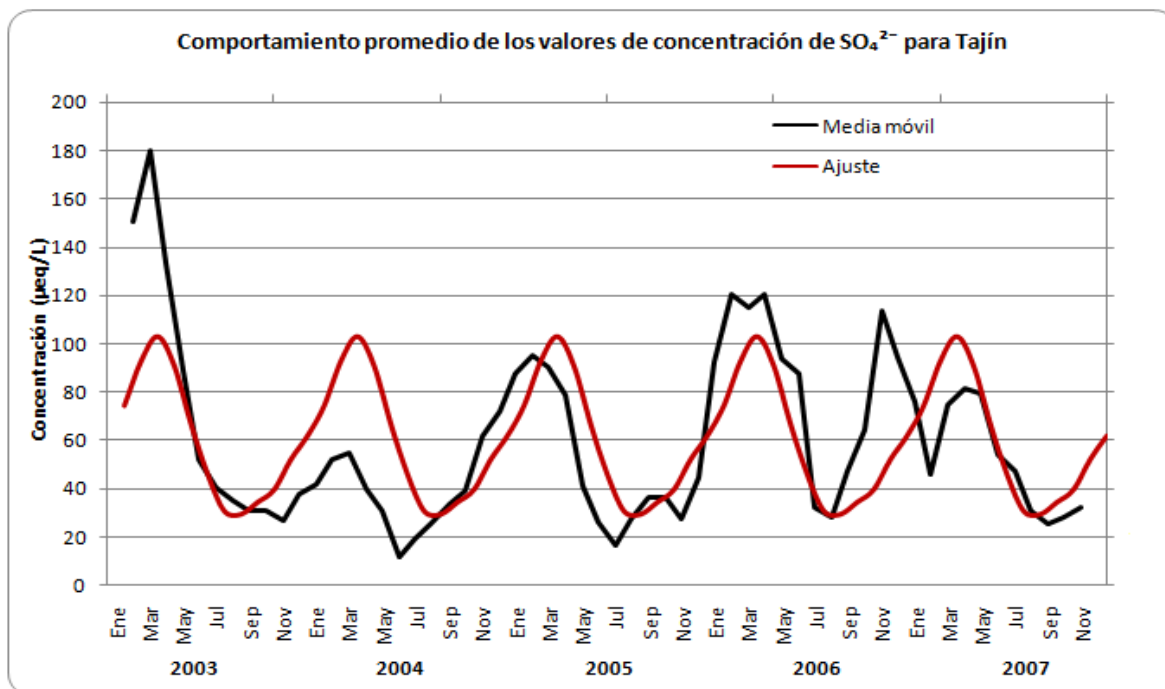


Figura 4.33.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión sulfato 2003-2007 para El Tajín

En La Mancha, la tendencia en cuanto al contenido de sulfatos es a aumentar, aunque esto sea de manera muy ligera (figura 4.34). A partir de la misma figura se observa que los valores máximos para cada año se encuentran entre los meses de enero a abril y los mínimos de junio a septiembre. El comportamiento promedio del contenido de sulfatos se muestra en la figura 4.35; de esta se aprecia que el ajuste de los datos observados es mejor en los últimos tres años que en los dos primeros.

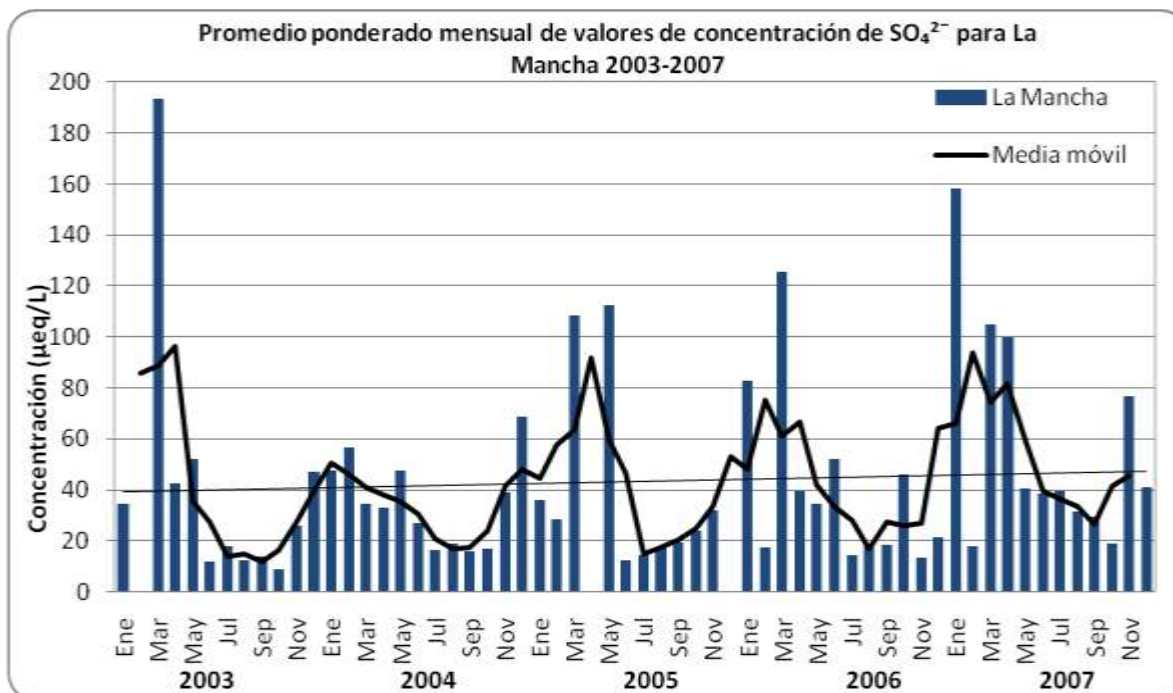


Figura 4.34.- Promedios ponderados mensuales de concentración de ión sulfato 2003-2007 para La Mancha

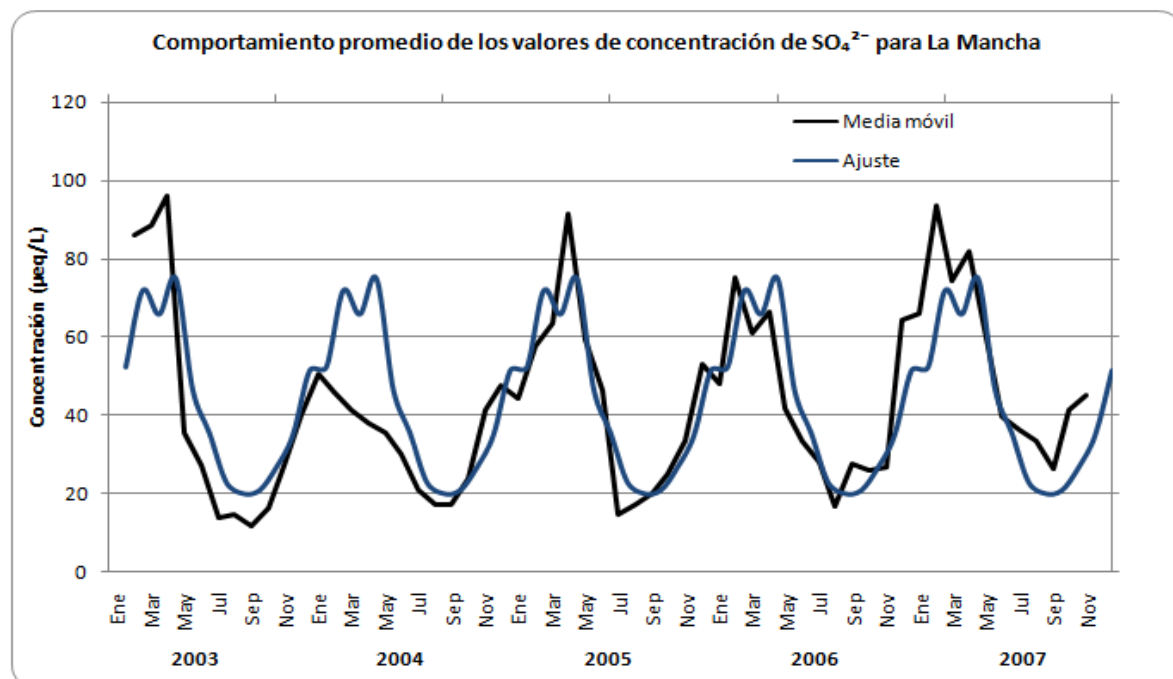


Figura 4.35.- Comportamiento promedio y observado de los valores de concentración de ión sulfato 2003-2007 para La Mancha

Uno de los resultados esperados es observar la relación directa entre el pH y la cantidad de sulfatos y nitratos contenidos en el agua de lluvia. En las figuras 4.36 y 4.37, se muestra el comportamiento que sigue el pH así como el de los aniones mencionados para determinar si existe alguna relación. De la primera, se observa que a un aumento en la concentración de sulfatos corresponde una disminución en el valor de pH, y no necesariamente el aumento en el valor de nitratos tiene una disminución de pH, de lo anterior podemos aseverar que son más importantes las contribuciones de sulfatos para la disminución del pH que los nitratos.

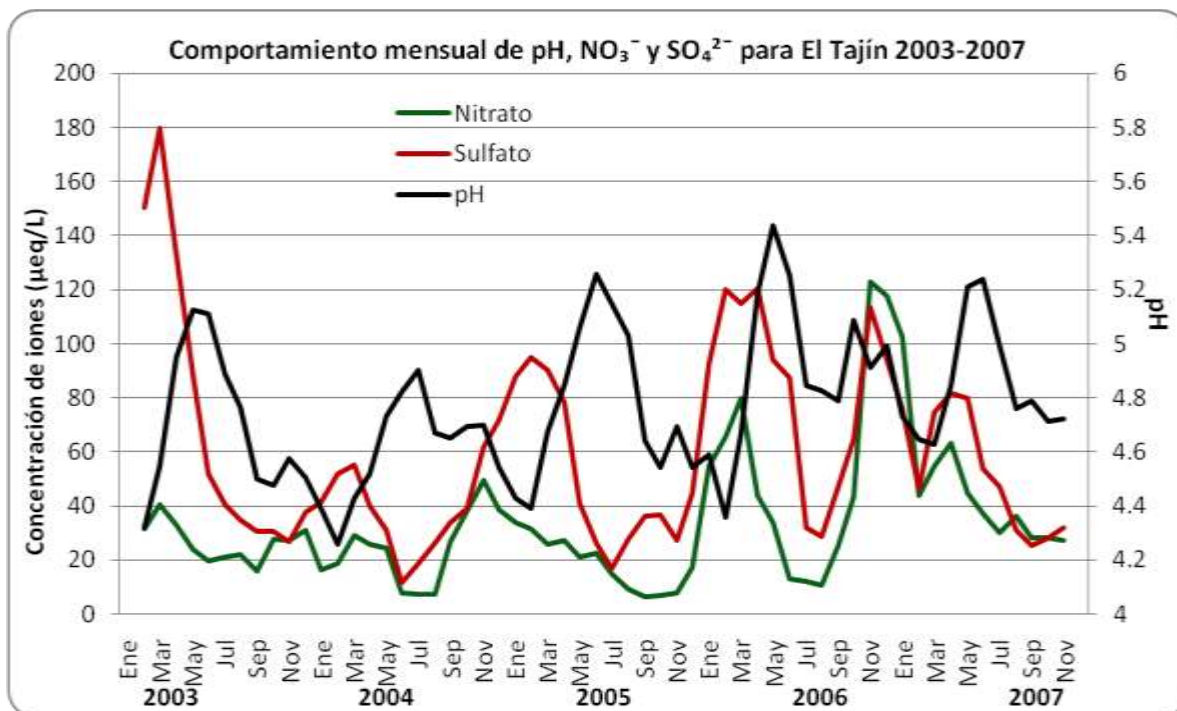


Figura 4.36.- Comportamiento mensual del pH, nitrato y sulfato para El Tajín 2003-2007

Para el caso de La Mancha, no se muestra una relación clara a la disminución de pH, cabe mencionar, que en este caso los valores de pH son mayores, así como las concentraciones de sulfatos y nitratos son menores que para el caso de El Tajín. De manera general se puede afirmar que en los casos con pH más bajo corresponde un pequeño aumento en la concentración de sulfatos.

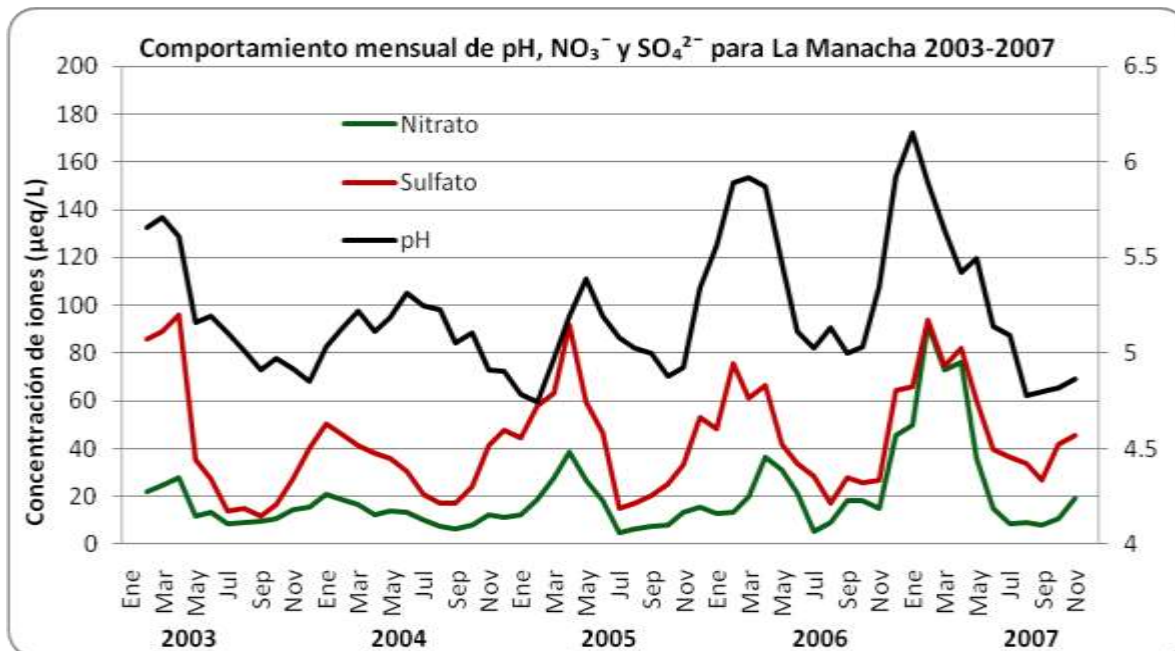


Figura 4.37.- Comportamiento mensual del pH, nitrato y sulfato para La Mancha 2003-2007

4.3.9 INTERCOMPARACIÓN DE PH, CONDUCTIVIDAD Y CONCENTRACIÓN DE IONES

Uno de los pasos para el análisis de iones es determinar la relación que existe entre ellos, para la realización de lo anterior se recurrió al coeficiente de correlación de Spearman, se eligió utilizar éste método no paramétrico después de realizar las pruebas de normalidad de Shapiro Wilks a los datos de iones y no presentar este tipo de distribución (Anexo III).

En la tabla 4.2 y 4.3 se presentan los coeficientes de correlación de Spearman para El Tajín y La Mancha respectivamente, durante los años 2006-2007. De ambas tablas es relevante destacar las altas correlaciones que presentan el NaCl, NH_4NO_3 y CaSO_4 . El NaCl indica el origen marino del agua de lluvia en ambos sitios ($r > 0.9$), y que ambos se presentan en cantidades casi iguales.

Tabla 4.2.- Factor de correlación de Spearman para El Tajín 2006-2007

TJ 06	H+	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	Cl-	NO3-	SO42-
H+	1.000000	0.018955	-0.125316	-0.120592	-0.108288	-0.259373	-0.020041	0.095464	0.185106
Na+		1.000000	0.314987	0.336593	0.375170	0.589438	0.913595	0.297673	0.288852
NH4+			1.000000	0.576343	0.592752	0.638253	0.346042	0.897730	0.627446
K+				1.000000	0.611845	0.675119	0.483394	0.512898	0.496836
Mg2+					1.000000	0.746359	0.449506	0.543602	0.432422
Ca2+						1.000000	0.630227	0.580352	0.586251
Cl-							1.000000	0.354043	0.250327
NO3-								1.000000	0.614128
SO42-									1.000000

TJ 07	H+	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	Cl-	NO3-	SO42-
H+	1.000000	0.011056	-0.257582	-0.203330	-0.230588	-0.248864	0.035691	0.077976	0.216980
Na+		1.000000	0.167825	0.246892	0.498028	0.781554	0.902249	0.736600	0.686953
NH4+			1.000000	0.669223	0.479805	0.323679	0.277017	0.562212	0.252915
K+				1.000000	0.626419	0.523473	0.297765	0.592932	0.382867
Mg2+					1.000000	0.640618	0.552140	0.579565	0.525589
Ca2+						1.000000	0.744074	0.686490	0.703854
Cl-							1.000000	0.689629	0.625212
NO3-								1.000000	0.704046
SO42-									1.000000

Tabla 4.3.- Factor de correlación de Spearman para La Mancha 2006-2007

LM 06	H+	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	Cl-	NO3-	SO42-
H+	1.000000	-0.080311	-0.080204	-0.016458	0.140695	-0.110373	-0.066236	-0.046116	0.129177
Na+		1.000000	0.424294	0.559423	0.570459	0.726671	0.990420	0.452248	0.687953
NH4+			1.000000	0.363668	0.332674	0.455624	0.443362	0.965382	0.331856
K+				1.000000	0.614113	0.656607	0.621980	0.395835	0.660762
Mg2+					1.000000	0.460786	0.586521	0.355248	0.508896
Ca2+						1.000000	0.750361	0.434397	0.857339
Cl-							1.000000	0.464772	0.708289
NO3-								1.000000	0.400047
SO42-									1.000000

LM 07	H+	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	Cl-	NO3-	SO42-
H+	1.000000	-0.394441	-0.318604	-0.338815	-0.305442	-0.308338	-0.310938	-0.113160	-0.134430
Na+		1.000000	0.512036	0.807750	0.669804	0.821185	0.935271	0.319743	0.735124
NH4+			1.000000	0.520523	0.419917	0.538319	0.529428	0.720864	0.513715
K+				1.000000	0.764291	0.754743	0.799155	0.265719	0.616377
Mg2+					1.000000	0.731984	0.651719	0.398687	0.661171
Ca2+						1.000000	0.814649	0.430573	0.900371
Cl-							1.000000	0.319035	0.762434
NO3-								1.000000	0.493425
SO42-									1.000000

Para el caso del NH_4NO_3 , las fuentes pueden ser zonas agrícolas y ganaderas aledañas a los sitios de estudio, de manera particular en El Tajín, ya que en promedio presenta un coeficiente de correlación más alto que para La Mancha.

Asimismo, la descomposición de la materia orgánica tiene desprendimiento de nitrato de amonio.

En el caso del CaSO_4 , los coeficientes de correlación son más bajos para El Tajín que para La Mancha. Una de las fuentes más importantes de este compuesto son los aerosoles que se desprenden del suelo, principalmente del tipo calcáreo. El valor más bajo para El Tajín nos indica una presencia de sulfatos más elevada que la contenida en los aerosoles del suelo, pudiendo provenir de fuentes antropogénicas; los cuales también participan en la acidificación del agua de lluvia.

Para el periodo 2006-2007 la cantidad de sulfatos en agua de lluvia es siempre mayor que la de calcio para Tajín; en La Mancha solo para los meses en la temporada de lluvias (junio-octubre) el sulfato es más elevado que el calcio.

Para determinar si había diferencia significativa de los distintos parámetros analizados, se utilizó la prueba de suma de rangos de Wilcoxon. Esta prueba se aplicó para las dos diferentes estaciones en el mismo año, y en años consecutivos de la misma estación. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 4.4; en la cual se presentan los valores p obtenidos mediante el software STATISTICA 8.0; este valor p puede entenderse como el nivel α más pequeño al cual los datos de la muestra son significativos. Los valores en rojo indican que la prueba es significativa al valor de $\alpha=0.5$.

Tabla 4.4.- Resumen de la prueba no paramétrica de suma de rangos de Wilcoxon

	pH	Conductividad	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	Cl-	NO3-	SO42-
TJ 06 Vs TJ 07	0.505183	0.417652	0.279956	0.509858	0.849113	0.191330	0.913993	0.729036	0.017697	0.454997
LM 06 Vs LM 07	0.105214	0.000215	0.228550	0.292447	0.203575	0.171659	0.000364	0.023131	0.046264	0.005722
TJ 06 Vs LM 06	0.002416	0.076187	0.001133	0.000647	0.149255	0.000883	0.264746	0.007421	0.000418	0.000300
TJ 07 Vs LM 07	0.290244	0.008140	0.011290	0.098795	0.003275	0.064366	0.049084	0.000005	0.000001	0.708603

De la tabla anterior se observa que para el pH solo hay una diferencia significativa para el año 2006 entre El Tajín y La Mancha, siendo este año donde se observa la mayor diferencia entre los valores de pH entre estas dos estaciones. Para 2007 el valor de pH fue similar en ambos lugares, por lo cual no difieren significativamente; mientras que para Tajín de acuerdo a esta prueba no hubo gran diferencia entre los dos años de muestreo. Si bien el valor de pH fue sensiblemente bajo para La Mancha en el 2007 no hay evidencia para rechazar la hipótesis de que las medias de los años 2006 y 2007 no sean iguales ($p=0.105214$).

El contenido de los iones sodio, amonio, potasio y magnesio no difieren de manera significativa entre 2006 y 2007 en cada estación, sin embargo si lo hacen entre estaciones para los mismos años (excepto el potasio para 2006).

En lo que se refiere al calcio, este aumentó de manera significativa de 2006 a 2007 para La Mancha, mientras que en El Tajín no se presentó diferencia entre estos mismos años. En 2006 no hay diferencia entre las estaciones, sin embargo debido al aumento de calcio en La Mancha en el 2007, la diferencia entre los valores de las estaciones para este año si se vuelve significativa.

En cuanto a cloruro, solamente El Tajín no presenta diferencia para los años consecutivos 2006 y 2007, ya que entre las dos estaciones y La Mancha si tenemos un valor p por debajo de 0.05.

Para el nitrato la diferencia entre ambas estaciones para 2006 y 2007 es mucho más marcada que entre años consecutivos para una sola estación, aunque no dejan de ser significativos.

El sulfato no presenta diferencia en los dos años de estudio para El Tajín, ni entre ambas estaciones en el año 2007, comportamiento similar al del pH; sin embargo para La Mancha si hay aumento significativo en el año 2007 respecto al de 2006, en este periodo se observa también una disminución muy marcada aunque no significativa del pH. Para el año 2006 entre las estaciones también tenemos diferencia significativa, misma que se observa también en el pH.

4.4 FACTORES DE ENRIQUECIMIENTO Y NEUTRALIZACIÓN.

4.4.1 FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO

El factor de enriquecimiento (FE) para una sustancia se define como:

$$FE = \frac{(X/Na)_{muestra}}{(X/Na)_{agua\ de\ mar}} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

Donde el numerador representa la proporción de la sustancia con respecto al sodio que contiene la muestra de agua de lluvia (en ppm) y el denominador representa esta misma proporción pero del agua de mar. Se ha propuesto al sodio como compuesto de referencia ya que no existen fuentes antropogénicas ligadas a este, además su origen está ligado principalmente al agua de mar de la misma forma que el agua de lluvia (*Riley, et al, 1971*).

Este factor puede ser usado para identificar el posible origen de los diversos compuestos que se pretenda analizar, comparándolos con las concentraciones conocidas que contiene el agua de mar. Las concentraciones marinas de los iones analizados de acuerdo a (*Riley, et al, 1971*) se muestran en las tablas 4.5 - 4.8.

Los posibles resultados que ofrece este factor pueden ser:

FE = 1: La sustancia X existe en la misma proporción que el agua de mar

FE > 1: La sustancia X ha sido enriquecida con respecto al agua de mar

FE < 1: La sustancia X ha disminuido

Con la ayuda del FE podemos calcular también el Factor de Sal Marina (FSM), el cual representa el porcentaje de cada sustancia ligada a un origen marino, este factor se define como:

$$FSM (X)\% = \frac{(Na^+)_{Lluvia} \cdot (X/Na^+)_{mar}}{X_{Lluvia}} \cdot 100 \quad \text{Ec. (4.2)}$$

El porcentaje restante, conocido como Factor No Marino (FNM), corresponde a la parte antropogénica o debida a otras fuentes ajenas al agua de mar de la sustancia:

$$FNM = 100 - FSM \quad \text{Ec. (4.3)}$$

Las tablas 4.5 y 4.6 muestran los factores antes mencionados para El Tajín en los años 2006 y 2007 respectivamente; presentándose valores típicos de los diferentes iones en agua de mar, así como las relaciones entre estos y el sodio.

Tabla 4.5.- Factor de Enriquecimiento para El Tajín 2006

MUESTRA	CATIONES (ppm)					ANIONES ppm		
	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Ca ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
Ene	1.183	0.417	0.250	0.169	0.748	3.015	2.048	3.772
Feb	5.958	2.206	0.482	0.117	3.394	10.265	7.544	8.163
Abr	0.535	1.428	0.262	0.354	1.083	2.100	4.650	3.040
May	9.715	3.330	0.340	0.110	2.610	15.045	0.920	8.928
Jun	0.364	0.233	0.437	0.057	0.297	0.810	0.765	1.559
Jul	0.396	0.248	0.207	0.038	0.259	0.800	0.783	2.090
Ago	0.374	0.153	0.024	0.028	0.179	0.593	0.699	0.952
Sep	0.430	0.125	0.010	0.046	0.247	0.690	0.488	1.057
Oct	2.096	0.974	0.195	0.047	1.191	3.515	3.550	4.761
Nov	0.242	1.434	0.089	0.070	1.263	0.540	4.004	3.484
Dic	0.050	4.090	0.358	0.102	1.486	0.286	15.276	8.092
ponderado	1.296	0.909	0.177	0.087	0.849	2.361	2.899	3.378
mediana	0.43	0.97	0.25	0.07	1.08	0.81	2.05	3.48
σ(N=6)	3.09	1.36	0.16	0.09	1.04	4.81	4.44	2.96
[AGUA DE MAR] [g/Kg]	10.76	0.00	0.39	1.29	0.41	19.35	0.00	2.71
(x/Na⁺)_{Mar}	1.00	9.29E-06	0.04	0.12	0.04	1.80	9.29E-06	0.25
(x/Na⁺)_{Lluvia}	1.00	0.70	0.14	0.07	0.66	1.82	2.24	2.61
FE(x)	1.00	75531.97	3.77	0.56	17.20	1.01	240743.92	10.35
FSM(x)%	100.00	0.00	26.50	100.00	5.81	98.67	0.00	9.66
FNM(x)%	0.00	100.00	73.50	0.00	94.19	1.33	100.00	90.34
X_{exceso} (mg/L)	0.00	0.91	0.13	0.00	0.80	0.03	2.90	3.05
X_{Origen Marino}	1.30	1.20E-05	0.05	0.09	0.05	2.33	1.20E-05	0.33

De ambas tablas, así como de las 4.7 y 4.8 que hacen referencia a La Mancha 2006 y 2007 respectivamente; se observa que el FE es demasiado elevado para amonio y nitrato, esto debido a que su contenido en agua de mar es mínimo, lo

cual ocasiona que un valor de concentración bajo en agua de lluvia resalte. De lo anterior se concluye que el 100% del nitrato y amonio encontrado en las muestras de agua de lluvia sea de origen no marino, tal como se aprecia en todas las tablas que hacen referencia al FE.

Tabla 4.6.- Factor de enriquecimiento para El Tajín 2007

MUESTRA	CATIONES (ppm)					ANIONES ppm		
	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Ca ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
Ene	1.356	0.107	0.062	0.056	0.618	1.286	2.599	1.978
Feb	0.566	0.130	0.009	0.007	0.197	0.521	1.169	0.881
Mar	2.018	0.166	0.096	0.104	1.147	1.833	4.406	3.780
Abr	3.368	0.502	0.179	0.208	2.072	3.789	4.622	6.049
May	0.714	0.767	0.143	0.153	0.763	1.229	2.759	1.920
Jun	0.520	0.267	0.104	0.220	1.260	0.800	0.920	3.500
Jul	0.979	0.641	0.197	0.198	0.452	1.570	3.253	2.329
Ago	0.163	0.288	0.166	0.104	0.218	0.404	1.386	0.959
Sep	L.D.	0.260	0.270	0.090	0.140	0.120	2.100	1.200
Oct	0.728	0.402	0.171	0.237	0.331	1.280	1.740	1.517
Nov	0.027	0.330	0.141	0.033	0.256	0.169	1.416	1.362
Dic	0.437	0.259	0.120	0.026	0.219	0.158	1.948	1.738
ponderado	0.642	0.290	0.126	0.099	0.377	0.789	1.856	1.604
mediana	0.71	0.28	0.14	0.10	0.39	1.01	2.02	1.83
s(N=6)	0.96	0.20	0.07	0.08	0.59	1.03	1.22	1.50
[AGUA DE MAR] [g/Kg]	10.76	0.00	0.39	1.29	0.41	19.35	0.00	2.71
$(x/Na^+)_{Mar}$	1.00	9.29E-06	0.04	0.12	0.04	1.80	9.29E-06	0.25
$(x/Na^+)_{Lluvia}$	1.00	0.45	0.20	0.15	0.59	1.23	2.89	2.50
FE(x)	1.00	48599.16	5.41	1.29	15.39	0.68	310882.28	9.92
FSM(x)%	100.00	0.00	18.48	77.53	6.50	100.00	0.00	10.08
FNM(x)%	0.00	100.00	81.52	22.47	93.50	0.00	100.00	89.92
X _{exceso} (mg/L)	0.00	0.29	0.10	0.02	0.35	0.00	1.86	1.44
X _{Origen Marino}	0.64	5.97E-06	0.02	0.08	0.02	0.79	5.97E-06	0.16

Este origen no marino puede ser antropogénico, ya sea por la quema de combustibles fósiles o los fertilizantes utilizados en la agricultura; o bien debido a la descomposición de la materia orgánica, tal como lo sería la vegetación que rodea a cada una de las dos estaciones, la cual sin duda es considerable.

La mayor parte del magnesio es por lo general de origen marino, y en ocasiones este tiende a disminuir. El potasio y el calcio tienen una parte cercana al 20% y 10% de origen marino respectivamente, sin embargo de acuerdo al FE se

presenta un enriquecimiento de ambas especies, pudiendo ser el origen aerosoles desprendidos del suelo.

Tabla 4.7.- Factor de enriquecimiento para La Mancha 2006

MUESTRA	CATIONES (ppm)					ANIONES ppm		
	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Ca ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
Ene	4.639	0.274	0.353	0.055	1.654	7.328	0.959	3.982
Feb	1.672	L.D.	0.057	0.164	0.258	2.312	L.D.	0.838
Mar	4.744	0.433	0.370	1.326	2.496	7.637	1.551	6.036
Abr	4.418	0.624	0.884	0.158	0.792	6.800	2.150	1.900
May	2.699	0.903	0.331	0.492	0.608	4.453	3.111	1.661
Jun	0.769	0.177	0.243	0.186	0.183	1.535	0.513	2.498
Jul	0.843	0.114	0.128	0.112	0.168	1.423	0.390	0.681
Ago	0.723	0.016	0.185	0.270	0.218	1.280	0.055	0.880
Sep	0.393	0.370	0.196	0.117	0.219	0.782	1.275	0.881
Oct	1.020	0.610	0.130	0.760	0.570	1.688	2.101	2.222
Nov	1.856	0.087	0.314	0.967	2.104	3.142	0.299	5.317
Dic	0.611	0.206	0.158	0.254	0.414	1.083	0.708	1.033
ponderado	0.901	0.163	0.187	0.218	0.292	1.561	0.547	1.280
mediana	1.35	0.27	0.22	0.22	0.49	2.00	0.96	1.78
$\sigma(\bar{N}=6)$	1.68	0.27	0.22	0.40	0.81	2.60	0.95	1.83
[AGUA DE MAR] [g/Kg]	10.76	0.00	0.39	1.29	0.41	19.35	0.00	2.71
$(x/Na^+)_{Mar}$	1.00	0	0.04	0.12	0.04	1.80	9.29E-06	0.25
$(x/Na^+)_{LLuvia}$	1.00	0.18	0.21	0.24	0.32	1.73	0.61	1.42
FE(x)	1.00	19476.15	5.72	2.02	8.52	0.96	65254.79	5.64
FSM(x)%	100.00	0.01	17.49	49.48	11.74	100.00	0.00	17.73
FNM(x)%	0.00	99.99	82.51	50.52	88.26	0.00	100.00	82.27
X _{exceso} (mg/L)	0.00	0.16	0.15	0.11	0.26	0.00	0.55	1.05
X _{Origen Marino}	0.90	8.38E-06	0.03	0.11	0.03	1.56	8.38E-06	0.23

En lo que respecta al sulfato, para El Tajín cerca del 90% es de origen no marino, mientras que para La Mancha este valor es cercano al 80%, lo cual nos indica una mayor presencia de sulfato de origen no marino en El Tajín en comparación con La Mancha, esto de manera consistente a que es en El Tajín donde se presentan los valores de pH más ácidos. La mayor presencia de sulfatos de origen no marino en El Tajín, sugiere por lo tanto una mayor presencia de SO_x en la región o en el trayecto de las masas de aire que dan origen a los eventos de lluvia.

Tabla 4.8.- Factor de enriquecimiento para La Mancha 2007

MUESTRA	CATIONES (ppm)					ANIONES ppm		
	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ₂ ⁺	Ca ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
Ene	10.300	2.250	1.170	0.350	3.160	16.912	7.771	7.600
Feb	1.806	0.201	0.110	0.078	0.336	2.879	0.772	0.868
Mar	6.524	2.544	0.484	0.204	3.542	10.479	9.026	8.703
Abr	3.549	1.214	0.229	0.034	1.963	5.669	4.296	4.799
May	2.333	1.211	0.341	1.029	1.097	3.278	5.677	6.278
Jun	15.973	0.768	1.577	0.281	1.473	27.117	2.934	3.344
Jul	2.705	0.264	0.541	0.179	0.907	6.086	0.495	2.177
Ago	5.119	0.187	0.892	0.157	0.698	9.898	0.188	1.901
Sep	0.484	0.075	0.105	0.090	0.419	1.384	1.182	1.415
Oct	0.855	0.060	0.137	0.055	0.275	1.441	0.234	0.899
Nov	1.339	0.051	0.130	0.148	1.387	2.179	0.624	3.677
Dic	2.306	0.441	0.329	0.244	0.436	3.847	2.697	1.960
ponderado	2.561	0.300	0.398	0.194	0.659	4.795	1.364	2.125
mediana	2.52	0.35	0.33	0.17	1.00	4.76	1.94	2.76
$\sigma(N=6)$	4.57	0.87	0.47	0.27	1.09	7.68	3.07	2.66
[AGUA DE MAR] [g/Kg]	10.76	0.00	0.39	1.29	0.41	19.35	0.00	2.71
$(x/Na^+)_{Mar}$	1.00	9.29E-06	0.04	0.12	0.04	1.80	9.29E-06	0.25
$(x/Na^+)_{LLuvia}$	1.00	0.12	0.16	0.08	0.26	1.87	0.53	0.83
FE(x)	1.00	12598.06	4.29	0.63	6.75	1.04	57323.16	3.29
FSM(x)%	100.00	0.01	23.30	100.00	14.81	96.05	0.00	30.36
FNM(x)%	0.00	99.99	76.70	0.00	85.19	3.95	100.00	69.64
X _{exceso} (mg/L)	0.00	0.30	0.31	0.00	0.56	0.19	1.36	1.48
X _{Origen Marino}	2.56	2.38E-05	0.09	0.19	0.10	4.61	2.38E-05	0.64

4.4.2 FACTOR DE NEUTRALIZACIÓN

Los compuestos existentes en la corteza terrestre pueden en un momento dado neutralizar parte de la acidez del agua de lluvia, los componentes principales que ayudan a neutralizar son el amonio, magnesio y calcio, siendo este último quien aporta más a la neutralización. Otras especies que podrían colaborar en la neutralización son los carbonatos y bicarbonatos, sin embargo la presencia de carbonatos se ve limitada por el pH de las muestras, cuyo promedio ponderado oscila entre 4.4 y 5.1. Una forma de comprobar si se da o no esta neutralización es calculando el Factor de Neutralización (FN), el cual se define como:

$$FN_{X_i} = \frac{[X_i]}{[SO_4^{2-} + NO_3^-]} \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Donde X_i es el componente de interés y las concentraciones se encuentran expresadas en $\mu\text{eq/L}$ (Possanzini et al, 1988).

Tabla 4.9.- Factores de neutralización para El Tajín y La Mancha 2006-2007

Sitio y año	NH_4^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	$(\text{NH}_4^+ \text{ Mg}^{2+} \text{ Ca}^{2+})$
Tajín 2006	0.43	0.06	0.36	0.85
Tajín 2007	0.25	0.13	0.30	0.68
La Mancha 2006	0.28	0.49	0.36	1.12
La Mancha 2007	0.24	0.20	0.57	1.02

En la tabla 4.9 se encuentran los FN de ambas estaciones en los dos años, para obtenerlos se tomo el promedio ponderado anual de cada uno de los iones. En esta se desglosa la contribución individual de cada catión y la suma de estos. Se aprecia que para ambas estaciones es el calcio el que más contribuye a neutralizar parte de la acidez, seguido del amonio y el magnesio, cabe señalar que para La Mancha el magnesio es mayor que en Tajín y muy cercano al amonio, pero menor que el calcio.

En total para El Tajín los FN no logran llegar a 1, lo cual indica que la cantidad de sulfatos y nitratos es mayor que la de los compuestos capaces de neutralizar a estos componentes, consistente con valores de pH menores en este sitio. Para el caso de La Mancha los valores son superiores a 1, sin embargo no logra ser lo suficientemente alto como para lograr que el pH suba a más de 5.6. Esto nos sugiere que hay una neutralización parcial por parte de aerosoles terrestres, aunque no lo suficiente para que la lluvia deje de ser ácida.

A pesar de que se cuantifican una buena parte de los compuestos inorgánicos, puede haber en el agua de lluvia especies orgánicas que no se pueden cuantificar por el método de medición utilizado (HPLC). Mediante el balance iónico (BI) realizado para cada muestra de lluvia se puede conocer la proporción que existe entre la suma total de aniones y la suma total de cationes que fueron cuantificados, el valor del BI puede indicar si en la muestra de lluvia hay presencia de otras especies químicas además de las mencionadas anteriormente, este balance se expresa como:

$$BI = \frac{\sum \text{aniones } (-)}{\sum \text{cationes } (+)} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Los posibles valores de este índice pueden ser:

BI > 1 : Hay presencia de más especies de cationes que los cuantificados

BI = 1 : Los aniones y cationes se encuentran balanceados

BI < 1 : Hay presencia de más especies de aniones que los cuantificados

En la figura 4.38 se muestra la gráfica de cajas correspondiente a los valores del balance iónico de cada una de las muestras de lluvia, en ella se aprecia que para El Tajín los valores del balance son cercanos a 1, lo cual nos indica que se cuantificó la mayor parte de las especies presentes en agua de lluvia.

En el caso de La Mancha, para el año 2006 los valores del BI son más bajos que todos los demás años, esto nos indica la posible presencia de bicarbonatos no cuantificados que pudieron haber influido en una disminución del pH, consistente con que es este año el que presenta el valor más alto de pH.

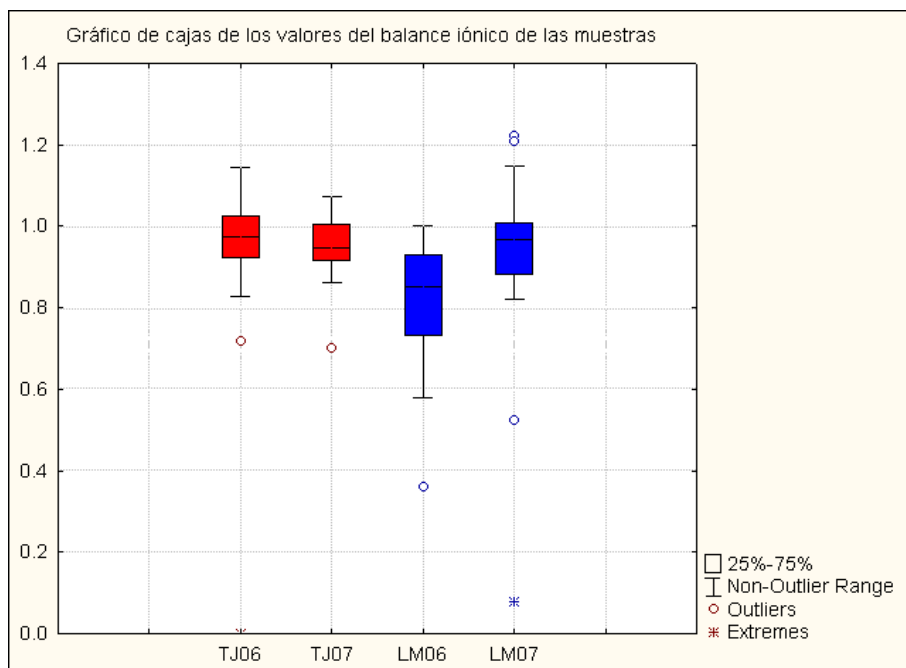


Figura 4.38.- Gráfico de cajas de los valores del balance iónico de las muestras de lluvia para El Tajín (TJ) y La Mancha (LM) 2006-2007

4.5 FUENTES POTENCIALES DE PRECURSORES DE LLUVIA ÁCIDA.

Uno de los objetivos planteados en la realización del presente trabajo de investigación es la de localizar las fuentes potenciales que contribuyan a la acidificación del agua de lluvia para los sitios de estudio.

El primer paso fue cuantificar las emisiones de precursores de lluvia ácida en los estados del Golfo de México, estos valores se encuentran en la Tabla 2.4. El siguiente paso consistió en realizar una investigación sobre la localización de las principales fuentes puntuales que contribuyan con una gran cantidad de precursores en la región del Golfo de México.

Dentro de las fuentes que se tomaron en cuenta se tiene a las:

- Centrales termoeléctricas
- Complejos petroquímicos
- Complejos procesadoras de gas
- Refinerías, entre otras.

Se ubicaron los sitios con una gran actividad industrial y se investigó en el INEM la cantidad de precursores que emiten a la atmósfera. En la tabla 4.10 se mencionan los municipios en los cuales se localiza algún tipo de actividad industrial en los estados del Golfo de México, cabe mencionar que en la zona la actividad petrolera predomina, y que forma parte esencial de la economía de estos estados.

Tabla 4.10.- Emisiones de los municipios con fuentes potenciales con mayor aportación como precursores de lluvia ácida para los sitios de estudio (ton/año).

Municipio	SOx	NOx
Cosoleacaque, Ver.	1,817.5	2,162.9
Cotaxtla, Ver.	2,946.0	138.5
Medellin, Ver.	20.8	3,973.5
Minatitlan, Ver.	52,762.0	4,611.4
Poza Rica, Ver.	3,080.4	1,487.1
Tihuatlan, Ver.	8,389.8	1,481.9
Tuxpan, Ver.	227,969.9	25,961.0
Altamira, Tamps.	91,794.0	9,466.5
Cd. Madero, Tamps.	38,941.9	5,947.8
Centro, Tab.	72,711.8	8,933.0
Huimanguillo, Tab.	941.4	1,611.5
Macuspana, Tab.	70,250.0	1,602.8
Reforma, Chis.	88,369.6	1,247.6
Campeche, Camp.	43,314.1	22,660.2
Cd. del Carmen, Camp.	107,709.0	16,997.3
Mérida, Yuc.	9,538.0	9,136.3
Valladolid, Yuc.	19,575.9	2,328.5

Cabe señalar que los municipios de Poza Rica y Tihuatlán, los cuales se ubican muy cerca de Tajín emiten 0.5 y 1.3 veces respectivamente la cantidad de SOx que se emiten en el Distrito Federal, cantidad demasiado grande considerando el tamaño de ambos sitios, lo cual los convierte pese a un valor bajo de emisiones comparado con el resto de los demás; en un factor a considerar por la cercanía.

Conociendo la ubicación de estos sitios, es posible determinar si estos contribuyen o no en la aportación de precursores de lluvia ácida en los sitios de muestreo. En

la figura 4.38 se muestra la localización de cada uno de estos sitios, y posteriormente mediante el uso de trayectorias de retroceso se analizará si aportan precursores a las zonas de estudio.

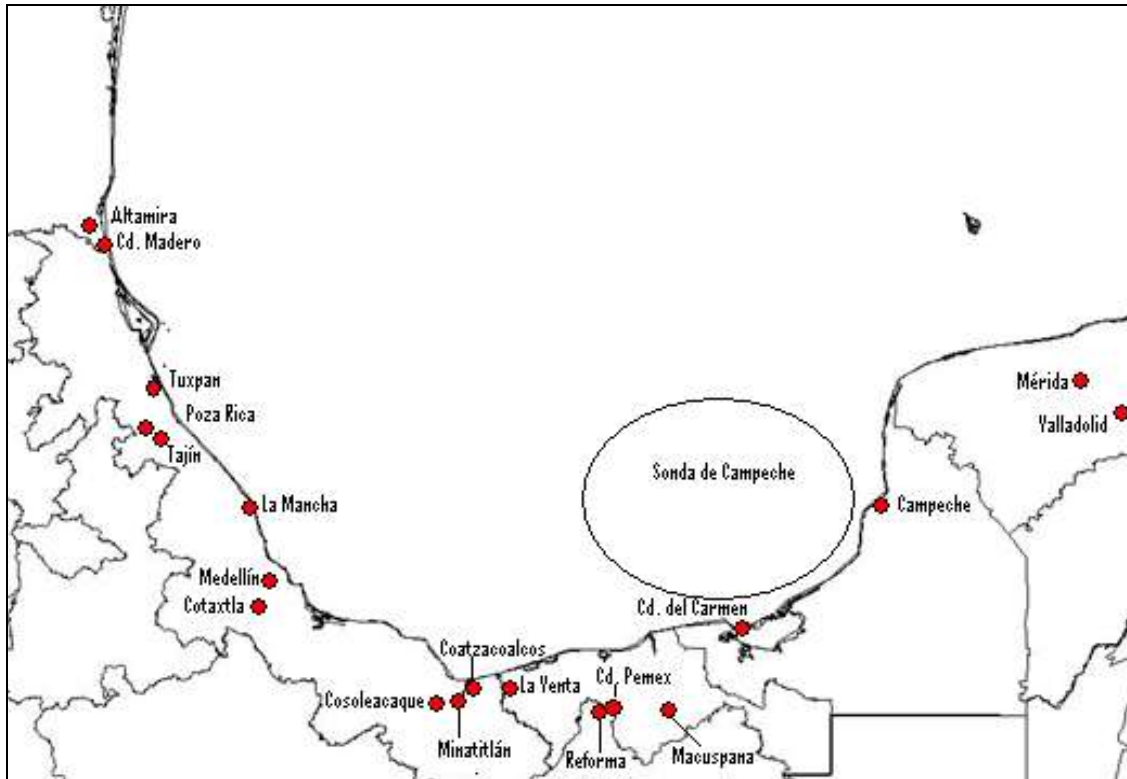


Figura 4.39.- Ubicación de las fuentes potenciales de precursores de lluvia ácida para los sitios de estudio.

En el INEM también se encuentran cuantificadas las emisiones generadas por la actividad petrolera en la sonda de Campeche, atribuyéndoselas al Municipio de Ciudad del Carmen, quien ocupa el segundo puesto solo por debajo de Tuxpan.

4.6 TRAYECTORIAS APLICADAS

Para el presente trabajo se elaboraron trayectorias de retroceso de las parcelas de aire que dieron origen a los eventos de lluvia registrados en las estaciones de muestreo. Estas trayectorias se elaboraron a 24 y 72 horas, esto con el objetivo de observar la aportación local y el transporte de largo alcance de los precursores, para lo cual 72 horas es un tiempo adecuado (Celle-Jeanton, et al, 2008).

Las trayectorias realizadas (Ver anexo IV) muestran básicamente dos patrones relacionados a la temporada del año en la que se dan los eventos de lluvia: del norte y del este. Las trayectorias provenientes del norte se dan en invierno, y las provenientes del este en el verano; en los meses de primavera y otoño hay una transición entre las condiciones meteorológicas por lo que en estos meses se tienen eventos de ambas direcciones. Las figuras 4.39 y 4.40 muestran las trayectorias más representativas para ambos sitios durante el periodo 2006-2007.

Las trayectorias se muestran en tres colores diferentes para diferenciarlas respecto al pH, el color rojo indica un evento por debajo del valor de 5.5, el color azul corresponde a los valores mayores a 5.7, y el verde se refiere a aquellas entre 5.5 y 5.7, los cuales son valores próximos al pH de lluvia que podría considerarse como neutro.

Para ambos sitios la mayor parte de los eventos se tienen en los meses de verano, acorde con la temporada de lluvias; también la dirección predominante es del este para los dos lugares, ya que como se mencionó antes los vientos alisios dominan la mayor parte de año.

En Tajín de un total de 80 trayectorias, 7 pasan claramente por la zona Tampico-Madero-Altamira, la cual es una zona considerada como crítica y además es una de las fuentes potenciales mencionada con anterioridad. De estas siete trayectorias, cinco resultaron ser ácidas mientras dos tuvieron un pH mayor a 5.65.

Otro sitio que resalta es la zona de Tuxpan, la cual de acuerdo con el INEM la aportación más alta de precursores en la región; de todos los eventos doce pasan por la zona de influencia de Tuxpan, siendo 11 de ellas ácidas y solo uno con pH cercano al valor neutro de lluvia. Sin embargo, debido a su cercanía con Tajín, la dispersión de las emisiones de la termoeléctrica de Tuxpan puede alcanzar la zona muy fácilmente, por lo que se considera podría afectar a un número más alto de eventos que solo los mencionados.

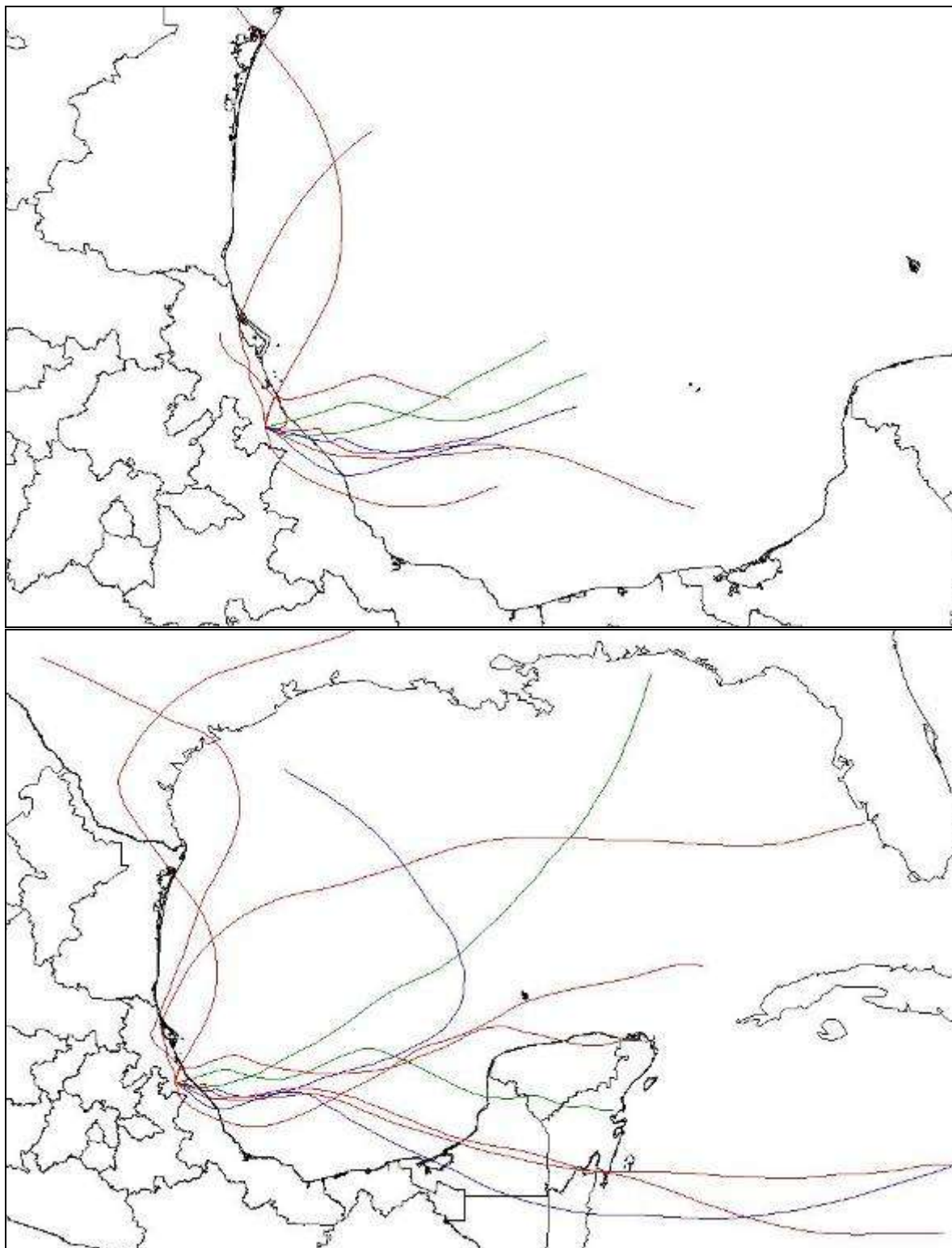


Fig.4.40.- Trayectorias representativas de los eventos de lluvia para El Tajín.

Los eventos restantes tienen su origen en el Golfo de México, pero cabe señalar que al tocar tierra o incluso en el mar su comportamiento es en varias ocasiones un tanto errático. Los municipios aledaños a la zona arqueológica, mismos que generan cerca de 1.8 veces los SOx que se generan en el Distrito Federal, son paso obligado de la mayoría de las trayectorias.

Para el caso de La Mancha de los 110 eventos analizados, solo 15 de ellos muestran haber pasado por las zonas de Cd. Madero – Altamira, Tuxpan y Poza Rica, de los cuales nueve de ellos fueron ácidos mientras que los otros 6 no lo fueron. Se puede afirmar que las fuentes localizadas al norte de La Mancha contribuyen en menor cantidad con la acidificación del agua de lluvia en este sitio. Estos eventos, como ya se mencionó anteriormente se tienen particularmente en los meses de invierno, por lo cual se observará que el color azul predomina en esta época de año para las trayectorias de La Mancha. Las trayectorias restantes provienen del Golfo de México, región en la cual también tenemos una gran emisión de SOx (sonda de Campeche).

Un número importante de trayectorias recorren en su totalidad la Península de Yucatán, que se caracteriza por tener un suelo de tipo calcáreo; para Tajín son 30 mientras que para La Mancha son 60, durante este recorrido pudieron haberse incorporado aerosoles del suelo ricos en sulfato o carbonato de calcio.

Ya que en La Mancha se presentan una mayor cantidad de eventos cuyo recorrido previo fue la Península, se podría pensar que esto ayuda a neutralizar en parte los SOx que se recolectan en la sonda de Campeche. Esto es consistente tanto con los coeficientes de correlación entre el sulfato y el calcio así como con el FN.

Además se realizó un análisis comparativo de la composición química de los eventos de lluvia entre las trayectorias provenientes del Norte y del Este para ambos sitios, con el objeto de determinar si había diferencia significativa en el contenido de aniones y cationes, así como de pH entre ambos tipos de trayectoria, para observar si una región influye más que la otra para la acidificación de la precipitación.

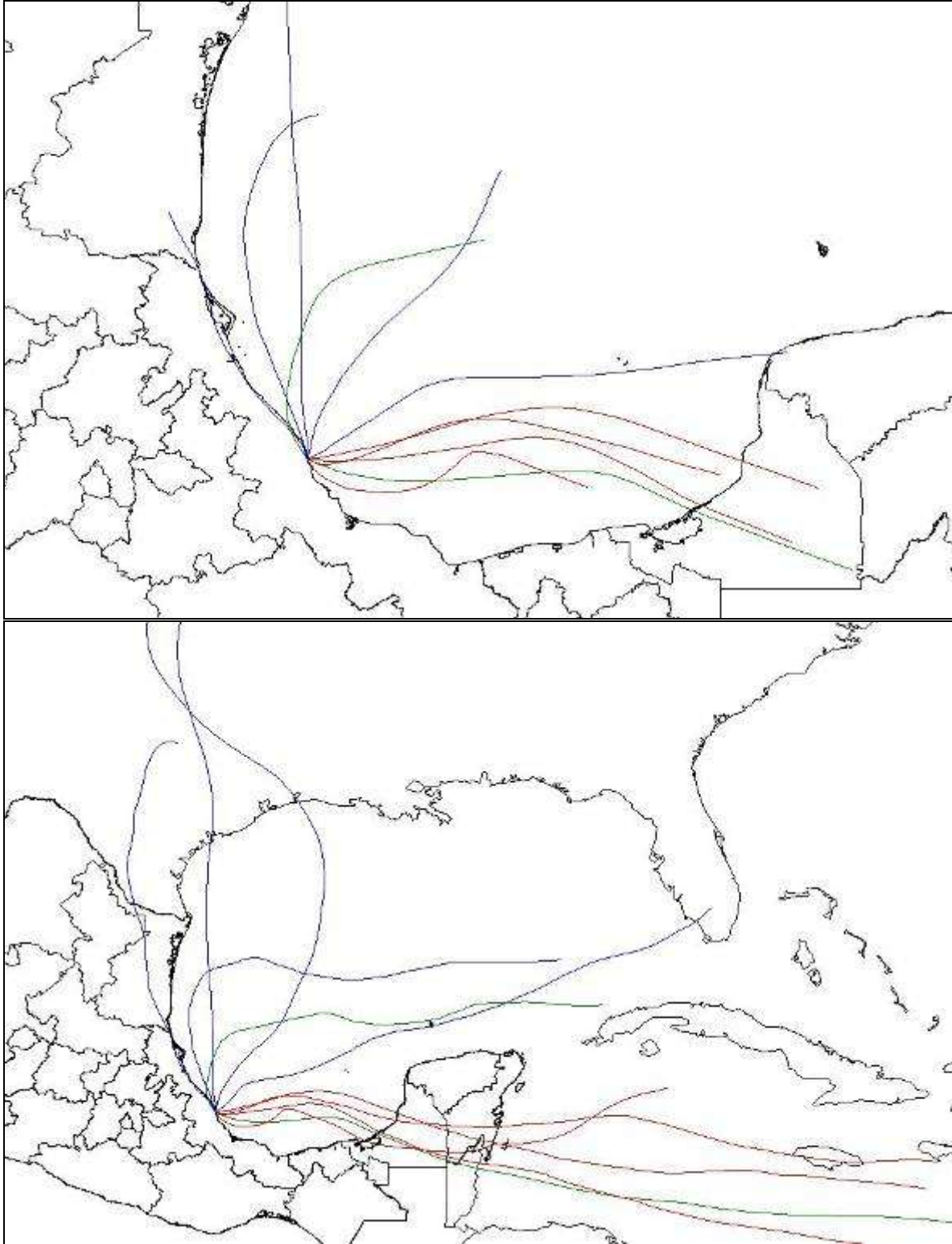


Fig.4.41.- Trayectorias representativas de los eventos de lluvia para La Mancha

En la tabla 4.11 se observan los valores de los parámetros medidos de las muestras, clasificados por la dirección de procedencia del evento, la cual puede ser del Norte o del Este.

Tabla 4.11.- Valores de pH, conductividad, aniones y cationes de las muestras de lluvia separadas por región de procedencia de trayectorias.

Estación	Año	Dirección	pH	Precipitación	Conductividad	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Tajín	2006	N	4.64	539.8	26.999	22.945	56.441	52.888	3.430	3.454	33.163	61.763	43.284	58.919
		E	4.53	694.2	31.339	29.490	56.239	48.685	5.389	10.015	49.666	70.539	49.446	79.282
	2007	N	4.78	575.3	13.382	16.445	32.027	16.162	2.932	8.324	19.028	23.640	31.975	33.143
		E	4.80	510.5	13.006	15.938	23.297	16.061	3.549	8.004	18.598	19.833	27.620	33.734
La Mancha	2006	N	5.15	459.3	11.859	7.128	40.507	4.997	4.934	11.710	12.424	45.359	5.423	19.400
		E	5.04	638.5	10.651	9.050	35.357	11.814	4.302	18.734	11.191	39.945	11.080	26.978
	2007	N	4.77	515.5	31.445	17.145	100.934	4.390	9.670	9.643	31.564	131.772	13.169	35.380
		E	4.80	736.5	23.062	15.930	69.651	17.119	7.717	9.852	25.156	91.462	17.099	31.666

De la prueba de realizada para observar diferencia significativa (Wilcoxon), solo se obtuvo que el valor de pH para La Mancha en el año 2006 entre las trayectorias que provienen del Norte y las que provienen del Este difiere de manera significativa, lo cual indica que para este año las fuentes que contribuyeron a que el pH sea más bajo son las localizadas al Este de la estación. Para el caso de El Tajín, no hubo diferencia significativa entre los dos recorridos observados, lo cual puede indicar que son las fuentes regionales las que más contribuyen a que el pH del agua de lluvia se mantenga bajo sin distinción del recorrido previo.

4.7 FUENTES LOCALIZADAS.

Ha sido mediante el análisis estadístico de los valores de las muestras de lluvia y de las trayectorias de retroceso, que se ha podido evaluar la contribución de las fuentes potenciales mencionadas anteriormente, y determinar aquellas que contribuyen en mayor medida con los precursores que originan la lluvia ácida en los sitios de estudio. De lo anterior podemos señalar a los siguientes sitios como el origen más probable de los SO_x y NO_x que repercuten en el Estado de Veracruz.

- Altamira
- Cd. Madero

- Tuxpan
- Poza Rica
- Sonda de Campeche

En cada uno de estos lugares la actividad industrial es grande comparada con otras ciudades del País, aunque cabe señalar que las ciudades de Altamira y Cd. Madero contribuyen en una cantidad mucho menor de eventos que los otros sitios, por lo cual solo se tomarán en cuenta las fuentes localizadas en la zona de Tuxpan – Poza Rica y la sonda de Campeche.

Las fuentes puntuales localizadas en estos sitios son:

- Central Termoeléctrica Presidente Adolfo López Mateos
- Central Termoeléctrica Poza Rica
- Complejo procesador de Gas Poza Rica
- Complejo Petroquímico Escolín
- Plataformas

Estas fuentes forman parte de las compañías paraestatales CFE y PEMEX. De las anteriores mencionadas el complejo petroquímico Escolín se dedica a la elaboración de polietileno de baja densidad, proceso en el cual de acuerdo al AP-42 no se tienen emisiones importantes de SO_x y NO_x; por lo tanto no se tomará en cuenta dentro de las estrategias de prevención y control.

En lo que respecta a las plataformas localizadas en la sonda de Campeche aquellas que contienen quemadores emiten cerca del 80% de contaminantes que se tienen por la extracción de crudo (*Villaseñor, et al, 2003*).

Las centrales termoeléctricas mencionadas usan combustóleo para la producción de energía, lo cual genera gran cantidad de óxidos de azufre más que de óxidos de nitrógeno, consistente con los resultados de las muestras de agua de lluvia. Estos compuestos son originados directamente en la quema del combustóleo al oxidarse el azufre contenido.

En los complejos procesadores de gas, las emisiones de azufre se tienen principalmente en el proceso de recuperación de azufre. La figura 5.1 muestra el

proceso general de tratamiento de gas, donde se aprecia que después de eliminar el H_2S y CO_2 (endulzamiento de gas), estos compuestos pasan a las plantas recuperadoras de azufre (figura 5.2), donde se obtiene azufre elemental; el azufre que no se logra recuperar es incinerado generando SO_x y emitido a la atmósfera.

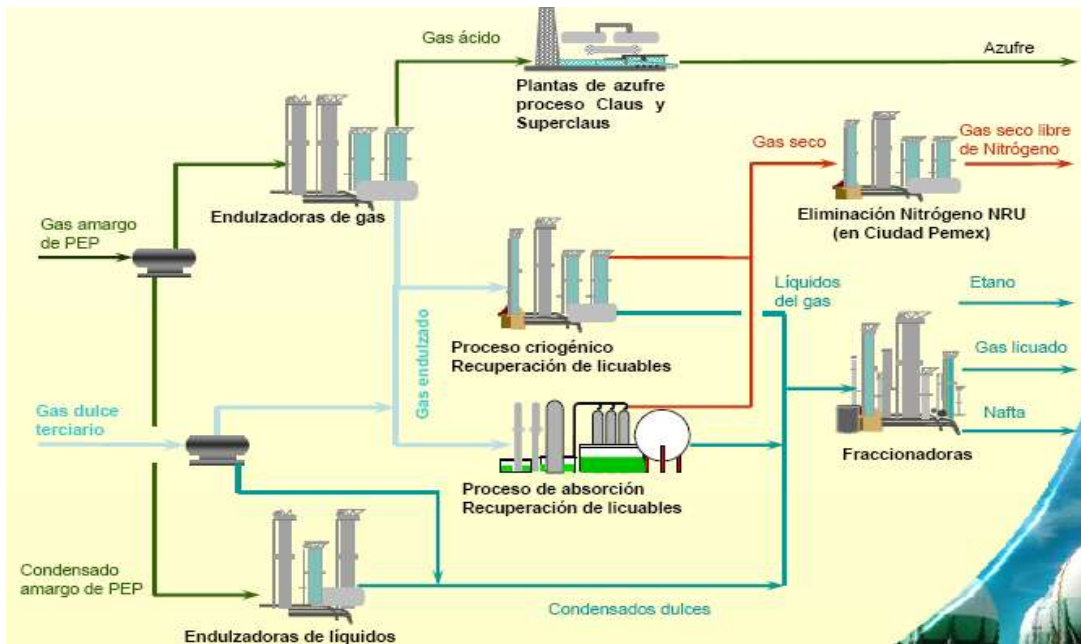


Figura 4.42.- Descripción del tratamiento en los Complejos Procesadores de Gas. Fuente: PEMEX

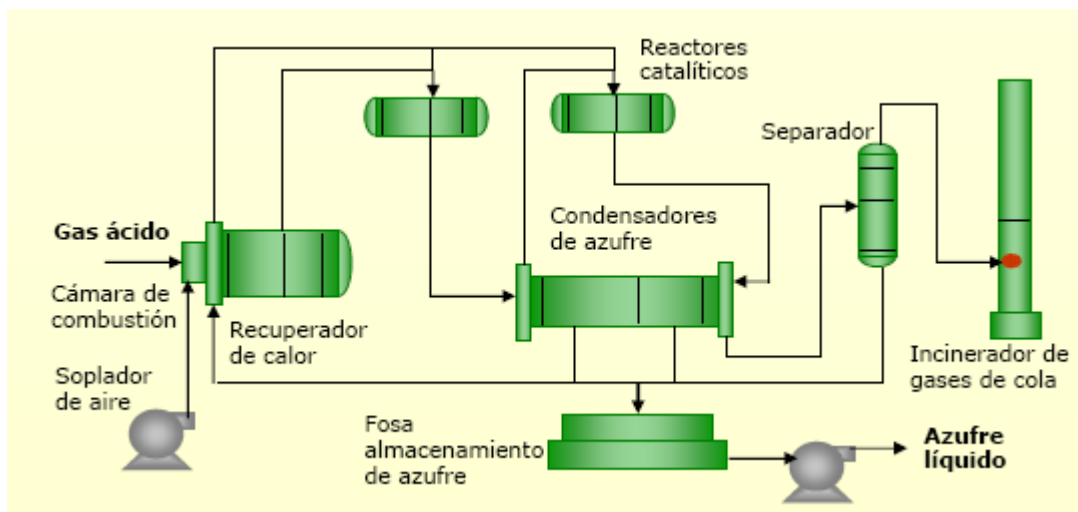


Figura 4.43.- Descripción del proceso de recuperación de azufre. Fuente: PEMEX

4.8 MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y CONTROL

La propuesta de medidas de prevención obedece fundamentalmente a que es en las fuentes donde se puede atacar el problema que se origina a partir de los precursores de lluvia ácida. Entre menos emisiones a la atmósfera se tenga el problema deberá disminuir. Sin embargo, no es factible establecer medidas en todas y cada una de las fuentes solo porque estas se encuentran emitiendo, sino más bien se debe priorizar aquellas que estén relacionadas con el problema que se estudia.

La prevención de la contaminación atmosférica puede abordarse de manera integral logrando un acuerdo entre industria y gobierno. Medidas como las expuestas en la sección 2.7 ayudan no solamente a prevenir la deposición ácida sino también a mejorar la calidad del aire, lo cual es benéfico para la salud de la población en general.

La elaboración de leyes y normas en México, así como su adecuada aplicación, que promuevan la reducción y control de las emisiones así como un monitoreo de las mismas, nos ayudarán a disminuir los efectos que se tienen en la actualidad.

En México se han llevado a cabo acciones, las cuales de manera indirecta ayudan a reducir el problema de la lluvia ácida. Estas acciones se han expuesto en “La Gestión Ambiental en México” (SEMARNAT 2006), y van enfocadas a reformas en las Normas Oficiales Mexicanas existentes en materia de emisiones a la atmósfera tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles; así como la fabricación y consumo de combustibles con un más bajo contenido de azufre.

Además, se han establecido en años recientes redes de monitoreo en diversas ciudades de la República Mexicana, lo cual nos permite conocer como se encuentra la calidad del aire.

Otra de las acciones implementadas para reducir emisiones en México, es la aplicación del programa PROAIRE, el cual plantea la renovación de la flota de taxis, sustitución de vehículos medianos de transporte público por otros de mayor capacidad, programa contra vehículos ostensiblemente contaminantes,

modernización y una aplicación más estricta del programa de verificación vehicular, actualización del programa Hoy No Circula, reducción de emisiones en las 300 industrias más emisoras, entre otras.

Dentro de las medidas de prevención aplicables a las centrales termoeléctricas podemos encontrar:

- Cambio de combustible: Consiste en cambiar el combustible por uno que genere menos contaminantes, por ejemplo el cambio de combustóleo por gas natural o turbogas. Aplicando este procedimiento las emisiones de SOx son mínimas, aunque las de NOx aumentan. La desventaja es que para realizar esta acción no solo basta cambiar el combustible, sino que debe hacerse una reconfiguración total de la planta para instalar quemadores apropiados al nuevo combustible.

- Alteración del combustible: Básicamente se refiere a la disminución del contenido de azufre en el combustóleo, para lo cual se requiere que el proceso en las refinerías cambie, además que el contenido de azufre en el crudo mexicano es alto comparado con otros a nivel mundial. Mediante este método la cantidad de SOx generados disminuye.

- Optimizar la combustión: El uso de cierto tipo de quemadores conlleva a una mayor producción de NOx, los quemadores llamados tangenciales reducen su formación, sin embargo para este caso lo que más se genera es SOx, por lo cual la aplicación de este método no ayudaría a reducir el problema expuesto.

De las medidas de control que hay, una de las más adecuadas para el caso de las emisiones en termoeléctricas es la eliminación de azufre en corriente gaseosa (Flue-gas desulfurization FGD). En este proceso (Figura 5.3) al gas de combustión se le hace reaccionar con un compuesto alcalino, para la formación de sulfatos sólidos, los cuales son removidos del equipo. Este proceso tiene tres variantes (*Schnelle, et al, 2002*):

- Wet scrubbers: En este proceso los gases de salida pasan a través de una torre en la cual se rocía CaO o CaCO₃ en solución acuosa, el SO₂ es removido por la solución y se forma sulfato de calcio. El producto de la reacción puede desecharse

o tratarse para recuperar el sulfato de calcio y aprovecharse para otros usos. La eficiencia del proceso es de un 99% para la remoción de SO_2 .

- Spray dry scrubbers: Al igual que el proceso anterior se hace reaccionar al gas de salida con una solución acuosa de CaO o CaCO_3 , solamente que el rociado es mucho más fino de tal manera que el calor de los gases evapora al agua del producto de la reacción; de esta manera se elimina la necesidad de darle un tratamiento al agua residual de la reacción. La eficiencia de este método es de 93-97%.

- Sorbent injection: En este método se rocía CaCO_3 o Ca(OH)_2 en base seca, los gases de salida reaccionan con el polvo y forman sulfato de calcio, la eficiencia que se alcanza con este método es de un 50-80%, pero el costo de operación es bajo y el no se tiene que tratar el producto de la reacción.

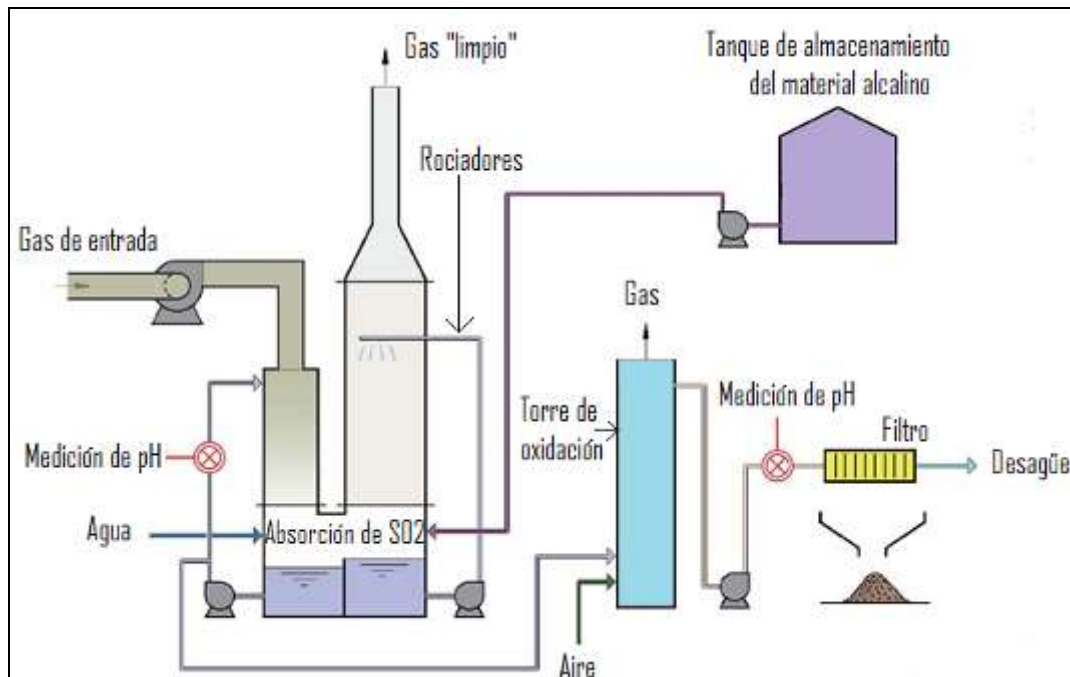


Figura 4.44.- Esquema del proceso de eliminación de azufre en corriente gaseosa. Fuente: Modificada de <http://www.yokogawa.com/iab/appnotes/iab-app-hydrosulurry-en.htm>

En el caso de los complejos procesadores de gas las emisiones se tienen en las plantas de recuperación de azufre, estas pueden disminuir de dos formas:

- a) Aumentando la eficiencia de recuperación del proceso Claus llevando la reacción a temperaturas más bajas en fase líquida
- b) Incorporando wet scrubbers en la salida de los gases.

Con el primer método el azufre recuperado es de un 98-99%, mientras que con el Segundo la eficiencia oscila entre 99.8-99.9%.

En el caso de La Mancha son los quemadores ubicados en la sonda de Campeche quienes emiten la mayor parte de SO_2 y NO_x producto de las actividades petroleras de la zona; para este tipo de fuentes el establecimiento de medidas de prevención y control es más complicado, ya que el contenido de los gases de combustión tiene una gran cantidad de H_2S , el cual es altamente tóxico; así como hidrocarburos varios que no pudieron ser captados para su aprovechamiento.

Una forma de prevenir la generación de una gran cantidad de SO_2 producto de la oxidación de H_2S , es la implementación de una unidad de Recuperación de Gas de Quemadores, (www.unhabitat.org) en la cual el gas se comprime y se envía a un proceso de endulzamiento (remoción de H_2S para la obtención de azufre elemental). De esta forma se aprovecha la energía calorífica del hidrocarburo recuperado, el azufre contenido en el gas y se previene la emisión de grandes cantidades de SO_2 .

Mediante la aplicación de las medidas de prevención y control como las sugeridas se puede esperar que la emisión de precursores disminuya de manera significativa en la región, lo cual llevaría a un gradual aumento en el pH del agua de lluvia para El Tajín y La Mancha, que es finalmente, lo que se busca para evitar el impacto a los ecosistemas y patrimonio cultural, los cuales son de todos los mexicanos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

1. Para los dos sitios estudiados (El tajín y La Mancha) se encontró un promedio ponderado anual de pH de agua de lluvia menor a 5.65, por lo cual se tiene la presencia de lluvia ácida. Ésta acidez indica que existen precursores incorporándose al agua de lluvia que incide en la región de estudio.

2. En cuanto a conductividad el promedio ponderado más alto se encontró para El Tajín en el año 2006, seguido de La Mancha en 2007, siendo estos dos valores muy similares.

3. De los cationes cuantificados, el sodio es el que tiene un valor de concentración mayor, seguido del calcio, amonio, magnesio y potasio. Los aniones cuantificados observaron el siguiente comportamiento en orden decreciente: cloruros, sulfatos y nitratos.

4. El valor de nitratos más alto se tiene en El Tajín, y la tendencia encontrada considerando datos de otros años es creciente, esto para los dos sitios estudiados.

5. El valor de sulfatos más alto se tiene para El Tajín en el año 2006, mientras que en el 2007 el valor es similar para ambos sitios; esto sugiere que los sulfatos influyen en el pH del agua de lluvia, ya que para el año 2007 el valor de pH fue similar y en 2006 el valor de pH presentó diferencia significativa entre los dos sitios.

6. Los resultados de la prueba de correlación de Spearman, muestran una fuerte correlación para la formación de cloruro de sodio, nitrato de amonio y sulfato de calcio.

El nitrato de amonio está ligado a la descomposición de la materia orgánica y también a los fertilizantes utilizados en actividades agrícolas; ambas estaciones están rodeadas por gran cantidad de vegetación y la actividad agrícola es muy fuerte en ambas. Por lo cual se considera a estas fuentes como las que aportan amonio y nitrato al agua de lluvia.

El origen del sulfato de calcio está más ligado a aerosoles que se desprenden del suelo, cabe señalar que la correlación es más grande en La Mancha que en El Tajín para este compuesto, lo cual sugiere que hay una emisión más alta de SO_x en los alrededores de El Tajín que en La Mancha.

7. Se aplicó la prueba no paramétrica de suma de rangos de Wilcoxon para establecer si hay diferencia significativa entre los valores de concentración de los distintos iones así como de pH y conductividad.

De esta prueba se encontró que si hay diferencia significativa para casi todos los parámetros al nivel de significancia de 0.05 entre las dos estaciones para los dos años, a excepción del potasio y calcio en 2006; y el pH y sulfato en 2007. En la estación de El Tajín para años consecutivos no hubo diferencia significativa más que para el nitrato, mientras que en La Mancha en años consecutivos el sodio, amonio, potasio y magnesio no difieren significativamente. Esto sugiere que en cuanto a concentración de iones, la composición de agua de lluvia permanece muy similar de un año a otro en cada estación.

En lo que respecta al pH en La Mancha entre los años 2006 y 2007 el valor disminuyó drásticamente de un año a otro, sin embargo, aplicando la prueba de Wilcoxon se encuentra que esta disminución no es significativa.

8. Una de las pruebas aplicadas a los valores de iones fue la prueba de factor de enriquecimiento (FE) y del factor de neutralización (FN), del FE se concluye que el 90% de los sulfatos encontrados en agua de lluvia para El Tajín son de origen no marino, mientras que para La Mancha el valor promedio es de un 75%, lo cual sugiere una mayor presencia de SO_x provenientes de actividades humanas que se incorporan al agua de lluvia que incide sobre El Tajín. En cuanto a nitratos el 100% son de origen no marino en ambos sitios, ya que la concentración de estos en agua de mar es demasiado baja, pudiendo ser emitidos por actividades humanas o por fuentes naturales.

Los FN calculados oscilan entre 0.68 – 1.12, siendo los más bajos para El Tajín y más altos para La Mancha, lo cual sugiere una mayor presencia de aerosoles atmosféricos alcalinos en La Mancha.

9. Se ubicaron regiones con fuerte actividad industrial en los Estados del Golfo de México y se investigó cual es su aportación de precursores con base en el INEM para su análisis con trayectorias de retroceso. En un análisis comparativo de las emisiones, se observó que existen fuentes puntuales con una aportación muy alta de SO_x, sobre todo en los municipios de Tuxpan, Veracruz y Cd. del Carmen, Campeche.

10. Se realizaron trayectorias de retroceso para cada evento de lluvia en las estaciones de monitoreo para los años 2006 y 2007. Estas trayectorias muestran dos patrones básicos de transporte de masas de aire: del norte y del este; presentándose estos en invierno y verano respectivamente.

Se realizó un análisis estadístico para comparar la composición química de las muestras dependiendo de su región de origen. Para El Tajín no hubo diferencia significativa en ningún parámetro, para los dos años estudiados, entre los eventos de lluvia provenientes del Norte y los del Este, lo cual indica que las fuentes ubicadas en ambas regiones de procedencia de trayectorias así como las cercanas contribuyen en conjunto a la acidificación del agua de lluvia en este sitio.

En la Mancha se observó para el año 2006 una diferencia significativa entre los valores de pH de las muestras de los eventos que provienen del Norte y los del Este, resultando tener un pH más bajo los eventos cuyas fuentes potenciales se ubican en la parte oriental del Golfo de México.

10. Del análisis de trayectorias se aprecia que las fuentes cercanas a El Tajín como lo son las termoeléctrica de Tuxpan y Poza Rica, así como el complejo procesador de gas Poza Rica, son las que aportan una mayor cantidad de precursores a los eventos muestreados; también una de las regiones que aporta precursores a los eventos de lluvia muestreados es la Sonda de Campeche, aunque en menor escala.

Para La Mancha, las fuentes que contribuyen con la acidificación del agua de lluvia son las plataformas ubicadas en el Golfo de México, en las cuales se extrae la mayor cantidad de petróleo crudo del país.

Las fuentes mencionadas en los dos párrafos anteriores, de acuerdo al análisis químico, estadístico y de trayectorias, son las más probables de aportar precursores de la lluvia ácida que incide en los sitios de muestreo.

RECOMENDACIONES

Llevar a cabo acciones que conduzcan a una menor emisión de precursores, y así disminuir el problema de la lluvia ácida y todas las consecuencias que esta acarrea. Estas acciones se pueden enfocar de dos maneras, una global y otra particular.

De manera global se sugiere que se acuerde y legislen acciones para disminuir la emisión de precursores, entre ellas se exponen las siguientes:

- Establecer un acuerdo nacional de reducción de precursores de lluvia ácida con metas a mediano y largo plazo.
- Establecer límites permisibles de emisión de precursores por tipo de industria.
- Incentivar fiscalmente a empresas que cumplan con la reducción de emisiones.
- Multar a aquellas industrias que emitan más de lo que se establezca como permitido.
- Generar combustibles con un bajo contenido de azufre.
- Generar una mayor cantidad de energía eléctrica mediante tecnologías limpias.

De manera particular y enfocándonos en las fuentes mencionadas, para reducir emisiones de precursores, las acciones sugeridas a llevarse a cabo son:

- Establecer dispositivos de control en las Centrales Termoeléctricas de Tuxpan y Poza Rica como lo son los wet scrubbers.
- Aumentar la eficiencia del proceso de recuperación de azufre en el complejo procesador de gas Poza Rica.

- Implementar un sistema de recuperación de gas de quemadores para la zona de plataformas.

Con la implementación de las acciones mencionadas anteriormente se busca disminuir las emisiones de precursores y su posterior incorporación al medio ambiente, de manera particular al agua de lluvia. También se propone seguir el estudio de deposición ácida aún bajo la implementación de las estrategias de prevención y control para observar la eficacia de las medidas tomadas.

Paralelamente al estudio y de manera complementaria se sugiere ampliar los sitios de muestreo para cubrir todo el Golfo de México, así como poner una estación en la zona de plataformas en la sonda de Campeche.

En los sitios de monitoreo se sugiere llevar a cabo un estudio en suelo y ecosistemas de la zona para detectar el posible impacto por la acidificación del agua de lluvia.

La aplicación de un modelo de dispersión de contaminantes a las fuentes mencionadas ayudaría a corroborar y cuantificar la aportación de precursores que estas aportan al agua de lluvia.

Realizar un monitoreo integral de calidad del aire para validar el modelo de dispersión aplicado, poniendo especial interés en los precursores de lluvia ácida.

La creación de un Plan de Prevención de Deterioro Significativo para la Zona Arqueológica de El Tajín y para la zona de manglares adenaña al Morro de La Mancha, debe plantearse para la preservación del patrimonio cultural y natural de los mexicanos.

ANEXOS

Anexo I

Resumen de las condiciones meteorológicas en los sitios de muestreo.

CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN EL TAJÍN

Como parte de la red de monitoreo de deposición húmeda en el estado de Veracruz, se encuentran en cada uno de los sitios estaciones meteorológicas que nos permiten medir otras variables de interés aparte de la precipitación, la cual es la que más nos ocupa en este caso.

La información recabada por las estaciones fue analizada y se muestra en resumen a continuación. Cabe señalar que la información no se tiene completa para todas las variables en los dos años en ambas estaciones, esto debido a fallas en la transmisión – recepción de datos, descompostura de los sensores ocasionada por intemperismo en el ambiente marino e incluso eventos meteorológicos extremos que ocasionaron en más de una ocasión la inutilización completa de la estación con la pérdida de la información.

En la tabla I.1 se muestran los valores promedio anuales para El Tajín de las principales variables, como lo son las temperaturas, presión y precipitación. Cabe recordar que en el caso de las temperaturas los valores promedio que se muestran están un poco sesgados a los meses de invierno, ya que la estación no reportó temperatura de junio a septiembre del 2006.

Tabla I.1.- Promedio anual de variables atmosféricas para El Tajín

T. minima (°C)	17.3
T. media (°C)	21.7
T. maxima (°C)	27.4
Presión (mb)	1001.9
Precipitación (mm)	1184.3

En la Figura I.1 se muestra a detalle los valores promedio mensuales de temperatura de la estación, en la cual observamos un aumento progresivo de la temperatura de los meses de enero a mayo, y un descenso gradual de octubre a diciembre.

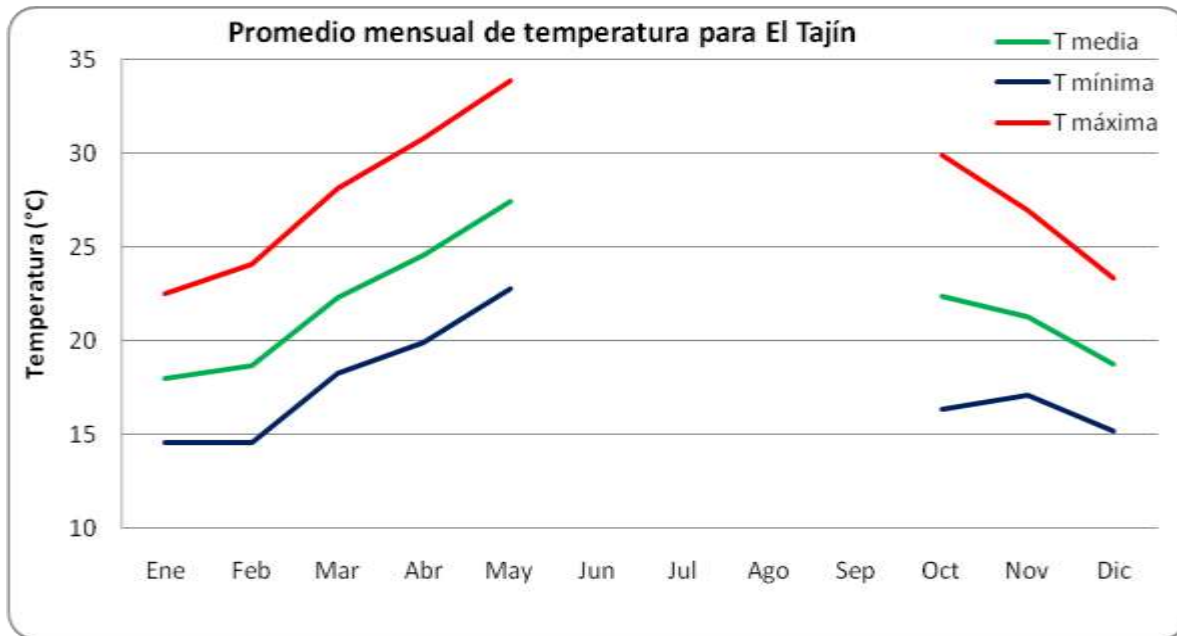


Figura I.1.- Promedio mensual de temperatura de El Tajín 2006-2007

Aunque no se pueda ver la información de junio a septiembre se espera que la temperatura no sea mayor que la observada en mayo, al ser este mes el reportado como más caluroso en la región basado en la climatología de otros sitios cercanos.

En cuanto a la presión (figura I.2) esta permanece por lo general alta en los meses de invierno debido a la invasión de frentes fríos, mientras que baja debido al calentamiento ocasionado por la estacionalidad así como por el paso de ondas tropicales. Esta baja en la presión promueve la generación de nubes convectivas y a su vez la precipitación.

La gráfica de precipitación (figura I.3) se obtuvo promediando los valores mensuales en los años 2006 y 2007. De esta se aprecia que la precipitación se tiene principalmente durante los meses de verano, aunque en la temporada de invierno se tiene una aportación también importante, esto debido a la presencia de frentes fríos que dejan lluvia a su paso.

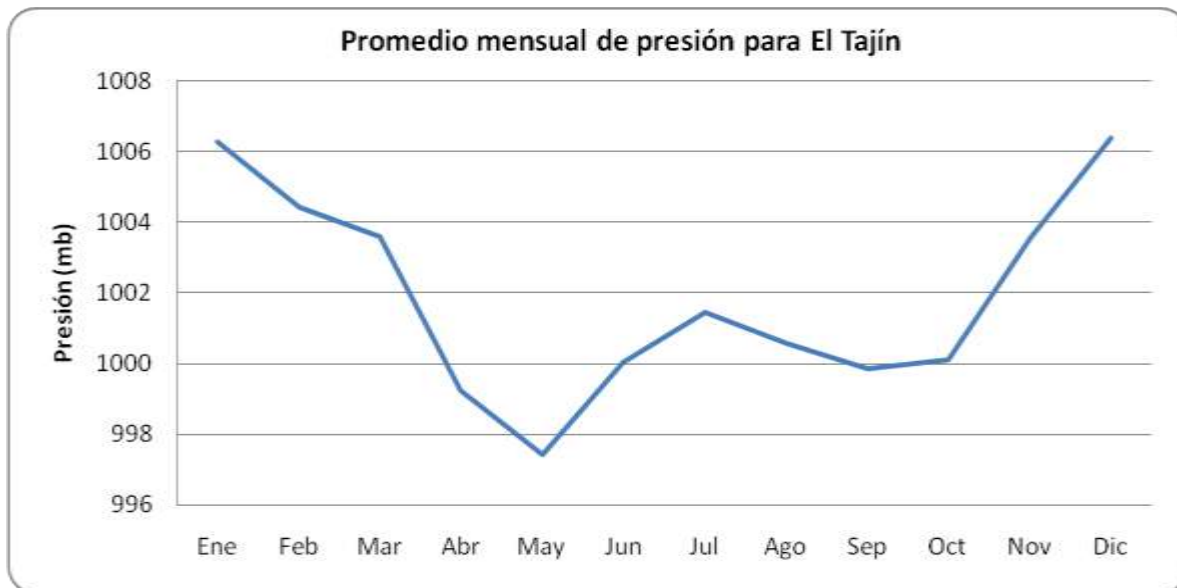


Figura 1.2.- Promedio mensual de presión para El Tajín 2006-2007

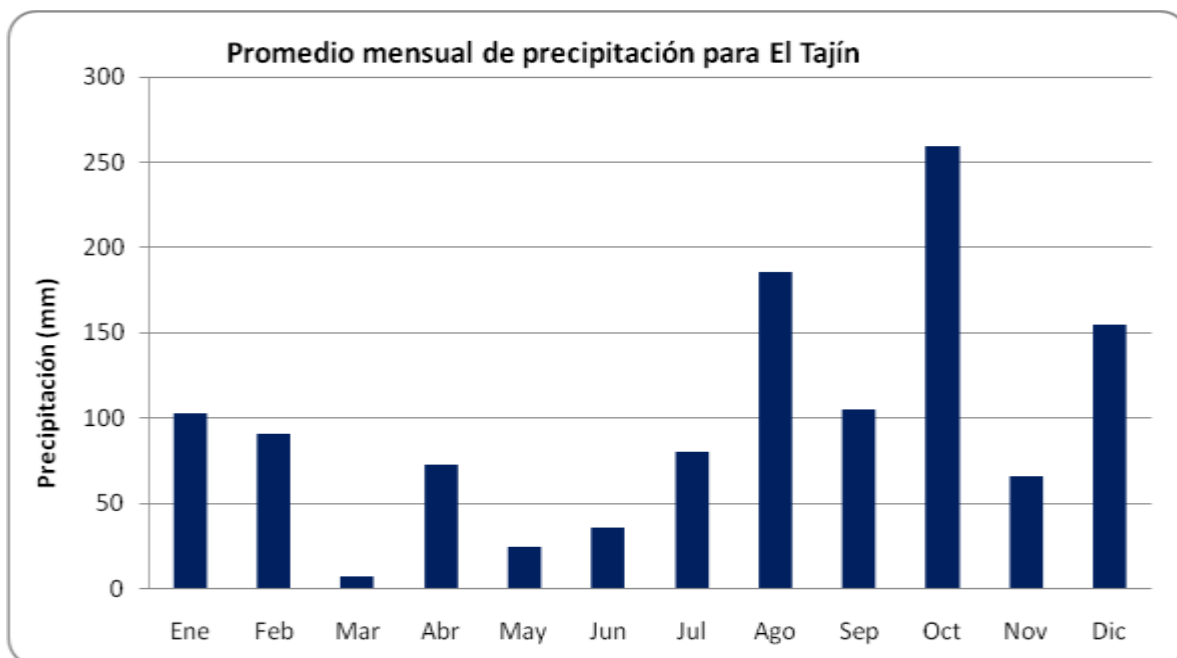


Figura 1.3.- Promedio mensual de precipitación para El Tajín 2006-2007

Los vientos en la estación de El Tajín, son predominantemente del Norte y del Sureste. En las rosas de los vientos (figuras 1.4-6) de los meses de invierno se muestra una mayor frecuencia entre el N-NW, y es a partir del mes de mayo

donde empiezan a fluctuar las direcciones, siendo dominante el viento proveniente del cuarto cuadrante.

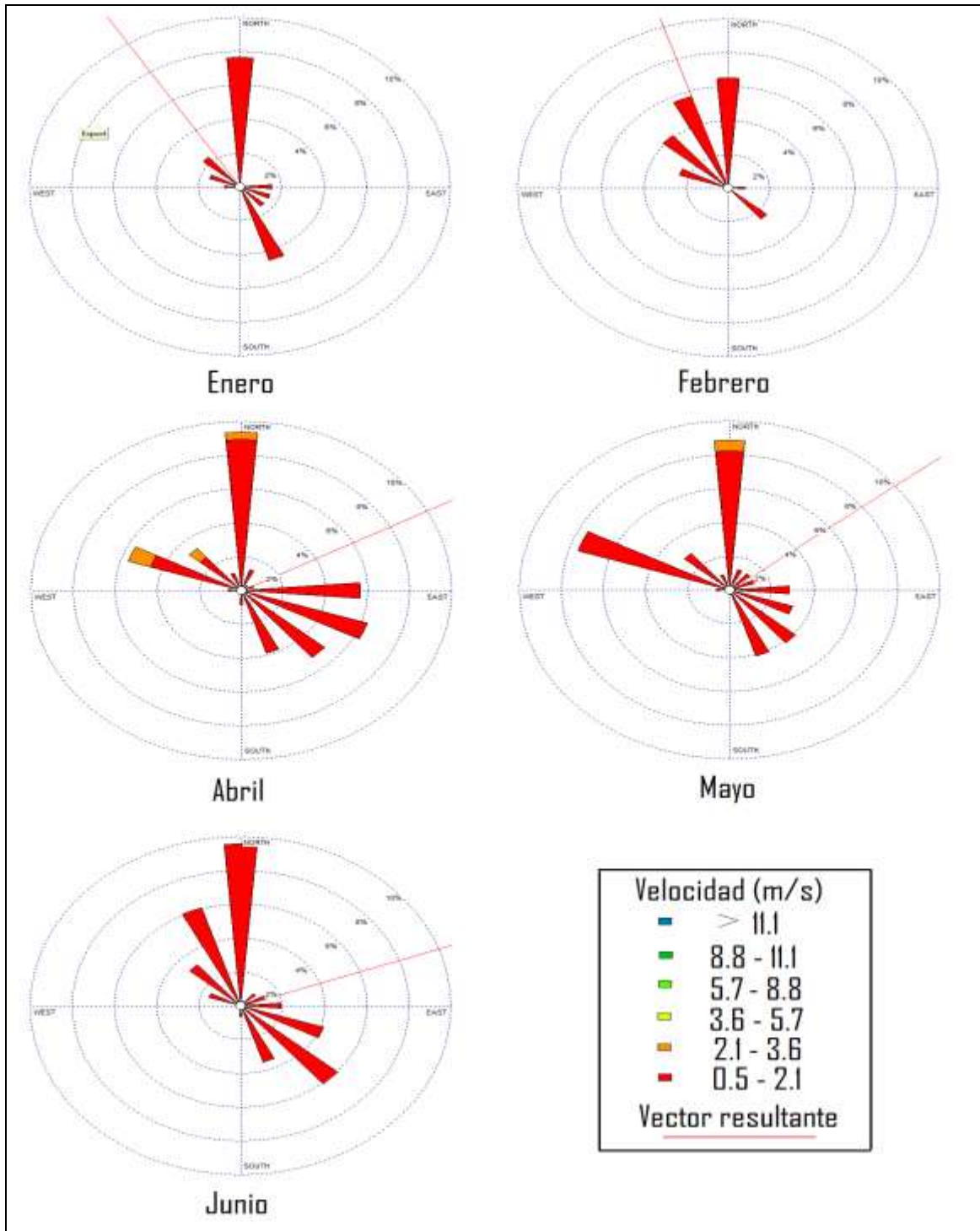


Figura I.4.- Rosa de los vientos de El Tajín para los meses Enero – Junio 2006

La velocidad de los mismos se mantiene por lo general baja, siendo el rango de 0.5-2.1 m/s el más observado durante todo el año.

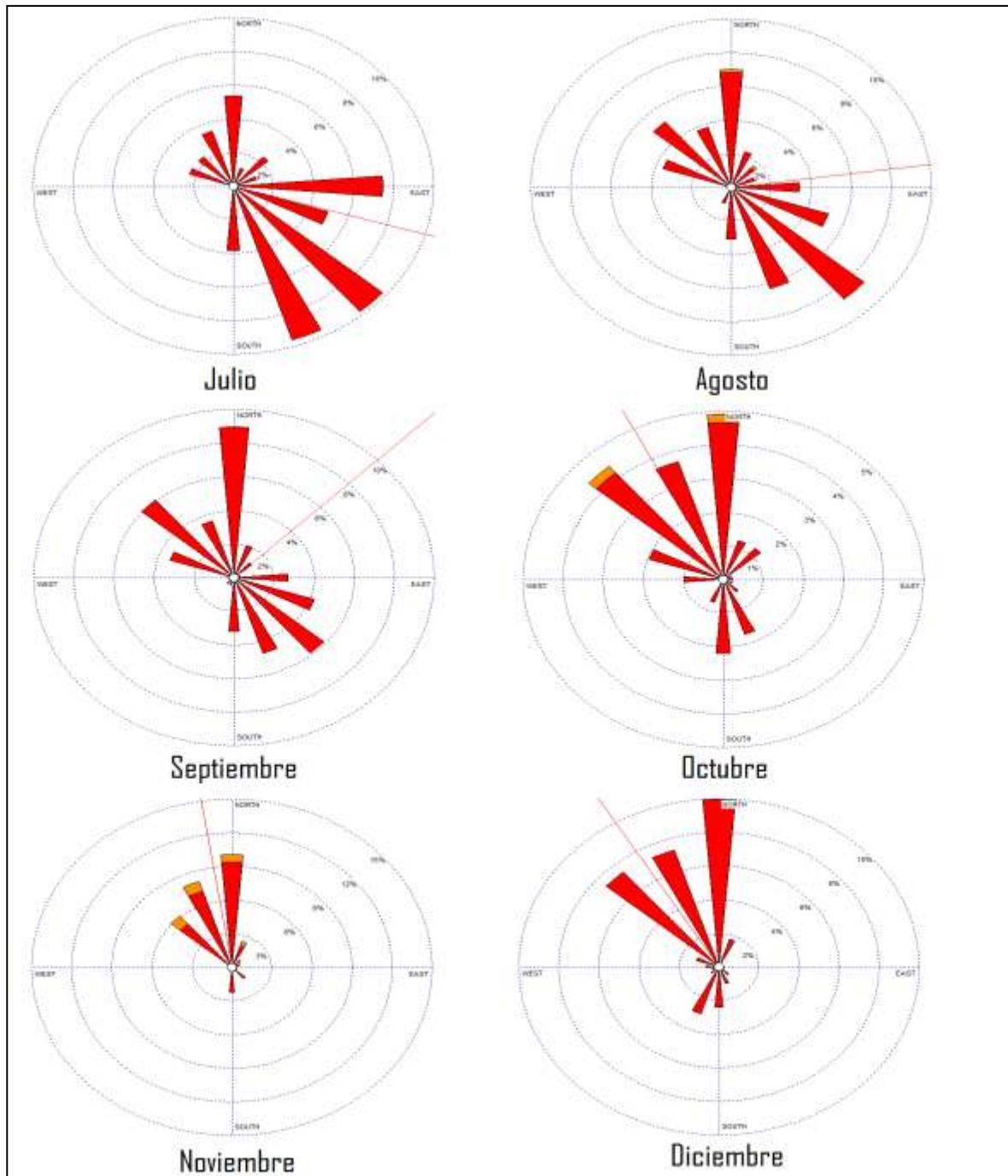


Figura 1.5.- Rosa de los vientos de El Tajín para los meses Julio – Diciembre 2006

Es importante señalar que las rosas de viento tienen correspondencia con la dirección de las trayectorias realizadas para El Tajín. Esto nos indica que el transporte atmosférico en niveles bajos no difiere del encontrado a 500 msnm.

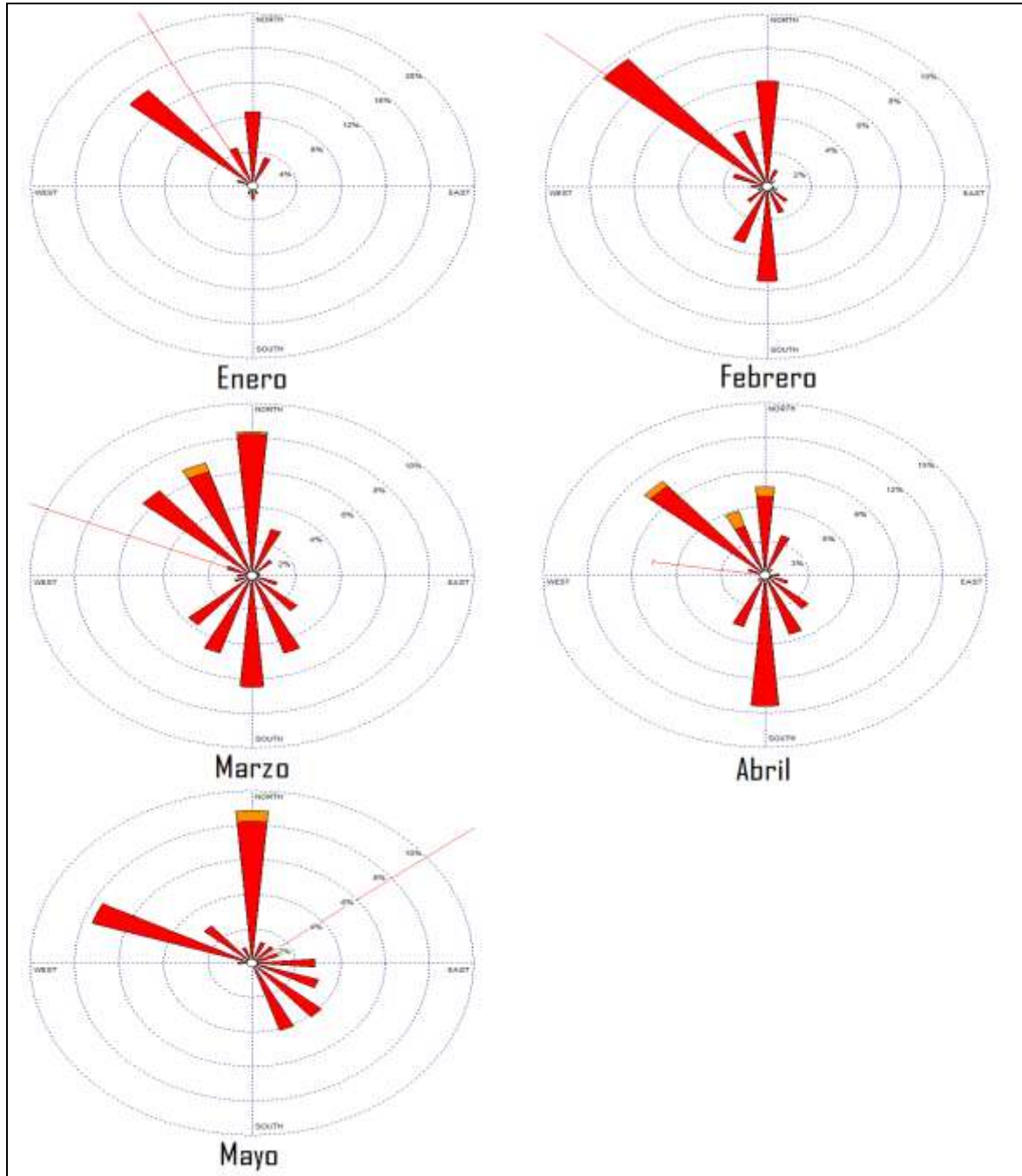


Figura I.6.- Rosa de los vientos de El Tajín para los meses Enero – Mayo 2007

LA MANCHA

En La Mancha, los datos disponibles de la estación meteorológica corresponden de febrero a diciembre de 2007, sin embargo, los datos de precipitación fueron obtenidos mediante pluviómetros convencionales, lo cual no representó una pérdida alguna en cuanto a la información generada.

En la tabla I.2 se muestran los valores promedio anuales obtenidos, se aprecia que las temperaturas promedio son altas, incluida la mínima, la precipitación supera los 1000 mm, llegando a representar un 70% más que la media nacional.

Tabla I.2.- Promedio anual de variables atmosféricas para La Mancha

T. minima (°C)	22.1
T. media (°C)	25.3
T. maxima (°C)	28.9
Humedad (%)	82.4
Presión (mb)	1012.2
Precipitación(mm)	1206.4

Por encontrarse en un ambiente marino, la humedad se mantiene alta a lo largo de todo el año, reflejándose en un promedio anual de más de 80%. En cuanto a la presión, se mantiene en un valor muy cercano al de una atmósfera estándar (1013 mb), siendo su elevación la principal causa.

En la figura I.7 se observa la marcha anual de la temperatura. Los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre muestran los valores más bajos, mientras que el resto del año las temperaturas se mantienen altas, resaltando que la temperatura máxima sobrepasa en promedio los 30 °C.

Como se dijo anteriormente la humedad se mantiene elevada la mayor parte del año, siendo la temporada de lluvias donde alcanza los valores más altos (figura I.8).

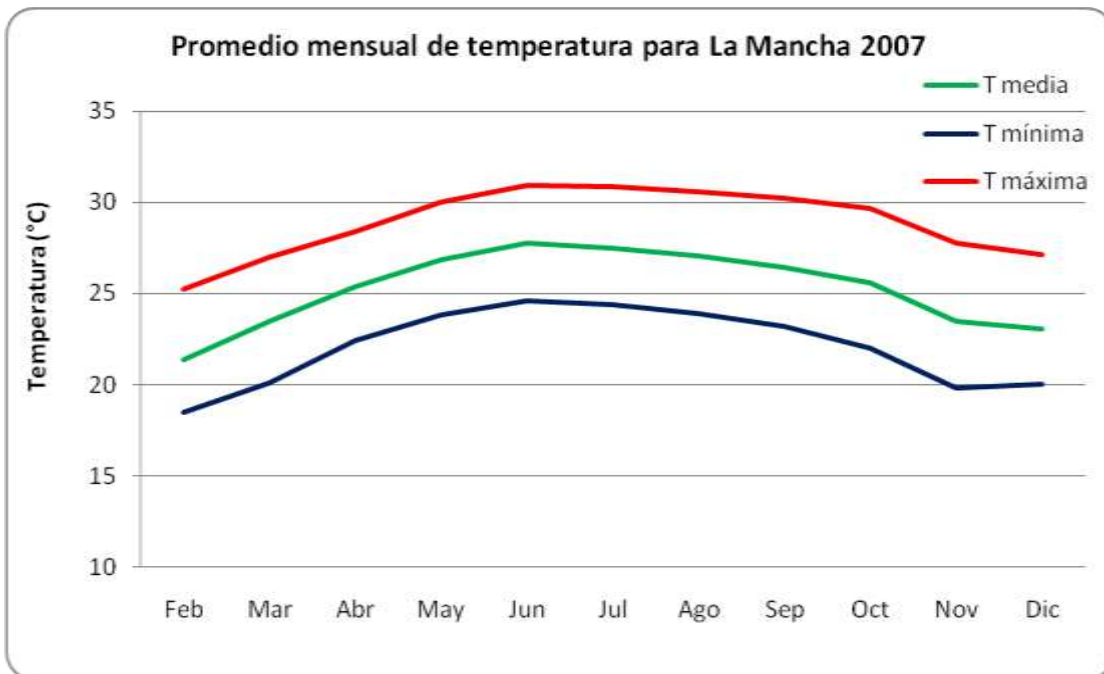


Figura I.7.- Promedio mensual de temperatura de La Mancha 2007

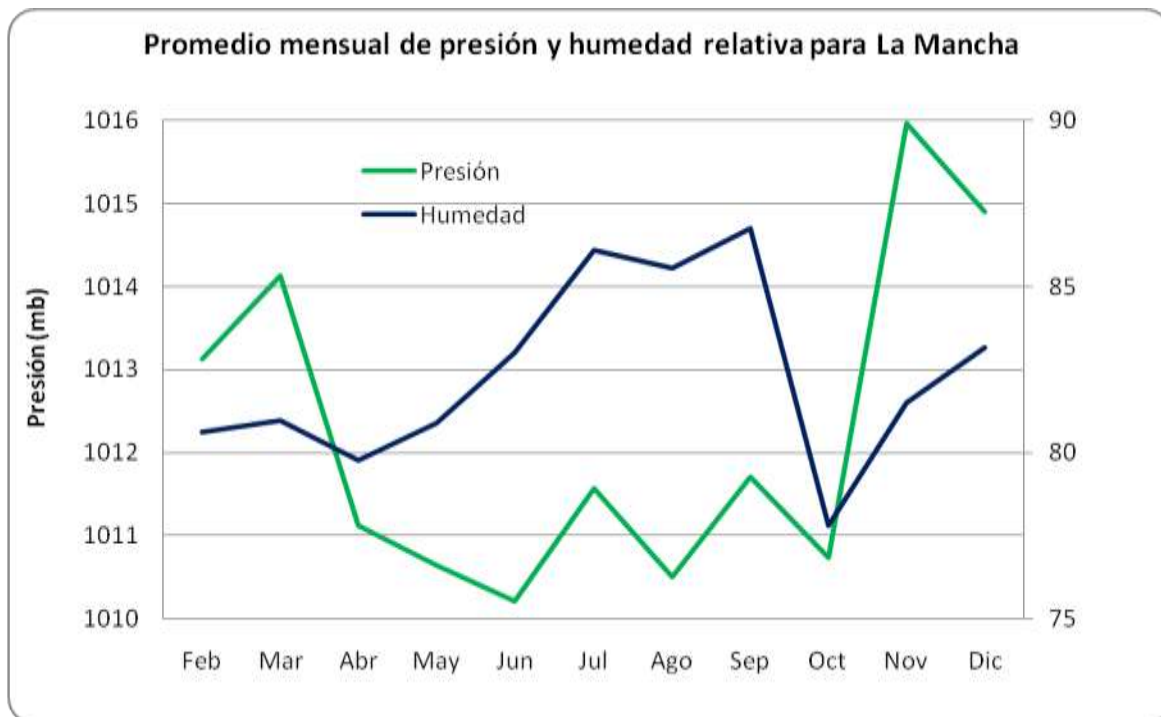


Figura I.8.- Promedio mensual de presión y humedad relativa de La Mancha 2007

El comportamiento de la presión atmosférica es alta en los meses de invierno, debido a la invasión de frentes fríos, y baja durante el verano, debido al calentamiento radiativo y al paso de ondas tropicales que generan lluvias a su paso.

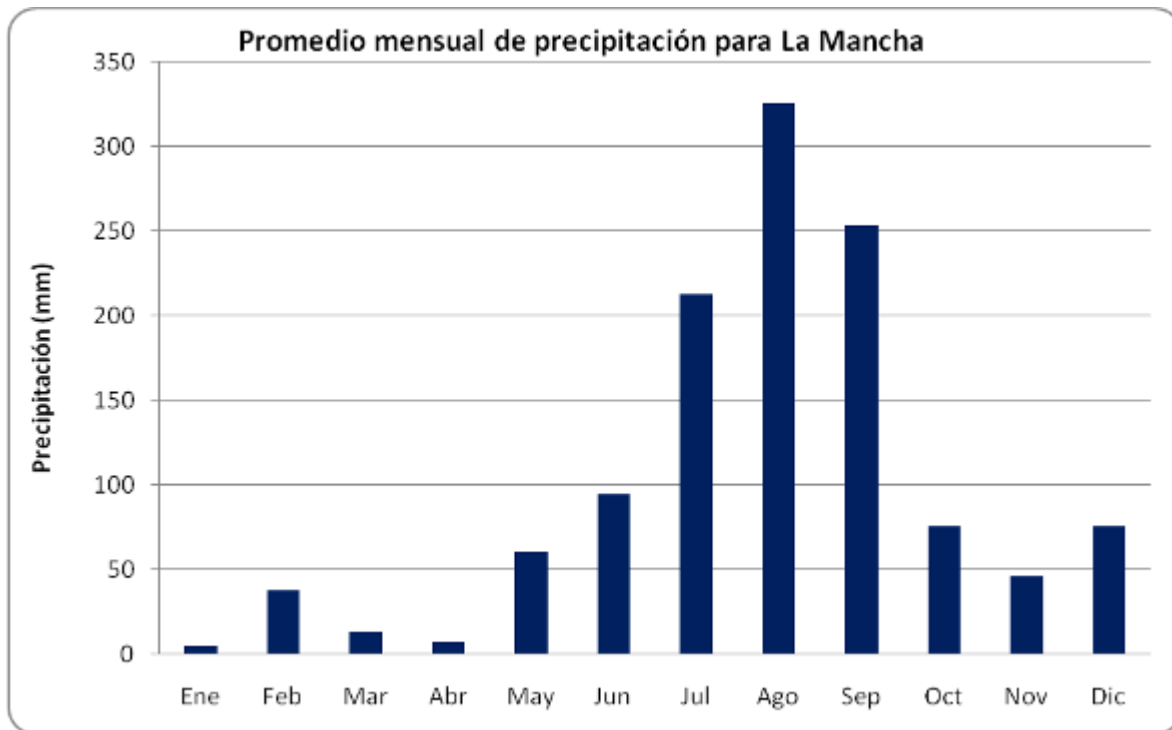


Figura I.9.- Promedio mensual de precipitación de La Mancha 2006 – 2007

En la figura I.9 se muestra la marcha anual de la precipitación que se tiene en la estación de La Mancha, en esta se aprecia como los meses de enero a abril la precipitación se mantiene baja, siendo a partir de mayo cuando comienza la temporada de lluvias que finaliza en octubre. Los meses de noviembre y diciembre tienen precipitación pero el mecanismo de formación es diferente del presentado durante la temporada de lluvias.

El viento en este sitio (figuras I.10-11) mantiene una dirección predominante del cuarto cuadrante durante los meses para los cuales se tiene información. Debido a la falta de información no es posible generalizar ni sacar una conclusión respecto a las trayectorias realizadas para este sitio durante el periodo de muestreo.

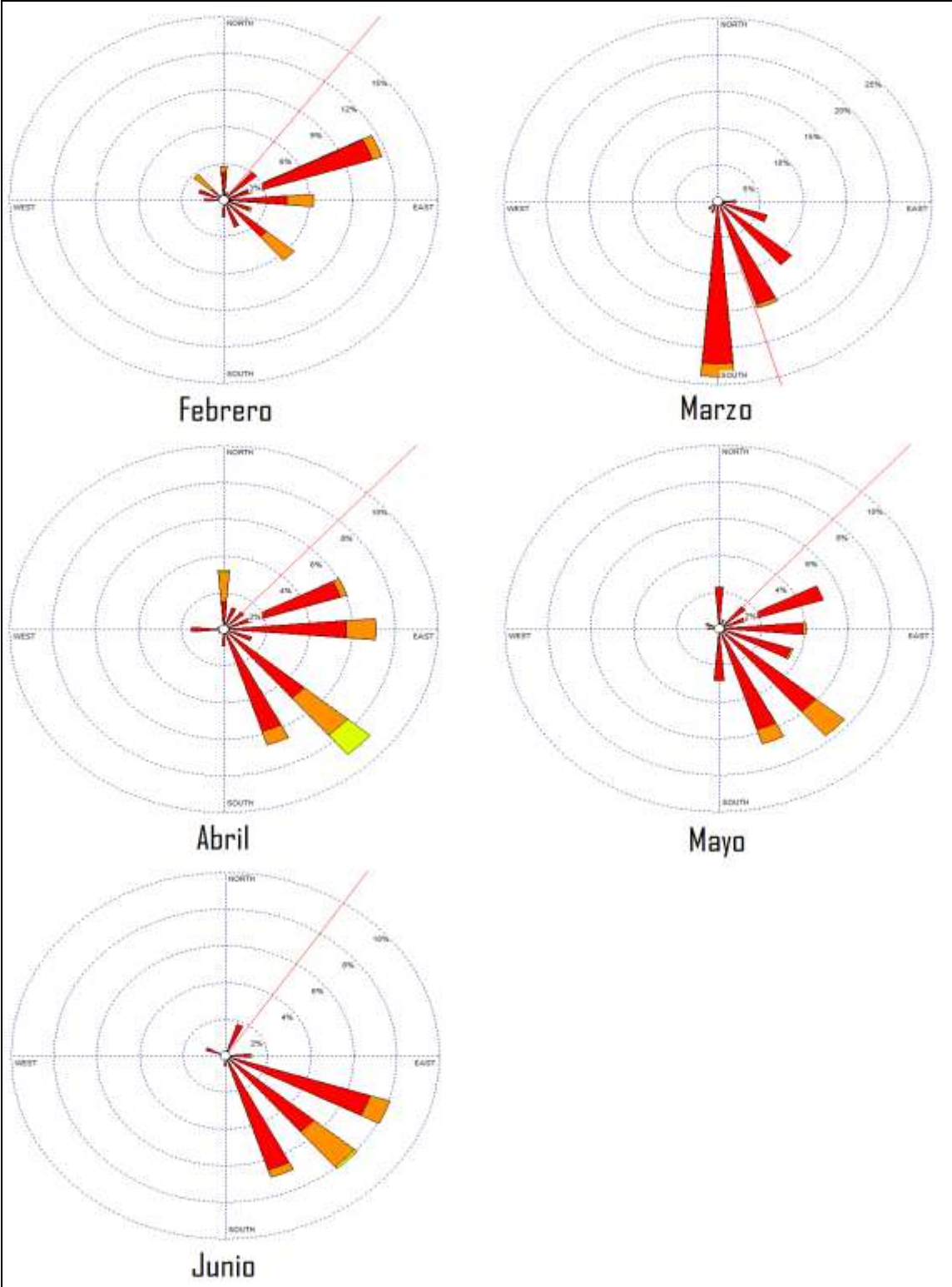


Figura I.10.- Rosa de los vientos de La Mancha para los meses Febrero – Junio 2007

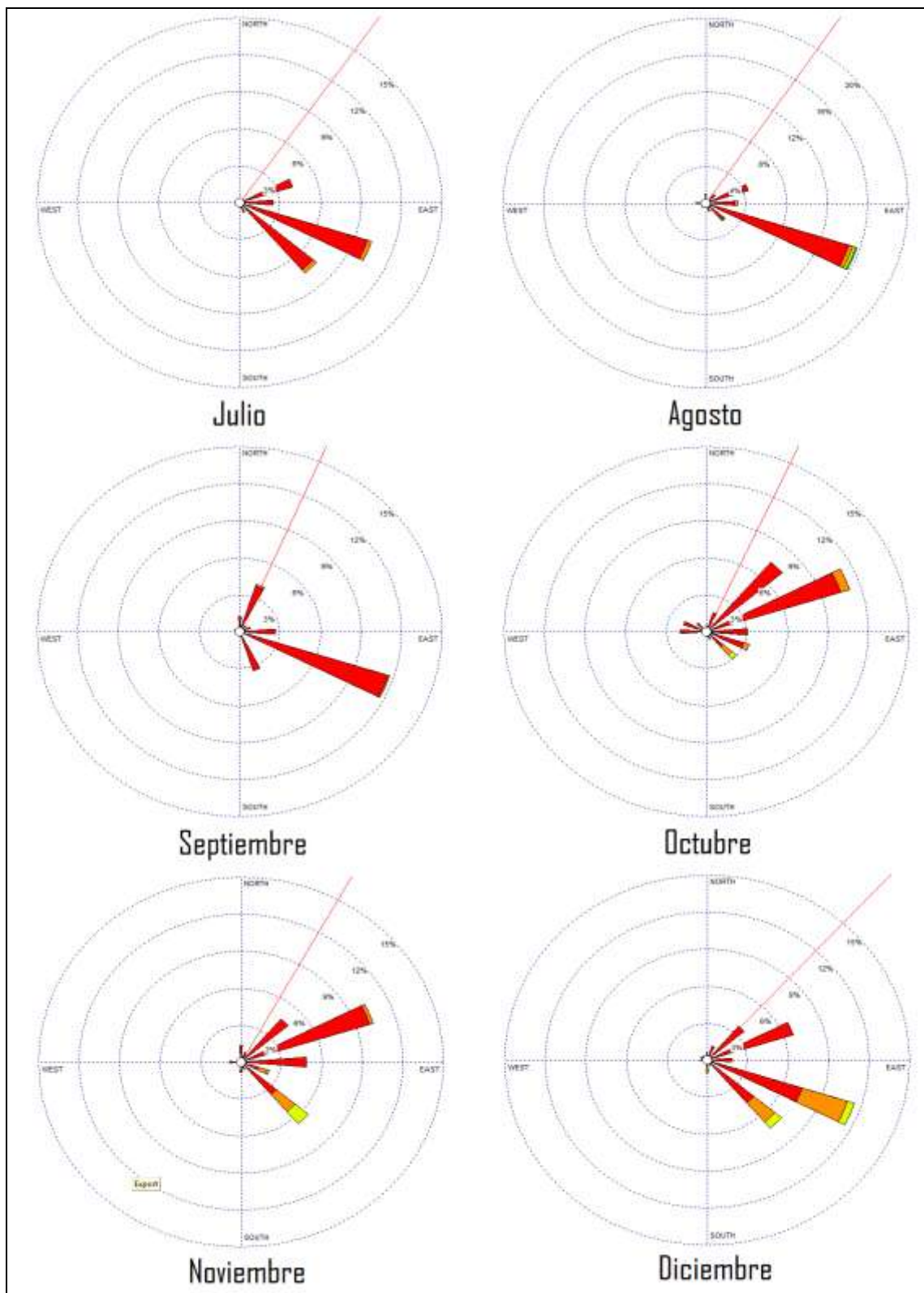


Figura I.11.- Rosa de los vientos de La Mancha para los meses Julio – Diciembre 2007

Anexo II

Valores de pH, conductividad y concentración de aniones y cationes de las muestras colectadas en los sitios de muestreo.

(Obtenidos por la Q. Ana Luisa Alarcón J. en el laboratorio de la SCA-CCA-UNAM)

Tabla II.1.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para El Tajín 2006.

Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
05-ene	38.10	4.08	21.60	0.466	0.699	0.137	0.391	0.860	3.510	3.680	3.270
23-ene	29.21	4.47	14.91	0.320	0.070	0.070	0.030	L.D.	0.824	0.071	1.694
24-ene	13.97	4.15	62.80	2.370	0.660	0.760	0.047	1.020	3.870	1.940	5.220
25-ene	34.29	4.08	59.80	2.230	0.300	0.320	0.090	1.150	3.984	1.964	5.509
Promedio	115.57	4.16	36.22	1.183	0.417	0.250	0.169	0.748	3.015	2.048	3.772
11-feb	12.70	4.88	112.10	8.665	3.630	0.750	0.150	5.230	14.160	12.400	12.600
19-feb	8.89	4.42	28.40	2.092	0.172	0.100	0.070	0.772	4.700	0.608	1.824
Promedio	21.59	4.63	77.64	5.958	2.206	0.482	0.117	3.394	10.265	7.544	8.163
30-abr	101.60	5.08	41.50	0.535	1.428	0.262	0.354	1.083	2.100	4.650	3.040
12-may	40.64	6.19	98.30	9.715	3.330	0.340	0.110	2.610	15.045	0.920	8.928
24-jun	31.75	5.91	13.28	0.380	0.160	0.210	0.060	0.330	0.920	0.620	0.816
28-jun	6.35	4.26	35.00	0.320	0.350	0.190	0.120	0.430	0.433	1.483	3.672
30-jun	10.16	5.26	10.17	0.340	0.390	1.300	0.010	0.110	0.700	0.768	2.560
Promedio	48.26	5.04	15.48	0.364	0.233	0.437	0.057	0.297	0.810	0.765	1.559
01-jul	12.70	4.99	10.43	0.390	0.200	0.640	0.070	0.290	1.345	0.682	0.720
07-jul	25.40	4.65	18.58	0.230	0.216	0.110	0.030	0.280	0.407	0.721	2.019
10-jul	26.67	4.94	7.84	0.180	0.070	0.200	0.010	0.100	0.452	0.242	1.054
10-jul	2.54	4.22	7.46	0.060	0.060	0.050	0.010	0.038	0.843	1.400	0.760
16-jul	17.78	4.19	36.30	0.690	0.400	0.200	0.017	0.400	1.292	0.806	4.080
17-jul	12.70	4.38	26.00	0.920	0.630	0.110	0.120	0.410	1.261	2.205	3.451
21-jul	2.54	5.09	7.09	0.350	0.126	L.D.	0.060	0.250	0.531	0.442	0.960
23-jul	2.54	4.31	27.20	0.069	L.D.	L.D.	L.D.	0.040	0.146	0.030	2.270
Promedio	102.87	4.54	18.42	0.396	0.248	0.207	0.038	0.259	0.800	0.783	2.090
03-ago	15.24	4.70	13.10	0.207	0.067	0.001	0.001	0.027	0.355	0.200	0.976
07-ago	35.56	4.87	9.84	0.529	0.284	0.038	0.030	0.044	0.843	1.400	0.760
21-ago	39.37	5.29	8.20	0.299	0.068	0.020	0.037	0.360	0.459	0.260	1.116
Promedio	90.17	4.96	9.67	0.374	0.153	0.024	0.028	0.179	0.593	0.699	0.952
13-sep	12.70	6.23	33.80	1.261	0.216	0.020	0.030	0.700	1.985	0.747	1.692
18-sep	44.45	4.71	9.84	0.225	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	0.345	0.253	0.732
19-sep	33.02	4.84	11.92	0.378	0.104	0.025	0.220	0.280	0.576	0.416	1.296
24-sep	25.40	4.94	6.66	0.092	0.010	0.005	0.010	0.100	0.136	L.D.	0.786
25-sep	45.72	5.23	10.50	0.414	0.059	0.010	0.010	0.360	0.670	0.187	1.178
29-sep	36.83	5.34	7.24	0.690	0.423	0.010	0.020	0.320	1.170	1.457	1.052
Promedio	198.12	4.98	10.98	0.430	0.125	0.010	0.046	0.247	0.690	0.488	1.057
01-oct	34.29	5.71	8.67	0.380	0.180	0.210	0.030	0.360	0.890	0.650	0.816
03-oct	8.89	4.69	25.90	M.I.	M.I.	M.I.	M.I.	M.I.	M.I.	M.I.	M.I.
04-oct	17.78	4.57	13.83	0.731	0.990	0.048	0.054	0.420	1.990	3.427	1.052
05-oct	60.96	4.84	7.43	0.390	0.108	L.D.	0.019	L.D.	0.730	0.400	0.580
13-oct	60.96	5.59	127.20	8.872	3.697	0.751	0.151	5.257	14.515	12.600	13.576
19-oct	82.55	4.91	7.20	0.690	0.423	0.010	L.D.	0.320	1.170	1.457	1.052
22,23-oct	59.69	3.84	8.84	0.575	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	0.890	0.650	7.392
27-oct	12.25	3.94	71.10	0.526	2.390	0.758	0.250	2.000	0.800	10.710	10.311
Promedio	337.37	4.42	32.53	2.096	0.974	0.195	0.047	1.191	3.515	3.550	4.761
03-nov	19.05	5.84	11.46	0.500	0.209	0.054	0.038	0.760	0.956	0.720	1.960
11-12-nov	25.40	6.38	48.20	0.197	2.908	0.142	0.117	2.400	0.580	8.930	5.770
15-nov	19.05	5.58	8.34	0.045	0.695	0.054	0.038	0.250	0.069	0.720	1.960
Promedio	63.50	5.86	25.22	0.242	1.434	0.089	0.070	1.263	0.540	4.004	3.484
3-4-dic	50.80	6.13	30.20	0.023	2.671	0.424	0.106	1.858	0.270	10.670	5.780
08-dic	40.64	4.15	42.90	0.017	1.621	L.D.	L.D.	L.D.	0.060	5.590	3.880
13-dic	31.75	4.37	30.00	0.041	1.832	0.038	0.034	L.D.	0.064	6.324	1.970
Promedio	123.19	4.46	34.34	0.050	4.090	0.358	0.102	1.486	0.286	15.276	8.092

Tabla II.2.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para El Tajín 2007.

Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
01-ene	10.16	4.36	30.40	2.092	0.172	0.100	0.070	0.772	1.833	4.406	3.052
02-ene	25.40	5.42	7.94	0.504	0.027	0.015	0.022	0.238	0.780	0.314	0.557
07-ene	26.67	5.63	5.78	1.400	0.115	0.067	0.051	0.560	1.024	2.317	1.729
19-ene	10.16	4.28	29.60	1.573	0.129	0.075	0.073	0.802	1.469	4.200	2.565
25-ene	5.08	6.34	62.30	2.581	0.212	0.123	0.129	1.419	2.326	4.170	4.374
29-ene	12.70	4.18	36.50	1.714	0.141	0.082	0.082	0.906	1.850	4.406	3.052
Promedio	90.17	4.66	19.36	1.356	0.107	0.062	0.056	0.618	1.286	2.599	1.978
03-feb	86.36	5.00	6.53	0.680	0.060	L.D.	L.D.	0.220	0.520	1.170	0.880
4-5-feb	33.02	5.10	6.13	0.093	0.400	L.D.	L.D.	0.024	0.515	1.162	0.871
11-feb	40.64	5.29	7.28	0.710	0.058	0.034	0.026	0.289	0.526	1.173	0.891
Promedio	160.02	5.08	6.64	0.566	0.130	0.009	0.007	0.197	0.521	1.169	0.881
04-mar	12.70	4.20	53.80	2.018	0.166	0.096	0.104	1.147	1.833	4.406	3.780
02-abr	15.24	6.36	61.40	7.760	0.637	0.374	0.464	5.112	8.104	8.456	13.427
04-abr	5.08	4.15	39.40	1.320	0.320	0.030	0.020	0.300	2.350	2.430	1.929
05-abr	10.16	4.37	22.50	0.680	0.470	0.055	0.043	0.100	1.039	2.332	1.756
07-abr	3.81	5.29	39.50	1.191	1.279	0.238	0.254	1.272	2.048	4.753	3.321
08-abr	6.35	4.39	20.80	0.420	0.030	0.020	0.025	0.230	0.810	0.846	1.343
21,22-abr	2.54	6.55	22.10	2.496	0.205	0.119	0.098	1.079	1.833	4.406	3.052
Promedio	43.18	4.60	39.44	3.368	0.502	0.179	0.208	2.072	3.789	4.622	6.049
27-may	7.62	5.73	31.50	0.714	0.767	0.143	0.153	0.763	1.229	2.759	1.920
20-jun	10.16	5.30	15.80	0.520	0.267	0.104	0.220	1.260	0.800	0.920	3.500
06-jul	5.08	4.40	66.20	2.750	0.960	0.600	0.880	1.400	4.052	8.243	7.182
12-jul	3.81	4.04	37.40	1.650	0.190	0.030	0.050	0.150	2.567	3.482	2.933
18-jul	6.35	5.42	14.54	0.470	0.570	0.030	0.140	0.500	0.751	2.199	1.382
20-jul	20.32	5.29	9.25	0.570	0.330	0.180	0.050	0.310	1.040	1.455	0.990
26-jul	6.35	4.53	29.00	0.974	1.722	0.195	0.276	0.280	1.499	5.933	3.313
Promedio	41.91	4.69	22.51	0.979	0.641	0.197	0.198	0.452	1.570	3.253	2.329
05-ago	30.48	5.70	6.50	0.370	0.330	0.050	0.110	0.150	0.615	1.260	0.456
06-ago	33.02	4.50	8.69	0.020	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	0.226	1.280
29-ago	190.50	5.07	8.74	0.160	0.340	0.230	0.130	0.280	0.454	1.699	1.081
30-ago	26.67	5.35	5.93	0.130	0.220	0.050	0.040	0.120	0.300	0.730	0.270
Promedio	280.67	4.99	8.22	0.163	0.288	0.166	0.104	0.218	0.404	1.386	0.959
26-sep	2.54	4.6	10.76	L.D.	0.260	0.270	0.090	0.140	0.120	2.100	1.200
10-oct	48.26	4.92	8.09	0.140	0.520	0.300	0.110	0.180	0.487	2.537	1.009
14-oct	31.75	4.24	18.85	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	2.600
20-oct	36.83	5.20	4.71	2.300	0.300	0.220	1.000	0.920	3.739	1.425	2.511
28-oct	64.77	5.23	13.00	0.630	0.570	0.130	0.015	0.270	1.100	2.180	0.800
Promedio	181.61	4.78	11.04	0.728	0.402	0.171	0.237	0.331	1.280	1.740	1.517
26-nov	41.91	4.63	12.34	0.021	0.320	0.130	0.030	0.160	0.150	1.230	1.509
28-nov	12.70	4.82	9.16	0.010	L.D.	0.070	0.080	0.130	0.079	0.938	0.520
30-nov	13.97	5.67	9.14	0.060	0.660	0.240	L.D.	0.660	0.310	2.406	1.687
Promedio	68.58	4.76	11.10	0.027	0.330	0.141	0.033	0.256	0.169	1.416	1.362
01-dic	12.70	4.76	10.74	0.270	0.310	0.180	0.030	0.150	0.579	1.100	0.970
03-dic	127.00	4.58	11.71	0.320	0.090	0.040	0.006	0.070	0.067	1.100	1.300
29-dic	46.99	4.78	22.90	0.800	0.700	0.320	0.080	0.640	0.290	4.469	3.129
Promedio	186.69	4.63	14.46	0.437	0.259	0.120	0.026	0.219	0.158	1.948	1.738

Tabla II.3.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para La Mancha 2006.

Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
14-ene	1.0	6.13	101.70	5.334	0.348	1.067	0.358	1.792	8.210	1.200	4.300
25-ene	6.3	6.52	35.01	4.529	0.262	0.240	0.007	1.632	7.188	0.921	3.931
Promedio	7.3	6.44	44.15	4.639	0.274	0.353	0.055	1.654	7.328	0.959	3.982
26-feb	40.2	5.52	11.56	1.672	L.D.	0.057	0.164	0.258	2.312	L.D.	0.838
25-mar	2.5	6.02	65.70	4.744	0.433	0.370	1.326	2.496	7.637	1.551	6.036
13-abr	8.0	6.22	58.60	4.418	0.624	0.884	0.158	0.792	6.800	2.150	1.900
01-may	9.0	5.33	36.40	2.870	1.600	0.260	0.330	0.650	4.653	5.511	1.785
03-may	6.0	5.42	42.70	4.050	1.090	0.280	0.560	0.730	6.487	3.754	1.934
12-may	4.5	5.93	19.30	1.840	0.420	0.490	0.830	0.500	3.276	1.447	1.256
13-may	1.8	5.88	47.80	3.780	0.430	0.570	0.760	0.790	6.334	1.481	1.959
29-may	6.5	5.17	25.00	1.509	0.232	0.299	0.345	0.463	2.593	0.799	1.435
Promedio	27.8	5.38	33.06	2.699	0.903	0.331	0.492	0.608	4.453	3.111	1.661
05-jun	4.0	4.75	27.10	1.900	1.200	L.D.	L.D.	0.600	2.860	1.040	1.514
20-jun	2.0	4.41	27.20	1.263	0.117	0.371	0.225	0.267	2.550	0.450	0.560
22-jun	18.0	4.43	26.70	0.847	0.008	0.729	0.171	0.132	1.850	0.410	2.300
23-jun	9.0	4.80	18.68	1.120	0.018	0.274	0.228	0.227	2.420	0.710	30.430
24-jun	45.0	4.87	11.55	0.438	0.161	0.203	0.155	0.156	0.770	0.480	0.540
28-jun	25.0	4.61	21.40	0.561	0.236	0.046	0.145	0.131	1.130	1.040	1.570
29-jun	30.0	5.23	13.88	1.157	0.048	0.186	0.261	0.180	2.450	0.230	0.490
30-jun	33.0	5.16	10.30	0.721	0.288	0.247	0.207	0.220	1.420	0.360	0.421
Promedio	166.0	4.81	15.80	0.769	0.177	0.243	0.186	0.183	1.535	0.513	2.498
01-jul	13.0	5.09	7.69	0.600	0.010	0.010	0.020	0.060	0.775	0.365	0.440
02-jul	9.0	4.66	18.99	1.040	0.220	0.260	0.230	0.210	1.836	0.758	1.554
09-jul	48.0	5.17	7.30	0.810	0.240	0.270	0.100	0.090	1.491	0.827	0.541
10-jul	18.0	5.17	11.90	0.956	0.104	0.146	0.192	0.186	1.603	0.359	0.771
11-jul	19.0	4.86	14.16	1.451	0.235	L.D.	L.D.	0.384	2.233	0.808	0.921
14-jul	10.0	4.68	28.90	2.900	0.340	0.340	0.520	0.290	4.771	1.171	1.699
15-jul	10.0	4.98	5.85	0.800	0.320	0.190	0.190	0.310	1.930	0.578	0.906
20-jul	14.0	5.53	14.33	1.810	L.D.	0.170	L.D.	1.360	2.940	L.D.	3.406
21-jul	72.0	5.23	6.04	0.780	0.150	0.090	0.110	0.100	1.282	0.517	0.523
22-jul	21.0	5.33	6.44	0.770	L.D.	0.170	L.D.	0.040	1.339	L.D.	0.321
23-jul	46.0	5.42	4.90	0.630	L.D.	L.D.	0.140	0.010	0.970	L.D.	0.206
24-jul	48.0	5.39	1.77	0.250	L.D.	0.130	0.100	0.080	0.502	L.D.	0.388
Promedio	328.0	5.16	7.72	0.843	0.114	0.128	0.112	0.168	1.423	0.390	0.681
03-ago	75.0	5.23	4.39	0.360	L.D.	0.100	0.070	L.D.	0.645	L.D.	0.283
05-ago	21.0	4.93	14.32	1.460	0.130	0.080	0.290	0.010	2.320	0.448	0.588
07-ago	65.0	5.31	8.63	0.690	0.010	0.180	0.490	0.310	1.225	0.034	0.979
08-ago	19.0	4.80	11.01	0.760	L.D.	0.200	1.170	L.D.	1.351	L.D.	0.761
14-ago	5.0	5.01	19.60	2.150	0.180	0.480	1.090	1.730	3.744	6.620	4.621
15-ago	9.0	5.36	7.40	0.490	0.010	0.300	L.D.	0.770	1.026	0.034	2.058
21-ago	10.5	4.64	19.87	0.840	L.D.	0.270	0.580	1.420	1.537	L.D.	4.508
23-ago	43.0	5.26	4.57	0.500	0.010	0.470	L.D.	0.230	1.195	0.034	0.816
24-ago	10.0	5.14	8.24	3.340	L.D.	0.170	0.210	0.190	5.295	L.D.	0.804
27-ago	23.0	4.91	17.39	0.898	L.D.	0.041	0.072	0.113	1.419	L.D.	0.862
31-ago	19.0	5.45	5.28	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	0.170
Promedio	299.5	5.12	8.52	0.723	0.016	0.185	0.270	0.218	1.280	0.055	0.880
03-sep	25.0	5.04	7.63	0.160	0.060	0.230	0.030	0.350	0.454	0.207	1.278
06-sep	8.0	4.92	13.23	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	0.577
11-sep	7.0	4.72	17.17	1.110	0.140	0.570	0.590	0.850	2.224	0.482	2.955
12-sep	15.0	5.19	6.70	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	0.310
13-sep	7.0	5.30	5.76	0.470	L.D.	0.040	0.070	0.100	0.760	L.D.	0.481
20-sep	31.0	5.26	5.36	0.250	1.670	0.130	0.130	0.180	0.502	5.752	0.696
25-sep	66.0	5.20	5.80	0.600	0.070	0.260	0.140	0.210	1.159	0.241	0.807
Promedio	159.0	5.13	6.96	0.393	0.370	0.196	0.117	0.219	0.782	1.275	0.881
14-oct	17.0	4.75	17.93	1.020	0.610	0.130	0.760	0.570	1.688	2.101	2.222
03-nov	1.0	6.48	0.20	0.337	0.060	L.D.	0.041	0.106	0.519	0.207	0.270
19-nov	21.0	5.22	15.96	0.210	L.D.	L.D.	0.043	0.102	0.323	L.D.	0.534
20-nov	6.0	5.11	11.92	1.644	L.D.	0.070	0.138	0.290	2.594	L.D.	1.069
Promedio	28.0	5.21	14.53	0.522	0.002	0.015	0.063	0.142	0.817	0.007	0.639
03-dic	6.0	6.00	35.70	0.299	0.238	0.046	0.015	0.010	0.502	0.820	0.072
04-dic	5.5	6.04	4.49	0.074	0.277	L.D.	0.004	L.D.	0.114	0.954	0.044
09-dic	3.0	6.45	47.60	2.220	0.010	0.670	1.190	1.980	4.023	0.034	4.769
Promedio	14.5	6.08	26.32	0.611	0.206	0.158	0.254	0.414	1.083	0.708	1.033

Tabla II.4.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones (ppm) por evento para La Mancha 2007

Muestras	pH	Volumen de lluvia (mm)	Conductividad Experimental ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
27-ene	4.0	6.48	134.00	10.300	2.250	1.170	0.350	3.160	16.912	7.771	7.600
03-feb	10.0	5.77	13.21	0.470	0.200	0.170	0.090	0.300	0.877	0.794	0.802
04-feb	21.0	5.97	8.90	0.260	0.200	0.100	0.070	0.160	0.491	0.755	0.435
11-feb	4.0	5.87	68.20	13.260	0.210	0.010	0.090	1.350	20.418	0.807	3.305
Promedio	35.0	5.89	16.91	1.806	0.201	0.110	0.078	0.336	2.879	0.772	0.868
30-mar	19.0	5.30	73.10	0.630	2.390	0.600	0.250	2.000	1.513	8.543	5.041
03-abr	2.0	5.43	133.90	8.370	3.700	0.750	0.070	5.120	13.562	12.975	12.466
05-abr	5.0	5.97	35.80	1.620	0.220	0.020	0.020	0.700	2.511	0.824	1.731
Promedio	7.0	5.74	63.83	3.549	1.214	0.229	0.034	1.963	5.669	4.296	4.799
19-may	4.5	5.47	56.40	2.517	1.178	0.503	0.420	2.100	5.472	3.272	5.250
24-may	18.0	5.10	33.20	1.560	0.530	0.246	0.192	0.960	3.340	1.840	3.000
25-may	50.0	5.37	13.40	0.600	0.400	0.200	0.080	0.400	1.400	0.896	1.152
26-may	4.0	4.72	45.00	2.732	0.405	0.546	0.221	1.107	5.940	1.125	2.768
30-may	2.0	5.00	86.50	8.044	0.779	1.609	0.374	1.872	13.990	1.731	3.743
Promedio	78.5	5.22	23.88	1.228	0.484	0.281	0.140	0.699	2.630	1.282	1.959
09-jun	5.0	5.40	109.90	22.000	0.350	0.440	0.180	0.780	35.200	1.452	2.063
25-jun	8.0	5.64	42.10	3.437	0.470	0.687	0.144	0.720	8.051	0.832	1.727
Promedio	13.0	5.53	68.18	6.78	0.42	0.59	0.16	0.74	13.35	1.07	1.86
03-jul	23.0	4.54	58.70	4.218	0.305	0.844	0.241	1.207	9.880	0.541	2.896
12-jul	20.0	4.78	28.30	1.675	0.219	0.335	0.112	0.560	3.922	0.388	1.343
13-jul	17.0	5.30	15.82	0.956	0.103	0.191	0.067	0.335	2.239	0.183	0.804
15-jul	1.0	5.15	62.20	4.225	2.100	0.845	0.022	1.110	9.896	0.673	2.570
15-jul	10.0	4.37	36.60	1.602	0.214	0.320	0.201	1.004	3.751	0.920	2.410
24-jul	5.0	4.38	64.60	4.100	0.308	0.820	0.313	1.563	9.602	0.546	3.751
25-jul	13.0	4.84	13.35	0.808	0.221	0.162	0.107	0.534	1.893	0.392	1.282
Promedio	89.0	4.67	34.94	2.225	0.245	0.445	0.156	0.793	5.211	0.461	1.901
06-ago	23.0	5.00	7.69	1.622	0.203	0.324	0.144	0.721	3.800	0.360	1.730
07-ago	83.0	4.85	9.10	0.260	0.000	0.077	0.051	0.256	0.898	L.D.	0.614
15-ago	2.0	5.43	56.90	3.317	1.552	0.663	0.284	1.421	7.770	2.750	3.410
17-ago	21.0	4.54	11.63	0.301	0.155	0.060	0.068	0.340	1.570	0.274	0.816
21-ago	74.0	5.54	107.10	10.500	L.D.	1.853	0.233	1.164	21.700	L.D.	2.794
26-ago	1.0	5.89	104.30	9.820	1.863	1.964	0.571	2.854	23.000	3.300	6.850
27-ago	70.0	6.03	22.70	1.776	0.400	0.355	0.102	0.508	4.160	0.060	1.220
30-ago	25.0	5.89	64.00	9.388	0.009	1.878	0.163	0.815	14.450	0.030	1.956
30-ago	11.0	4.80	7.35	0.092	0.009	0.059	0.010	0.030	0.455	0.030	0.542
Promedio	310.0	5.09	40.61	3.931	0.133	0.735	0.125	0.623	8.054	0.091	1.512
01-sep	35.0	6.47	6.42	0.179	0.300	0.036	0.002	0.011	0.420	0.900	0.026
02-sep	1.5	4.57	18.70	0.649	L.D.	0.130	L.D.	0.472	1.519	0.683	1.132
04-sep	16.0	4.41	22.10	0.160	L.D.	0.173	0.119	0.597	2.024	0.500	1.433
07-sep	48.0	5.00	13.48	0.692	L.D.	0.138	0.051	0.253	1.620	0.620	0.607
08-sep	19.0	4.86	8.04	0.120	0.068	0.079	0.037	0.183	0.930	0.120	0.440
09-sep	22.0	4.41	14.98	0.090	L.D.	L.D.	L.D.	0.110	0.430	0.120	1.390
12-sep	3.0	4.67	19.40	1.234	0.282	0.247	0.022	0.080	2.890	0.500	0.260
15-sep	26.0	4.22	22.10	0.050	L.D.	L.D.	L.D.	0.090	0.750	0.100	1.679
15-sep	13.0	4.33	16.44	0.090	0.060	L.D.	L.D.	0.200	1.100	0.218	1.558
23-sep	4.0	5.52	32.10	1.976	0.323	0.395	0.135	0.676	4.628	0.572	1.622
27-sep	39.0	4.96	12.51	0.620	0.177	0.124	0.086	0.428	1.451	0.313	1.026
28-sep	106.0	4.53	13.85	0.403	L.D.	0.081	0.094	0.468	0.945	1.200	1.124
29-sep	52.0	4.38	13.44	0.092	L.D.	0.018	0.125	0.300	0.216	2.200	1.498
30-sep	2.0	4.23	57.10	2.818	L.D.	0.564	0.150	0.750	6.600	0.230	1.800
Promedio	386.5	4.57	14.18	0.484	0.075	0.105	0.090	0.419	1.384	1.182	1.415
02-oct	9.0	4.09	17.05	0.010	0.010	L.D.	L.D.	L.D.	1.748	0.395	1.109
10-oct	47.0	4.92	7.32	0.417	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	0.642	L.D.	0.378
12-oct	1.0	3.81	9.11	0.757	L.D.	0.151	0.052	0.260	0.110	L.D.	0.624
20-oct	27.0	5.83	18.94	0.915	0.093	0.183	0.100	0.501	1.409	0.322	1.202
21-oct	23.0	4.66	8.80	0.358	L.D.	0.072	0.067	0.335	0.551	L.D.	0.803
23-oct	8.0	4.76	38.20	3.751	0.543	0.750	0.186	0.932	5.773	1.872	2.237
28-oct	1.5	6.08	94.70	10.813	L.D.	2.163	0.420	2.100	16.643	L.D.	5.041
Promedio	116.5	4.74	14.32	0.855	0.060	0.137	0.055	0.275	1.441	0.234	0.899
23-nov	5.0	5.97	32.50	1.380	0.550	0.190	0.280	0.510	2.296	1.961	1.275
27-nov	27.0	5.64	50.20	1.950	L.D.	0.220	0.200	2.710	3.200	0.142	6.614
28-nov	8.0	5.87	10.15	0.600	L.D.	0.060	0.090	0.320	0.978	0.084	0.833
30-nov	18.0	4.72	11.96	0.740	0.010	0.010	0.060	0.120	1.148	1.216	1.203
Promedio	58.0	5.14	31.28	1.339	0.051	0.130	0.148	1.387	2.179	0.624	3.677
03-dic	3.0	4.88	14.00	1.110	0.070	0.180	0.170	0.350	1.871	1.058	1.473
04-dic	14.5	5.42	13.27	1.020	L.D.	0.150	0.190	0.380	1.706	0.236	1.094
10-dic	77.0	4.60	19.68	2.390	0.660	0.290	0.310	0.340	3.941	3.831	2.022
14-dic	2.0	4.30	96.80	1.720	0.440	0.010	0.030	1.490	2.656	4.623	5.982
16-dic	39.0	4.94	22.20	2.740	0.200	0.500	0.150	0.600	4.670	1.401	1.991
Promedio	135.5	4.72	20.73	2.306	0.441	0.329	0.244	0.436	3.847	2.697	1.960

Tabla II.5.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para El Tajín 2006.

Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
05-ene	38.10	4.08	21.60	83.176	20.261	38.833	3.504	32.181	43.000	99.153	59.355	68.125
23-ene	29.21	4.47	14.91	33.884	13.913	3.889	1.790	2.469	L.D.	23.277	1.145	35.292
24-ene	13.97	4.15	62.80	70.795	103.043	36.667	19.437	3.868	51.000	109.322	31.290	108.750
25-ene	34.29	4.08	59.80	83.176	96.957	16.667	8.184	7.407	57.500	112.542	31.677	114.771
Promedio	115.57	4.16	36.22	69.221	51.419	23.162	6.385	13.899	37.401	85.177	33.038	78.577
11-feb	12.70	4.88	112.10	13.183	376.739	201.667	19.182	12.346	261.500	400.000	200.000	262.500
19-feb	8.89	4.42	28.40	38.019	90.957	9.556	2.558	5.761	38.600	132.768	9.800	38.000
Promedio	21.59	4.63	77.64	23.409	259.064	122.562	12.336	9.634	169.718	289.963	121.682	170.059
30-abr	101.60	5.08	41.50	8.318	23.261	79.333	6.701	29.136	54.150	59.322	75.000	63.333
12-may	40.64	6.19	98.30	0.646	422.391	185.000	8.696	9.053	130.500	425.000	14.839	186.000
24-jun	31.75	5.91	13.28	1.230	16.522	8.889	5.371	4.938	16.500	26.000	10.000	17.000
28-jun	6.35	4.26	35.00	54.954	13.913	19.444	4.859	9.877	21.500	12.232	23.919	76.500
30-jun	10.16	5.26	10.17	5.495	14.783	21.667	33.248	0.823	5.500	19.774	12.387	53.333
Promedio	48.26	5.04	15.48	9.197	15.812	12.968	11.172	4.722	14.842	22.878	12.334	32.478
01-jul	12.70	4.99	10.43	10.233	16.957	11.111	16.368	5.761	14.500	38.000	11.000	15.000
07-jul	25.40	4.65	18.58	22.387	10.000	12.000	2.813	2.469	14.000	11.497	11.629	42.063
10-jul	26.67	4.94	7.84	11.482	7.826	3.900	5.115	0.823	5.000	12.770	3.903	21.958
10-jul	2.54	4.22	7.46	60.256	2.609	3.333	1.279	0.823	1.900	23.814	22.581	15.833
16-jul	17.78	4.19	36.30	64.565	30.000	22.222	5.115	1.399	20.000	36.500	13.000	85.000
17-jul	12.70	4.38	26.00	41.687	40.000	35.000	2.813	9.877	20.500	35.621	35.565	71.896
21-jul	2.54	5.09	7.09	8.128	15.217	7.000	L.D.	4.938	12.500	15.000	7.129	20.000
23-jul	2.54	4.31	27.20	48.978	3.000	L.D.	L.D.	2.000	4.124	L.D.	L.D.	47.292
Promedio	102.87	4.54	18.42	28.972	17.229	13.763	5.305	3.138	12.936	22.607	12.613	43.550
03-ago	15.24	4.70	13.10	19.953	9.000	3.700	0.030	0.100	1.330	10.028	3.226	20.333
07-ago	35.56	4.87	9.84	13.490	23.000	15.800	0.960	2.500	2.200	23.814	22.581	15.833
21-ago	39.37	5.29	8.20	5.129	13.000	3.800	0.512	3.045	18.000	12.970	4.194	23.250
Promedio	90.17	4.96	9.67	10.931	16.268	8.515	0.607	2.332	8.952	16.749	11.281	19.832
13-sep	12.70	6.23	33.80	0.589	54.820	12.000	0.512	2.469	35.000	56.073	12.048	35.250
18-sep	44.45	4.71	9.84	19.498	9.800	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	9.746	4.081	15.250
19-sep	33.02	4.84	11.92	14.454	16.450	5.800	0.639	18.107	14.000	16.271	6.710	27.000
24-sep	25.40	4.94	6.66	11.482	4.000	0.556	0.128	0.823	5.000	3.842	L.D.	16.375
25-sep	45.72	5.23	10.50	5.888	18.000	3.250	0.256	0.823	18.000	18.927	3.016	24.542
29-sep	36.83	5.34	7.24	4.571	30.000	23.500	0.256	1.646	16.000	33.051	23.500	21.917
Promedio	198.12	4.98	10.98	10.502	18.698	6.926	0.262	3.778	12.346	19.497	7.871	22.018
01-oct	34.29	5.71	8.67	1.950	16.522	10.000	5.371	2.469	18.000	25.141	10.484	17.000
03-oct	8.89	4.69	25.90	M.I	M.I	M.I	M.I	M.I	M.I	M.I	M.I	M.I
04-oct	17.78	4.57	13.83	26.915	31.780	55.000	1.228	4.444	21.000	56.215	55.274	21.917
05-oct	60.96	4.84	7.43	14.454	16.957	6.000	L.D.	1.564	L.D.	20.621	6.452	12.083
13-oct	60.96	5.59	127.20	2.570	385.739	205.367	19.212	12.446	262.830	410.028	203.226	282.833
19-oct	82.55	4.91	7.20	12.303	30.000	23.500	0.256	L.D.	16.000	33.051	23.500	21.917
22,23-oct	59.69	3.84	8.84	144.544	25.000	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	25.141	10.484	154.000
27-oct	12.25	3.94	71.10	114.815	22.870	132.778	19.386	20.576	100.000	22.599	172.742	214.820
Promedio	337.37	4.42	32.53	38.459	91.113	54.104	4.980	3.866	59.542	99.305	57.252	99.196
03-nov	19.05	5.84	11.46	1.445	21.739	11.610	1.381	3.128	38.000	27.000	11.613	40.833
11-12-nov	25.40	6.38	48.20	0.417	8.565	161.556	3.632	9.630	120.000	16.384	144.032	120.208
15-nov	19.05	5.58	8.34	2.630	1.957	38.611	1.381	3.128	12.500	1.960	11.613	40.833
Promedio	63.50	5.86	25.22	1.389	10.535	79.689	2.281	5.728	63.150	15.242	64.581	72.583
3-4-dic	50.80	6.13	30.20	0.741	1.000	148.389	10.844	8.724	92.900	7.627	172.097	120.417
08-dic	40.64	4.15	42.90	70.795	0.739	90.056	L.D.	L.D.	L.D.	1.695	90.161	80.833
13-dic	31.75	4.37	30.00	42.658	1.783	101.778	0.972	2.798	L.D.	1.800	102.000	41.042
Promedio	123.19	4.46	34.34	67.231	2.164	227.236	9.161	8.379	74.320	8.086	246.381	168.588

Tabla II.6.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para El Tajín 2007.

Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
01-ene	10.16	4.36	30.40	43.652	90.957	9.556	2.551	5.761	38.600	51.768	71.060	63.580
02-ene	25.40	5.42	7.94	3.802	21.913	1.475	0.395	1.779	11.916	22.034	5.059	11.614
07-ene	26.67	5.63	5.78	2.344	60.889	6.396	1.708	4.180	28.004	28.932	37.371	36.017
19-ene	10.16	4.28	29.60	52.481	68.410	7.181	1.919	5.987	40.115	41.492	67.742	53.437
25-ene	5.08	6.34	62.30	0.457	112.202	11.776	3.148	10.589	70.944	65.702	67.258	91.124
29-ene	12.70	4.18	36.50	66.069	74.522	7.822	2.091	6.760	45.293	52.260	71.060	63.580
Promedio	90.17	4.66	19.36	21.927	58.956	5.958	1.592	4.610	30.885	36.334	41.916	41.198
03-feb	86.36	5.00	6.53	10.000	29.565	3.333	L.D.	L.D.	11.000	14.689	18.871	18.333
4-5-feb	33.02	5.10	6.13	7.943	4.040	22.222	L.D.	L.D.	1.214	0.268	18.741	18.137
11-feb	40.64	5.29	7.28	5.129	30.866	3.242	0.866	2.159	14.462	14.861	18.925	18.557
Promedio	160.02	5.08	6.64	8.338	24.628	7.208	0.220	0.548	9.860	11.757	18.858	18.350
04-mar	12.70	4.20	53.80	63.096	87.720	9.205	2.461	8.563	57.371	51.768	71.060	78.750
02-abr	15.24	6.36	61.40	0.437	337.373	35.394	9.563	38.149	255.595	228.930	136.395	279.733
04-abr	5.08	4.15	39.40	70.795	57.391	17.778	0.767	1.646	15.000	66.384	39.187	40.184
05-abr	10.16	4.37	22.50	42.658	29.565	26.111	1.407	3.544	5.000	29.340	37.618	36.584
07-abr	3.81	5.29	39.50	5.129	51.768	71.060	6.090	20.932	63.580	57.859	76.660	69.180
08-abr	6.35	4.39	20.80	40.738	18.261	1.667	0.512	2.058	11.500	22.893	13.639	27.973
21,22-abr	2.54	6.55	22.10	0.282	108.512	11.396	3.036	8.050	53.935	51.768	71.060	63.580
Promedio	43.18	4.60	39.44	24.980	146.418	27.913	4.588	17.115	103.625	107.030	74.551	126.023
27-may	7.62	5.73	31.50	1.862	31.061	42.636	3.654	12.559	38.148	34.715	44.498	40.010
20-jun	10.16	5.30	15.80	5.012	22.599	14.839	2.659	18.107	63.000	22.599	14.839	72.917
06-jul	5.08	4.40	66.20	39.811	119.565	53.333	15.345	72.428	70.000	114.476	132.955	149.621
12-jul	3.81	4.04	37.40	91.201	71.739	10.556	0.767	4.115	7.500	72.506	56.156	61.101
18-jul	6.35	5.42	14.54	3.802	20.435	31.667	0.767	11.523	25.000	21.202	35.469	28.802
20-jul	20.32	5.29	9.25	5.129	24.783	18.333	4.604	4.115	15.500	29.386	23.462	20.629
26-jul	6.35	4.53	29.00	29.512	42.353	95.691	4.983	22.724	14.000	42.353	95.691	69.024
Promedio	41.91	4.69	22.51	20.651	42.544	35.610	5.033	16.337	22.591	44.345	52.469	48.514
05-ago	30.48	5.70	6.50	1.995	16.087	18.333	1.279	9.053	7.500	17.366	20.329	9.495
06-ago	33.02	4.50	8.69	31.623	0.870	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	3.645	26.667
29-ago	190.50	5.07	8.74	8.511	6.957	18.889	5.882	10.700	14.000	12.839	27.400	22.511
30-ago	26.67	5.35	5.93	4.470	5.652	12.222	1.279	3.292	6.000	8.465	11.774	5.625
Promedio	280.67	4.99	8.22	10.139	7.108	15.973	4.253	8.558	10.887	11.404	22.353	19.982
26-sep	2.54	4.60	10.76	25.119	0.000	14.444	6.905	7.407	7.000	3.390	33.871	25.000
10-oct	48.26	4.92	8.09	12.023	6.087	28.889	7.673	9.053	9.000	13.760	40.912	21.023
14-oct	31.75	4.24	18.85	57.544	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	54.167
20-oct	36.83	5.20	4.71	6.310	100.000	16.667	5.627	82.305	46.000	105.627	22.976	52.310
28-oct	64.77	5.23	13.00	5.888	27.391	31.667	3.325	1.235	13.500	31.073	35.161	16.667
Promedio	181.61	4.78	11.04	16.635	31.666	22.350	4.366	19.537	16.535	36.159	28.071	31.608
26-nov	41.91	4.63	12.34	23.442	0.913	17.778	3.325	2.469	8.000	4.238	19.839	31.442
28-nov	12.70	4.82	9.16	15.136	0.435	L.D.	1.790	6.584	6.500	2.225	15.136	10.833
30-nov	13.97	5.67	9.14	2.138	2.609	36.667	6.138	L.D.	33.000	8.747	38.805	35.138
Promedio	68.58	4.76	11.10	17.564	1.170	18.333	3.614	2.728	12.815	4.784	22.831	28.379
01-dic	12.70	4.76	10.74	17.378	11.739	17.222	4.604	2.469	7.500	16.343	17.742	20.208
03-dic	127.00	4.58	11.71	26.303	13.913	5.000	1.023	0.494	3.500	1.893	17.742	27.083
29-dic	46.99	4.78	22.90	16.596	34.783	38.889	8.184	6.584	32.000	8.184	72.081	65.192
Promedio	186.69	4.63	14.46	23.252	19.018	14.361	3.069	2.161	10.946	4.459	31.419	36.208

Tabla II.7.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para La Mancha 2006.

Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
14-ene	1.0	6.13	101.70	0.741	231.921	19.355	27.285	29.492	89.583	231.921	19.355	89.583
25-ene	6.3	6.52	35.01	0.302	196.913	14.556	6.138	0.576	81.600	203.051	14.858	81.902
Promedio	7.3	6.44	44.15	0.362	201.709	15.213	9.035	4.537	82.694	207.006	15.474	82.954
26-feb	40.2	5.52	11.56	3.020	72.696	L.D.	1.458	13.498	12.900	65.311	L.D.	17.458
25-mar	2.5	6.02	65.70	0.955	206.261	24.056	9.463	109.136	124.800	215.724	25.011	125.755
13-abr	8.0	6.22	58.60	0.603	192.090	34.677	22.599	13.032	39.583	192.090	34.677	39.583
01-may	9.0	5.33	36.40	4.677	124.783	88.889	6.650	27.160	32.500	131.432	88.889	37.177
03-may	6.0	5.42	42.70	3.802	176.087	60.556	7.161	46.091	36.500	183.248	60.556	40.302
12-may	4.5	5.93	19.30	1.175	80.000	23.333	12.532	68.313	25.000	92.532	23.333	26.175
13-may	1.8	5.88	47.80	1.318	164.348	23.889	14.578	62.551	39.500	178.926	23.889	40.818
29-may	6.5	5.17	25.00	6.761	65.591	12.881	7.643	28.376	23.137	73.235	12.881	29.898
Promedio	27.8	5.38	33.06	4.191	117.329	50.182	8.458	40.483	30.413	125.786	50.182	34.604
05-jun	4.0	4.75	27.10	17.783	82.609	66.667	L.D.	L.D.	30.000	80.791	16.774	31.542
20-jun	2.0	4.41	27.20	38.905	54.910	6.490	9.491	18.498	13.334	72.034	7.258	11.667
22-jun	18.0	4.43	26.70	37.154	36.830	0.422	18.645	14.041	6.617	52.260	6.613	47.917
23-jun	9.0	4.80	18.68	15.849	48.715	1.014	7.004	18.772	11.374	68.362	11.452	633.958
24-jun	45.0	4.87	11.55	13.490	19.036	8.956	5.182	12.784	7.809	21.751	7.742	11.250
28-jun	25.0	4.61	21.40	24.547	24.372	13.104	1.174	11.956	6.557	31.921	16.774	32.708
29-jun	30.0	5.23	13.88	5.888	50.307	2.687	4.751	21.494	9.022	69.209	3.710	10.208
30-jun	33.0	5.16	10.30	6.918	31.335	16.012	6.323	17.010	11.004	40.113	5.806	8.771
Promedio	166.0	4.81	15.80	15.578	33.439	9.855	6.213	15.295	9.140	43.373	8.279	52.032
01-jul	13.0	5.09	7.69	8.128	26.087	0.556	0.256	1.646	3.000	21.893	5.887	9.167
02-jul	9.0	4.66	18.99	21.878	45.217	12.222	6.650	18.930	10.500	51.867	12.222	32.378
09-jul	48.0	5.17	7.30	6.761	35.217	13.333	6.905	8.230	4.500	42.123	13.333	11.261
10-jul	18.0	5.17	11.90	6.761	41.551	5.798	3.736	15.823	9.310	45.287	5.798	16.071
11-jul	19.0	4.86	14.16	13.804	63.079	13.032	L.D.	L.D.	19.188	63.079	13.032	19.188
14-jul	10.0	4.68	28.90	20.893	126.087	18.889	8.696	42.798	14.500	134.783	18.889	35.393
15-jul	10.0	4.98	5.85	10.471	34.783	17.778	4.859	15.638	15.500	54.520	9.323	18.875
20-jul	14.0	5.53	14.33	2.951	78.696	L.D.	4.348	L.D.	68.000	83.043	L.D.	70.951
21-jul	72.0	5.23	6.04	5.888	33.913	8.333	2.302	9.053	5.000	36.215	8.333	10.888
22-jul	21.0	5.33	6.44	4.677	33.478	L.D.	4.348	L.D.	2.000	37.826	L.D.	6.677
23-jul	46.0	5.42	4.90	3.802	27.391	L.D.	L.D.	11.523	0.500	27.391	L.D.	4.302
24-jul	48.0	5.39	1.77	4.074	10.870	L.D.	3.325	8.230	4.000	14.194	L.D.	8.074
Promedio	328.0	5.16	7.72	6.886	36.646	6.329	3.277	9.247	8.386	40.200	6.282	14.178
03-ago	75.0	5.23	4.39	5.888	15.652	L.D.	2.558	5.761	L.D.	18.210	L.D.	5.888
05-ago	21.0	4.93	14.32	11.749	63.478	7.222	2.046	23.868	0.500	65.524	7.222	12.249
07-ago	65.0	5.31	8.63	4.898	30.000	0.556	4.604	40.329	15.500	34.604	0.556	20.398
08-ago	19.0	4.80	11.01	15.849	33.043	L.D.	5.115	96.296	L.D.	38.159	L.D.	15.849
14-ago	5.0	5.01	19.60	9.772	93.478	10.000	12.276	89.712	86.500	105.754	10.000	96.272
15-ago	9.0	5.36	7.40	4.365	21.304	0.556	7.673	0.000	38.500	28.977	0.556	42.865
21-ago	10.5	4.64	19.87	22.909	36.522	L.D.	6.905	47.737	71.000	43.427	L.D.	93.909
23-ago	43.0	5.26	4.57	5.495	21.739	0.556	12.020	L.D.	11.500	33.760	0.556	16.995
24-ago	10.0	5.14	8.24	7.244	145.217	L.D.	4.348	17.284	9.500	149.565	L.D.	16.744
27-ago	23.0	4.91	17.39	12.303	39.043	L.D.	1.049	5.926	5.650	40.092	L.D.	17.953
31-ago	19.0	5.45	5.28	3.548	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	14.194	L.D.	3.548
Promedio	299.5	5.12	8.52	7.440	31.427	0.890	4.737	22.181	10.891	36.163	0.890	18.331
03-sep	25.0	5.04	7.63	9.120	6.957	3.333	5.882	2.469	17.500	12.839	3.333	26.620
06-sep	8.0	4.92	13.23	12.023	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	12.023
11-sep	7.0	4.72	17.17	19.055	48.261	7.778	14.578	48.560	42.500	62.839	7.778	61.555
12-sep	15.0	5.19	6.70	6.457	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	6.457
13-sep	7.0	5.30	5.76	5.012	20.435	L.D.	1.023	5.761	5.000	21.458	L.D.	10.012
20-sep	31.0	5.26	5.36	5.495	10.870	92.778	3.325	10.700	9.000	14.194	92.778	14.495
25-sep	66.0	5.20	5.80	6.310	26.087	3.889	6.650	11.523	10.500	32.737	3.889	16.810
Promedio	159.0	5.13	6.96	7.398	17.066	20.570	5.020	9.649	10.956	22.086	20.570	18.354
14-oct	17.0	4.75	17.93	17.783	44.348	33.889	3.325	62.551	28.500	47.673	33.889	46.283
03-nov	1.0	6.48	0.20	0.331	14.652	3.333	L.D.	3.374	5.300	14.652	3.333	5.631
19-nov	21.0	5.22	15.96	6.026	9.130	L.D.	L.D.	3.539	5.100	9.130	L.D.	11.126
20-nov	6.0	5.11	11.92	7.762	71.478	L.D.	1.790	11.358	14.500	73.269	L.D.	22.262
Promedio	28.0	5.21	14.53	6.194	22.688	0.119	0.384	5.209	7.121	23.072	0.119	13.316
03-dic	6.0	6.00	35.70	1.000	13.000	13.222	1.176	1.235	0.500	14.176	13.222	1.500
04-dic	5.5	6.04	4.49	0.912	3.217	15.389	L.D.	0.329	L.D.	3.217	15.389	0.912
09-dic	3.0	6.45	47.60	0.355	96.522	0.556	17.136	97.942	99.000	113.657	0.556	99.355
Promedio	14.5	6.08	26.32	0.833	26.570	11.423	4.032	20.900	20.690	30.602	11.423	21.523

Tabla II.8.- Valores de pH, conductividad, volumen de lluvia y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) por evento para La Mancha 2007.

Muestras	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
27-ene	4.0	6.48	134.00	0.331	447.826	125.000	29.923	28.807	158.000	477.749	125.331	158.331
03-feb	10.0	5.77	13.21	1.698	20.435	11.111	4.348	7.407	15.000	24.783	12.809	16.698
04-feb	21.0	5.97	8.90	1.072	11.304	11.111	2.558	5.761	8.000	13.862	12.183	9.072
11-feb	4.0	5.87	68.20	1.349	576.522	11.667	0.256	7.407	67.500	576.777	13.016	68.849
Promedio	35.0	5.89	16.91	1.282	78.509	11.175	2.806	6.420	16.800	81.315	12.457	18.082
30-mar	19.0	5.30	73.10	5.012	27.391	132.778	15.345	20.576	100.000	42.737	137.790	105.012
03-abr	2.0	5.43	133.90	3.715	363.913	205.556	19.182	5.761	256.000	383.095	209.271	259.715
05-abr	5.0	5.97	35.80	1.072	70.435	12.222	0.512	1.646	35.000	70.946	13.294	36.072
Promedio	7.0	5.74	63.83	1.827	154.286	67.460	5.846	2.822	98.143	160.132	69.287	99.970
19-may	4.5	5.47	56.40	3.388	109.440	65.440	12.875	34.568	105.000	154.576	52.774	109.375
24-may	18.0	5.10	33.20	7.943	67.826	29.440	6.287	15.802	48.000	94.350	29.677	62.500
25-may	50.0	5.37	13.40	4.266	26.087	22.222	5.115	6.584	20.000	39.548	14.452	24.000
26-may	4.0	4.72	45.00	19.055	118.800	22.500	13.976	18.226	55.360	167.797	18.145	57.667
30-may	2.0	5.00	86.50	10.000	349.750	43.275	41.147	30.807	93.575	395.198	27.919	77.979
Promedio	78.5	5.22	23.88	5.958	53.406	26.905	7.198	11.513	34.969	74.304	20.671	40.813
09-jun	5.0	5.40	109.90	3.981	527.830	19.444	11.253	14.815	39.000	616.670	23.426	42.981
25-jun	8.0	5.64	42.10	2.291	149.454	26.093	17.583	11.845	35.979	227.429	13.419	35.979
Promedio	13.0	5.53	68.18	2.941	294.983	23.536	15.148	12.987	37.141	377.137	17.268	38.672
03-jul	23.0	4.54	58.70	28.840	183.406	16.967	21.577	19.863	60.333	279.096	8.726	60.333
12-jul	20.0	4.78	28.30	16.596	72.805	12.168	8.565	9.211	27.979	110.791	6.258	27.979
13-jul	17.0	5.30	15.82	5.012	41.563	5.739	4.890	5.514	16.750	63.249	2.952	16.750
15-jul	1.0	5.15	62.20	7.079	183.703	116.667	21.612	1.847	55.500	279.548	10.855	53.542
15-jul	10.0	4.37	36.60	42.658	69.631	11.886	8.192	16.529	50.208	105.960	14.839	50.208
24-jul	5.0	4.38	64.60	41.687	178.245	17.124	20.970	25.727	78.146	271.243	8.806	78.146
25-jul	13.0	4.84	13.35	14.454	35.140	12.294	4.134	8.793	26.708	53.475	6.323	26.708
Promedio	89.0	4.67	34.94	21.466	96.731	13.620	11.380	12.864	39.635	147.200	7.433	39.613
06-ago	23.0	5.00	7.69	10.000	70.541	11.290	8.299	11.866	36.042	107.345	5.806	36.042
07-ago	83.0	4.85	9.10	14.125	11.304	L.D.	1.961	4.211	12.792	25.367	L.D.	12.792
15-ago	2.0	5.43	56.90	3.715	144.237	86.246	16.969	23.388	71.042	219.492	44.355	71.042
17-ago	21.0	4.54	11.63	28.840	13.087	8.593	1.540	5.597	17.000	44.350	4.419	17.000
21-ago	74.0	5.54	107.10	2.884	456.522	L.D.	47.391	19.163	58.208	612.994	L.D.	58.208
26-ago	1.0	5.89	104.30	1.288	426.957	103.495	50.230	46.982	142.708	649.718	53.226	142.708
27-ago	70.0	6.03	22.70	0.933	77.224	22.222	9.085	8.368	25.417	117.514	0.968	25.417
30-ago	25.0	5.89	64.00	1.288	408.192	0.484	48.023	13.416	40.750	408.192	0.484	40.750
30-ago	11.0	4.80	7.35	15.849	4.000	0.484	1.512	0.823	1.500	12.853	0.484	11.292
Promedio	310.0	5.09	40.61	8.071	170.929	7.384	18.807	10.264	31.143	227.510	1.463	31.490
01-sep	35.0	6.47	6.42	0.339	7.797	16.653	0.917	0.178	0.542	11.864	14.516	0.542
02-sep	1.5	4.57	18.70	26.915	28.198	L.D.	3.317	L.D.	23.583	42.910	11.016	23.583
04-sep	16.0	4.41	22.10	38.905	6.957	L.D.	4.420	9.829	29.854	57.175	8.065	29.854
07-sep	48.0	5.00	13.48	10.000	30.073	L.D.	3.538	4.163	12.646	45.763	10.000	12.646
08-sep	19.0	4.86	8.04	13.804	5.217	3.763	2.031	3.018	9.167	26.271	1.935	9.167
09-sep	22.0	4.41	14.98	38.905	3.913	L.D.	L.D.	L.D.	5.500	12.147	1.935	28.958
12-sep	3.0	4.67	19.40	21.380	53.648	15.681	6.312	1.783	4.000	81.638	8.065	5.417
15-sep	26.0	4.22	22.10	60.256	2.174	L.D.	L.D.	L.D.	4.500	21.186	1.613	34.979
15-sep	13.0	4.33	16.44	46.774	3.913	3.333	L.D.	L.D.	10.000	31.073	3.516	32.458
23-sep	4.0	5.52	32.10	3.020	85.911	17.939	10.107	11.125	33.792	130.734	9.226	33.792
27-sep	39.0	4.96	12.51	10.965	26.935	9.816	3.169	7.037	21.375	40.989	5.048	21.375
28-sep	106.0	4.53	13.85	29.512	17.542	L.D.	2.064	7.709	23.417	26.695	19.355	23.417
29-sep	52.0	4.38	13.44	41.687	4.010	L.D.	0.472	10.274	15.000	6.102	35.484	31.208
30-sep	2.0	4.23	57.10	58.884	122.518	L.D.	14.414	12.346	37.500	186.441	3.710	37.500
Promedio	386.5	4.57	14.18	36.179	21.049	4.186	2.692	7.403	20.939	39.087	19.067	29.482
02-oct	9.0	4.09	17.05	81.283	0.435	0.556	L.D.	L.D.	L.D.	49.379	6.371	23.104
10-oct	47.0	4.92	7.32	12.023	18.136	L.D.	L.D.	L.D.	L.D.	18.136	L.D.	7.875
12-oct	1.0	3.81	9.11	154.882	32.910	L.D.	3.872	4.280	13.000	3.107	L.D.	13.000
20-oct	27.0	5.83	18.94	1.479	39.802	5.194	4.683	8.244	25.042	39.802	5.194	25.042
21-oct	23.0	4.66	8.80	21.878	15.565	L.D.	1.831	5.508	16.729	15.565	L.D.	16.729
23-oct	8.0	4.76	38.20	17.378	163.079	30.194	19.186	15.343	46.604	163.079	30.194	46.604
28-oct	1.5	6.08	94.70	0.832	470.141	L.D.	55.311	34.575	105.021	470.141	L.D.	105.021
Promedio	116.5	4.74	14.32	18.325	37.182	3.320	3.510	4.533	13.770	40.707	3.769	18.732
23-nov	5.0	5.97	32.50	1.072	60.000	30.556	4.859	23.045	25.500	64.859	31.627	26.572
27-nov	27.0	5.64	50.20	2.291	84.783	L.D.	5.627	16.461	135.500	90.409	2.291	137.791
28-nov	8.0	5.87	10.15	1.349	26.087	L.D.	1.535	7.407	16.000	27.621	1.349	17.349
30-nov	18.0	4.72	11.96	19.055	32.174	0.556	0.256	4.938	6.000	32.430	19.610	25.055
Promedio	58.0	5.14	31.28	7.258	58.223	2.807	3.329	12.204	69.345	61.553	10.065	76.603
03-dic	3.0	4.88	14.00	13.183	48.261	3.889	4.604	13.992	17.500	52.864	17.071	30.683
04-dic	14.5	5.42	13.27	3.802	44.348	L.D.	3.836	15.638	19.000	48.184	3.802	22.802
10-dic	77.0	4.60	19.68	25.119	103.913	36.667	7.417	25.514	17.000	111.330	61.786	42.119
14-dic	2.0	4.30	96.80	50.119	74.783	24.444	0.256	2.469	74.500	75.038	74.563	124.619
16-dic	39.0	4.94	22.20	11.482	119.130	11.111	12.788	12.346	30.000	131.918	22.593	41.482
Promedio	135.5	4.72	20.73	19.017	100.257	24.481	8.412	20.072	21.815	108.668	43.499	40.833

Tabla II.9.- Promedios ponderados mensuales de pH, conductividad y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) para El Tajín 2006 - 2007

Mes (2006)	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Ene	115.57	4.16	36.22	69.221	51.419	23.162	6.385	13.899	37.401	85.177	33.038	78.577
Feb	21.59	4.63	77.64	23.409	259.064	122.562	12.336	9.634	169.718	289.963	121.682	170.059
Abr	101.60	5.08	41.50	8.318	23.261	79.333	6.701	29.136	54.150	59.322	75.000	63.333
May	40.64	6.19	98.30	0.646	422.391	185.000	8.696	9.053	130.500	425.000	14.839	186.000
Jun	48.26	5.04	15.48	9.197	15.812	12.968	11.172	4.722	14.842	22.878	12.334	32.478
Jul	102.87	4.54	18.42	28.972	17.229	13.763	5.305	3.138	12.936	22.607	12.613	43.550
Ago	90.17	4.96	9.67	10.931	16.268	8.515	0.607	2.332	8.952	16.749	11.281	19.832
Sep	198.12	4.98	10.98	10.502	18.698	6.926	0.262	3.778	12.346	19.497	7.871	22.018
Oct	337.37	4.42	32.53	38.459	91.113	54.104	4.980	3.866	59.542	99.305	57.252	99.196
Nov	63.50	5.86	25.22	1.389	10.535	79.689	2.281	5.728	63.150	15.242	64.581	72.583
Dic	123.19	4.46	34.34	67.231	2.164	227.236	9.161	8.379	74.320	8.086	246.381	168.588
Anual	1242.88	4.58	29.42	26.627	56.327	50.523	4.532	7.145	42.448	66.700	46.751	70.375

Mes (2007)	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Enero	90.17	4.66	19.36	21.927	58.956	5.958	1.592	4.610	30.885	36.334	41.916	41.198
Febrero	160.02	5.08	6.64	8.338	24.628	7.208	0.220	0.548	9.860	11.757	18.858	18.350
Marzo	12.70	4.20	53.80	63.096	87.720	9.205	2.461	8.563	57.371	51.768	71.060	78.750
Abril	43.18	4.60	39.44	24.980	146.418	27.913	4.588	17.115	103.625	107.030	74.551	126.023
Mayo	7.62	5.73	31.50	1.862	31.061	42.636	3.654	12.559	38.148	34.715	44.498	40.010
Junio	10.16	5.30	15.80	5.012	22.599	14.839	2.659	18.107	63.000	22.599	14.839	72.917
Julio	41.91	4.69	22.51	20.651	42.544	35.610	5.033	16.337	22.591	44.345	52.469	48.514
Agosto	280.67	4.99	8.22	10.139	7.108	15.973	4.253	8.558	10.887	11.404	22.353	19.982
Septiembre	2.54	4.60	10.76	25.119	0.000	14.444	6.905	7.407	7.000	3.390	33.871	25.000
Octubre	181.61	4.78	11.04	16.635	31.666	22.350	4.366	19.537	16.535	36.159	28.071	31.608
Noviembre	68.58	4.76	11.10	17.564	1.170	18.333	3.614	2.728	12.815	4.784	22.831	28.379
Diciembre	186.69	4.63	14.46	23.252	19.018	14.361	3.069	2.161	10.946	4.459	31.419	36.208
Anual	1085.85	4.79	13.20	16.207	27.922	16.115	3.222	8.173	18.826	21.850	29.927	33.421

Tabla II.10.- Promedios ponderados mensuales de pH, conductividad y concentración de iones ($\mu\text{eq/L}$) para La Mancha 2006 - 2007

Mes (2006)	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Ene	7.3	6.13	101.70	0.362	201.709	15.213	9.035	4.537	82.694	207.006	15.474	82.954
Feb	40.2	5.52	11.56	3.020	72.696	0.000	1.458	13.498	12.900	65.311	0.000	17.458
Mar	2.5	6.02	65.70	0.955	206.261	24.056	9.463	109.136	124.800	215.724	25.011	125.755
Abr	8.0	6.22	58.60	0.603	192.090	34.677	22.599	13.032	39.583	192.090	34.677	39.583
May	27.8	5.38	33.06	4.191	117.329	50.182	8.458	40.483	30.413	125.786	50.182	34.604
Jun	166.0	4.81	15.80	15.578	33.439	9.855	6.213	15.295	9.140	43.373	8.279	52.032
Jul	328.0	5.16	7.72	6.886	36.646	6.329	3.277	9.247	8.386	40.200	6.282	14.178
Ago	299.5	5.12	8.52	7.440	31.427	0.890	4.737	22.181	10.891	36.163	0.890	18.331
Sep	159.0	5.13	6.96	7.398	17.066	20.570	5.020	9.649	10.956	22.086	20.570	18.354
Oct	17.0	4.75	17.93	17.783	44.348	33.889	3.325	62.551	28.500	47.673	33.889	46.283
Nov	28.0	5.21	14.53	6.194	22.688	0.119	0.384	5.209	7.121	23.072	0.119	13.316
Dic	14.5	6.08	26.32	0.833	26.570	11.423	4.032	20.900	20.690	30.602	11.423	21.523
Anual	1097.8	5.08	11.16	8.208	37.341	8.921	4.546	15.724	11.654	42.019	8.674	23.700

Mes (2007)	Volumen de lluvia (mm)	pH	Conductividad Experimental ($\mu\text{S/cm}$)	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Ene	4.0	6.48	134.00	0.331	447.826	125.000	29.923	28.807	158.000	477.749	125.331	158.331
Feb	35.0	5.89	16.91	1.282	78.509	11.175	2.806	6.420	16.800	81.315	12.457	18.082
Mar	19.0	5.30	73.10	5.012	27.391	132.778	15.345	20.576	100.000	42.737	137.790	105.012
Abr	7.0	5.74	63.83	1.827	154.286	67.460	5.846	2.822	98.143	160.132	69.287	99.970
May	78.5	5.22	23.88	5.958	53.406	26.905	7.198	11.513	34.969	74.304	20.671	40.813
Jun	13.0	5.53	68.18	2.941	294.983	23.536	15.148	12.987	37.141	377.137	17.268	38.672
Jul	89.0	4.67	34.94	21.466	96.731	13.620	11.380	12.864	39.635	147.200	7.433	39.613
Ago	310.0	5.09	40.61	8.071	170.929	7.384	18.807	10.264	31.143	227.510	1.463	31.490
Sep	386.5	4.57	14.18	36.179	21.049	4.186	2.692	7.403	20.939	39.087	19.067	29.482
Oct	116.5	4.74	14.32	18.325	37.182	3.320	3.510	4.533	13.770	40.707	3.769	18.732
Nov	58.0	5.14	31.28	7.258	58.223	2.807	3.329	12.204	69.345	61.553	10.065	76.603
Dic	135.5	4.72	20.73	19.017	100.257	24.481	8.412	20.072	21.815	108.668	43.499	40.833
Promedio	1252.0	4.78	26.51	16.033	80.538	11.591	8.315	9.530	27.122	105.448	15.107	32.393

Anexo III

Prueba estadística de Shapiro – Wilks aplicada a los valores de concentración de iones, pH y conductividad.

Figura III.1.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de El Tajín 2006.

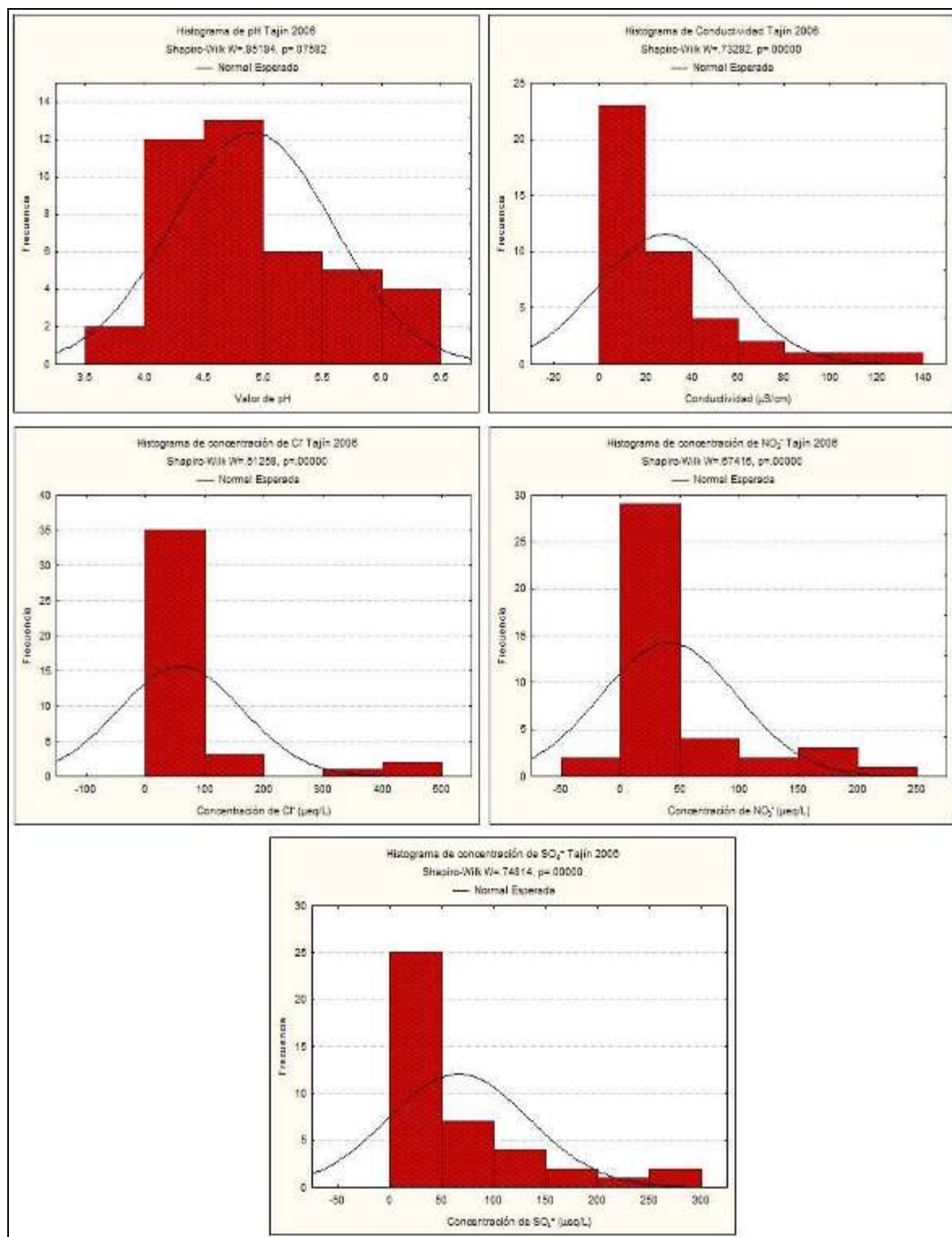


Figura III.2.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de El Tajín 2006.

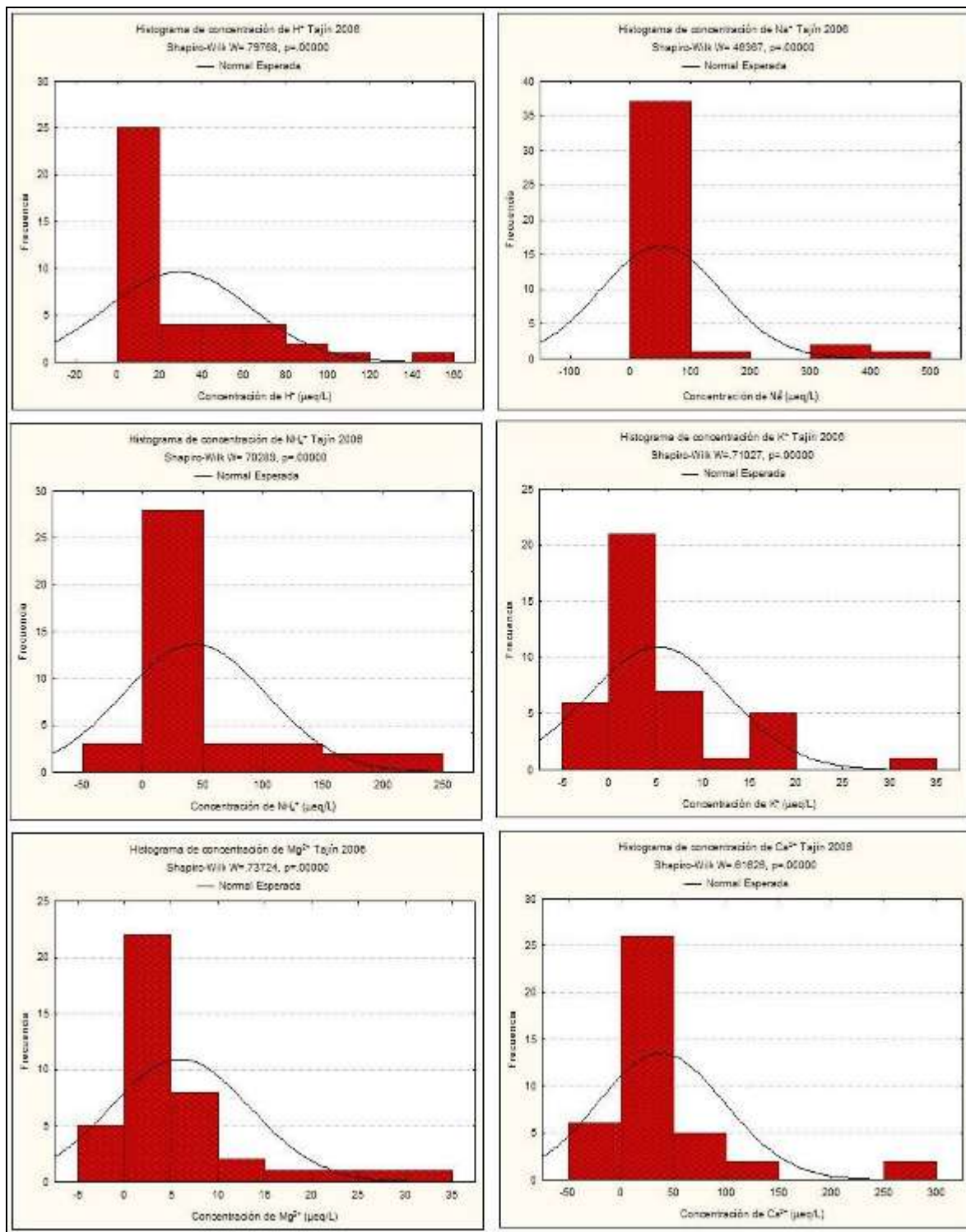


Figura III.3.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de El Tajín 2007.

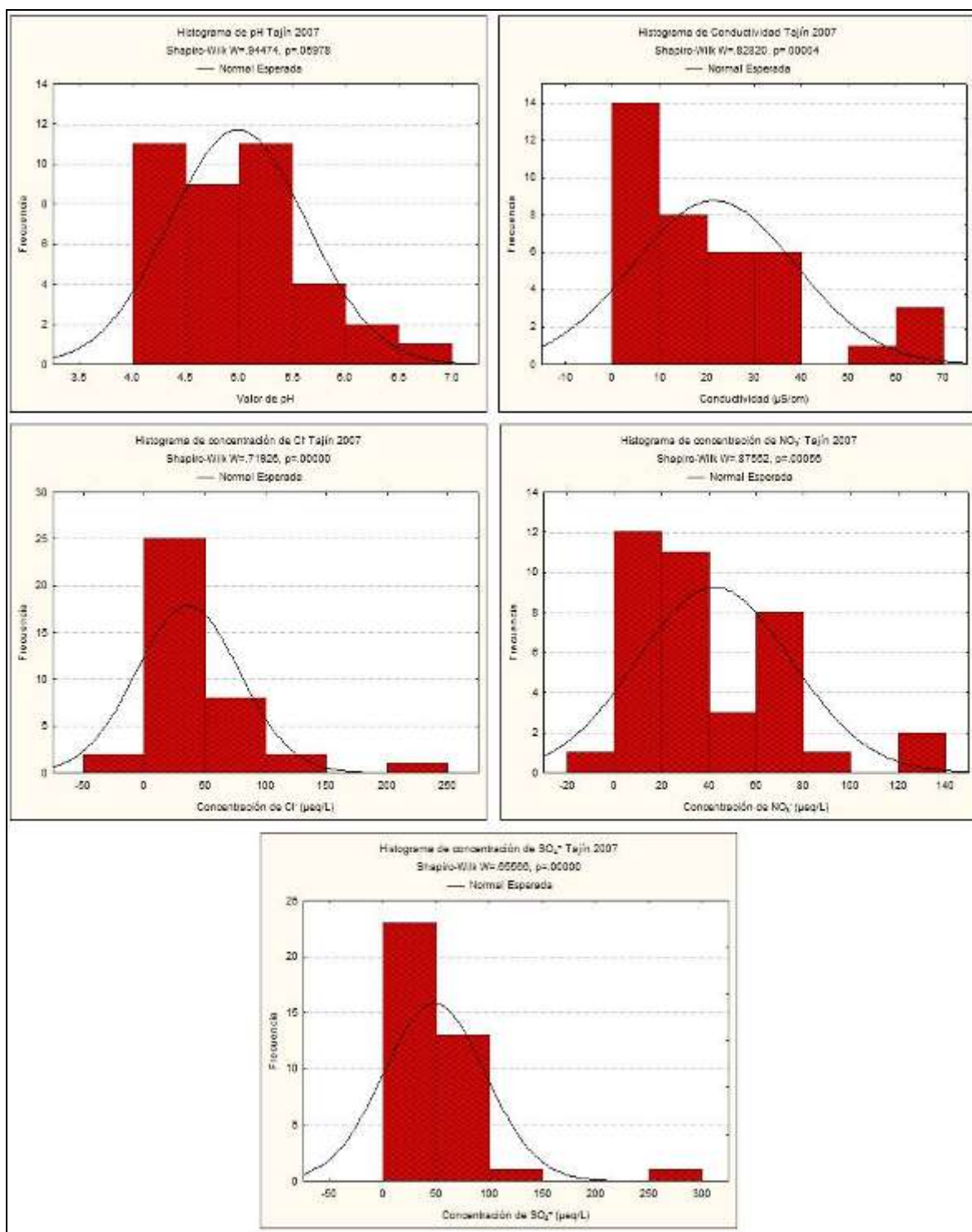


Figura III.4.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de El Tajín 2007.

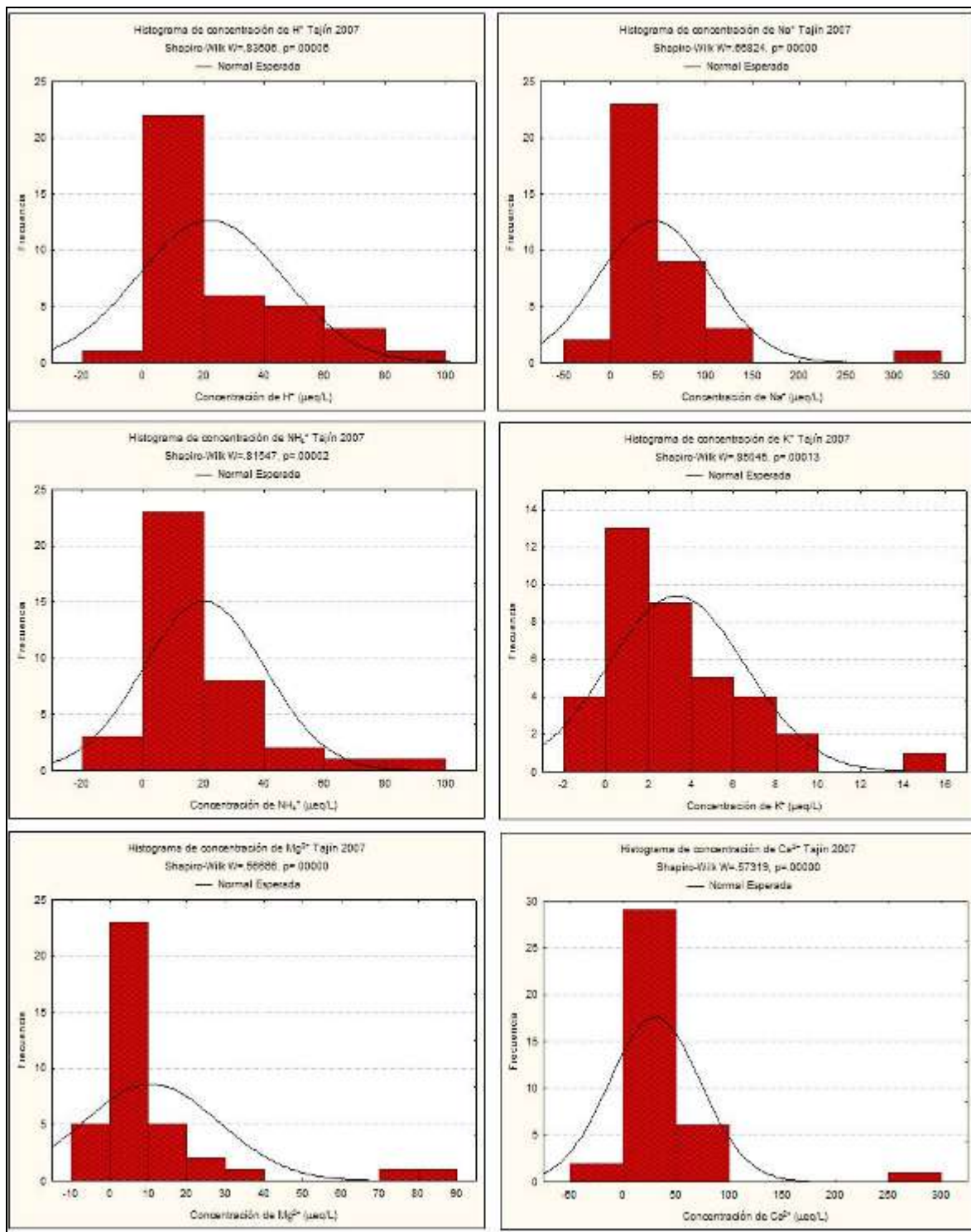


Figura III.5.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de La Mancha 2006.

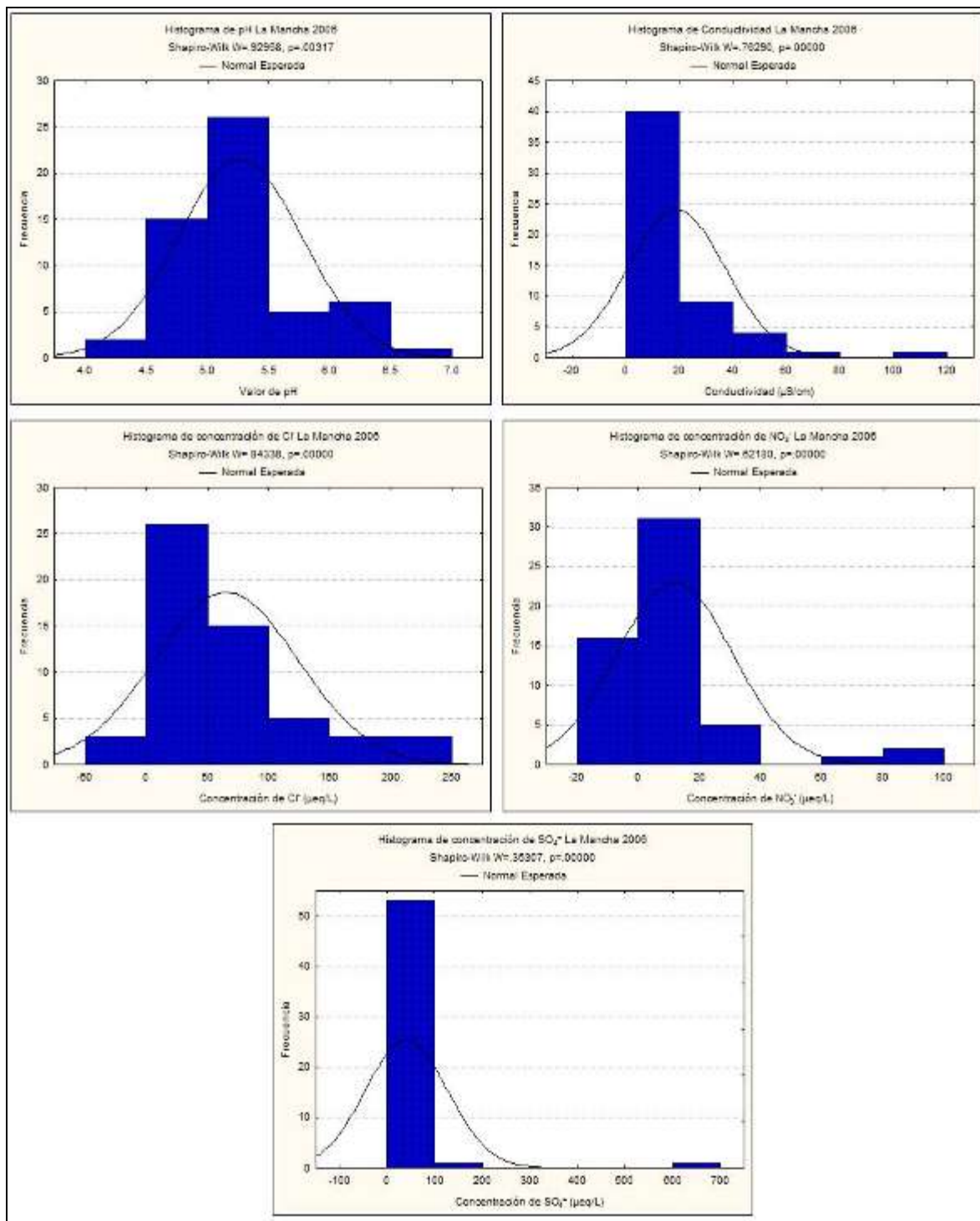


Figura III.6.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de La Mancha 2006.

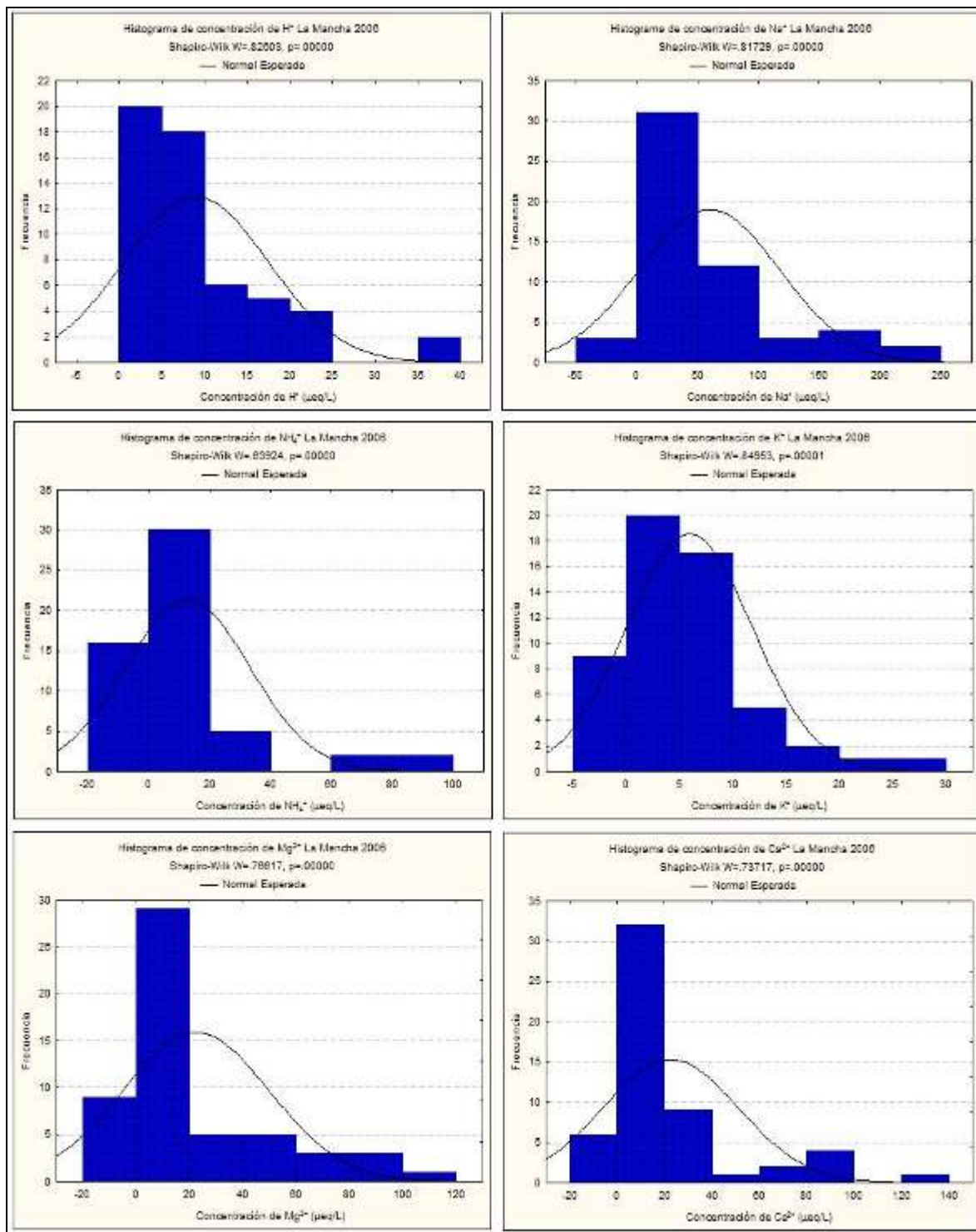


Figura III.7.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de pH, conductividad y concentración de aniones de La Mancha 2007.

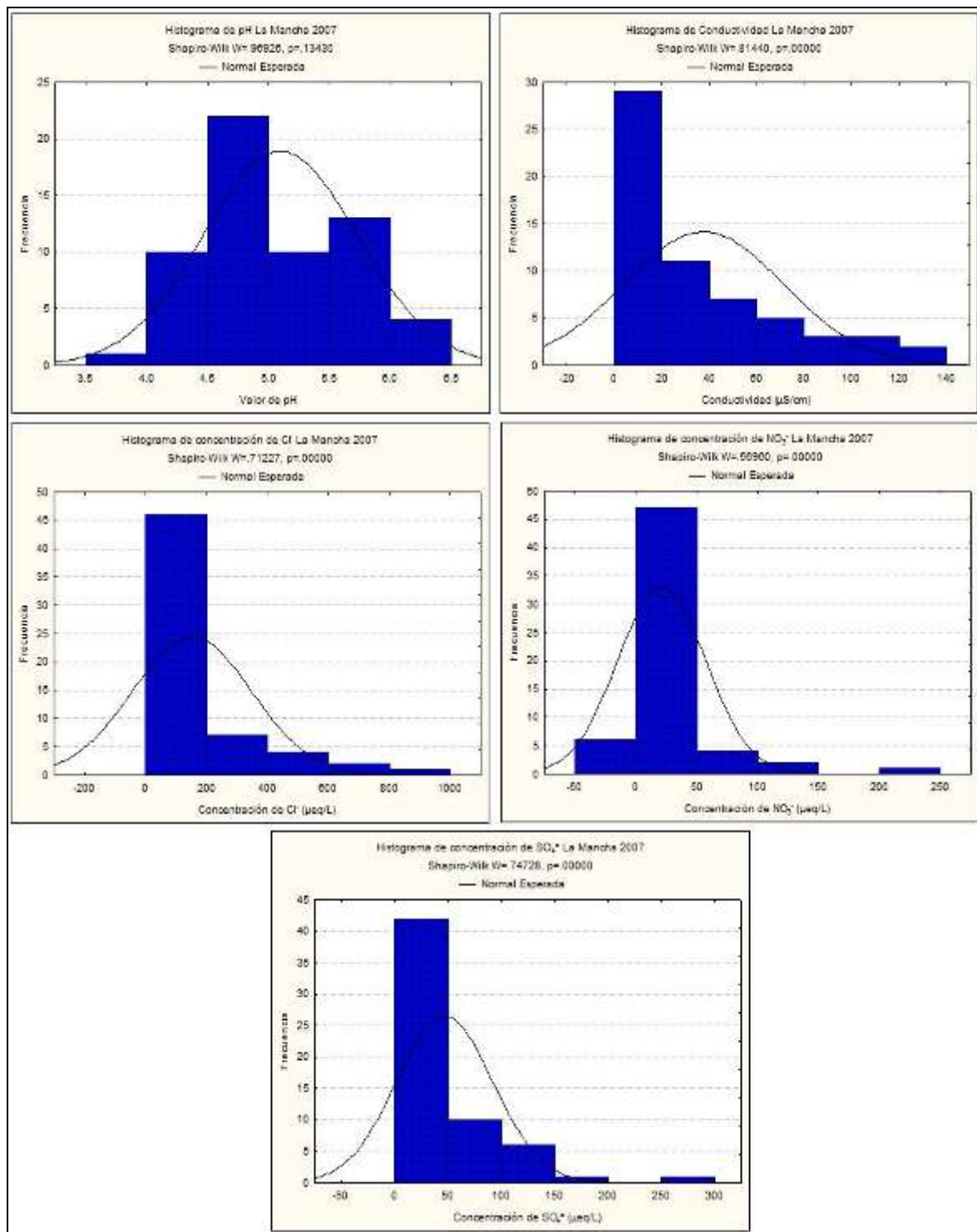
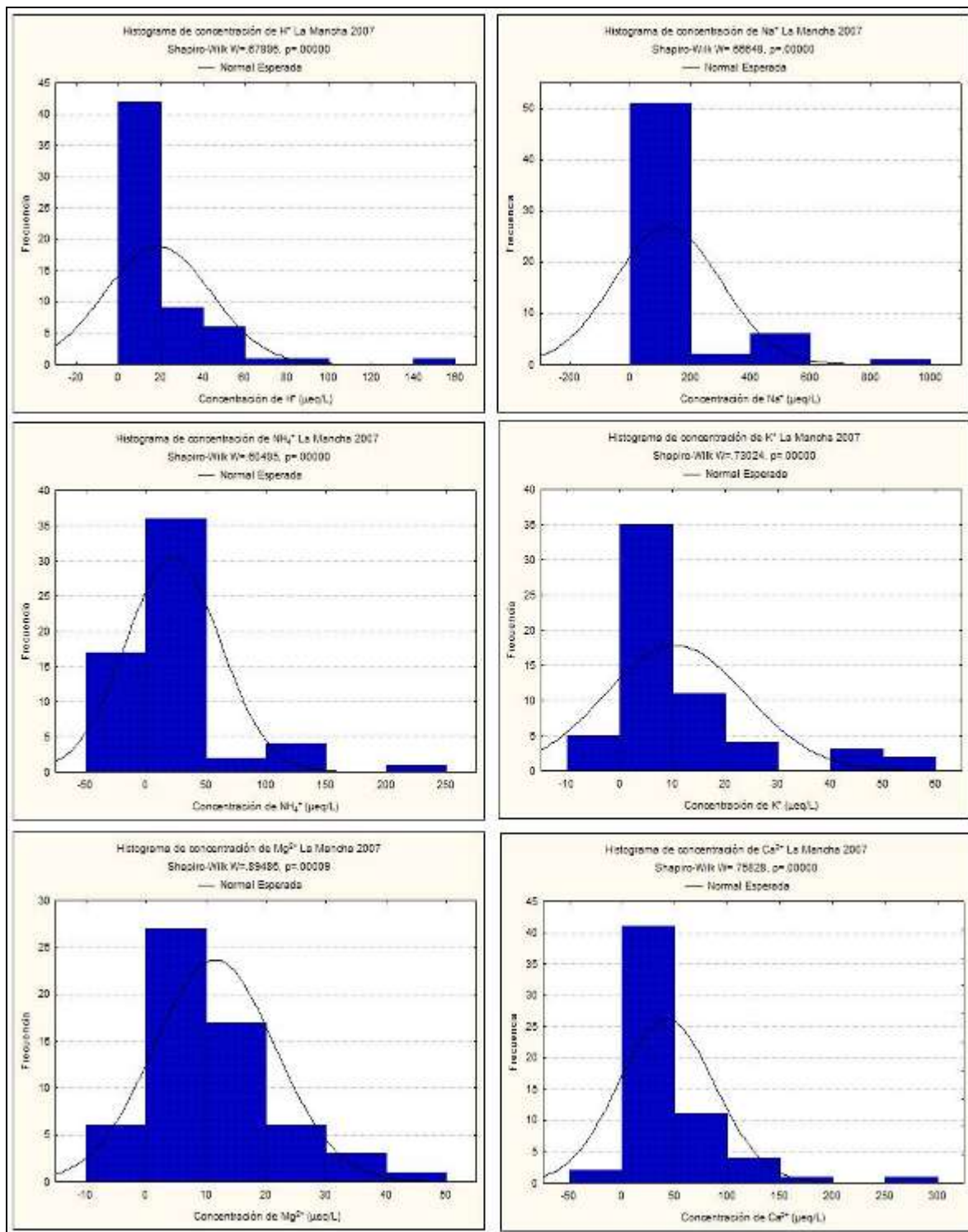


Figura III.8.- Prueba estadística de Shapiro-Wilks aplicada a los datos de concentración de cationes de La Mancha 2007.



Anexo IV

**Trayectorias realizadas para los eventos de lluvia de las dos
estaciones en los años 2006 -2007**

Figura IV.1.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero – Abril 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas

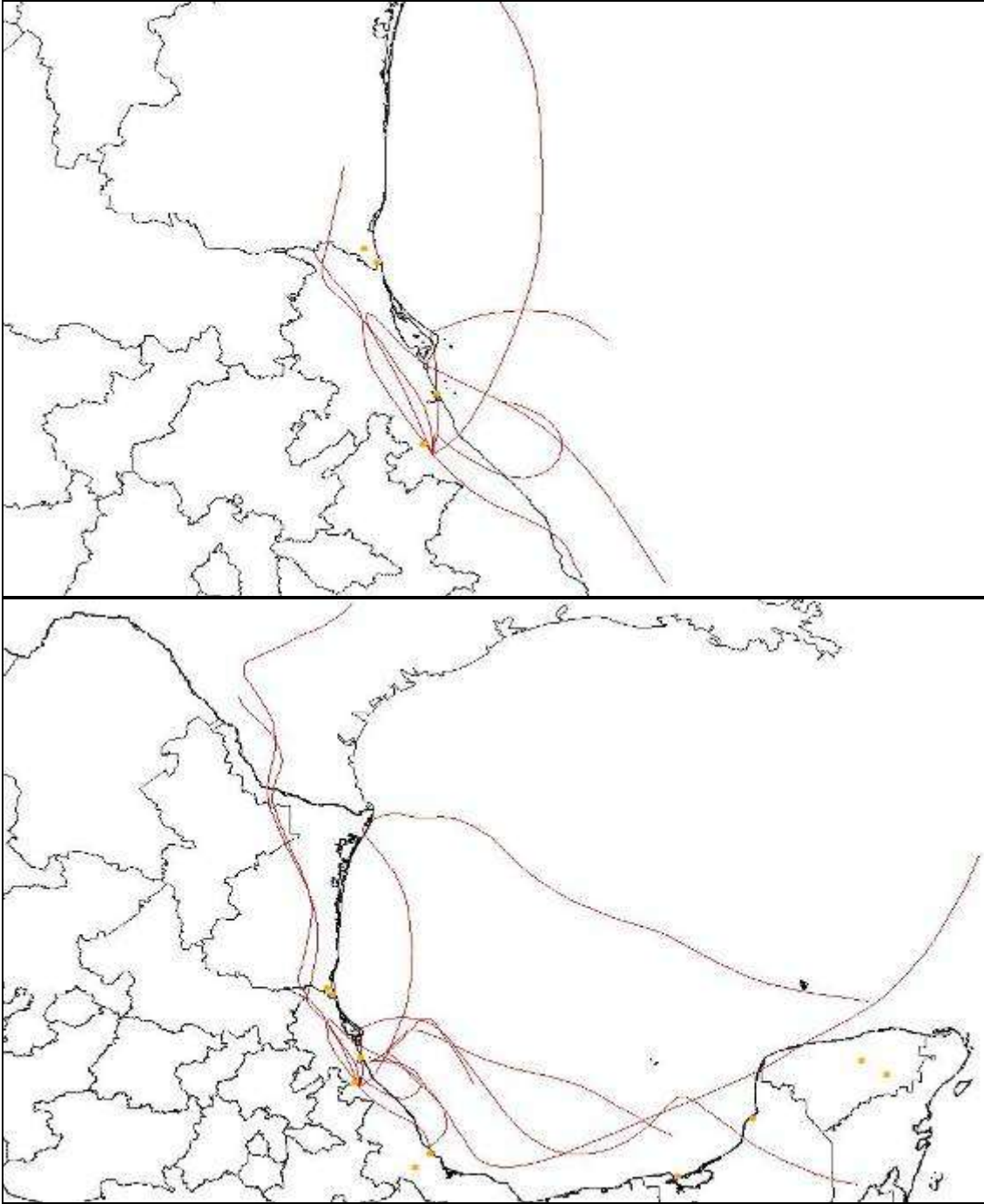


Figura IV.2.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Mayo – Junio 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas

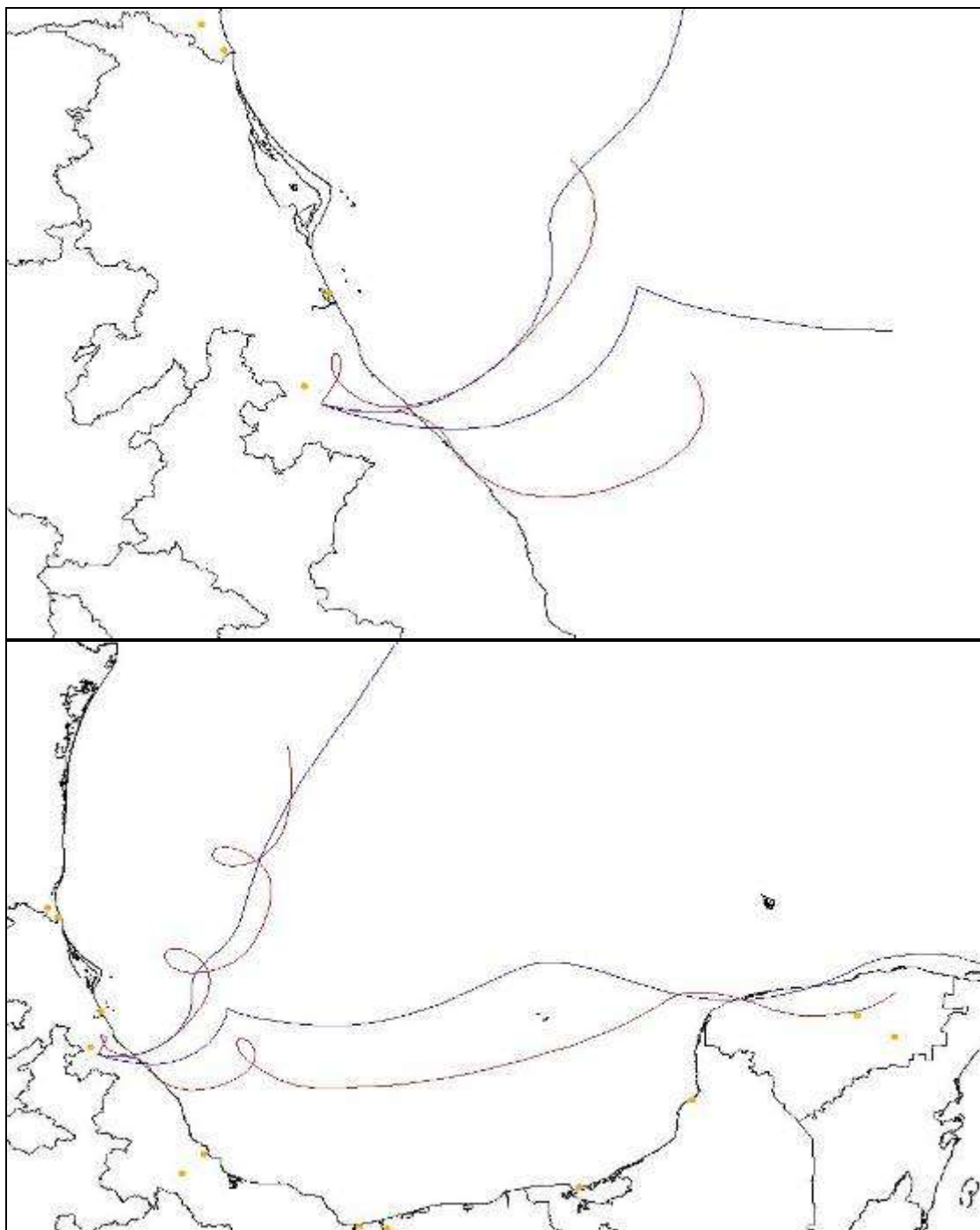


Figura IV.3.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Julio 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas

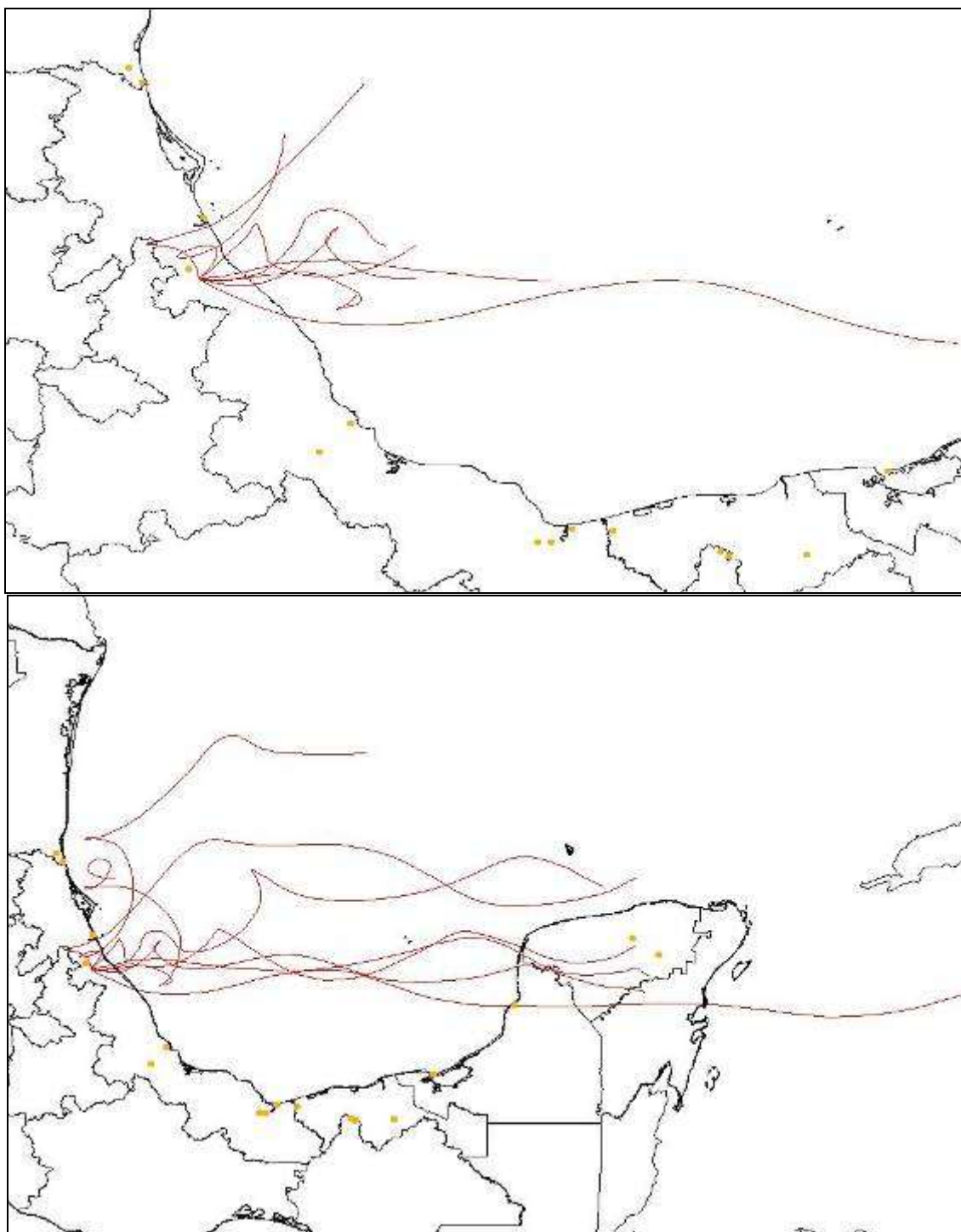


Figura IV.4.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Agosto - Septiembre 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas

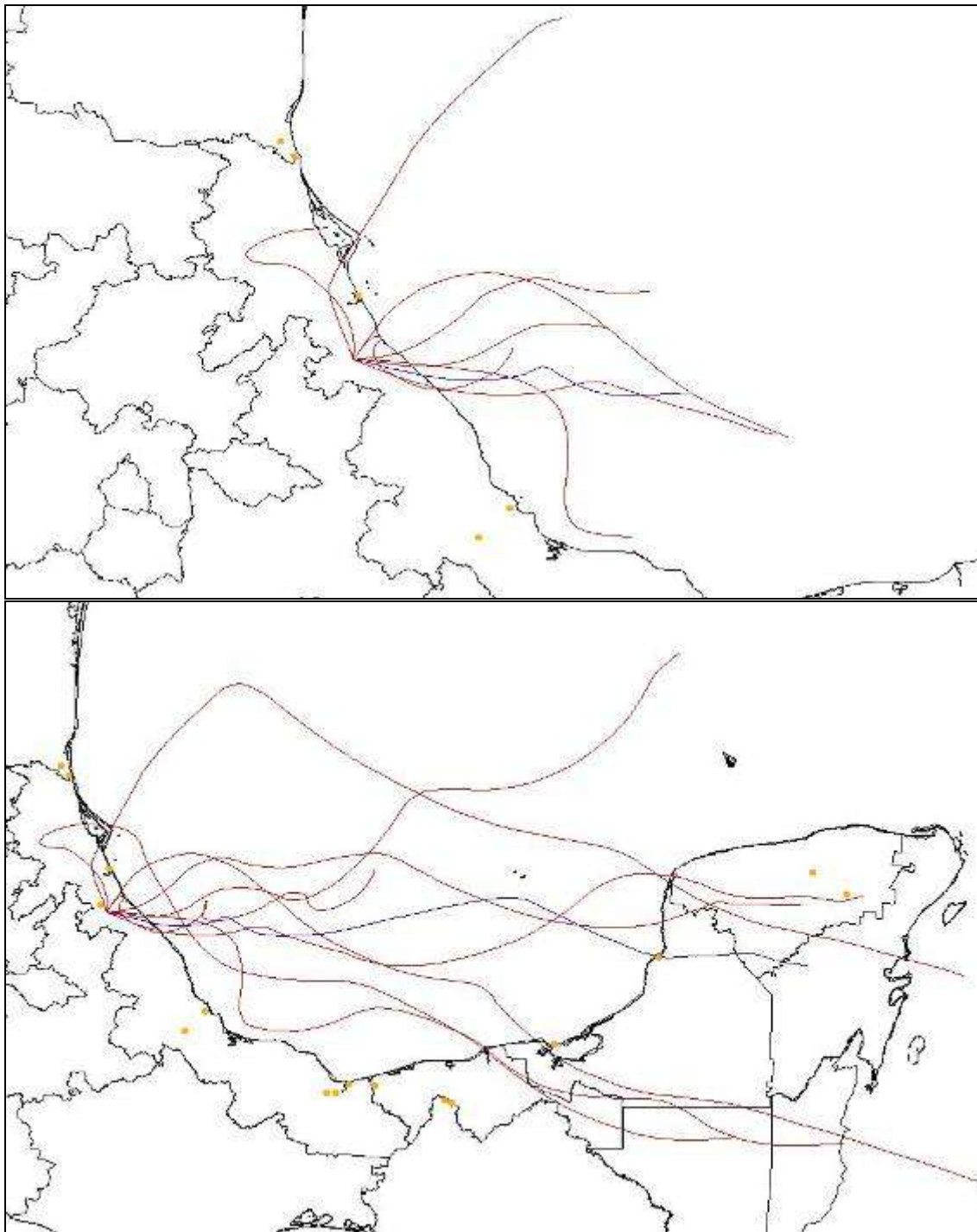


Figura IV.5.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Octubre 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas

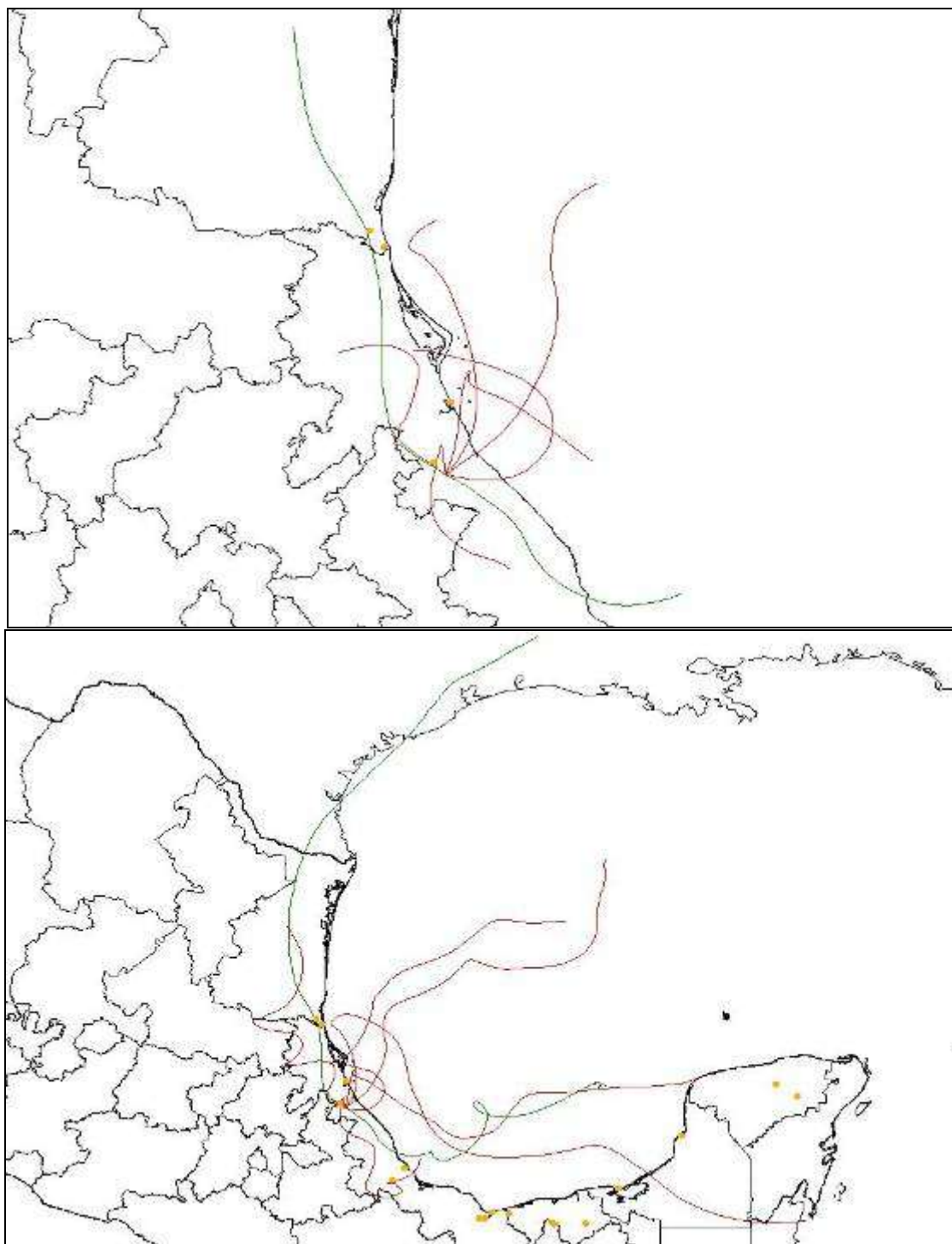


Figura IV.6.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Noviembre - Diciembre 2006 en El Tajín a 24 y 72 horas

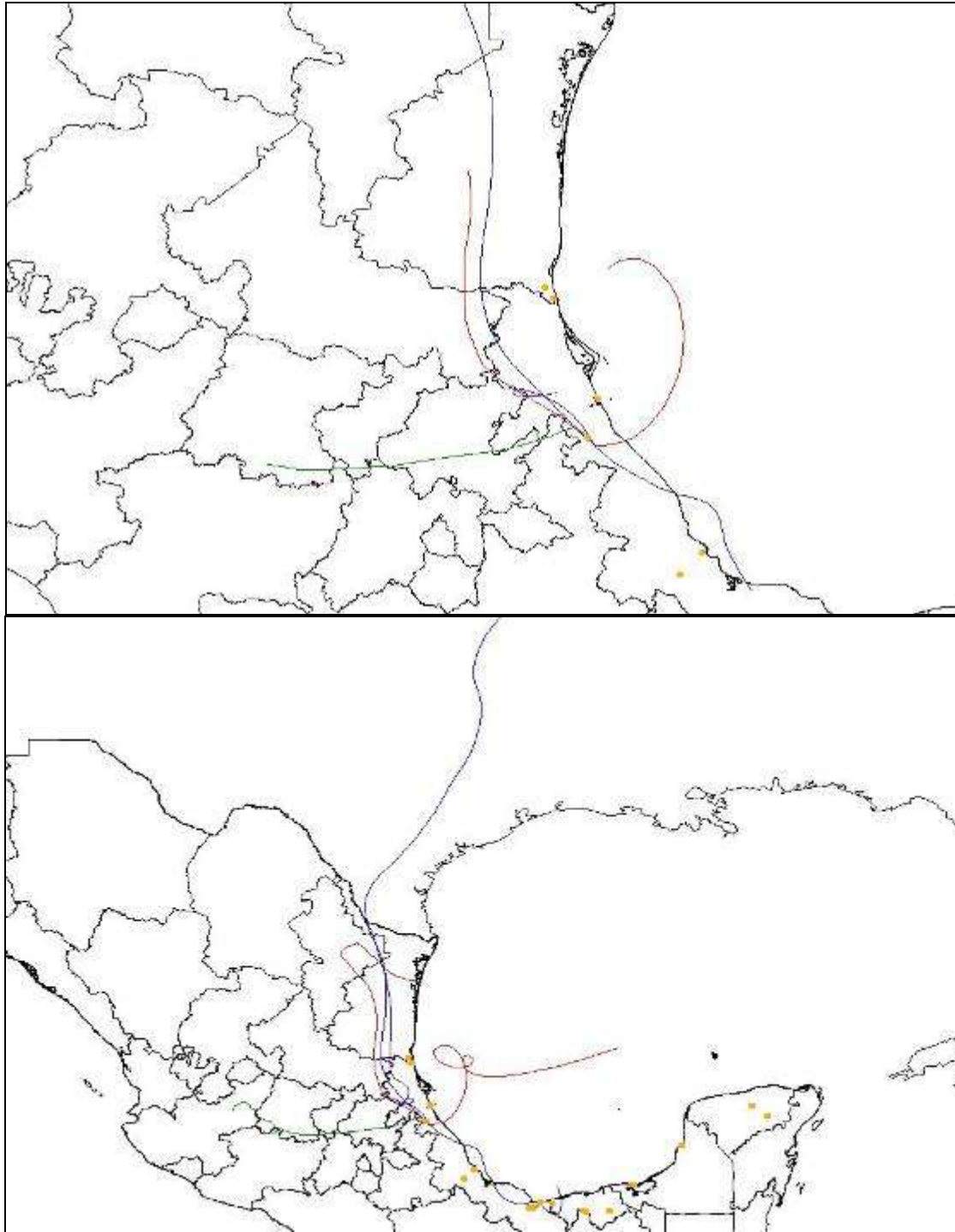


Figura IV.7.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero - Febrero 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas

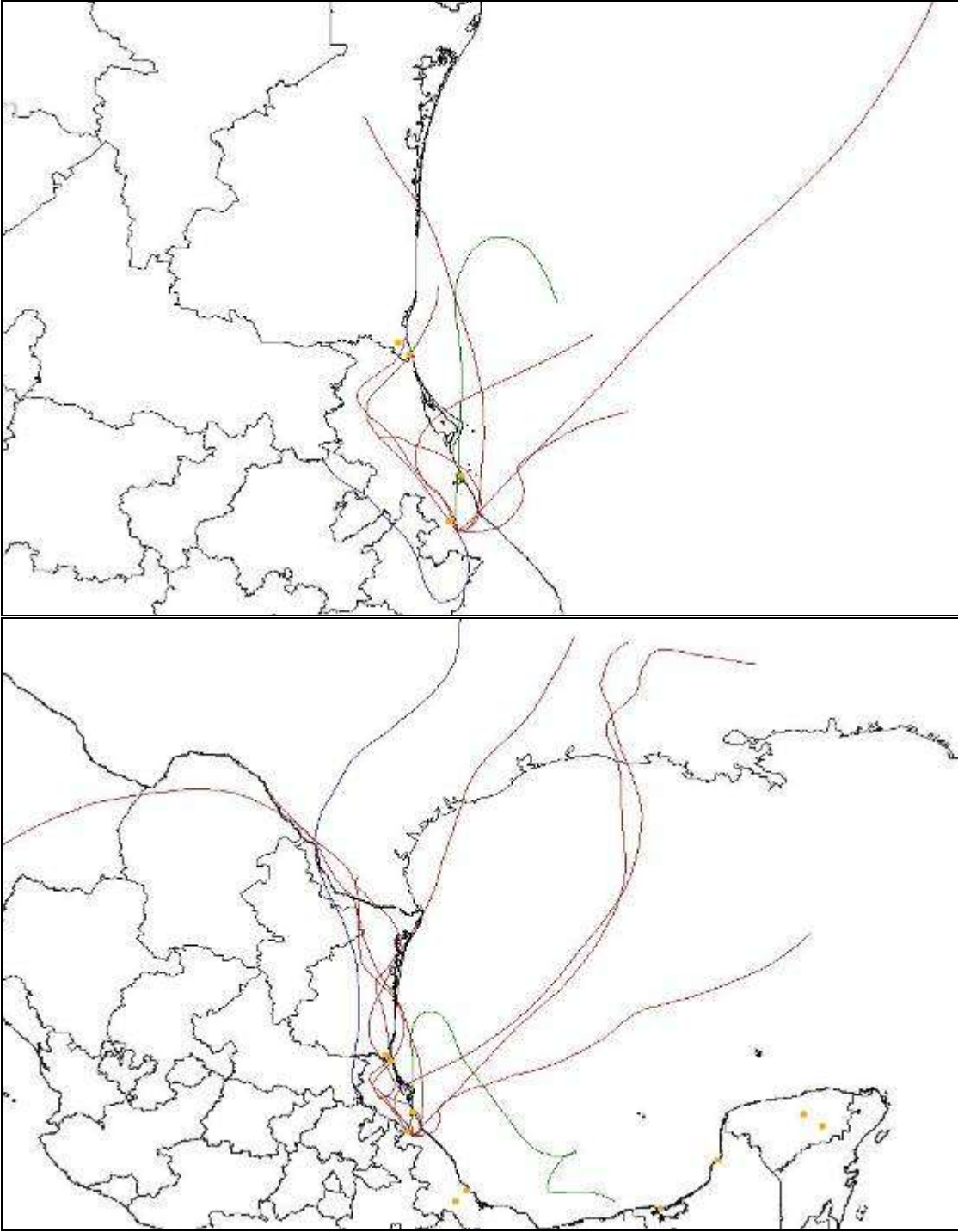


Figura IV.8.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Marzo - Junio 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas

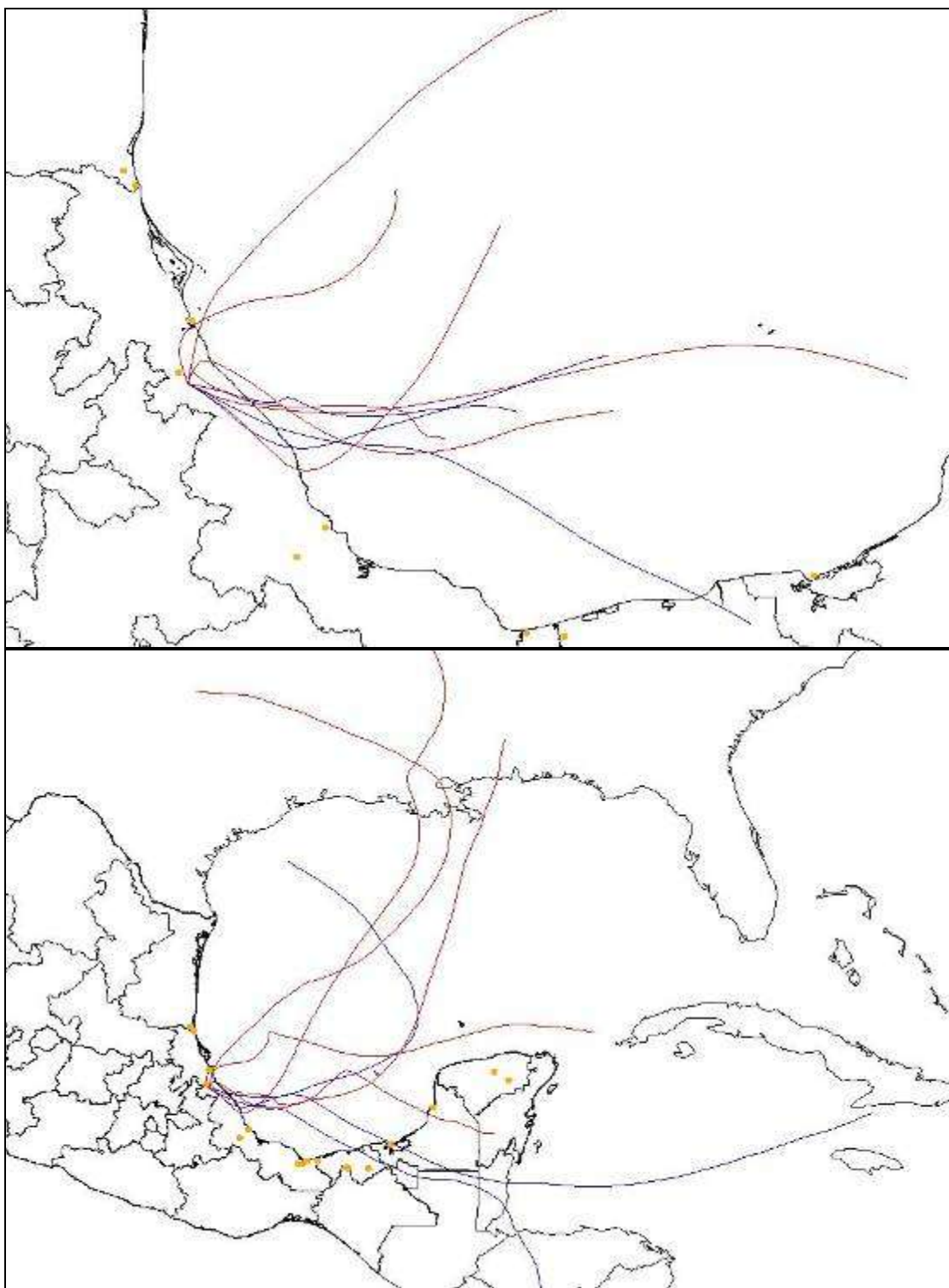


Figura IV.9.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Julio - Agosto 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas

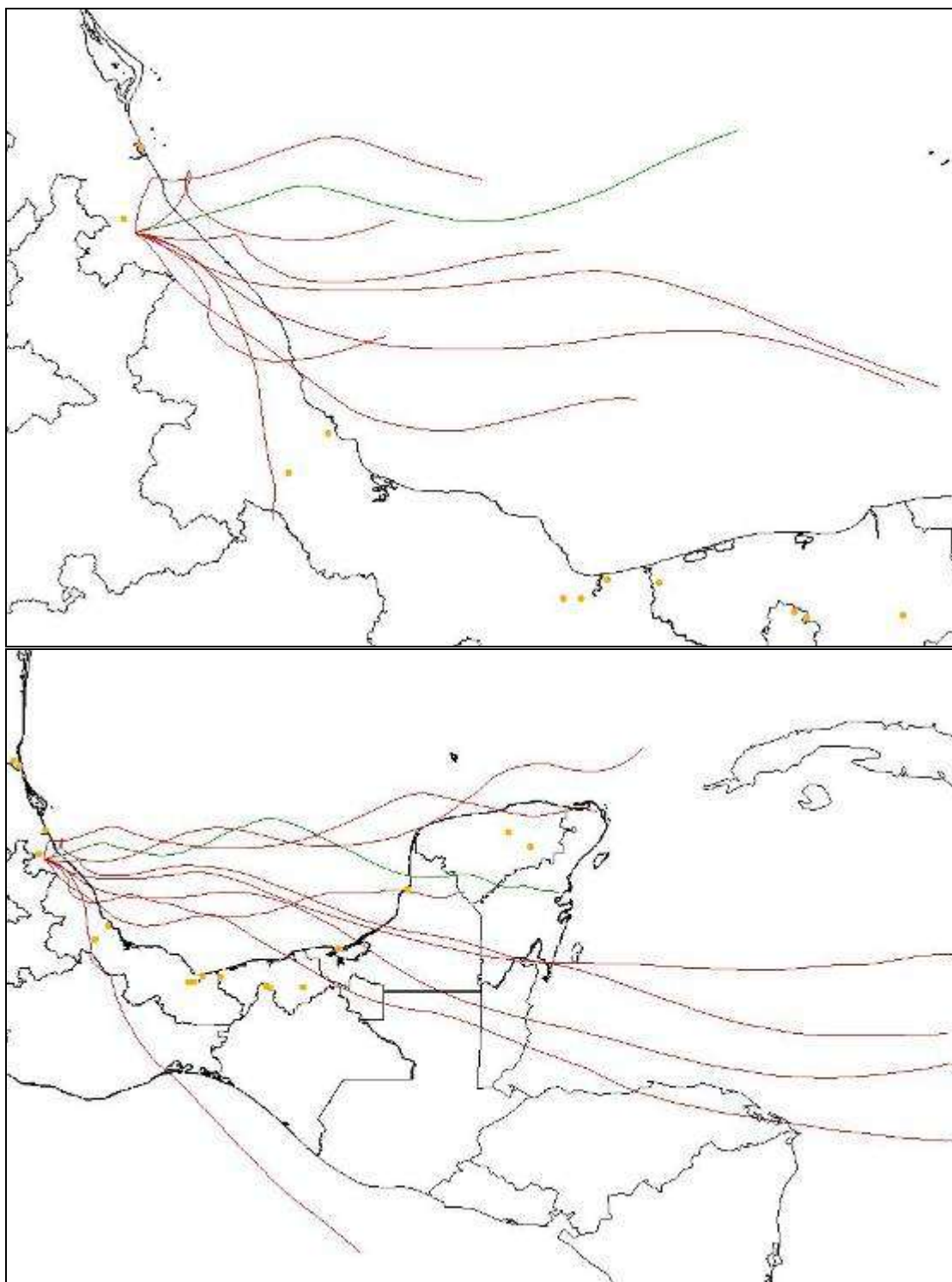


Figura IV.10.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Septiembre - Octubre 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas

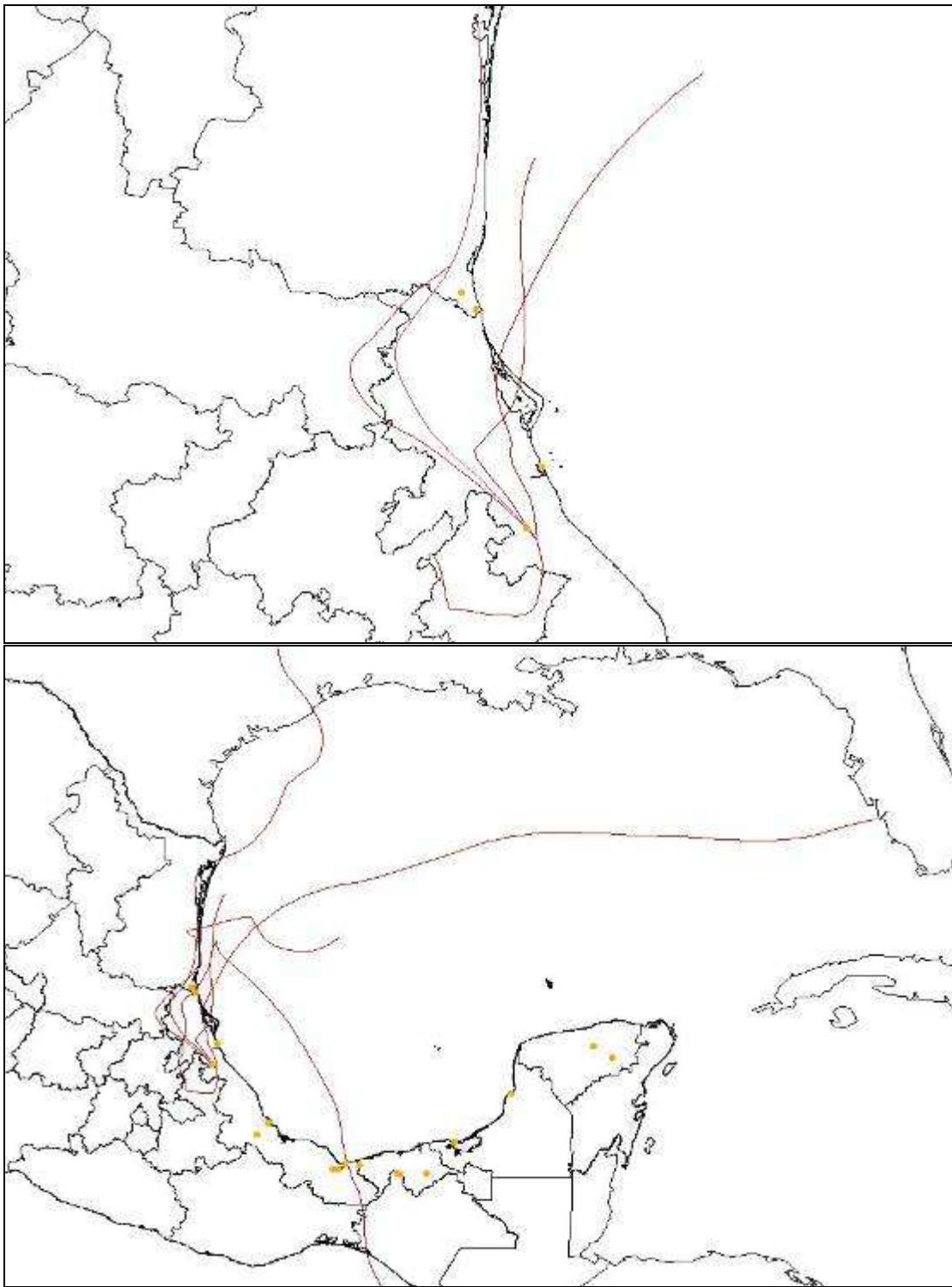


Figura IV.11.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Noviembre - Diciembre 2007 en El Tajín a 24 y 72 horas

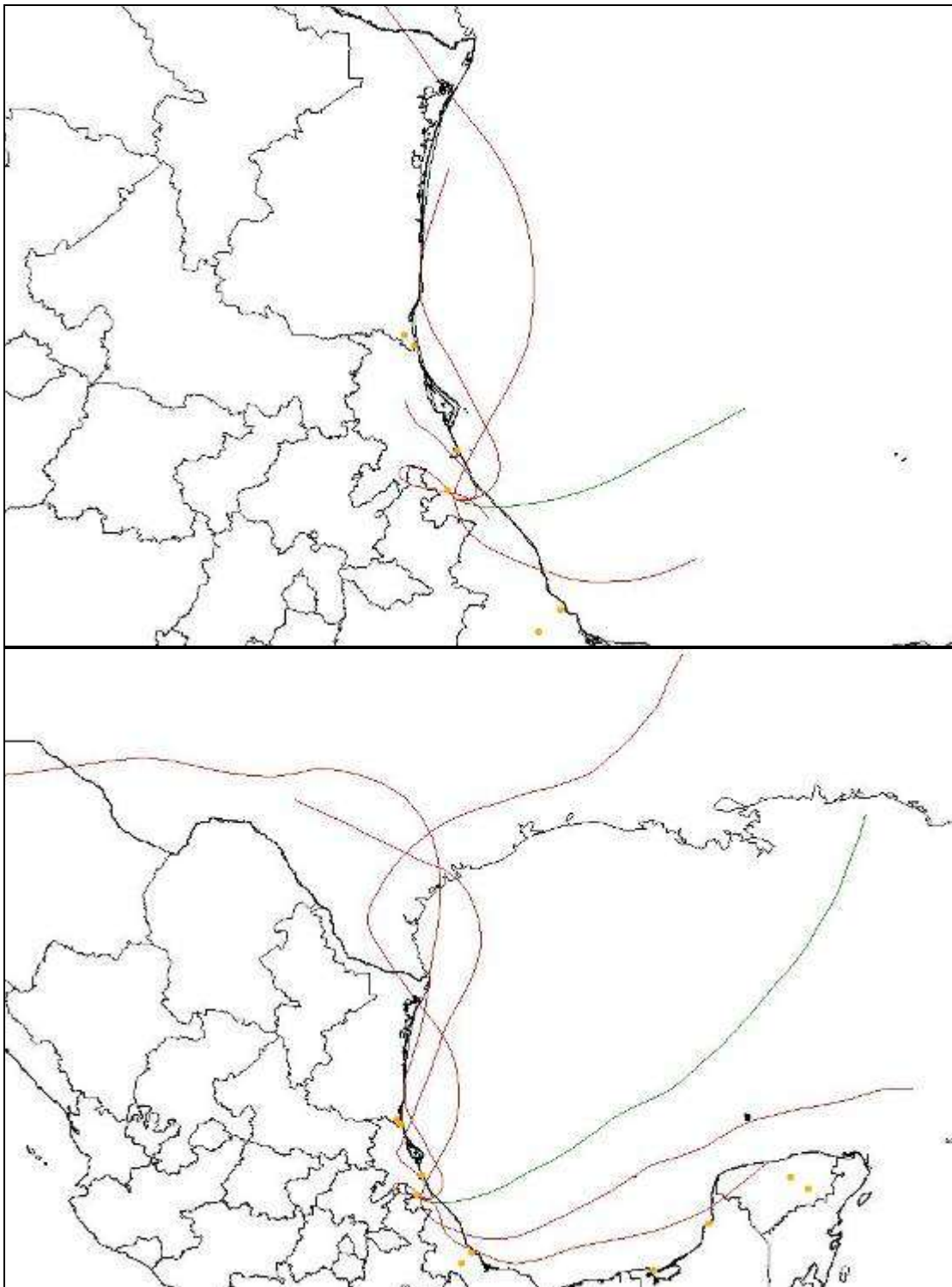


Figura IV.12.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero - Abril 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas

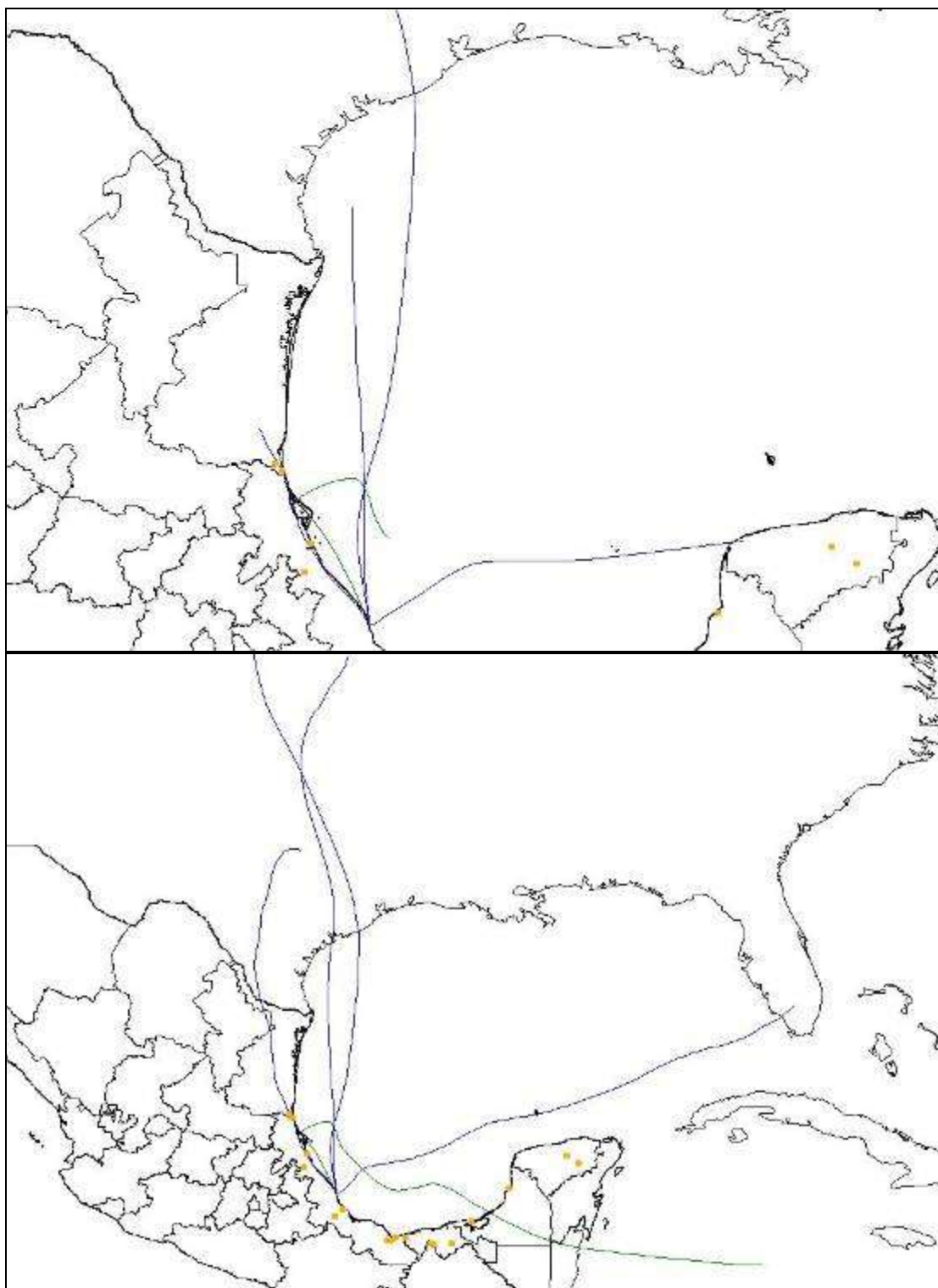


Figura IV.13.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Mayo 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas

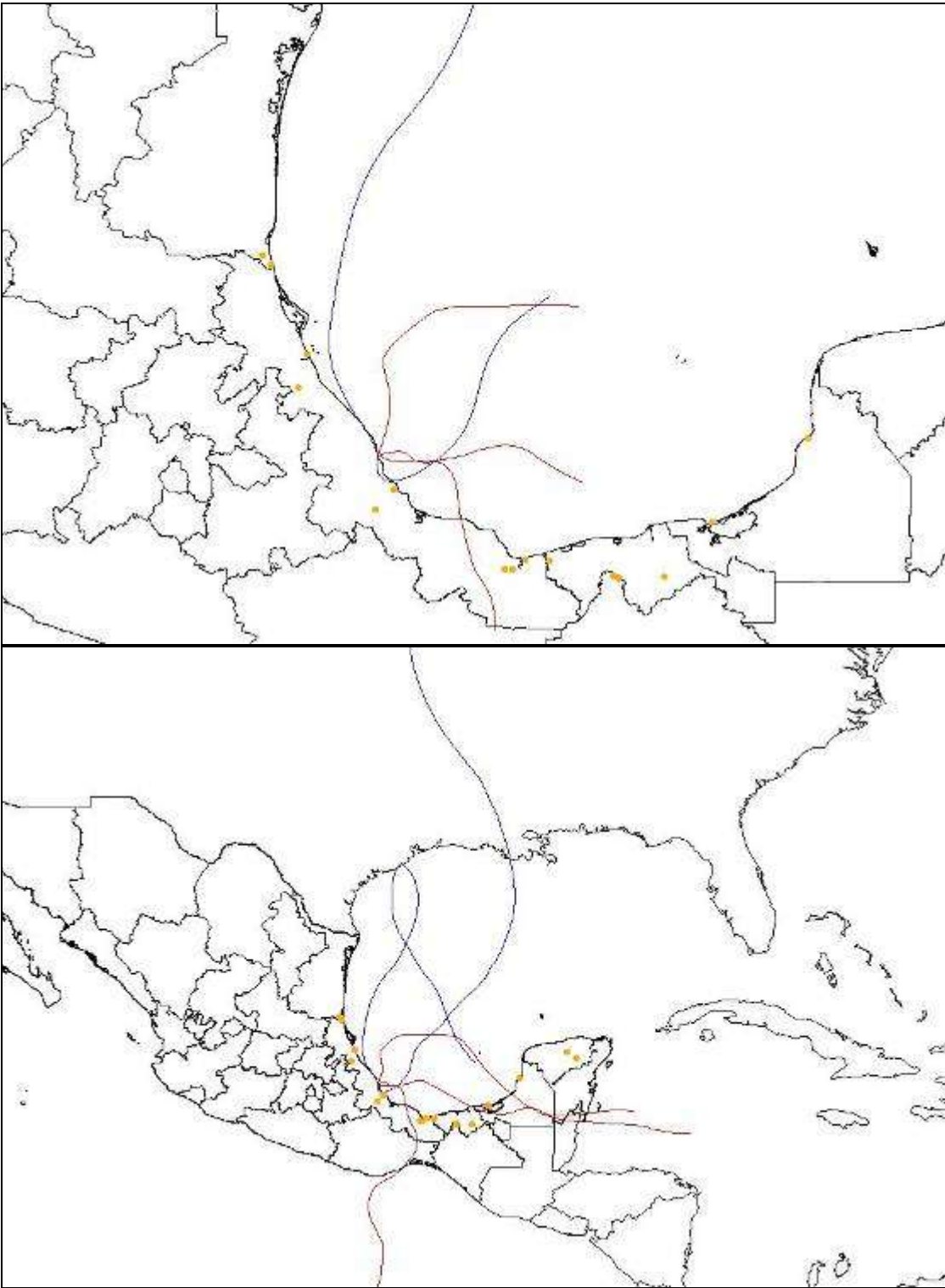


Figura IV.14.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Junio 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas

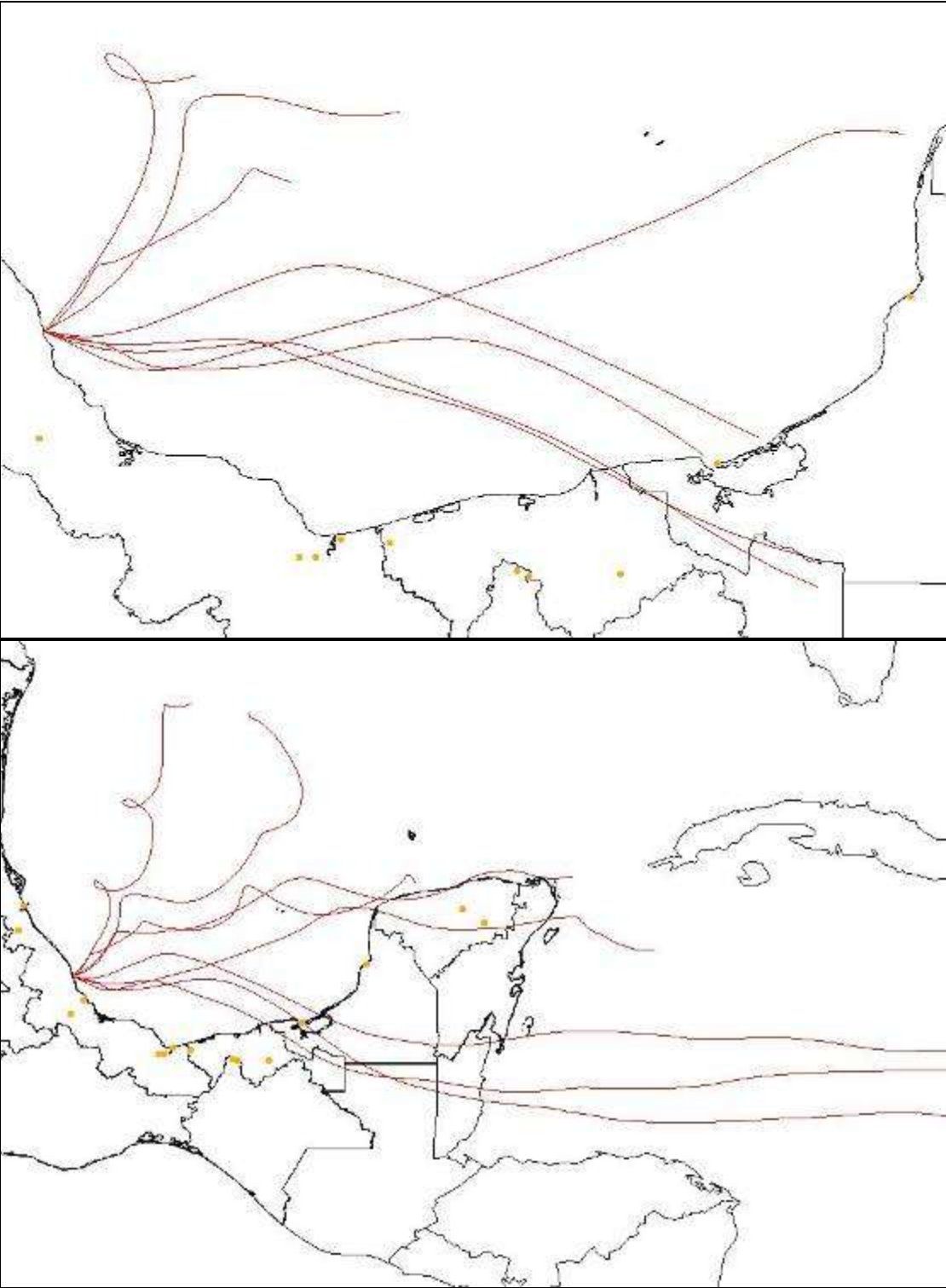


Figura IV.15.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Julio 2066 en La Mancha a 24 y 72 horas

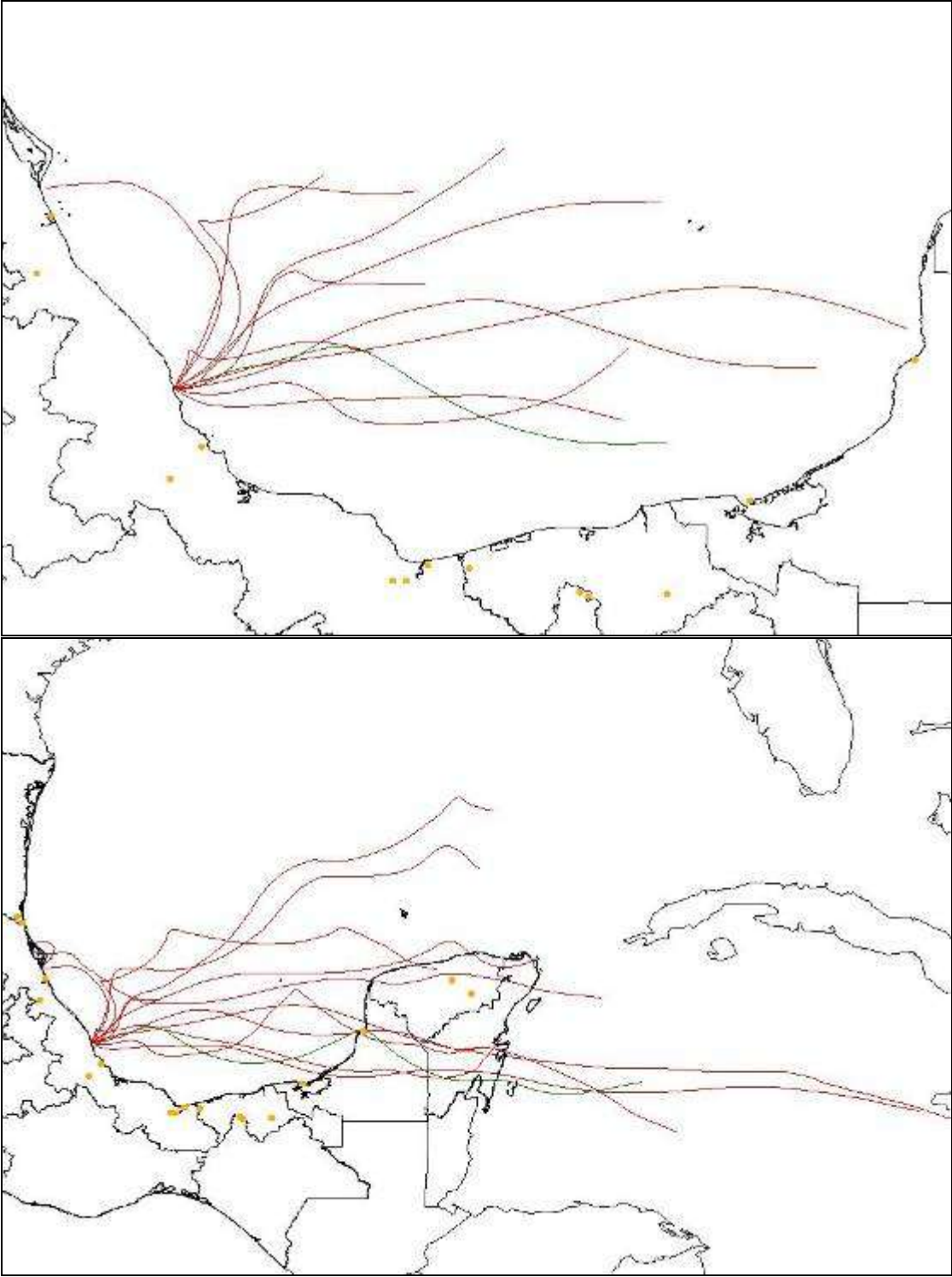


Figura IV.16.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Agosto 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas

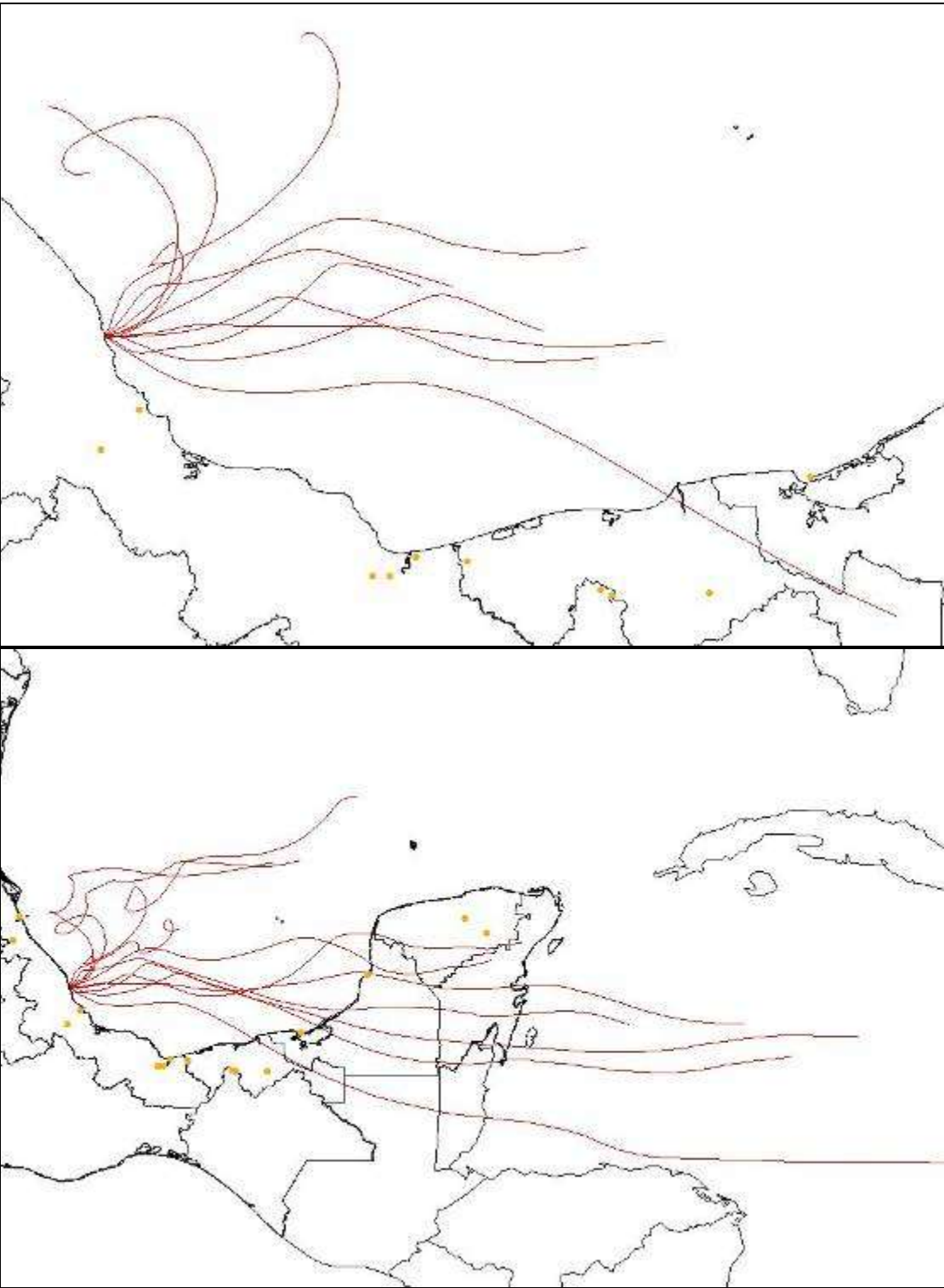


Figura IV.17.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Septiembre 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas

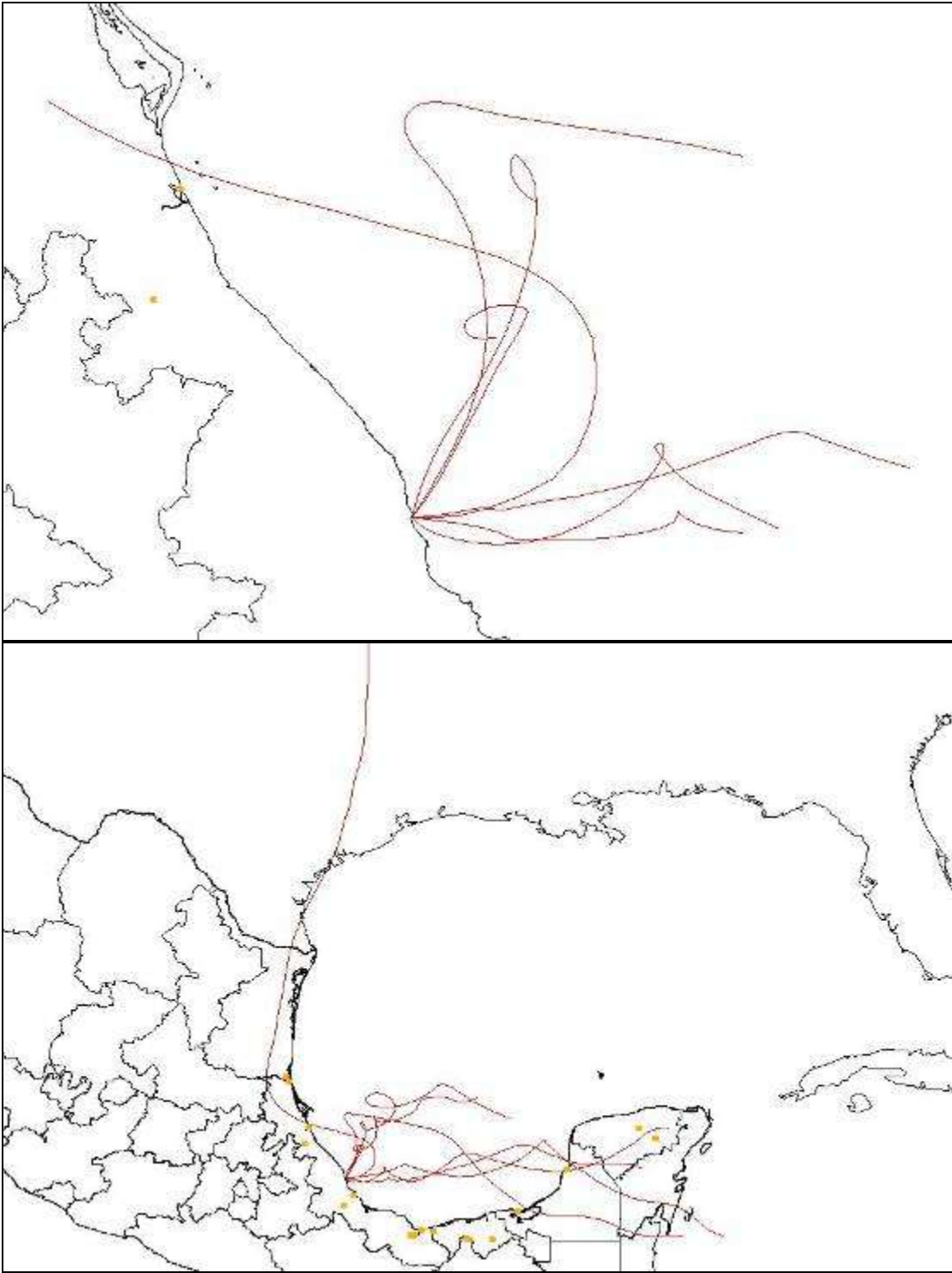


Figura IV.18.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Octubre - Diciembre 2006 en La Mancha a 24 y 72 horas

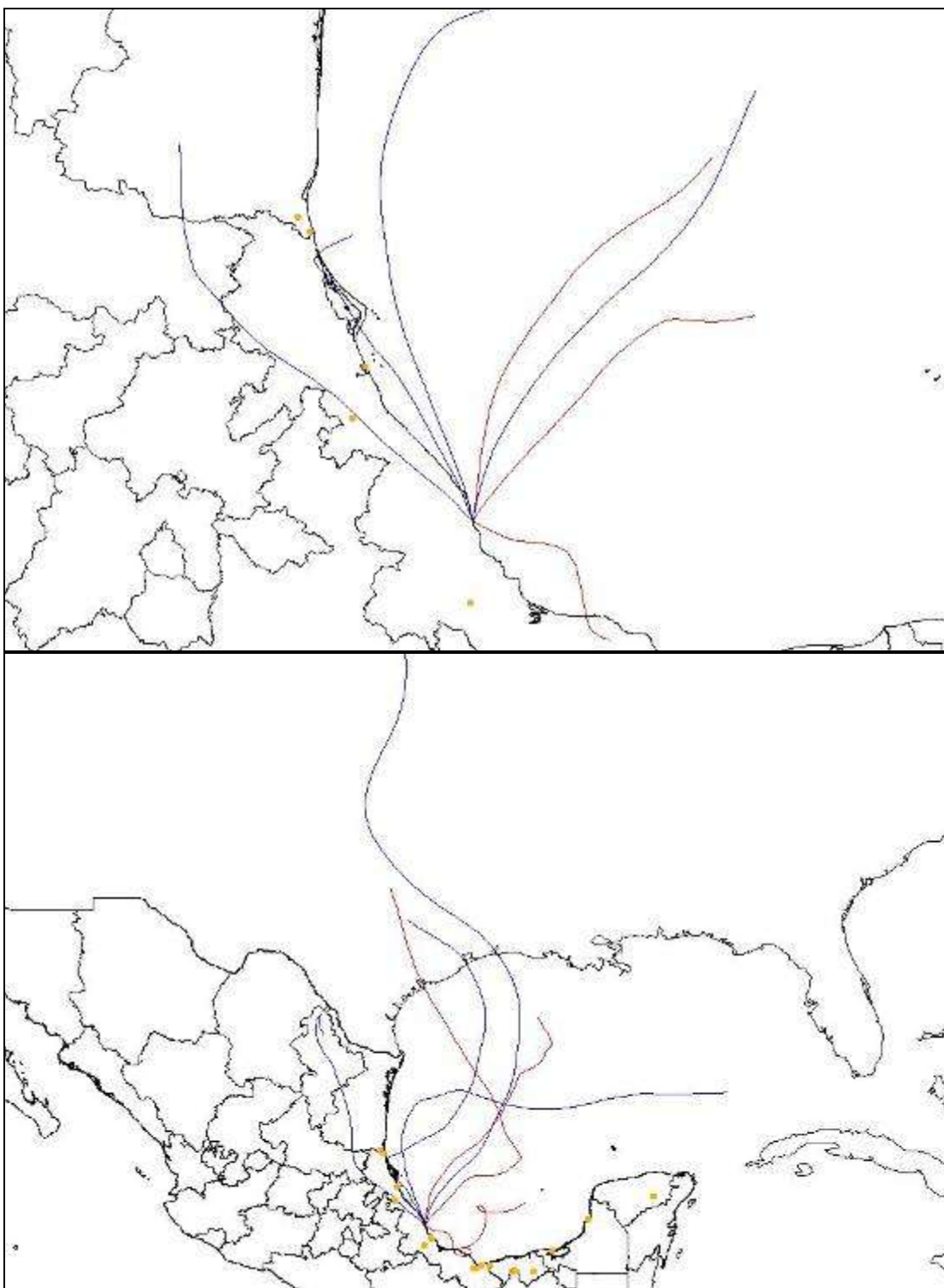


Figura IV.19.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Enero – Abril 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas

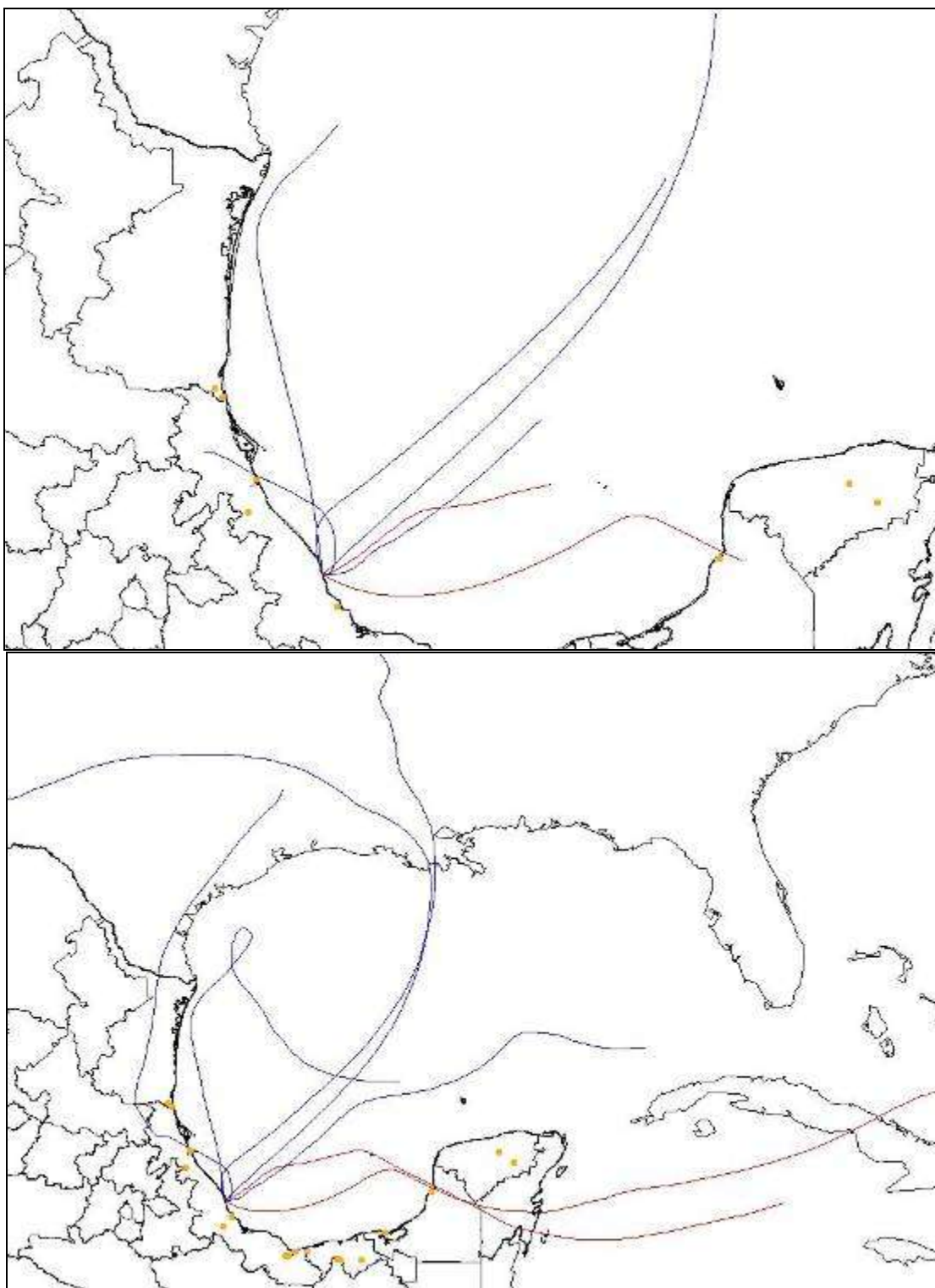


Figura IV.20.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Mayo - Junio 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas

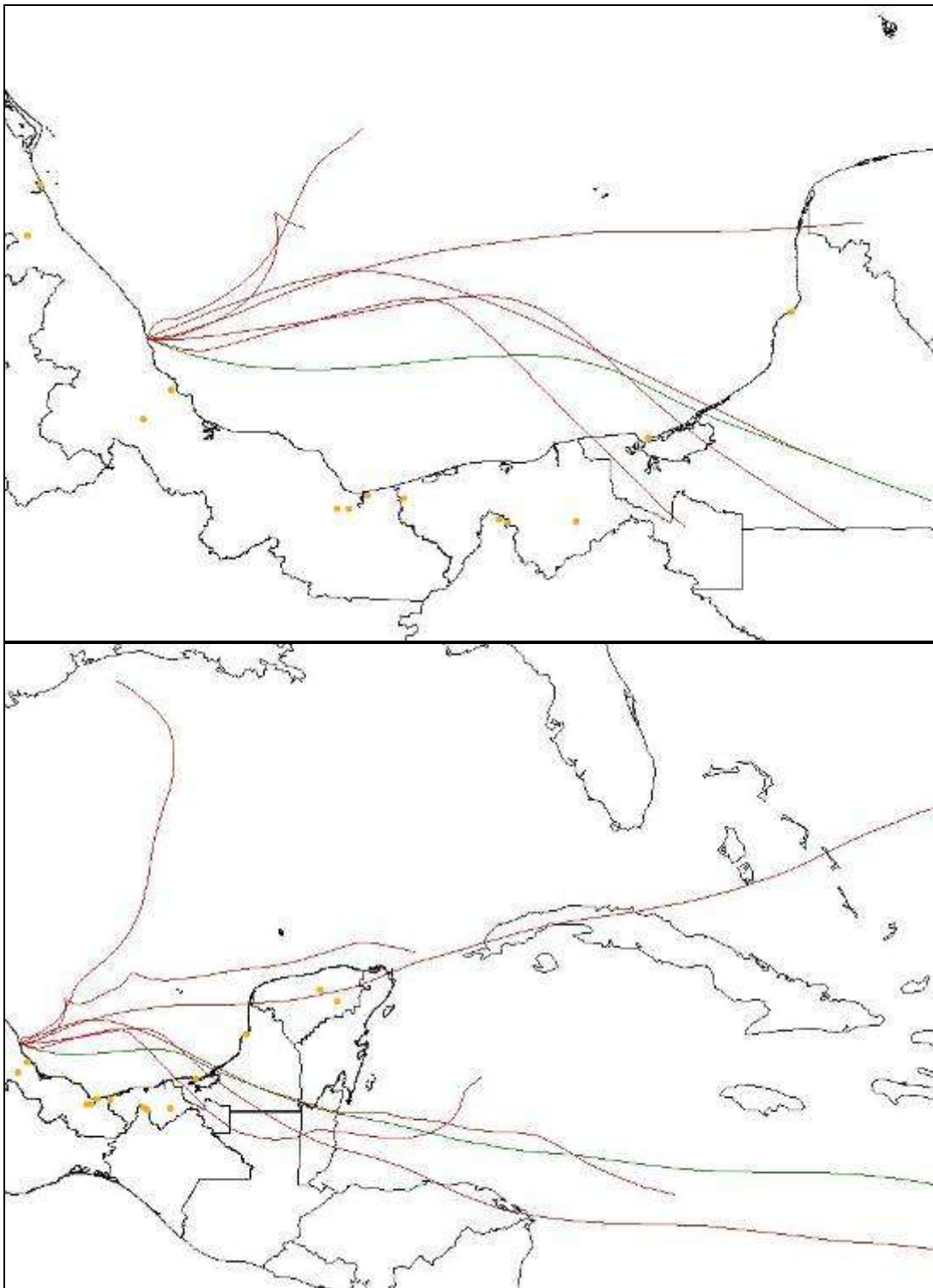


Figura IV.21.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Julio 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas

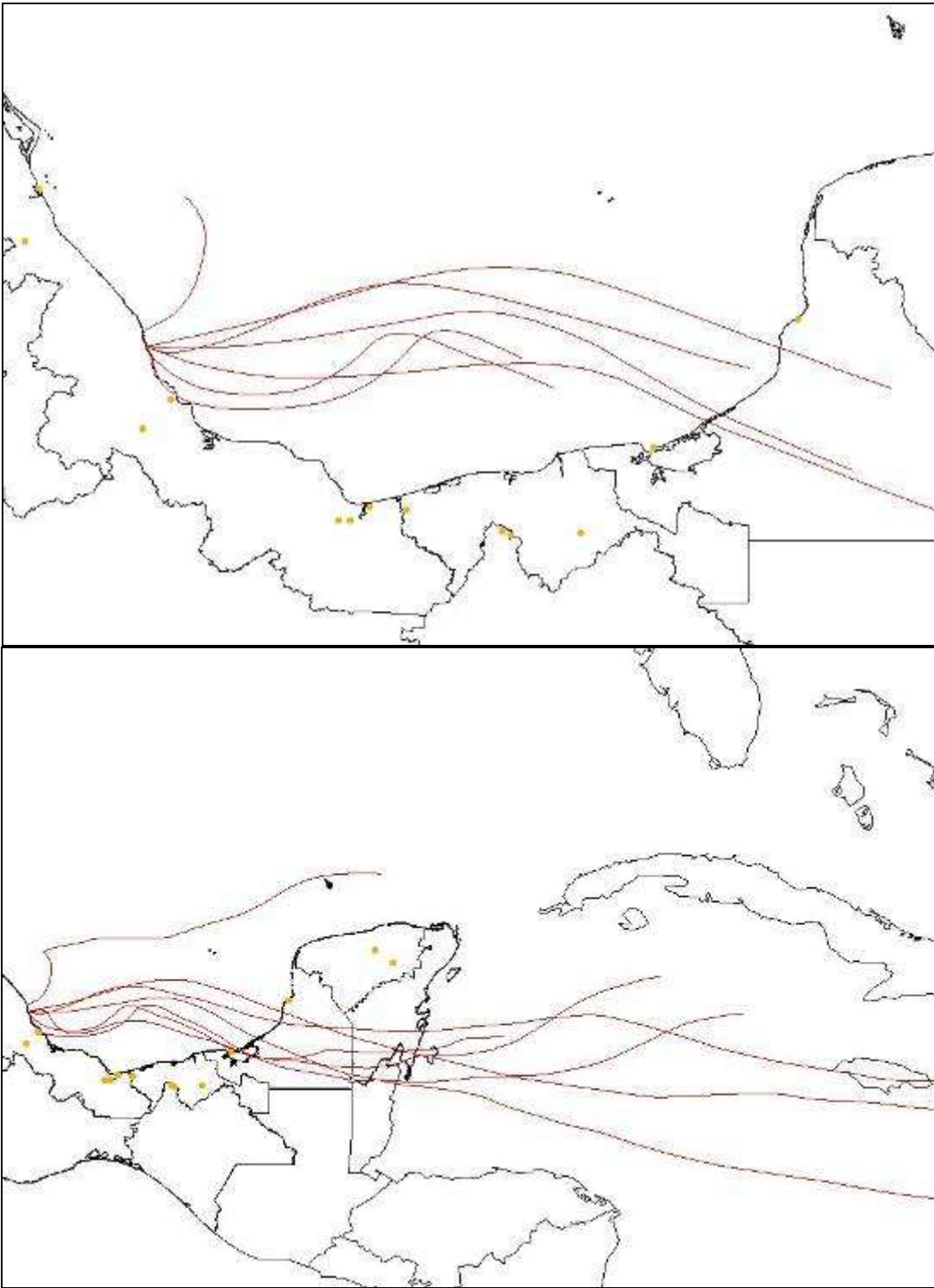


Figura IV.22.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Agosto 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas

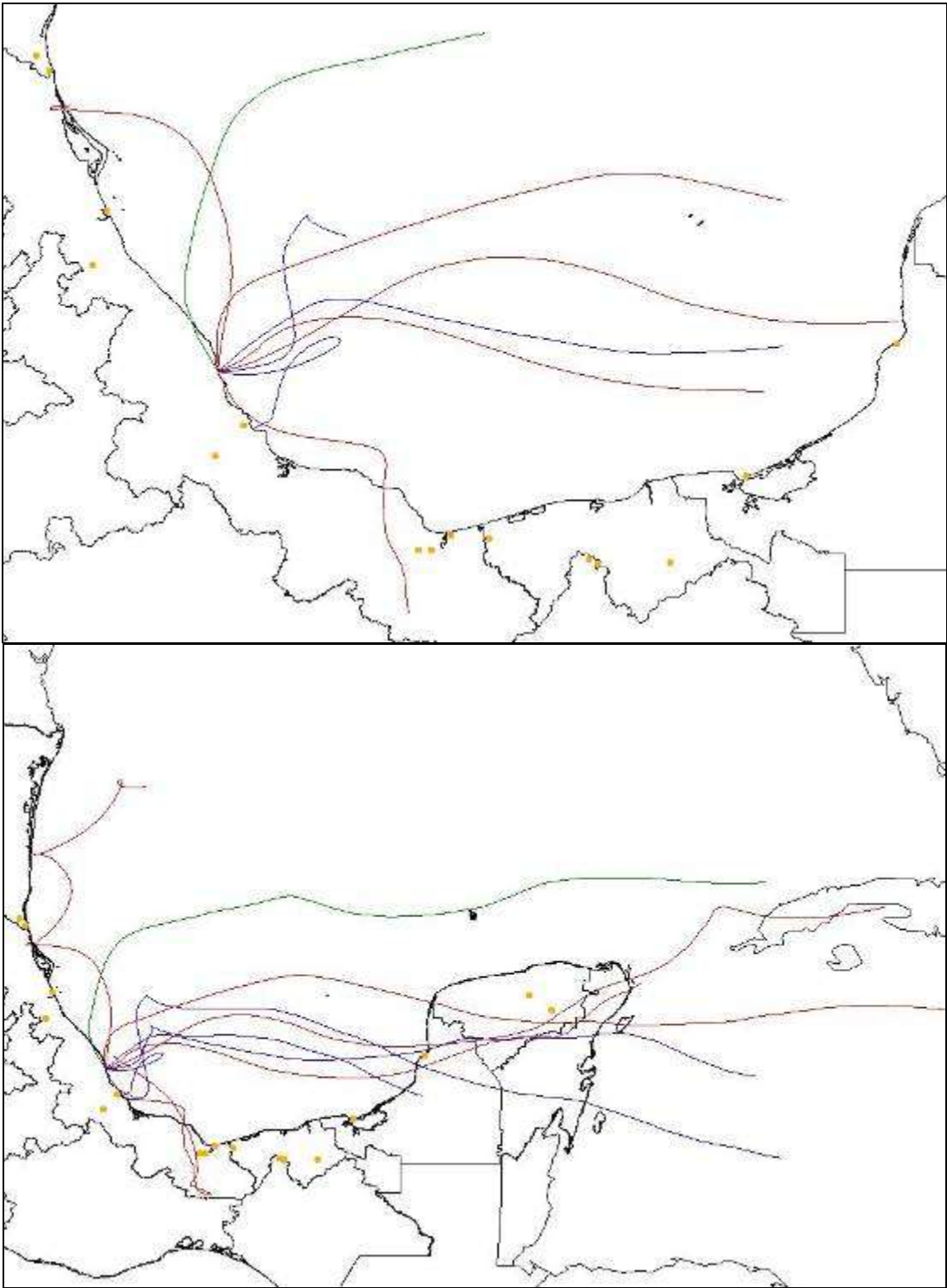


Figura IV.23.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Septiembre 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas

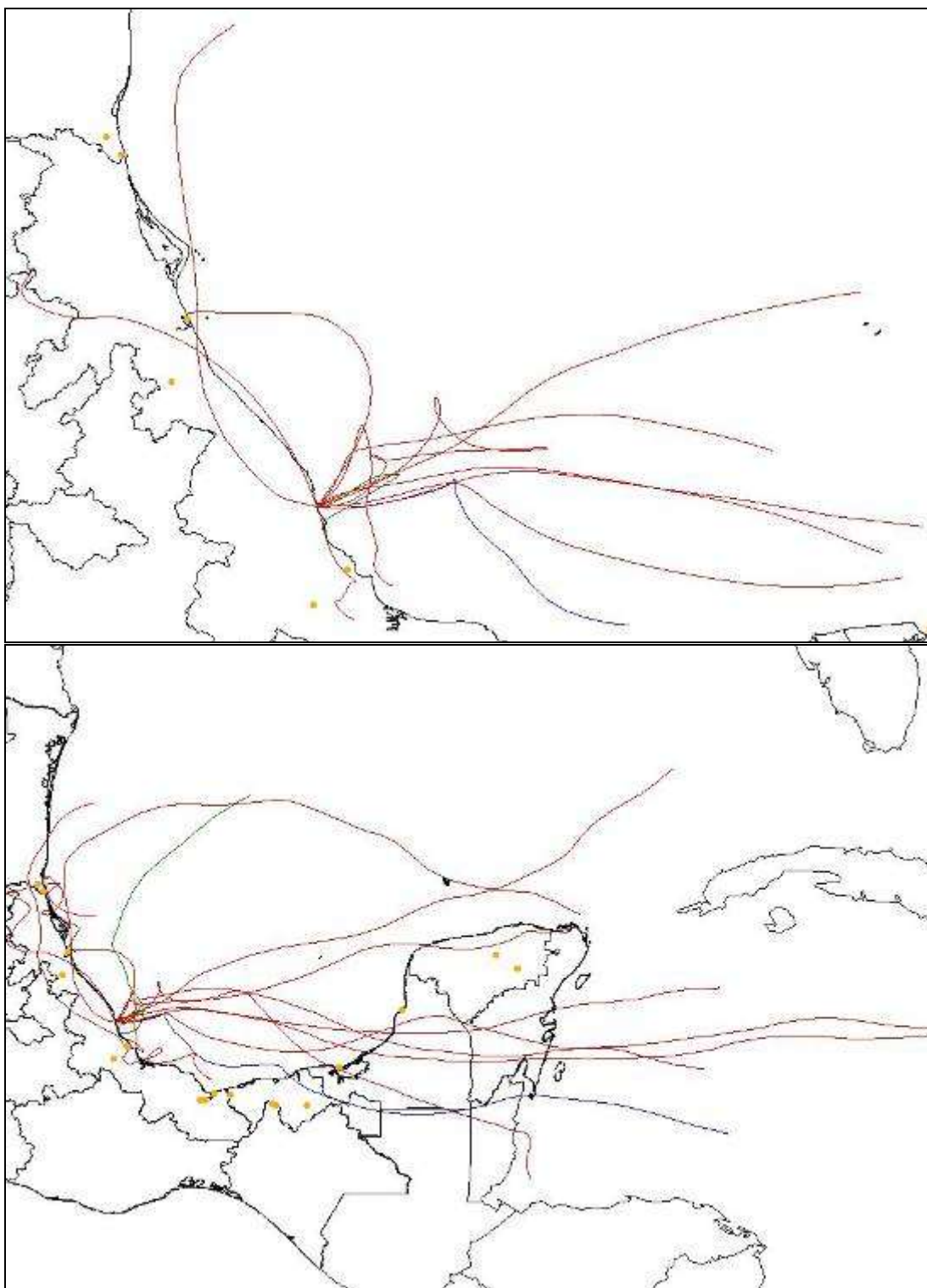


Figura IV.24.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el mes de Octubre 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas

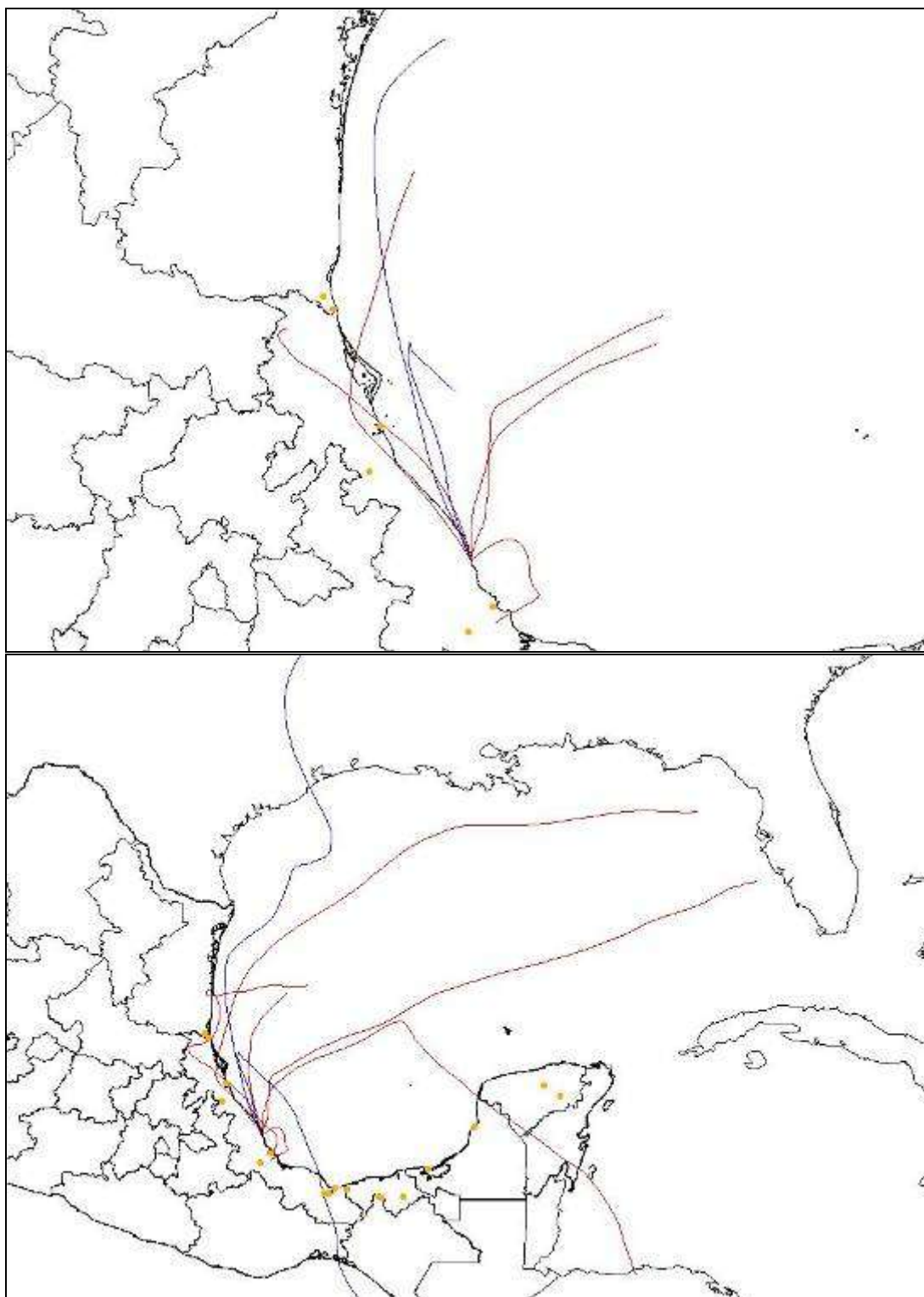
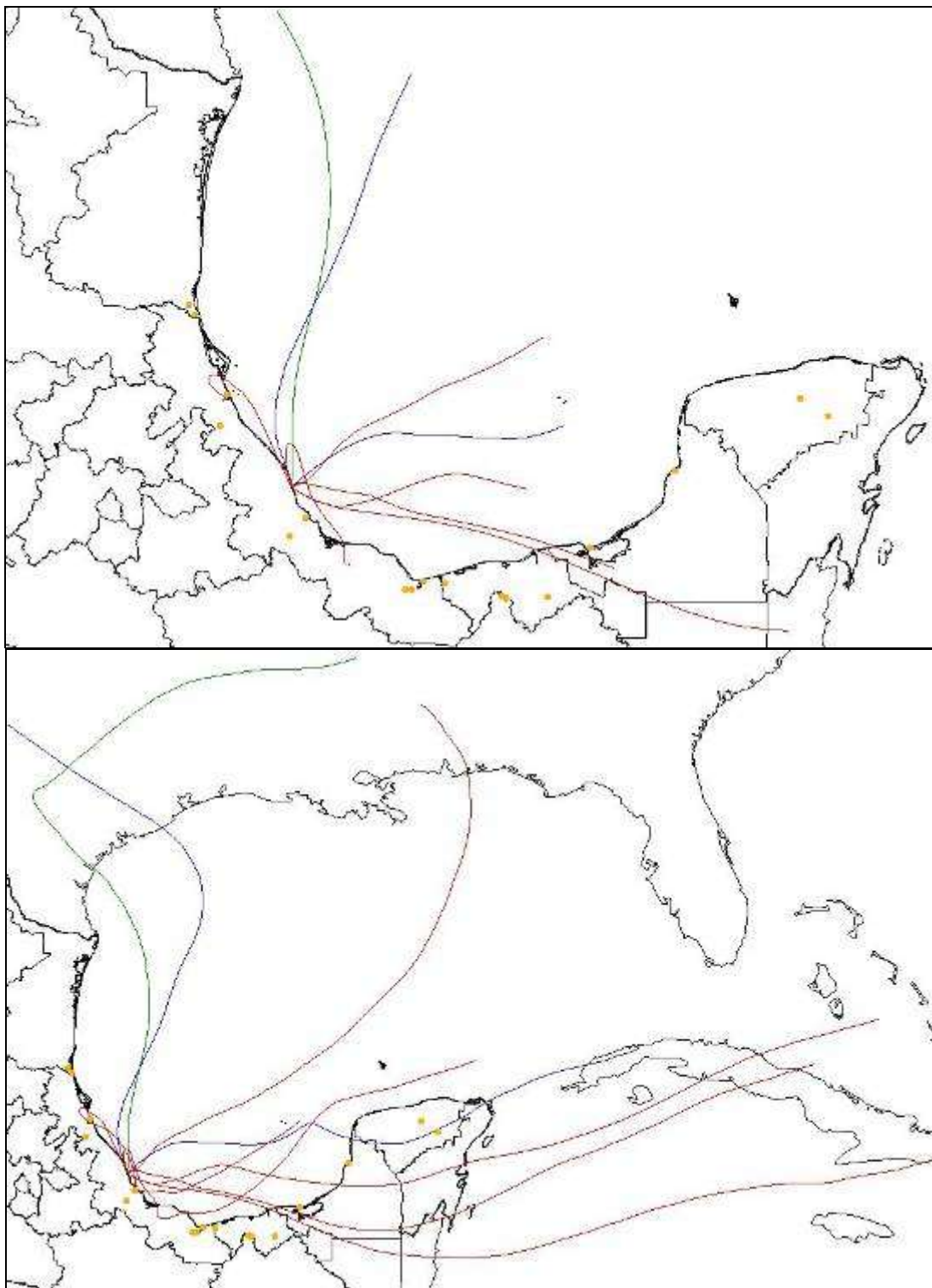


Figura IV.25.- Trayectorias de retroceso de los eventos de lluvia para el periodo Noviembre - Diciembre 2007 en La Mancha a 24 y 72 horas



BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFÍA.

Aguilar, S.; Bravo, H.; Magaña, R.; Saavedra, M.; Torres, R. (1981). "*Lluvia ácida en la cuenca del Valle de México*". Memorias de resúmenes de la reunión 1981 de la Unión Geofísica Mexicana. Manzanillo, Colima. Mayo 6-9.

Avila, A.; Alarcón, M. (1999). "*Relationship between precipitation chemistry and meteorological situations at a rural site in Spain*". Atmospheric Environment 33. 1663-1677 pp.

Bravo, H. (1964). "*Colección de lluvia en Puerto Vallarta, Jalisco, México*". Informe Técnico. UNAM-NCAR.

Bravo, H.; Soto, R.; Sosa, R.; Sánchez, P. (2003). "*Efecto de la lluvia ácida en el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos*". Ingeniería Investigación y Tecnología Vol. IV No 4 195-206 pp.

Bravo, H.; Soto, R.; Sosa, R.; Sánchez, P.; Alarcón, A.; Ruiz, J. (2004). "*Effects of wet acidic deposition on stony material at El Tajín archaeological site in Veracruz, Mexico*". 97th Air and Waste Management Association Annual Meeting, Indianapolis, IN, June. Paper AWMA-04-A-53.

Bravo, H.; Sosa, R.; Sánchez, P.; Soto, R.; Alarcón, A. (2005). "*Precipitación Ácida en la Costa del Golfo de México*". In: A. V. Botello, J. Rendón-von Osten, G. Gold Bouchot y C. Agraz- Hernández (Eds.). Golfo de México, Contaminación e impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, 2da Edición. Universidad Autónoma de Campeche, UNAM, Instituto Nacional de Ecología. 535-552 pp.

Bravo, H.; Soto, R.; Sosa, R.; Sánchez, P.; Alarcón, A.; Kahl, J.; Ruíz, B. (2006). "*Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico*". Environmental Pollution. Vol. 144 No 2. 655-660 pp.

Bravo, H.; Sosa, R.; Kahl, J.; Sánchez, P.; Alarcón, A.; Soto, R. (2006). "*Acid Deposition Events during the Autumn of 2003 in a research cruise over the Gulf of México*". 99th Air and Waste Management Association Annual Meeting, New Orleans, LO, June. Paper AWMA-06A-430.

Báez, A.; Cervantes, J.; Pereyra, D.; Belmont, R. (1997). "*Rainwater chemistry at the eastern flanks of the Sierra Madre Oriental, Veracruz, México*". Journal of geophysical research. Vol. 102. 23329-23336 pp.

Canter, L. (1986). "Acid Rain and Dry Deposition". Lewis Publishers INC. Michigan, USA.

Celle-Jeanton, H.; Travi, Y.; Loÿe-Pilot, D.; Huneau, F.; Bertrand, G. (2008). "Rainwater chemistry at a Mediterranean inland station (Avignon, France): Local contribution versus long-range supply" *Atmospheric Research* 91 (20 09) 118-126 pp.

Clark, T.; Voldner, E.; Dennis, R.; Seilkop, S.; Alvo, M.; Olson, M. (1989). "The evaluation of long-term sulfur models". *Atmospheric Environment* 23:2267-2288.

Clark, T.; Voldner, E.; Dennis, R.; Seilkop, S.; Alvo, M.; Olson, M. (1987). "International sulfur deposition model evaluation". EPA 600/3-87/008. U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.

Draxler, R.; Rolph, D. (2003). "*HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated) Model*." Acceso via web(<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, EUA.

García, E. (1987). "*Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*" México. 219 pp.

Grenander, U.; Rosenblatt, M. (1957). "*Statistical Analysis of Time Series*". Wiley, New York.

Henry, J., Heinke, G. (1999). "*Ingeniería Ambiental*" PRENTICE HALL, México, 778 pp.

Herrera, C. (2007). "*Evaluación de la deposición húmeda en la costa del Golfo de México para el periodo 2003-2005*". Tesis profesional, Facultad de Química, UNAM. México. 126 pp.

Jacobson, M. (2002). "*Atmospheric Pollution, History, science, and Regulation*". Cambridge University Press. United Kingdom. 399 pp.

Jiménez, B. (2001). "*La contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada*" LIMUSA, México D.F., 925 pp.

Jylhä, K. (1999). "*Relationship between the scavenging coefficient for pollutants in precipitation and the radar reflectivity factor. Part I: Derivation*". *Journal of Applied Meteorology and Climatology* Vol. 38 No. 10. 1421-1434 pp.

Kahl, J.; Bravo, H.; Sosa, R.; Sánchez, P.; Soto, R.; Alarcón, A. (2007). "*Characterization of atmospheric transport to the El Tajín archaeological zone in Veracruz, México*". *Atmósfera*, Octubre. Vol. 20. Número 004. UNAM, México, D.F. pp. 359-371.

Kuwait Central Government. (2006). "Use of Slares Gas as Fuel: Establishment of Flare Gas Recovery Unit at Shuaiba Refinery, Kuwait and Advancing towards Zero Non-Emergency Flaring". Acceso vía web: <http://www.unhabitat.org/bestpractices/2006>

Legge, A.; Krupa, S. (1990). "Acidic Deposition: Sulphur and Nitrogen Oxides". Lewis Publishers INC. Michigan, USA.

Masters, G. (1998). "Introduction to Environmental Engineering". Prentice Hall. 2nd Ed. New Jersey. 59-60 pp.

Martin, A. (1984). "Estimated washout coefficients for sulphur dioxide, nitric oxide, nitrogen dioxide and ozone" Atmospheric Environment Vol 18 No. 9 1955-1961 pp.

Montgomery, D.; Runger, G. (2003). "Applied statistics and probability for engineers" 3rd Ed. John Wiley and Sons. New York, USA. 706 pp.

NADP (2000). National Atmospheric Deposition Program/National trends Network. <http://nadp.sws.uiuc.edu>

NAPAP. (1990). "Integrated Assessment Report. The US National Acid Precipitation Assessment Program". The NAPAP Office of the Director, Washington, D.C. 520 pp.

Parungo, F.; Nagamoto, C.; Hoyt, S.; Bravo, H. (1990). "*The Investigation of Air Quality and Acid Rain Over the Gulf of Mexico*". Atmospheric Enviroment Vol. 24A, No. 1. 109-123 pp.

Peavy, H., Rowe, D., Tchobanoglus, G. (1985). "Enviromental Engineering". McGraw Hill, 2a ed., 699 pp.

PEMEX (2008). "Procesos industriales en los complejos procesadores de gas". Acceso vía web: <http://www.gas.pemex.com/>

Possanzini, M., Buttini, P., Dipalo, V., (1988). Characterization of a rural area in terms of dry and wet deposition. Science of the Total Environment 74, 111–120.

Ramírez, E.; Miranda, R.; Trujillo, G.; Bravo, H.; Sosa, R.; Sánchez, P.; Alarcón, A; Kahl, J. (2007). "*Preliminary Study of the Chemical Composition of Rainwater in Northeastern Mexico*". 100th Air and Waste Management Association Annual Meeting, Pittsburgh, PA, June. Paper 2007-A-204-AWMA.

Rosenfeld, D. (2006). "*Evidence of orographic precipitation suppression by air pollution-induced aerosols in the western United States*". Journal of Applied Meteorology and Climatology Vol. 45 No. 7. 893-911 pp.

- Riley, J.; Chester, R. (1971). "Introduction to Marine Chemistry" Academic Press. London and New York. 465 pp.
- Schnelle, K.; Brown, C. (2002). "Air pollution control technology handbook". CRC Press. Florida, USA.
- Seinfeld, J.; Pandis, S. (2006). "Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change". J. Wiley & Sons. 2nd Ed. New Jersey. 1203 pp.
- Seinfeld, J. (1986). "Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution". John Wiley and Sons. USA. 738 pp.
- SEMARNAT (2006). "Inventario Nacionan de Emisiones de México, 1999". México. 409 pp.
- Sosa, R.; Bravo, H.; Sanchez, P.; Alarcón, A.; Herrera, C. (2008). "Acid wet deposition evaluation in the coast of the Gulf of Mexico" 101st Air and Waste Management Association Annual Meeting, Portland, OR, June. Paper AWMA-08-ACE-759.
- Stohl, A., C. Forster, A. Frank, P. Seibert, and G. Wotawa (2005): "*Technical Note : The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2*". Atmos. Chem. Phys. 5, 2461-2474.
- Tejeda, A.; Acevedo, F.; Jáuregui, E. (1989). "Atlas Climático del Estado de Veracruz". Colección de Textos Universitarios. Universidad Veracruzana.
- Torres, F.; Reyes, J.; Chí, E.; Aarcón, A.; Bravo, H.; Sánchez, P. (2009) "Neutralización del agua de lluvia en la atmósfera de San Francisco de Campeche". XIV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. 1-5 Junio. Santa Cruz, Tlaxcala, México. QA-510.
- Turco, R. (1995). "Earth under siege: from air pollution to global chance". Oxford University. New York.
- US-EPA, (1994). "*Quality Assurance Handbook for Air pollution Measurement Systems. Vol V. Precipitation Measurement Systems. Epa-600/R-94/038e*". U.S. Enviromental Protection Agency., Research Triangle Park, NC.
- US-EPA. (2004) "The Clean Air Act". Acceso vía web: <http://www.epa.gov/air/caa>
- US-EPA. (1995). "AP-42 Compilation of air pollutant emission factors, Volume 1: stationary point and area sources" 5th Ed. Acceso vía web: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42>

Villaseñor, R.; Magdaleno, M.; Quintanar, A.; Gallardo, J.; López, M; Jurado, R.; Miranda, A.; Aguilar, M.; Melgarejo, L.; Palmerín E.; Vallejo, C.; Barchet, W. (2003). "An air quality emission inventory of offshore operations for the exploration and production of petroleum by the mexican oil industry" Atmospheric Environment 37. 3713 – 3729 pp.

Wonnacot, T.; Wonnacott, R. (1981). "Regression: A second course in statistics" John Wiley & Sons, Inc. Florida, USA. 556 pp.

Zaleta, L. (2001). "Tajín, misterio y belleza". Ed. Amate Litográfica. Xalapa, Veracruz, México.

<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>

<http://www.epa.gov/>

<http://www.eea.europa.eu/>

<http://www.inecol.edu.mx>

<http://www.papantlaver.gob.mx>

<http://www.readeratwork.blogspot.com/acid-rain.html>

http://www.unece.org/env/lrtap/fsulf_h1.htm

<http://www.veracruz.gob.mx>

<http://www.yokogawa.com/iab/appnotes/iab-app-hydroslurry-en.htm>