



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**AMBIENTAL – AIRE**

**PLAN PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO DE LA**  
**ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
Q. MÓNICA ANTÚNEZ ARGÜELLES

TUTORES PRINCIPALES:  
Dr. Humberto Bravo Álvarez, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM  
Dr. Rodolfo Sosa Echeverría, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

COMITÉ TUTOR  
Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada, Instituto de Geofísica, UNAM  
Dr. Pedro Martínez Pereda, Facultad de Ingeniería, UNAM  
Dr. Enrique César Valdez, Facultad de Ingeniería, UNAM

MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2013

JURADO ASIGNADO:

**Presidente: Dr. Pedro Martínez Pereda**

**Secretario: Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada**

**Vocal: Dr. Humberto Bravo Álvarez**

**1<sup>er</sup>. Suplente: Dr. Rodolfo Sosa Echeverría**

**2<sup>do</sup>. Suplente: Dr. Enrique César Valdéz**

**Lugar donde se realizó la tesis: Sección de Contaminación Ambiental, Centro de Ciencias de la  
Atmósfera, UNAM**

TUTORES DE TESIS:

Dr. Humberto Bravo Álvarez,  
Dr. Rodolfo Sosa Echeverría

-----  
FIRMA

-----  
FIRMA

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado de Ingeniería por su apoyo durante mis estudios. Al Centro de Ciencias de la Atmósfera, lugar donde realicé mi tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado. Así como al proyecto PAPIIT 1T109711: *Aplicación del diagnóstico de la caracterización de la deposición ácida en la zona costera del Golfo de México, para la evaluación de sus efectos y estrategias de control.*

Particularmente a los Doctores Humberto Bravo Álvarez y Rodolfo Sosa Echeverría por su tutoría durante la elaboración de mi tesis; a mi comité tutorial conformado por el Dr. Pedro Martínez Pereda, la Dra. Ruth Villanueva Estrada y el Dr. Enrique César Valdéz.

A la M. en I. Ana Luisa Alarcón Jiménez, QFB. Rocío Bautista Benitez, QFB. María del Carmen Torres Barreda y Pas. QFB. Verónica Néquiz Castillo por la realización de los análisis cromatográficos del depósito húmedo y los datos generados durante esta tesis.

A los colaboradores en la obtención y/o tratamiento de los datos meteorológicos: Biól. Pablo Sánchez Álvarez, Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda y M en C. Luis Eduardo Herrera Aztegui.

A la Arqlga. Guadalupe Espinosa Rodríguez por su apoyo y las facilidades concedidas para el convenio UNAM-INAH y al custodio Alejandro Santéz del INAH, responsable del muestreo del depósito húmedo y seco de El Tajín.

## Resumen

El Tajín es una zona arqueológica designada como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO (1992) debido a su importancia histórica y arquitectónica. El Tajín, compuesto en su mayor parte de roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), se ha visto expuesto al deterioro constante por factores como el intemperismo y la lluvia ácida. Los precursores químicos que forman esta última provienen de fuentes naturales y fuentes antropogénicas, principalmente emisiones de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) que provienen de la combustión de combustibles fósiles. La presencia de este fenómeno ocasiona una recesión superficial anual del material pétreo de  $4.2 \mu\text{m}\cdot\text{año}^{-1}$ .

La meta de este proyecto es la preservación de la zona arqueológica de El Tajín, proponiendo un plan para la prevención del deterioro ambiental significativo (PSD). Para ello se realizó, en el periodo comprendido del 2003 al 2009, el muestreo del depósito atmosférico húmedo y la fracción sedimentable del depósito seco. La evaluación de los mismos, consistió en la determinación de los parámetros: pH, conductividad eléctrica, concentración de cationes y aniones. En el depósito húmedo se encontró que el 50% de los eventos de lluvia tuvieron un  $\text{pH} < 5.6$  (lluvia ácida), ocasionada principalmente por aquellos aniones que pueden reaccionar con el ion hidronio formando ácidos fuertes:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ . Las muestras digeridas del depósito seco presentaron valores de  $\text{pH} > 5.6$  y los aniones predominantes, durante el periodo estudiado, fueron el  $\text{SO}_4^{2-}$  y el  $\text{Cl}^-$ , excepto para el 2007, en el cual, el  $\text{NO}_3^-$  fue el ion principal.

Se identificaron las actividades o las industrias que pueden estar emitiendo los precursores de depósito ácido atmosférico empleando trayectorias de retroceso. Se identificó, que para el 80% de los eventos de lluvia ácida, los vientos provienen del Este.

Aplicando la matriz de Leopold se identificaron 133 impactos, de los cuales 106 resultaron negativos.

A partir de la elaboración del PSD para El Tajín, se recomienda la mejora y/o renovación de la tecnología de algunos procesos industriales, así como la protección del patrimonio cultural *in situ*.

Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>iv</b>
<b>I. Introducción</b> .....	<b>10</b>
<i>Meta</i> .....	11
<i>Objetivos</i> .....	11
<b>II. Marco teórico</b> .....	<b>13</b>
2.1 <i>Prevención del deterioro ambiental significativo (PSD)</i> .....	13
2.1.1 <i>Impacto ambiental</i> .....	14
2.2 <i>Procedimiento para evaluar el impacto ambiental</i> .....	15
2.2.1 <i>Matriz de Leopold</i> .....	17
2.2.2 <i>Método de Batelle Columbus</i> .....	18
2.3 <i>Contaminantes en el aire</i> .....	18
2.3.1 <i>Fuentes de emisión de contaminantes</i> .....	20
2.3.2 <i>Depósito ácido atmosférico</i> .....	21
2.4 <i>Legislación ambiental</i> .....	23
2.4.1 <i>Normas Oficiales Mexicanas</i> .....	25
2.5 <i>Tecnología de control</i> .....	26
<b>III. Antecedentes</b> .....	<b>30</b>
3.1 <i>Área de estudio</i> .....	30
3.1.1 <i>Medio físico de la zona arqueológica de El Tajín</i> .....	31
3.1.2 <i>Medio biótico de la zona arqueológica de El Tajín</i> .....	33
3.1.3 <i>Perfil socioeconómico del municipio Papantla de Olarte</i> .....	33
3.2 <i>Depósito ácido sobre El Tajín</i> .....	33
3.2.1 <i>Efecto de la lluvia ácida</i> .....	34
3.2.2 <i>Caracterización de la lluvia ácida</i> .....	34
3.2.3 <i>Transporte de precursores de lluvia ácida hacia El Tajín</i> .....	35
<b>IV. Metodología</b> .....	<b>38</b>
4.1 <i>Descripción ambiental</i> .....	39
4.1.1 <i>Muestreo de depósito atmosférico húmedo y seco (D.H. / D.S.)</i> .....	39
4.1.2 <i>Análisis químico de las muestras</i> .....	41
4.1.3 <i>Procesamiento de datos</i> .....	43
4.2 <i>Modelos atmosféricos</i> .....	43
4.2.1 <i>HYSPLIT</i> .....	44
4.3 <i>Evaluación de impacto ambiental</i> .....	46
4.3.1 <i>Matriz de Leopold</i> .....	46
4.3.2 <i>Método de Batelle Columbus</i> .....	48
<b>V. Resultados y discusiones</b> .....	<b>52</b>
5.1 <i>Depósito atmosférico</i> .....	52
5.1.1 <i>Depósito húmedo</i> .....	52
5.1.2 <i>Depósito seco</i> .....	58
5.1.3 <i>Factor amortiguador</i> .....	63
5.2 <i>Modelos atmosféricos</i> .....	67
5.2.1 <i>Vector del viento en la zona arqueológica de El Tajín</i> .....	67
5.2.2 <i>HYSPLIT</i> .....	70
5.3 <i>Evaluación del impacto</i> .....	73
5.3.1 <i>Matriz de Leopold</i> .....	73

PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA  
ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

---

5.3.2 Método de Batelle-Columbus.....	78
5.4 <i>Prevención del deterioro ambiental significativo</i> .....	81
5.4.1 Fuentes existentes y nuevas de emisión de precursores de depósito ácido.....	82
5.4.2 Tecnología existente para control de emisiones de SO <sub>2</sub> .....	85
5.4.3 Control de emisiones de precursores de depósito ácido en El Tajín.....	86
<b>VI. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>90</b>
<b>VII. Bibliografía</b> .....	<b>93</b>
<b>Abreviaturas</b> .....	<b>98</b>
<b>A. Anexos</b> .....	<b>100</b>
A.1 <i>Aniones predominantes del D.H. (ponderado mensual)</i> .....	100
A.2 <i>Rosas de los vientos</i> .....	102
A.3 <i>Trayectorias de retroceso de El Tajín (2003-2009)</i> .....	106
A.4 <i>Criterio para declarar patrimonio de la humanidad</i> .....	118
A.5 <i>Determinación de concentraciones de aniones y cationes, por cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC). [Protocolo de muestreo húmedo y seco de la SCA-CCA-UNAM]</i> .....	119

## Índice de figuras

Figura 3.1. Mapa de ubicación de la zona arqueológica de El Tajín (INAFED).....	30
Figura 3.2. Ubicación de la zona arqueológica de El Tajín .....	31
Figura 3.3. Localización de las fuentes emisoras de precursores de lluvia ácida, plataformas petroleras de Campeche (P.P.C), planta eléctrica de Tuxpan (TUX), ciudades industriales de Tampico, Monterrey y Brownsville/ Matamoros (TAM, MTY y BRO) y refinerías de Poza Rica y el Puerto de Veracruz (P.R. y VER) (Kahl et al, 2007) .....	36
Figura 3.4. Porcentaje de emisiones por tipo de contaminante de las fuentes fijas del Estado de Veracruz (SEDEMA) .....	36
Figura 4.1 Zona Arqueológica de El Tajín. ....	39
Figura 4.2 Muestreador automático de depósito húmedo y seco .....	40
Figura 4.3 Etiqueta de registro para las muestras de depósito húmedo .....	41
Figura 4.4. Trayectoria de retroceso del día 27 de marzo de 2005 para El Tajín .....	45
Figura 4.5. Promedio mensual de vector de viento (m/s), marzo 2005 .....	46
Figura 5.1 Eventos de depósito húmedo atmosférico (2003 - 2009) .....	52
Figura 5.2. pH promedio anual del depósito húmedo en El Tajín .....	54
Figura 5.3. Precipitación total anual (mm) .....	54
Figura 5.4. pH promedio mensual del depósito húmedo en el Tajín .....	55
Figura 5.5. Volumen promedio mensual del depósito húmedo en el Tajín (mm) .....	55
Figura 5.6. Variación anual de la concentración de aniones del depósito húmedo ( $\mu\text{eq/L}$ ) .....	56
Figura 5.7. Variación anual de la concentración de cationes del depósito húmedo ( $\mu\text{eq/L}$ ) .....	56
Figura 5.8. Distribución porcentual de aniones del depósito húmedo, ponderado anual .....	58
Figura 5.9. Distribución porcentual de cationes del depósito húmedo, ponderado anual .....	58
Figura 5.10 pH promedio mensual del depósito seco en el Tajín (del año 2003 al 2009) .....	59
Figura 5.11 Masa promedio mensual del depósito seco en el Tajín (g) (del año 2003 al 2008) .....	60
Figura 5.12. Aniones depósito seco ( $\mu\text{eq/L}$ ) .....	60
Figura 5.13. Cationes depósito seco ( $\mu\text{eq/L}$ ) .....	61
Figura 5.14. Distribución porcentual de aniones del depósito seco, ponderado anual porcentual ...	61
Figura 5.15. Distribución porcentual de cationes depósito seco, ponderado anual ponderado .....	62
Figura 5.16. Espectro obtenido con microscopio electrónico de barrido de la fase sólida del depósito seco, luego de la digestión. ....	62
Figura 5.17. Imágenes tomadas con un microscopio electrónico de barrido de la fase sólida del depósito seco, luego de la digestión. ....	63
Figura 5.18. Factor de neutralización total, $\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+}/ \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$ .....	67
Figura 5.19 Vectores de viento, a) del N, atmósfera estable; b) atmósfera inestable, pH=3.65; c) del N, atmósfera estable, pH=4.35; d) atmósfera Inestable pH=8.08 .....	68
Figura 5.20 Velocidad y dirección del viento 24 horas, temporada de estiaje (17/3/03) .....	69
Figura 5.21 Velocidad y dirección del viento 24 horas, temporada de lluvias (15/9/03) .....	70
Figura 5.22 Trayectorias de retroceso con diferentes coordenadas de origen (27/01/03; 12UTC) ...	72
Figura 5.23 Trayectorias de retroceso desde El Tajín y hacia adelante desde la fuente (27/01/03; 12UTC y 25/01/03; 12UTC, respectivamente 48 horas de duración) .....	72
Figura 5.24 Vector de vientos (27/01/03; 12UTC) .....	73
Figura 5.25. Valor medio de la recesión superficial en diferente países.....	80
Figura 5.26 Calidad ambiental de valores históricos, método de Batelle –Columbus.....	80
Figura 5.27. Ubicación de las instalaciones de petróleos mexicanos (PEMEX) .....	83
Figura 5.28 Participación de emisiones de $\text{SO}_x$ por instalación (PEMEX, 2011) .....	84
Figura 5.29 Reservas de hidrocarburos en México (PEMEX, 2011) .....	85
Figura A.1 Aniones predominantes del D.H.ponderado mensual .....	100
Figura A.2,a Rosas de los vientos .....	102

Figura A.2,b Vector de vientos, promedio mensual (2003 a 2009) .....104  
Figura A.3 Trayectorias de retroceso de El Tajín (2003-2009) .....106

### ***Índice de tablas***

Tabla 2.1 Normas Oficiales Mexicanas para la evaluación de la calidad del aire .....25  
Tabla 2.2 Desulfuración de gases de combustión (DGC) .....26  
Tabla 2.3 Técnicas de remoción de óxidos de nitrógeno.....27  
Tabla 3.1 Promedios de temperatura y precipitación en el municipio de Papantla de Olarte (1971-2000) .....32  
Tabla 3.2 Parámetros de la lluvia ácida de El Tajín .....35  
Tabla 4.1 Ejemplo de una matriz de Leopold para identificar los impactos .....47  
Tabla 4.2. Insumos del método de Batelle-Columbus .....49  
Tabla 5. 1. Eventos de depósito húmedo anuales en El Tajín (2003-2009)..... 53  
Tabla 5. 2. Resultados de la concentración ponderada anual de aniones y cationes del depósito húmedo en El Tajín, así como el pH (2003-2009).....53  
Tabla 5. 3. Concentración promedio anual de pH, aniones y cationes del depósito seco en El Tajín (2003-2008) .....59  
Tabla 5. 4. Factor de neutralización del D.H., D.S. y la suma de ellos de los principales aniones respecto al H<sup>+</sup> .....64  
Tabla 5. 5. Factor de neutralización de ambos depósitos y la suma de ellos para los principales respecto al H<sup>+</sup>.....65  
Tabla 5. 6. Factor de neutralización del D.H., D.S. y la suma de ellos de los principales aniones respecto al NH<sup>4+</sup> .....66  
Tabla 5. 7. Factor de neutralización del D.H., D.S. y la suma de ellos de los principales aniones respecto al Ca<sup>2+</sup> .....66  
Tabla 5. 8. Factor de neutralización de ambos depósitos y la suma de ellos para los principales aniones respecto al H<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup> .....66  
Tabla 5. 9. Porcentaje de proveniencia de los vientos de precursores de depósito ácido atmosférico, empleando trayectorias de retroceso. ....71  
Tabla 5. 10. Acciones y factores de la Matriz de Leopold. ....76  
Tabla 5.11. Matriz de Leopold. ....77  
Tabla 5.12. Método de Batelle-Columbus .....79  
Tabla A.1 Condiciones cromatográficas para determinación de aniones y cationes .....122



# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## I. Introducción

El Tajín fue la capital de la cultura Totonaca y actualmente es una zona arqueológica designada como Patrimonio Cultural de la Humanidad por la UNESCO en 1992. Fue una de las rutas más importantes de comercio entre el Golfo de México y la región central del país. Desde el siglo IV, esta zona se ha visto expuesta al deterioro constante del material que la constituye (roca caliza, conformada principalmente por  $\text{CaCO}_3$ ). Sin embargo, en la actualidad, sumado al desgaste que sufre naturalmente la roca por intemperismo, existen otros tipos de impactos ambientales a causa del crecimiento demográfico e industrial que ocurre, tanto en regiones del Estado de Veracruz, como aledañas. Un ejemplo de los impactos ambientales potenciales negativos a este sitio histórico, es el causado por el depósito ácido atmosférico (lluvia ácida), formado por la reacción que ocurre en la precipitación pluvial por los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre que se encuentran en la atmósfera, emitidos como producto de diversas actividades humanas y algunas fuentes naturales, confiriéndole un pH inferior a 5.6, valor de acidez natural de la lluvia (Masters y Wendell, 2008).

Este proyecto, en colaboración con el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), busca la preservación de la zona arqueológica de El Tajín, dado que en estudios previos se ha encontrado un daño significativo en el material pétreo por la presencia de este fenómeno. Para ello, se elaboró un plan para la prevención del deterioro ambiental significativo a estos monumentos, en el cual se sugieren acciones para mejorar la calidad ambiental, disminuyendo la contaminación ambiental en las regiones que contribuyen a la lluvia ácida de esta zona.

## **Meta**

Proponer un plan preliminar para la prevención del deterioro ambiental significativo de la zona arqueológica de El Tajín, Veracruz.

## **Objetivos**

1. Evaluar el depósito atmosférico de la zona arqueológica de El Tajín mediante la caracterización fisicoquímica (pH, conductividad y cuantificación de aniones y cationes).
2. Identificar las fuentes emisoras de contaminantes precursores del depósito ácido que potencialmente impactan a la zona de El Tajín, aplicando un modelo de trayectorias de retroceso (Hysplit).
3. Proponer un plan para la Prevención del Deterioro Ambiental Significativo (PSD) en la región de interés, el cual:
  - 3.1. Analice los impactos del depósito ácido atmosférico sobre el material de construcción de los monumentos de El Tajín.
  - 3.2. Minimice y prevenga las emisiones de precursores de lluvia ácida a la atmósfera.

# CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

## II. Marco teórico

En este capítulo se darán una serie de elementos conceptuales con el afán de dar una referencia al procedimiento de evaluación, prevención y control del deterioro ambiental.

### 2.1 Prevención del deterioro ambiental significativo (PSD)

El concepto de PSD fue introducido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés) en el año de 1977, en la *Ley de Aire Limpio*, con el afán de prevenir la degradación del aire en aquellas áreas cuyos niveles contaminantes fueran inferiores a los estándares establecidos en las Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental (NAAQS), que señalan “áreas en cumplimiento” o “áreas sin cumplimiento” para cada contaminante criterio.

El PSD se aplica a nuevas fuentes contaminantes o fuentes instaladas con modificaciones considerables en “áreas en cumplimiento” o bien que no cuentan con alguna clasificación según las NAAQS. Para su realización se requiere de:

1. Uso de la mejor tecnología de control existente y aplicable (BACT).
2. Análisis de impacto ambiental.
3. Participación de la población.

El PSD está diseñado para:

1. Proteger la salud pública y el bienestar de la población.
2. Preservar, proteger y mejorar la calidad ambiental en parques, monumentos nacionales, costas, puertos marítimos y otras áreas naturales de recreación, paisaje y valor histórico.
3. Asegurar que el desarrollo económico ocurra de manera concurrente con la preservación y sustentabilidad de la calidad ambiental existente.
4. Asegurarse que cualquier decisión política para permitir un deterioro ambiental, en cualquiera de las áreas en que se aplique al plan de PSD, se lleve a cabo después de una cuidadosa evaluación de todas las consecuencias de dicha decisión y después de un adecuado procedimiento para informar la participación de la ciudadanía en el proceso de decisión.

### **2.1.1 Impacto ambiental**

En México, en el año de 1971 fue publicada la primera ley en materia ambiental: Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental. El 28 de enero de 1988, se publicó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en el Diario Oficial de la Federación (DOF). En la última reforma, publicada en el DOF, el 30 de agosto de 2011, el artículo 28, sección V, indica que:

“La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual, la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente, preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Para ello, en los casos que determine el Reglamento, que para ello se expida, quienes pretendan llevar a cabo alguna de las siguientes obras o actividades, requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría (SEMARNAT)”.

Las actividades que requieren autorización se indican en la fracción XIII del artículo 28:

“Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal, que puedan causar desequilibrios ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección del ambiente.

El reglamento de la presente ley, determinará las obras o actividades a que se refiere este artículo que por su ubicación, dimensiones, características o alcances, no produzcan impactos

ambientales negativos significativos, no causen o puedan causar desequilibrios ecológicos, ni rebasen los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas referidas a la preservación del equilibrio ecológico y a la protección al ambiente y que por lo tanto, no deban sujetarse al procedimiento de evaluación de impacto ambiental, previsto en este ordenamiento.

Para los efectos a que se refiere la fracción XIII del mencionado artículo, la SEMARNAT notificará a los interesados su determinación para que sometan al procedimiento de evaluación de impacto ambiental, la obra o actividad que corresponda, explicando las razones que lo justifiquen, con el propósito de que aquellos presenten los informes, dictámenes y consideraciones que juzguen convenientes, en un plazo no mayor de 10 días. Una vez recibida la documentación de los interesados, la SEMARNAT en un plazo no mayor de 30 días, les comunicará si procede o no, la presentación de una manifestación de impacto ambiental, así como la modalidad y el plazo para hacerlo. Transcurrido el plazo señalado, sin que la SEMARNAT emita la comunicación correspondiente, se entenderá que no es necesaria la presentación de una manifestación de Impacto Ambiental.”

## **2.2 Procedimiento para evaluar el impacto ambiental**

La evaluación de impacto ambiental (EIA) es un instrumento de la política ambiental, cuyo objetivo es prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente así como la regulación de obras o actividades para evitar o reducir sus efectos negativos en el ambiente y en la salud humana (SEMARNAT, 2011). Posterior a conocer el dictamen de la autoridad responsable determinando el impacto ambiental que aplica, según la actividad realizada, debe elaborarse la “Manifestación de Impacto Ambiental” (MIA), documento en el cual, según el artículo 28 de la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), se deben evaluar los impactos potenciales que las operaciones, construcciones y/o realización de actividades pudieran causar al ambiente y proponer las medidas

necesarias para prevenir, disminuir o compensar dichas alteraciones.

La SEMARNAT establece que para la elaboración de una EIA se deben considerar secuencialmente las siguientes acciones y análisis:

1. Descripción del proyecto: Se describe el proyecto o actividad desde el enfoque ambiental, principales atributos y debilidades.
2. Desglose del proyecto: Prospección de las actividades relacionadas con el proyecto y las inducidas por el mismo, identificando los impactos al ambiente.
3. Descripción del ambiente, previo al proyecto: Descripción del medio físico en sus elementos bióticos y abióticos, empleando datos reportados en la literatura y recabados por observaciones directas en campo, incluyendo medio social y económico.
4. Elementos significativos del ambiente: Resumen de la información, acorde a la magnitud de la importancia en el ambiente, para determinar el significado de los elementos para su conservación, empleando los criterios de diversidad, rareza, perturbación, singularidad, entre otros, de manera integral.
5. Ámbito de aplicación de la EIA: Se definirá el alcance del estudio según su ámbito de aplicación, su incidencia o no con áreas naturales protegidas o con planes parciales de desarrollo urbano o del territorio, así como el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas vigentes.
6. Identificación de impactos: Definir las repercusiones que tendrá el proyecto sobre el ambiente descrito y sobre sus elementos más significativos. Cada impacto deberá ser valorado sobre una base lógica, mensurable y fácilmente identificable. Posteriormente, el análisis debe llegar a una sinergia que permita identificar, valorar y medir el efecto acumulativo del total de los impactos identificados.
7. Alternativas: Si existen dos o más alternativas para el proyecto, deberán analizarse, valorarse sobre la base de su significado ambiental y de sustentabilidad para



seleccionar la que mejor se ajuste a las necesidades del mantenimiento del equilibrio ambiental y a los objetivos, características y necesidades del proyecto.

8. Identificación de medidas de mitigación: Propuesta de medidas lógicas y viables en la aplicación de la preservación, minimización y control ambiental.
9. Valoración de impactos residuales: Identificación de situaciones, negativas para el ambiente, que pueden derivar de una falta de previsión o de intervención del hombre y que pudieran derivar de la puesta en operación del proyecto.
10. Plan de vigilancia y control: Definir impactos considerados en el plan de seguimiento y control; determinar los parámetros a evaluar, indicadores que demuestren la eficiencia del plan, la frecuencia de las actividades, los sitios y las características del muestreo.

En esta tesis se aplica el procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental, para determinar el impacto potencial, capaz de producir un deterioro significativo sobre la zona Arqueológica de El Tajín, causado por el fenómeno de lluvia ácida. Además se identifican las medidas de mitigación viables para prevenir, minimizar y controlar los efectos de las emisiones de precursores atmosféricos de la lluvia ácida.

Existen diversas técnicas para evaluar el impacto ambiental, cada una de ellas cumple diferentes propósitos y en consecuencia, su selección debe satisfacer las necesidades específicas de cada estudio. Las técnicas que más se adecuan a un estudio para la prevención del deterioro ambiental significativo son las *matrices de interacción*, las cuales enfatizan los rasgos característicos de la zona de estudio y su relación e impacto respecto a las diferentes actividades dentro del proceso. Particularmente se emplearon las técnicas de *Leopold* y de *Batelle Columbus* que se describen a continuación.

### **2.2.1 Matriz de Leopold**

Esta matriz fue diseñada en 1971 para identificar los impactos causados por un proyecto. Proporciona una relación causa-efecto del impacto ambiental provocado por las acciones de un proyecto determinado. Se construye con un eje horizontal que contiene las condiciones ambientales existentes que pueden ser dañadas, contra un eje vertical con las

acciones que pueden causar un impacto ambiental. La interacción entre ambos ejes debe evaluarse por su *magnitud e importancia* en una escala del 1 al 10, donde el 1 representa un valor bajo, y 10 representa el máximo (Vidal de los Santos, 2009).

- Magnitud: valoración, grado, escala o extensión el impacto o alteración potencial. Además de la calificación del 1 al 10, debe anteponerse un signo + para efectos positivos y – para efectos negativos.
- Importancia: corresponde a qué tan significativa es la acción particular sobre el factor ambiental, o elemento impactado, en el momento específico del análisis. Se califica también del 1 al 10, en orden creciente de importancia.

Es utilizado como método de identificación, más que como sistema de evaluación ambiental.

### **2.2.2 Método de Batelle Columbus**

Se basa en una lista de indicadores de impacto, conformada por parámetros o factores ambientales susceptibles de ser impactados (Vidal de los Santos, 2009). La evaluación de cada uno de ellos, se maneja de forma unitaria.

Los parámetros deben ser conmensurables, por lo que deben presentarse en Unidades de Impacto Ambiental (UIA). Para ello los valores óptimos de los parámetros, sin importar sus unidades, se representan con el valor 1 y los peores valores con el 0. Posteriormente se debe ponderar el valor.

### **2.3 Contaminantes en el aire**

En 1990, se realizó la enmienda a la Ley de Aire Limpio en Estados Unidos de América, donde se enfatizaba el control de las emisiones de contaminantes peligrosos al aire, el control de la lluvia ácida y la degradación del ozono de la estratósfera.

El Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM) de 1999 considera seis contaminantes de interés referidos a la calidad del aire: óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas (PM<sub>10</sub> / PM<sub>2.5</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>):

### *Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)*

Los NO<sub>x</sub> incluyen el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Son emitidos a la atmósfera por el proceso de combustión dando como principal producto el NO. Además son precursores de ozono (O<sub>3</sub>), partículas suspendidas y depósito ácido. Los NO<sub>x</sub> se encuentran en un estado transicional de una especie a otra, por lo que los NO<sub>x</sub> totales se registran con base en el peso molecular del NO<sub>2</sub> (INEM, 2006).

### *Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)*

Los SO<sub>x</sub> incluyen diversas especies de óxidos de azufre, pero la especie mayoritaria es el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Son emitidos a la atmósfera por el empleo de combustibles fósiles con azufre (carbón, combustóleo, gasolina y diesel), así como por procesos metalúrgicos y químicos que involucran el manejo de materiales sulfurados (altos hornos, refinerías y plantas de producción de ácido sulfúrico). Los SO<sub>x</sub> son precursores de depósito ácido; el SO<sub>2</sub> se oxida a trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) y luego a ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) o sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) en forma de aerosoles. Por convención, el INEM indica que los SO<sub>x</sub> totales se registran con base en el peso molecular del SO<sub>2</sub> (INEM, 2006).

### *Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)*

Los COV son hidrocarburos (HC), emitidos a la atmósfera generalmente por fuentes de combustión o de evaporación. Son precursores de la formación de ozono y partículas secundarias, algunos son clasificados como tóxicos (INEM, 2006).

### *Monóxido de Carbono (CO)*

El CO es un gas incoloro e inodoro, se produce en la combustión incompleta de los combustibles fósiles, teniendo mayor producción en zonas urbanas. Puede tener efectos en la salud de la población y contribuir, de manera reducida, a la formación de ozono (INEM, 2006).

### *Partículas*

Las partículas suspendidas totales (PST) se subdividen en dos términos, según su origen: 1) partículas primarias, que son materiales en estado sólido, líquido o gaseoso emitidos directamente por una fuente de emisión y que, a temperatura y presión

ambientales, se encuentra en estado sólido o líquido suspendido en la atmósfera; 2) partículas secundarias, correspondientes a los aerosoles formados a partir de materiales gaseosos como los NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y COV, resultado de reacciones químicas atmosféricas. El INEM incluye solamente las emisiones de partículas primarias.

Las emisiones de partículas también se caracterizan por su tamaño, el INEM se centra en dos de ellos: PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Las PM<sub>10</sub>, o partículas “gruesas”, son partículas primarias de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm y provienen de fuentes como caminos no pavimentados y obras de construcción. Las PM<sub>2.5</sub> o partículas “finas”, son las emisiones de partículas primarias con diámetro aerodinámico menor o igual que 2.5 µm. Se emiten de los escapes vehiculares y del consumo industrial de combustibles, impactando sobre la visibilidad, niebla y daños a la salud (INEM, 2006).

#### *Amoníaco (NH<sub>3</sub>)*

El NH<sub>3</sub> se emite por diversas fuentes, las dos más importantes son la ganadería y el uso de fertilizantes en la agricultura. La importancia en su medición radica en que puede reaccionar con los ácidos formados a partir de los SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>, dando lugar a las partículas secundarias: sulfato de amonio [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] y nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), que afectan la visibilidad (INEM, 2006).

En esta tesis, los contaminantes de mayor interés son los SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas.

### **2.3.1 Fuentes de emisión de contaminantes**

Las emisiones pueden provenir de cinco fuentes:

#### *Fuentes fijas*

Son plantas industriales estacionarias (manufactureras o de producción), regulados por la SEMARNAT en México. Para considerar una fuente como fija, la emisión de sus contaminantes debe ser mayor o igual a 10 Mg/año. Las fuentes fijas generan emisiones desde equipos estacionarios a través de chimeneas o ductos de venteo, o bien desde fuentes fugitivas no confinadas (INEM, 2006).

#### *Fuentes de área*

Corresponden a establecimientos industriales pequeños que emiten menos de 10 Mg/año. Incluyen actividades donde se involucre el uso comercial y doméstico de solventes, como el lavado en seco, y fuentes fugitivas de partículas suspendidas, como las actividades de labranza, levantamiento de polvo por vehículos que circulan en caminos no pavimentados y por el transporte del viento. Asimismo, las fuentes de área incluyen vehículos como locomotoras, aeronaves y embarcaciones marítimas comerciales y su emisión se relaciona en el área en que se desarrolla la actividad en (peso/área/tiempo) (INEM, 2006).

#### *Fuentes móviles*

Pertencen a las emisiones del escape de los vehículos automotores que circulan por carreteras y calles pavimentadas, incluidos automóviles particulares, motocicletas, taxis, microbuses, autobuses y camiones de carga pesada que utilizan diesel, gasolina o biocombustible (INEM, 2006).

#### *Fuentes móviles que no circulan por carreteras*

Corresponden a las emisiones de maquinaria agrícola, de construcción y otros similares (INEM, 2006).

#### *Fuentes naturales*

Se refieren a las emisiones naturales, tales como los COV's generados por la vegetación, los NOx provenientes de los suelos y los SO<sub>2</sub> y PM, producto de la actividad volcánica, entre otros (INEM, 2006).

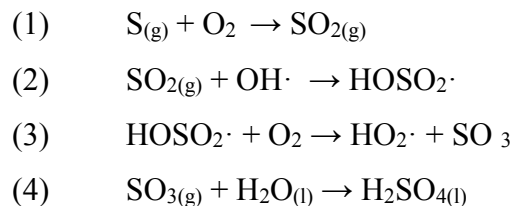
### **2.3.2 Depósito ácido atmosférico**

La lluvia, en condiciones normales, es ligeramente ácida debido a que el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de la atmósfera, en presencia de humedad, forma ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), confiriéndole un pH de 5.6 aproximadamente. Se considera que una lluvia es ácida cuando los valores de pH son inferiores a ese valor.

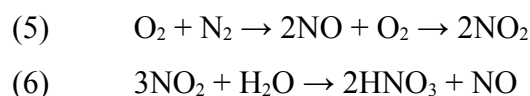
Esta acidez es consecuencia de un aumento en la concentración de los ácidos nítrico, sulfúrico y orgánico, cuyos precursores son emitidos por fuentes biogénicas y/o antropogénicas. Las emisiones de las fuentes naturales de mayor impacto son el dimetilsulfuro ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S) y el ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y los de menor impacto, los compuestos orgánicos volátiles (COV) como el isopreno y el terpeno. Los precursores provenientes de fuentes antropogénicas de mayor impacto son los óxidos de azufre y nitrógeno, también se emiten de manera significativa el CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y COV's, principalmente por la quema de combustibles fósiles.

Estos precursores al interactuar con la atmósfera, se exponen a humedad, radiación solar, altas temperaturas y oxidantes fuertes como el ozono (O<sub>3</sub>), iones metálicos, radicales libres (OH·, HO<sub>2</sub> y HOO·), propiciando la formación de ácidos.

El azufre gaseoso, producto de la combustión, se oxida a bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); aunado a este producto se puede sumar la emisión de SO<sub>2</sub> de las industrias, que nuevamente en fase gaseosa es oxidado por un radical libre hidroxilo y por el oxígeno formando el trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>), que en presencia de agua o humedad produce el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).



El óxido de nitrógeno a altas temperaturas y en presencia de oxígeno, condiciones similares a las de los motores industriales o vehiculares, se oxida a óxido nítrico (NO) que a su vez es oxidado en la atmósfera a dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el cual en presencia de agua reacciona, obteniéndose como producto ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>).



El depósito de lluvia ácida puede hacerse por vía húmeda, como lluvia, nieve o niebla, o bien, por vía seca. Si los gases precursores no se depositan por algunas de estas dos vías, se convierten en aerosoles, partículas formadas principalmente por los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ , que en presencia de vapor de agua forman  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

El depósito ácido puede dañar estructuras, edificios, monumentos, cultivos y visibilidad; pero también deteriora la calidad agua, vida acuática, vida silvestre y calidad de los suelos y minerales por escorrentía.

La Ley del Aire Limpio (*Clean Air Act* de EE.UU.), ampliada en 1990, proclama la reducción de las emisiones de los óxidos de azufre y nitrógeno, de las principales fuentes, así como el continuo monitoreo y efectos ocasionados por el depósito de lluvia ácida.

## 2.4 Legislación ambiental

La necesidad de crear una disciplina jurídica en torno al ambiente, por su estrecho vínculo con las diferentes necesidades y actividades humanas, causó en México la promulgación de la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental, en el año de 1971. Actualmente, la ley ambiental mexicana es la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en 1988 y modificada en concordancia a las acciones en materia de protección ambiental.

La LGEEPA tiene seis reglamentos: 1) en materia de áreas naturales protegidas (Fecha 28/12/2004), 2) de prevención y control de la contaminación de la atmósfera (fecha: 03/06/2004), 3) de registro de emisiones y transferencia de contaminantes (fecha: 03/06/2004), 4) de autorregulación y auditorías ambientales (fecha: 29/04/2010), 5) de evaluación del impacto ambiental (fecha: 30/05/2000) y 6) de ordenamiento ecológico (fecha: 08/08/2003) (PROFEPA, 2013).

En artículo 109 bis, capítulo I, del título cuarto: Protección al ambiente, de la LGEEPA:

[109 bis] "La SEMARNAT, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, deberán integrar un registro de emisiones y

transferencia de contaminantes al aire, agua, suelo y subsuelo, materiales y residuos de su competencia, así como de aquellas sustancias que determine la autoridad correspondiente. La información del registro se integrará con los datos y documentos contenidos en las autorizaciones, cédulas, informes, reportes, licencias, permisos y concesiones que en materia ambiental se tramiten ante la SEMARNAT, o autoridad competente del Gobierno del Distrito Federal, de los Estados, y en su caso, de los Municipios.”

En el capítulo II: “Prevención y control de la contaminación de la atmósfera”, los artículos 110 y 111:

[110]”Para la protección a la atmósfera...La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país; y...Las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.”

[111]”Para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la SEMARNAT tendrá que... Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan la calidad ambiental de las distintas áreas, zonas o regiones del territorio nacional, con base en los valores de concentración máxima permisible para la salud pública de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud...”



### 2.4.1 Normas Oficiales Mexicanas

Las normas para evaluar la calidad del aire como medida de protección a la salud de la población, se listan en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Normas Oficiales Mexicanas para la evaluación de la calidad del aire (SEMARNAT, 2012)**

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Límite máximo permisible	
<b>Ozono</b>	NOM-020-SSA1-1993  Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de ozono (O <sub>3</sub> ).	O <sub>3</sub> – promedio horario, una vez al año	0.110 ppm
		O <sub>3</sub> - 8 horas, una vez al año	0.080 ppm
<b>Monóxido de carbono</b>	NOM-021-SSA1-1993  Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO).	CO - 8 horas, una vez al año	11.00 ppm, o 12,595 µg/m <sup>3</sup>
<b>Bióxido de azufre</b>	NOM-022-SSA1-2010  Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).	SO <sub>2</sub> - 24 horas, una vez al año	288 µg/m <sup>3</sup> o 0.110 ppm
		SO <sub>2</sub> - anual	66 µg/m <sup>3</sup> o 0.025 ppm
		SO <sub>2</sub> -8 horas, dos veces al año	524 µg/m <sup>3</sup> , o 0.200 ppm
<b>Bióxido de nitrógeno</b>	NOM-023-SSA1-1993  Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).	NO <sub>2</sub> - 1 hora, una vez al año	0.21 ppm o 395 µg/m <sup>3</sup>
<b>Partículas (PM<sub>10</sub>)</b>	NOM-025-SSA1-1993  Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas menores de 10 micrómetros PM <sub>10</sub>	PM <sub>10</sub> - en 24 horas, una vez al año	150 µg/m <sup>3</sup>
		PM <sub>10</sub> - anual,	50 µg/m <sup>3</sup>

## 2.5 Tecnología de control

La minimización y control de los gases precursores del depósito ácido atmosférico dependen de 1) la disponibilidad y efectividad de la tecnología en los procesos de combustión; 2) la remoción de contaminantes, tanto en el combustible como en el gas efluente; 3) economizadores de combustibles; 4) el uso de energía alternativa, como eólica, nuclear, solar, entre otras, y 5) la reducción de los efectos de la deposición ácida en los receptores.

Los contaminantes primarios concernientes con el depósito ácido, bióxido de sulfuro y los óxidos de nitrógeno son emitidos por fuentes móviles y estacionarias.

### *Fuentes estacionarias*

La reducción y control de contaminantes provenientes de fuentes estacionarias se puede encauzar en cuatro rutas principales, que consisten en el uso de combustibles con bajo porcentaje de contaminación, la prevención de formación de contaminantes durante el proceso de combustión, la detección de contaminantes en los gases de escape y de combustión, y la conservación de energía.

Para la remoción de gases contaminantes existen varios métodos empleados en las industrias (Radojevic, 1992):

- 1) Desulfuración de gases de combustión (DGC): Esta técnica implica la atomización o depuración de los gases de combustión con absorbentes químicos que remueven, en su mayoría, el SO<sub>2</sub> producido durante el proceso de combustión. El lavado se puede llevar a cabo vía húmeda, seca o una combinación de ambas.

Tabla 2.2 Desulfuración de gases de combustión (DGC)

DGC	Absorbente	Remoción de SO <sub>2</sub> (%)
Húmeda	CaCO <sub>3</sub> , Na <sup>+</sup> , MgSO <sub>3</sub> , CaO, NH <sub>3</sub> , agua de mar, entre otros	90-95
Seca	Carbón activado, NH <sub>3</sub> , CaCO <sub>3</sub> , orgánicos.	70-90
Combinada	CaO, NH <sub>3</sub>	90-95

La DGC por vía seca es la que presenta menores costos de instalación, mantenimiento y operación, seguida por la vía húmeda. La desventaja para esta última, es la generación de grandes cantidades de lodos que dificultan el manejo y tratamiento de los residuos; a diferencia de la DGC combinada, cuyos residuos son sólidos.

En algunos procesos el absorbente es adicionado al combustible antes de la combustión, ayudando a controlar las emisiones tanto de SO<sub>2</sub> como de NO<sub>x</sub>.

- 2) Control de NO<sub>x</sub>: Dado que la emisión de estos gases es consecuencia de la oxidación del nitrógeno, presente en el aire y en el combustible, en función de la temperatura, concentración del oxígeno, presión y el tiempo de residencia en la cámara de combustión, el control se puede lograr modificando los regímenes de combustión o bien, mediante la reducción selectiva de los NO<sub>x</sub> en los gases de combustión.

**Tabla 2.3 Técnicas de remoción de óxidos de nitrógeno**

<b>Tecnología</b>		<b>Remoción de NO<sub>x</sub> (%)</b>
<b>Modificación de la combustión</b>		< 30 -50
<b>Combustión en lecho fluidizado (FBC)<sup>1</sup></b>		> 90
<b>Reducción selectiva</b>	<b>Catalítica</b>	60-80
	<b>No catalítica</b>	30-50 (urea) 60-90 (NH <sub>3</sub> )

<sup>1</sup> FBC, por sus siglas en inglés (Fluidized bed combustion)

La reducción selectiva catalítica es el proceso más costoso, además requiere que el combustible tenga menos del 1% en contenido de azufre, ya que se puede formar el aerosol  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . La reducción no catalítica es menos costosa, sin embargo, requiere de un equipo removedor de partículas ya que los subproductos formados son los aerosoles  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  y  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

#### *Fuentes móviles*

Las emisiones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ , partículas y  $\text{SO}_2$  por fuentes móviles provienen de los motores, ya sea por el encendido por chispa, el vapor, las turbinas de gas o del encendido por compresión emitida por autobuses, camiones, aviones, marina y/o locomotoras. El control se logra mediante la modificación de procesos y combustibles y el tratamiento de los gases de escape, como la inyección de aire, cámaras de postcombustión, convertidores catalíticos (catálisis heterogénea).

# CAPÍTULO III. ANTECEDENTES

### III. Antecedentes

En este capítulo se delimita y describe el medio físico, social y económico de la zona arqueológica de El Tajín. Asimismo se presentan las investigaciones previas de depósito ácido atmosférico realizadas para este mismo sitio.

#### 3.1 Área de estudio

El Tajín se ubica en el municipio de Papantla de Olarte, en la región Totonaca, Veracruz (Fig. 3.1). Las coordenadas geográficas son 20°26'41" latitud norte y 97°22'39" de longitud oeste, a una altura de 298 msnm.

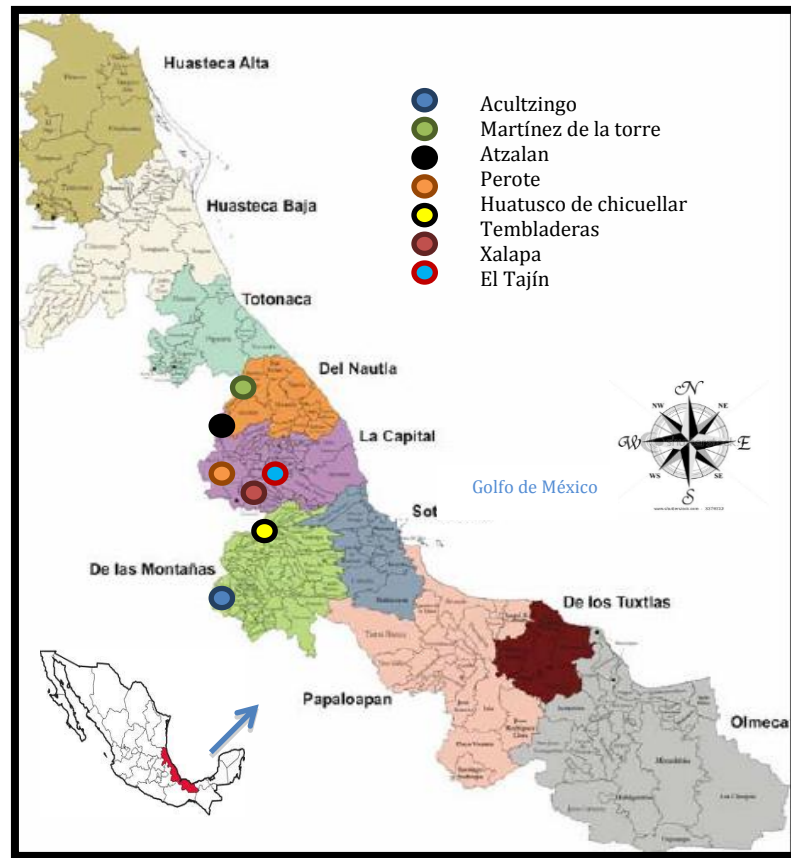


Figura 3. 1 Mapa de ubicación de la zona arqueológica de El Tajín (INAFED)

Fue fundada hacia el siglo IV d.C. En el año de 1992, la UNESCO declaró a la zona como Patrimonio Cultural de la Humanidad<sup>2</sup>: **Ciudadela pre-hispánica El Tajín**. Consta de

<sup>2</sup> Ver anexo "Criterio para declarar Patrimonio de la Humanidad"

más de 160 pirámides, solo 41 están abiertas al público en un terreno de 20 hectáreas, que conforman templos, pirámides, habitaciones y juegos de pelota. El núcleo de la antigua ciudad (zona abierta al público), se divide en cinco partes que corresponden a niveles altimétricos diferentes: Grupo Plaza del Arroyo, La Zona Central, La Gran Xicalcolihqui, El Tajín Chico y el Conjunto de las Columnas.

### 3.1.1 Medio físico de la zona arqueológica de El Tajín

*Localización del municipio de Papantla de Olarte:* Ubicado en la región Totonaca, Veracruz. Las coordenadas geográficas son 20°27' latitud norte y 97°19' de longitud oeste, a una altura de 180 msnm.

El municipio de Papantla de Olarte limita con Cazones de Herrera al norte; 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 noreste con Tihuatlán (Fig. 3. 2).



Figura 3.2 Ubicación de la zona arqueológica de El Tajín

PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA  
ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

*Extensión:* Abarca 1,221 hectáreas en una zona selvática y lluviosa de la Sierra Papanteca (INAH, 2011).

*Orografía:* Sierra Madre Oriental, localmente se le conoce como Sierra Papantla, la topografía es irregular, cerros de poca altura y predominancia de valles (INAFED, 2010).

*Hidrografía:* El Tajín se encuentra limitado por los cauces de los ríos Tecolutla y Cazones; existen arroyos tributarios como el Tlahuanapa, Santa Águeda y Poza Verde (INAFED, 2010).

*Clima:* Según la clasificación climática de Köppen, esta zona es del tipo Aw1(x'), correspondiente a un clima cálido subhúmedo, con una temperatura promedio de 24.1° C; su precipitación pluvial media anual es de 1,186 mm (INAFED, 2010).

**Tabla 3.1 Promedios de temperatura y precipitación en el municipio de Papantla de Olarte (1971-2000)**

1971-2000 Papantla de Olarte	Temperatura (°C)							Precipitación (mm)		
	Máxima normal	Máxima mensual	Máxima diaria	Media normal	Mínima normal	Mínima mensual	Mínima diaria	Normal	Máxima Mensual	Máxima diaria
<b>Enero</b>	23.7	33.1	37	18.8	14	8.4	1	54.3	167.4	60
<b>Febrero</b>	24.5	32.8	38	19.4	14.4	7.4	-	51.4	167.6	76.8
<b>Marzo</b>	28.1	32.9	39	22.8	17.5	12	3	44.7	243.6	100
<b>Abril</b>	30.4	35.9	42	24.9	19.4	14.7	8	64.1	182.3	161.3
<b>Mayo</b>	33.6	38.3	42	27.9	22.2	17.7	12	73.7	263.5	126.2
<b>Junio</b>	33.6	37.9	42.5	28.1	22.7	18.2	11.5	135.4	372.2	125.8
<b>Julio</b>	32.9	37.7	40	27.5	22.1	18.2	16.5	90.9	287.5	68.8
<b>Agosto</b>	33.2	38.6	40.5	27.6	22	14.5	13	123.8	322.9	181.4
<b>Septiembre</b>	31.9	38.6	40.5	26.7	21.5	15.7	12	250.7	803.3	261.3
<b>Octubre</b>	29.6	33.3	39.5	24.3	19.1	14.4	9	148.7	639.8	247.6
<b>Noviembre</b>	26.8	30.3	37	22	17.1	12.3	5	87.5	246.3	93.6
<b>Diciembre</b>	24	27.7	35	19.2	14.5	11.5	1	60.8	151.6	68.2
<b>Anual</b>	<b>29.4</b>			<b>24.1</b>	<b>18.9</b>			<b>1186.0</b>		



### **3.1.2 Medio biótico de la zona arqueológica de El Tajín**

*Principales Ecosistemas:* Bosque subtropical perennifolio, donde se encuentran especies de árboles como jonote, laurel, palo mula, cedro, ceiba y variedad de leguminosas; la fauna se compone por poblaciones de armadillos, conejos, tejones, mapaches, tlacuaches, coyotes, ardillas, palomas, codornices, gavilanes; víboras de cascabel, coralillo mazacuatas y nauyacac (INAFED, 2010).

*Recursos Naturales:* El municipio de Papantla cuenta con 3,220 pozos petroleros en explotación dentro del municipio, 17 km de playas vírgenes, 14% de zona boscosa con árboles de maderas preciosas, 75% de pastizales y zonas agrícolas (INAFED, 2010)..

*Características y Uso del Suelo:* El suelo es de tipo feozem, regosol y vertisol, caracterizados por localizarse en zonas templadas lluviosas con selva o acidez y susceptibilidad a la erosión. El 68% del territorio municipal es dedicado a la agricultura, 11% a la ganadería, 13% a viviendas, 4% al comercio y el 4% restante se destina a oficinas y espacios públicos (INAFED, 2010).

### **3.1.3 Perfil socioeconómico del municipio Papantla de Olarte**

*Habitantes:* El registro poblacional del censo realizado en 2010 indica que el municipio cuenta con 158,599 habitantes, de los cuales 77, 291 son hombres y 81, 301 son mujeres. Se reportan 3,458 nacimientos y 1,037 defunciones (INEGI, 2011).

*Grupos Étnicos:* De acuerdo al 2° Censo de Población y Vivienda del 2005, en el municipio habitan un total de 33,463 personas que hablan alguna lengua indígena, siendo la principal lengua indígena, la totonaca (INEGI, 2013).

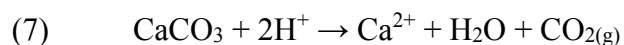
## **3.2 Depósito ácido sobre El Tajín**

El depósito ácido húmedo afecta directamente el material pétreo del que se encuentran contruidos los edificios de la zona arqueológica, además, la caracterización de esta precipitación sirve como un indicador de la calidad del aire.

### 3.2.1 Efecto de la lluvia ácida

La zona arqueológica del El Tajín, está edificada con roca caliza (INAH, 2011), que se compone a su vez de 81.2% de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), 17.9% de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y 0.9% de feldespatos (silicatos de aluminio, calcio, sodio o potasio).

La calcita en presencia de ácido es soluble, siendo inclusive una prueba para la identificación de este mineral. Se encontró una recesión superficial entre 3.5 y 4.94 micrómetros por año (Soto, 1999).



La calcita también es capaz de formar yeso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , por la reacción con ácido sulfúrico con Fe (III) como catalizador, debilitando la estructura de la roca caliza (Cheng y Castillo, 1984):



### 3.2.2 Caracterización de la lluvia ácida

El laboratorio de la Sección de Contaminación Ambiental del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (SCA/CCA/UNAM), ha caracterizado la lluvia colectada en la zona arqueológica de El Tajín desde el año 2003 hasta el 2009.

Se realizó el muestreo diariamente del depósito húmedo, como es recomendado por la NADP (*National Acidic Deposition Protection*, por sus siglas en inglés), el cual consiste en un dispositivo de dos cubetas capaz de coleccionar tanto el depósito húmedo como el seco. Las muestras fueron enviadas siguiendo el sistema de custodia hasta el laboratorio (SCA/CCA/UNAM), donde se realizó el análisis químico, que consiste en la determinación de los parámetros: pH, conductividad eléctrica, concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y concentración de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

Los resultados mostrados a continuación incluyen aquellos parámetros indicadores de la calidad del aire a partir de la lluvia ácida, en el periodo comprendido entre los años 2003-2009.

Tabla 3.2 Parámetros de la lluvia ácida en El Tajín

Año	Total anual (mm)	Promedio precipitación diaria (mm)	pH	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)
2003	772.5	15.8	4.55	1.23	2.28
2004	687.99	10.42	4.51	0.79	1.84
2005	1460.7	33.2	4.65	0.81	1.88
2006	1242.9	29.6	4.58	2.85	3.44
2007	1054.1	29.49	4.83	1.91	1.57
2008	755.5	22.2	4.95	0.82	2.02
2009	804	36.55	5.43	0.65	2.19

En la tabla 3.2, se observa que todos los años del registro han presentado lluvia ácida en la zona arqueológica, independientemente de la cantidad de lluvia obtenida anualmente; aunque el valor ponderado de acidez ha disminuido. El valor obtenido de nitratos y sulfatos para el año 2006 aumenta en 1ppm, sin embargo, el valor de pH al final no se ve alterado.

### 3.2.3 Transporte de precursores de lluvia ácida hacia El Tajín

El depósito húmedo en El Tajín tiene un valor de pH bajo, los precursores de esta lluvia ácida y otros contaminantes atmosféricos, son transportados desde el este y norte de esta zona arqueológica. Las fuentes emisoras principales son: 1) las instalaciones petroleras en la zona marina y costera, de la Bahía de Campeche, donde se estima una emisión de contaminantes atmosféricos de 660,000 toneladas, incluyendo 181,000 toneladas de SO<sub>2</sub> y 87,000 toneladas de hidrocarburos no metánicos (Kahl et al., 2007); 2) la planta eléctrica de Tuxpan; 3) las ciudades industriales de Tampico, Monterrey y Brownsville/ Matamoros y 4) las refinerías de Poza Rica y el Puerto de Veracruz (Fig. 3.3).

El Estado de Veracruz también es un gran emisor de contaminantes, siendo el principal contaminante el bióxido de azufre (67.69%), debido a la calidad de los combustibles empleados (Fig. 3.4). El sector con mayor contribución de emisiones a la atmósfera de partículas es el de alimentos con 91.70%, seguido del de bebidas con un 4.09%, la química y otras industrias manufactureras con 1.19% y 1.11% respectivamente (SEDEMA, 2011).

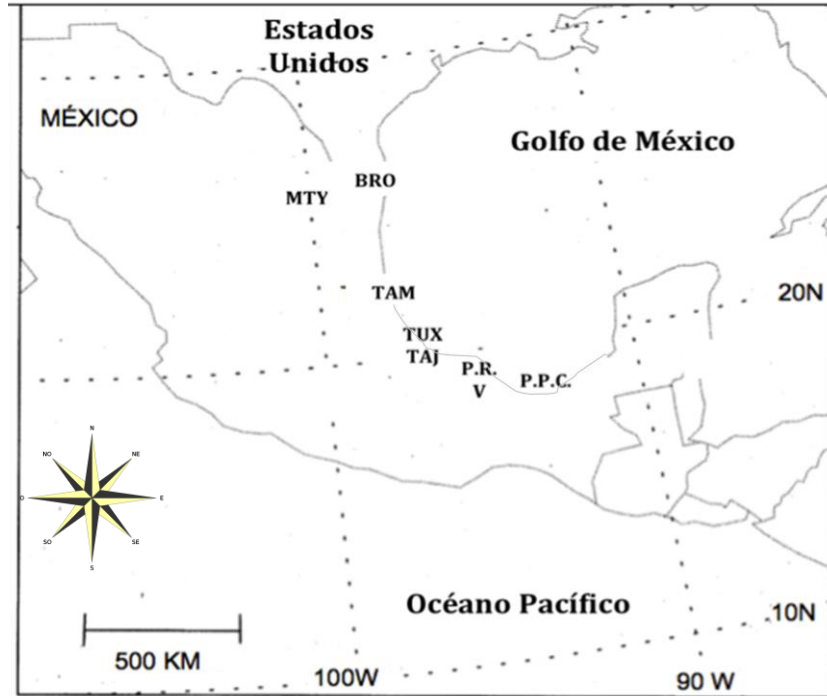


Figura 3.3 Localización de las fuentes emisoras de precursores de lluvia ácida, plataformas petroleras de Campeche (P.P.C), planta eléctrica de Tuxpan (TUX), ciudades industriales de Tampico, Monterrey y Brownsville/ Matamoros (TAM, MTY y BRO) y refinerías de Poza Rica y el Puerto de Veracruz (P.R. y VER) (Kahl et al, 2007)

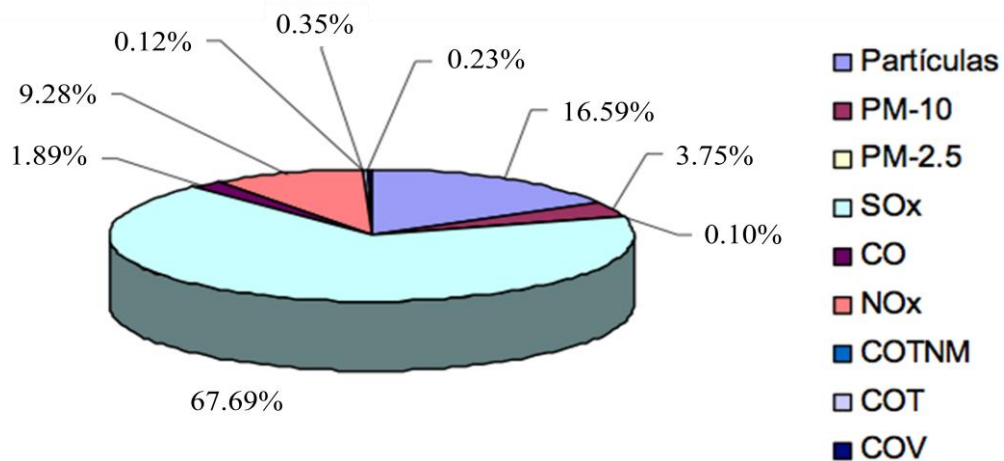


Figura 3.4 Porcentaje de emisiones por tipo de contaminante de las fuentes fijas del Estado de Veracruz (SEDEMA)

# CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

## IV. Metodología

Para evaluar el deterioro ambiental significativo y poder prevenir, mitigar y/o restaurar los daños en la zona arqueológica de El Tajín causados por la lluvia ácida, es necesario evaluar los impactos potenciales causados por la actividad antropogénica. El procedimiento está enfocado a la calidad del aire, los pasos a seguir consisten en lo siguiente:

1. Describir y delimitar el proyecto con un enfoque ambiental, el cual corresponde a la zona arqueológica de El Tajín.
2. Identificar las actividades o las industrias que puedan impactar la zona de estudio por efecto de la calidad del aire y elaborar un árbol de acciones relacionadas al proyecto.
3. Describir el medio físico, social y económico, es decir, elaborar un inventario ambiental, previo al proyecto y realizar un árbol de factores susceptibles a ser alterados por el proyecto.
4. Determinar los elementos significativos del ambiente que sean de interés para su conservación, de acuerdo a su diversidad, rareza, perturbación, singularidad, así como la localización de áreas naturales protegidas, reservas de la biósfera, planes parciales de desarrollo urbano entre otros y de acuerdo a ello, clasificar el área de aplicación de PSD.
5. Identificar los impactos causados, empleando la matriz de *Leopold*.
6. Evaluar el impacto ambiental sobre los elementos más significativos en una base lógica, mensurable y fácilmente identificable. Para ello se empleará el método de *Batelle Columbus*.
7. Realizar un programa para la prevención del deterioro ambiental significativo en la zona de estudio.

A continuación se desarrolla la metodología conforme a la secuencia establecida.

## 4.1 Descripción ambiental

La SCA-CCA-UNAM realizó el muestreo del depósito atmosférico húmedo y seco, en la zona arqueológica de El Tajín (Fig. 4.1), del año 2003 al 2009. A las muestras colectadas se les realizó un análisis químico para determinar diversos parámetros que permitirán describir la calidad del aire con relación al depósito atmosférico en la zona de estudio.

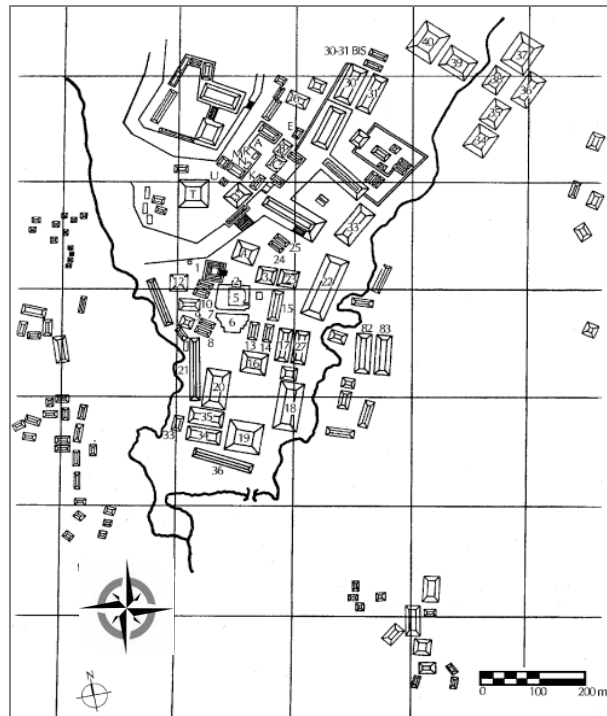


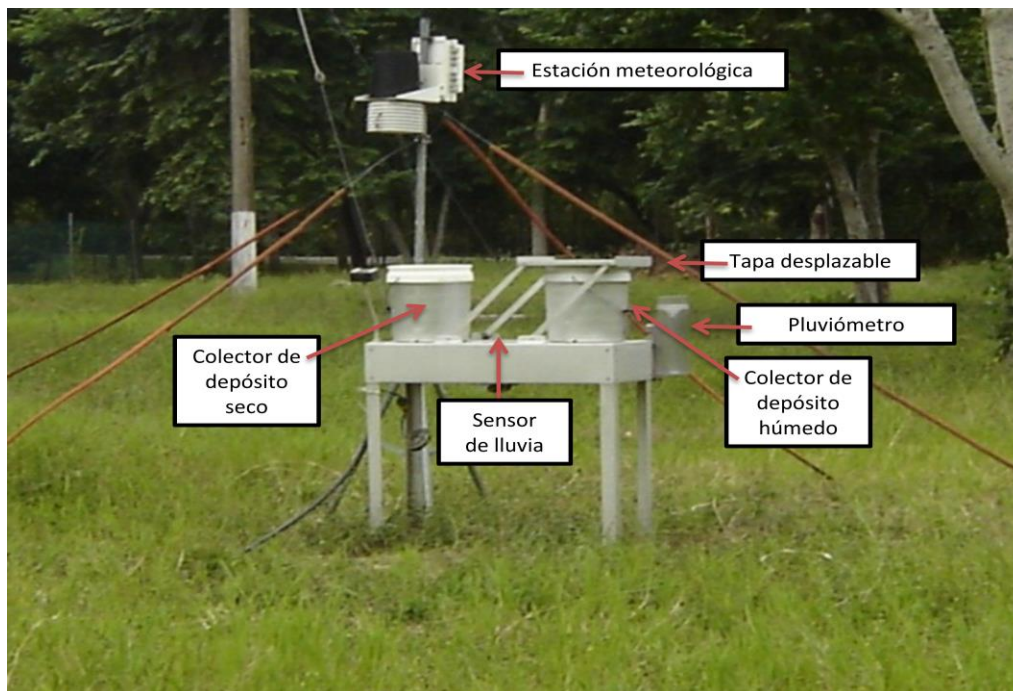
Figura 4.1 Zona Arqueológica de El Tajín, 1cm= 200m

### 4.1.1 Muestreo de depósito atmosférico húmedo y seco (D.H. / D.S.)

El muestreo requiere datos confiables que cumplan las normas de calidad basadas en las recomendaciones de la NADP y US-EPA. (NADP, 2004; US-EPA, 1994). Para ello, se realizó un programa de monitoreo que considere un plan de Aseguramiento de Calidad (QA) y Control de Calidad (QC) que incluyen la documentación y el cumplimiento de los procedimientos de muestreo, el mantenimiento preventivo de equipos de laboratorio e instrumentación, la capacitación y actualización de los analistas, cadena de custodia bien definida (registrando los datos de la muestra y su manejo), calibración de los equipos (empleo de estándares y blancos) y el control de precisión (dentro de plazo y duplicados entre distintas series). Igualmente deben ser aplicados procedimientos

estrictos a la gestión de datos para asegurar que se mantenga la precisión de los datos. (NADP, 2004).

El sistema de colección recomendado por la *National Atmospheric Deposition Program* (NADP) consiste en un dispositivo de dos cubetas, en las que se colecta el depósito seco y el depósito húmedo de forma separada, regulado por un sensor, que al detectar la lluvia envía una señal que permite desplazar y dejar descubierta la tapa de la cubeta de colección de depósito húmedo; mientras que la cubeta de colección de depósito seco o “partículas”, permanece cerrada. Al finalizar el evento de lluvia, el sensor envía nuevamente otra señal a este mecanismo, para que cubra la cubeta de depósito húmedo y se destape la cubeta de depósito seco, de tal forma que ahora esta última quede en posición de muestreo de partículas. Lo anterior evita el mezclado de las partículas con la lluvia (Fig. 4.2).



**Figura 4.2 Muestreador automático de depósito atmosférico húmedo y seco**

El D.H. es colectado luego de cada evento de lluvia. Consiste en retirar la cubeta correspondiente y trasvasar parte de la muestra en una botella de 250 mL previamente lavada. Se deben registrar los valores de campo de pH y conductividad eléctrica a cada muestra, así como el volumen de lluvia por medio de un pluviómetro colocado junto al



muestreador automático. El resto de la muestra se envasa en botellas de 500 mL. El D.S. se colecta mensualmente y se sella herméticamente, evitando la salida o entrada de partículas. Se etiquetan ambos tipos de muestra (Fig. 4.3), se almacenan a 4°C para prevenir cambios en la composición iónica de cada muestra y se envían al laboratorio para realizar el análisis químico correspondiente.



CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA  
Sección Contaminación Ambiental

DEPOSICIÓN HÚMEDA  
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Sitio de muestreo \_\_\_\_\_  
Período de muestreo \_\_\_\_\_  
Hora del evento (inicio) \_\_\_\_\_ Temperatura \_\_\_\_\_  
pH \_\_\_\_\_ Precipitación pluvial \_\_\_\_\_ mm  
Conductividad  $\mu\text{s}/\text{cm}$  \_\_\_\_\_

Figura 4.3 Etiqueta de registro para las muestras de depósito húmedo

#### 4.1.2 Análisis químico de las muestras

El análisis químico en el laboratorio de la SCA-CCA-UNAM consiste en la determinación de los parámetros de pH, conductividad eléctrica, concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y concentración de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

La cuantificación de iones del depósito húmedo, por encontrarse en fase acuosa, se realiza directamente y sólo en caso necesario se hacen diluciones. Para el depósito seco, se requiere un mayor tratamiento que se describe más adelante.

El valor de pH se determinó con un potenciómetro Corning pH meter modelo HORIBA D-24 con electrodo combinado de vidrio. Antes de la medición es necesario calibrar el instrumento con tres disoluciones buffer de pH=4, pH=7 y pH=10, a una temperatura de 25 °C. La conductividad eléctrica se determinó con un conductímetro meter HORIBA D-24, con un intervalo de  $0.0 \mu\text{s cm}^{-1}$  -  $199.9 \mu\text{s cm}^{-1}$ , el cual tiene incorporado un termistor. El equipo se autocalibra con dos disoluciones estándar de KCl y NaCl, con conductividades de  $1.490 \mu\text{s cm}^{-1}$  y  $445 \mu\text{s cm}^{-1}$  respectivamente, a una temperatura de 25° C.

La identificación y cuantificación de los iones inorgánicos se realiza con cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC), basado en el Método EPA 300.1. Se utilizó un cromatógrafo de líquidos de alta resolución con 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 y columnas para aniones 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, con tamaño de partícula igual a 6µm capacidad es de  $30 \pm 3 \mu\text{eq mL}^{-1}$ . La columna para cationes es 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 m y capacidad de  $12.0 \pm 0.2 \mu\text{eq mL}^{-1}$  (ver Anexo A.5).

Debido a los límites de detección del equipo de cromatografía, las muestras que se introduzcan a analizar deben tener una conductividad inferior a  $100 \mu\text{s cm}^{-1}$ ; en caso contrario deben realizarse diluciones.

Cuando el  $\text{pH} > 6.35$  la especie  $\text{HCO}_3^-$  está en disolución. Se cuantifica empleando el gráfico de Gran, ya que nos permite usar datos tomados antes del punto final para hallar el punto final (Harris, 1999). La ecuación del gráfico de Gran corresponde a:

$$V_b \cdot 10^{-\text{pH}} = \frac{\gamma_{\text{HA}}}{\gamma_{\text{A}^-}} K_a (V_e - V_b)$$

Para ello se titulan 10mL de la muestra adicionando alícuotas de 100 µL de HCl [ $4.0 \times 10^{-3}\text{M}$ ], hasta un  $\text{pH} \leq 4$ . Se registran los valores de volumen agregados y de pH luego de cada adición (incluyendo el pH inicial). Se deben tener al menos 5 mediciones, las cuales se introducen a la función de Gran. La curva se debe extrapolar para hallar el volumen de equivalencia y con ello obtener estequiométricamente la concentración del  $\text{HCO}_3^-$ .

#### *Depósito seco*

La masa de depósito seco muestreado se obtuvo pesando las cubetas con la muestra y se restó el peso de la cubeta vacía. Para ello es requisito limpiar previamente la superficie de las mismas retirando las partículas adheridas que puedan interferir con el peso.

Para retirar la muestra de la cubeta, se lavó con 200 mL de agua desionizada, ya estando en disolución se midió el pH y la conductividad, se evaporó el agua y el sólido se almacenó en un lugar fresco y seco para su posterior cuantificación durante 3 años.

Los iones que interesa analizar son aquellos que son solubles en agua, para ello se realiza una digestión, pesando en una balanza analítica el depósito seco en una nave, el sólido se vertió en un matraz Erlenmeyer de 100 mL y se agregaron aproximadamente 60 mL de agua desionizada, se calentó a una temperatura de  $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , sin exceder los  $80^{\circ}\text{C}$  para evitar pérdida de los cloruros, manteniendo constante el volumen de agua.

Se recupera la fase acuosa por medio de una filtración al vacío con un matraz kitasato, empleando un filtro con tamaño de poro igual a  $0.20\ \mu\text{m}$  y se afora a 50.0 mL si la conductividad es menor o igual a  $50\ \mu\text{s cm}^{-1}$ ; o bien, a 100.0 mL si la conductividad es mayor a  $50\ \mu\text{s cm}^{-1}$ . Cuando la conductividad supera los  $100\ \mu\text{s cm}^{-1}$  es necesario hacer diluciones antes de cuantificar los iones en el equipo de HPLC.

La fase sólida es insoluble en medio acuoso, es decir que no interfiere en el valor de pH del depósito atmosférico. Para corroborar lo anterior, se les realizó a algunas muestras un análisis semicuantitativo con un microscopio electrónico de barrido.

#### **4.1.3 Procesamiento de datos**

Los parámetros de conductividad eléctrica, concentración de cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y concentración de aniones:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , se someten a un balance iónico con el fin de validar los datos.

Se determina la media ponderada de pH, anual y mensual, para identificar la existencia de lluvia ácida y determinar los periodos con mayor incidencia.

#### **4.2 Modelos atmosféricos**

Para identificar las acciones o industrias generadoras potenciales de algún impacto sobre la zona de estudio se emplearán modelos atmosféricos que simulen los procesos físicos y químicos de los contaminantes en el aire, que se emiten y reaccionan en la atmósfera. Por el método de integración del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, los modelos se clasifican como eulerianos (coordenadas fijas respecto a la tierra)

y lagrangianos (coordenadas que sigue el movimiento de la atmósfera) (INECC, 2012). Estos últimos, integran la posición de una partícula a partir de campos de viento mediante la resolución de la ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{dX}{dt} = V(X(t), t)$$

Donde V es el vector de la velocidad, X corresponde al de la posición y se realiza la simulación en un intervalo de tiempo (t) sobre una región delimitada por un par de puntos definidos, dados por latitudes y longitudes, a un delta de presión ( $\Delta P$ ) y ciertas condiciones meteorológicas dadas.

Los modelos lagrangianos se dividen en modelos de *trayectoria* y modelos *gaussianos*, de acuerdo con la geometría del sistema de modelación, siendo el primero de ellos el que se acopla a las necesidades de este trabajo.

Los modelos de dispersión que caracterizan los procesos atmosféricos a los que se ve expuesto un contaminante emitido por una fuente, son utilizados para predecir la dispersión y trayectoria de los contaminantes en la atmósfera considerando las condiciones reales de meteorología y de las fuentes de emisión, un ejemplo de este modelo es el Hysplit.

#### 4.2.1 HYSPLIT

El modelo *HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT trayectoria integrada lagrangiano de partícula única híbrida) es un servicio de *Air Resources Laboratory* (ARL, Laboratorio de Recursos Atmosféricos) de la *National Atmospheric and Oceanic Administration* (NOAA, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos). El Hysplit modela trayectorias progresivas o regresivas de parcelas de aire simples y hasta simulaciones complejas de depósito y dispersión, ya sea de una partícula o de una masa de aire.

El cálculo de la advección permite interpretar un evento que afecta la calidad del aire. El análisis de las trayectorias de retroceso es una herramienta que permite determinar los orígenes y las fuentes de los contaminantes, pudiendo incluir las transformaciones químicas.

El cálculo de una trayectoria particular se obtiene cuando se estima la posición a partir de la velocidad media (v) en la posición inicial ( $X_0$ ) y la posición (X) luego de cierto

tiempo (t) y con cierta aceleración (a):

$$X = X_0 + v(t) + \frac{1}{2} a t^2$$

Los datos se interpolan a un sistema de coordenadas que irá graficando la parcela. Es preciso introducir al modelo los valores de: latitud, longitud, altitud, fecha y dirección de la trayectoria. A manera de ejemplo, se muestra en la figura 4.4 la trayectoria inversa sobre El Tajín.

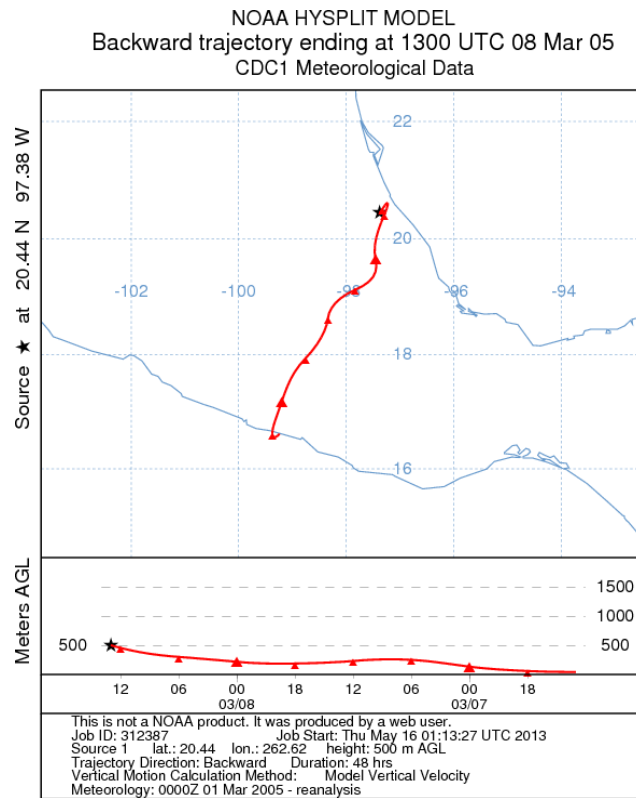


Figura 4.4 Trayectoria de retroceso del día 8 de marzo de 2005 proveniente desde El Tajín.

Los datos que serán introducidos corresponden a aquellos días donde se haya presentado un mayor valor de acidez en la lluvia de El Tajín, las trayectorias que se obtengan deben de compararse con el comportamiento de los vientos para los días evaluados (Fig. 4.5). La información meteorológica se encuentra almacenada en la base de datos de reanálisis regional de Norte América, (NARR, por sus siglas en inglés) de la NOAA.

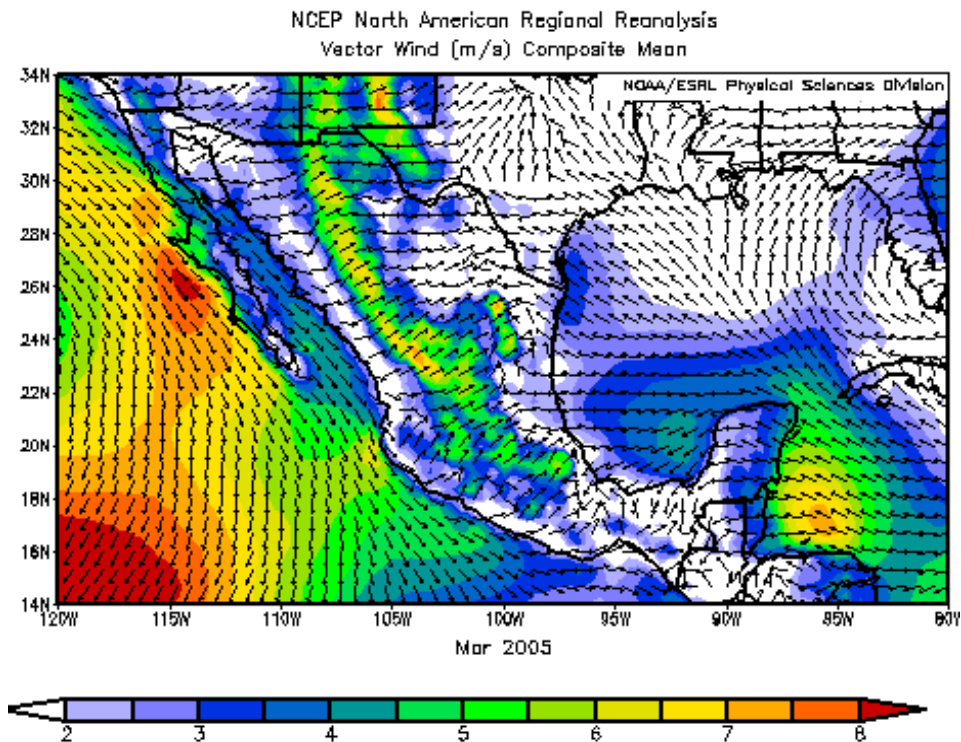


Figura 4.5 Promedio mensual del vector de viento (m/s), marzo 2005.

### 4.3 Evaluación de impacto ambiental

La evaluación del impacto ambiental permite identificar y predecir los efectos de ciertas acciones sobre el medio. Para ello, se requiere la identificación de esas acciones capaces de afectar el proyecto (árbol de acciones), así como la de los elementos del medio ambiente que puedan ser afectados (árbol de factores ambientales). Una vez identificados los impactos, debe asignárseles un valor dimensional, lo que implica el desarrollo de unidades conmensurables que, a su vez, deben cambiarse de escala para presentar los datos obtenidos con un índice de calidad ambiental general.

#### 4.3.1 Matriz de Leopold

Esta matriz identifica los impactos causados por un proyecto, involucra el uso de 100 acciones o actividades específicas y 88 factores ambientales, dando una matriz con 8,800 celdas de impactos potenciales. Cuando se detecte un impacto, la celda correspondiente debe ser marcada con un línea diagonal para indicar la magnitud (escala o extensión del impacto) e importancia (significancia de la acción) en una escala del 1 al 10. La magnitud

se califica en una valoración objetiva de los hechos y la importancia se asigna de manera subjetiva por un grupo interdisciplinario (Vidal de los Santos, 2009).

El trabajo para el uso de información de una matriz se realiza de la siguiente forma:

1. Identificar las acciones que pueden tener lugar en el proyecto y situarlas en la parte superior de la matriz (eje de las abscisas).
2. Los factores susceptibles a impactos se colocan el eje de las ordenadas.
3. En las celdas que interactúen se traza con una línea diagonal. Las celdas vacías corresponden a situaciones que no causan impactos.
4. En la esquina superior izquierda de cada celda se califica la magnitud del 1 al 10, donde el número 10 representa el mayor impacto, 1 el menor y 5 un valor medio. La calificación se señala con un signo (+) o (-) para efectos positivos y negativos, respectivamente.
5. En la esquina inferior derecha se califica la importancia de la interacción. De igual forma, se asigna un valor numérico que va de 1 a 10.
6. Se suman los números en los renglones y en las columnas de la matriz, el total obtenido dará una visión sobre la evaluación e interpretación parcial de los impactos asociados a varias fronteras espaciales en el sitio.

En la tabla 4.1 se muestra un ejemplo de la matriz de Leopold.

**Tabla 4.1 Ejemplo de una matriz de Leopold para identificar los impactos**

Magnitud		ACCIONES						Total de impactos	
Importancia		a		b		c			
<b>FACTORES</b>	<b>A</b>	2	1			8	5	2	
	<b>B</b>	-7	2	-8	8	-9	7	3	
<b>Total impactos</b>	Positivos	1		0		1		2	
	Negativos		1		1		1	3	
<b>TOTAL</b>								<b>5</b>	

En la evaluación de impacto ambiental que compete a esta tesis, únicamente se determinarán los componentes ambientales involucrados con la calidad del aire, específicamente lluvia ácida, causada por las emisiones de los SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub> de las fuentes por industrias.

#### 4.3.2 Método de Batelle Columbus

El método de Batelle consiste en un listado de indicadores de impacto, está compuesto por cuatro categorías ambientales que contienen a su vez 15 componentes y se subdividen en 78 parámetros ambientales (Tabla 4.2). El procedimiento consiste en transformar las escalas a indicadores conmensurables, mediante la ponderación de la importancia del parámetro, a este concepto se le denomina *unidad de impacto ambiental* (UIA). La suma acumulativa de los 78 parámetros ambientales en un sistema no alterado da un total de 1000, conforme disminuye este valor, el deterioro es mayor.

La UIA para cualquier parámetro, se estima dándole un valor de “1” al valor cuya calidad ambiental sea la más favorecedora y “0” al valor obtenido con menor calidad, así mismo se puede obtener un tercer parámetro que sirva como referencia para observar el comportamiento de la calidad y a partir de esto, construir una gráfica que permita determinar los valores de calidad ambiental del parámetro que desee medir a UIA.

Se calcula la UIA de cada parámetro (UIA<sub>i</sub>) y posteriormente se suma el valor de cada parámetro ambiental. La unidad de impacto ambiental debida al proyecto es igual a la diferencia entre las unidades de impacto ambiental con el proyecto y sin el proyecto:

$$UIA_{i(\text{debida al proyecto})} = UIA_{i(\text{sin proyecto})} - UIA_{i(\text{con proyecto})}$$

El impacto global se obtiene:

$$\sum_{i=0}^n (UIA_i)_{(\text{debida al proyecto})}$$



PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA  
ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

**Tabla 4.2 Insumos del método de Batelle-Columbus**

Categoría	Componentes	Indicadores		
Ecología 240	a. Especies y poblaciones 140	Terrestres	Pastizales y praderas	14
			Cosechas	14
			Vegetación natural	14
			Especies dañinas	14
			Aves de caza continentales	14
		Acuáticas	Pesquerías comerciales	14
			Vegetación natural	14
			Especies dañinas	14
			Pesca deportiva	14
			Aves acuáticas	14
	b. Hábitat y comunidades 100	Terrestres	Cadenas alimentarias	12
			Uso del suelo	12
Especies raras y en peligro			12	
Diversidad de especies			14	
Acuáticas		Cadenas alimentarias	12	
		Uso del suelo	12	
		Especies raras y en peligro	12	
		Diversidad de especies	14	
c. Ecosistemas	Sólo descriptivo			
Contaminación 402	a. Agua 318	Pérdidas en las cuencas hidrográficas		20
		Demanda biológica de oxígeno		25
		Oxígeno disuelto		32
		Coliformes fecales		18
		carbono inorgánico		22
		Nitrógeno inorgánico		25
		Fosfato inorgánico		28
		Pesticidas		16
		pH		18
		Variación del caudal de la corriente		28
		Temperatura		28
		Sólidos disueltos totales		25
		Sustancias tóxicas		14
		Turbidez		29
	b. Atmósfera 52	Monóxido de carbono		5
		Hidrocarburos		5
		Óxidos de nitrógeno		19
		Partículas sólidas		12
		Oxidantes fitoquímicos		5
		Óxidos de azufre		19
Otros		5		
c. Suelo 28	Uso de suelo		14	
	Erosión		14	
d. Ruido 4	Ruido		4	

PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA  
ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

Aspectos estéticos 153	a. Suelo 32	Material geológico superficial Relieve y caracteres topográficos Extensión y alineaciones	6 16 10
	b. Aire 35	Olor y visible Sonidos	3 2
	c. Agua 28	Presencia de agua	10
		Interfase suelo y agua	16
		Olor y materiales flotantes	6
		Área de la superficie de agua Márgenes arboladas y geológicas	10 10
	d. Biota 24	Animales domésticos	5
Animales salvajes		5	
Diversidad de tipos de vegetación		9	
Variedad dentro de los tipos de vegetación		5	
e. Objetos artesanales 10	Objetos artesanales	10	
f. Composición 30	Efectos de composición	15	
	Elementos singulares	15	
Aspectos de interés humano 205	a. Valores educacionales y científicos 48	Arqueológico	13
		Ecológico	13
		Geológico	11
		Hidrológico	11
	b. Valores históricos 55	Arquitectura y estilos	11
		Acontecimientos	11
		Personajes	11
		Religiones y culturas "Frontera del Oeste"	11 11
	c. Culturas 28	Etnias	14
		Otros grupos étnicos	7
Grupos religiosos		7	
d. Sensaciones 37	Admiración	11	
	Aislamiento / soledad	11	
	Misterio	4	
	Integración con la naturaleza	11	
e. Patrones culturales	Oportunidades de empleo	13	
	Vivienda	13	
	Interacciones sociales	11	

# CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

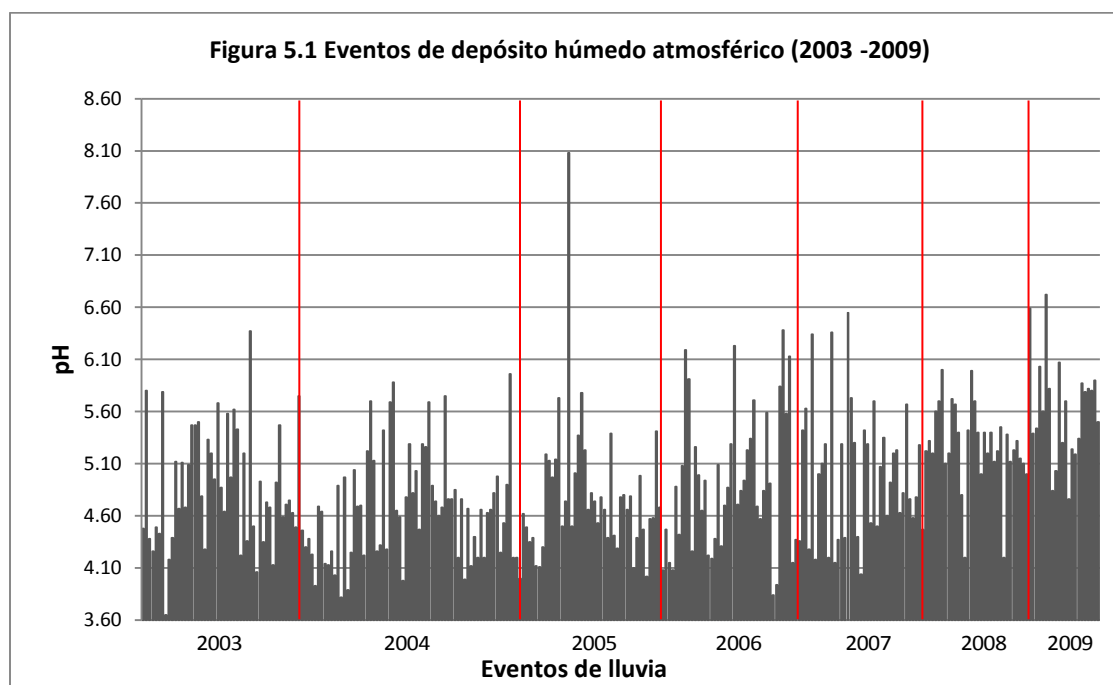
## V. Resultados y discusiones

### 5.1 Depósito atmosférico

Dado que la lluvia ácida se refiere a la mezcla de depósito húmedo y seco, cuyo valor de pH es inferior a 5.6 debido a los altos contenidos de ácido nítrico y sulfúrico, a continuación se presentan los resultados para ambos depósitos, en la zona arqueológica de El Tajín.

#### 5.1.1 Depósito húmedo

En la figura 5.1 se muestran los valores de pH de los 295 eventos de depósito húmedo muestreados en la zona arqueológica de El Tajín, durante el periodo de 2003 a 2009. El valor mínimo de pH fue de 3.65, presentado el 27 de febrero de 2003 y el máximo, correspondiente a un pH de 8.08 ocurrió el 24 de junio de 2005.



El análisis de pH de las muestras de depósito húmedo, indica que al menos el 81% de los eventos de precipitación, corresponden a depósito ácido de 2003 a 2008, sólo para 2009 corresponde a 50% (Tabla 5.1).

Tabla 5. 1 Eventos de depósito húmedo anuales en El Tajín (2003-2009)

Año	Eventos de depósito húmedo	Número de eventos con pH <5.6	Eventos de lluvia ácida (%)
2003	49	43	87.76
2004	68	62	91.18
2005	43	40	93.02
2006	42	35	83.33
2007	37	30	81.08
2008	34	28	82.35
2009	22	11	50

Se realizó un análisis químico a cada una de las muestras, obteniendo un ponderado anual de la concentración de aniones y cationes, así como del pH (Tabla 5.2). Esto nos permite observar las especies presentes en el agua de lluvia, siendo de principal interés los iones nitratos y sulfatos, por ser los responsables de la lluvia ácida.

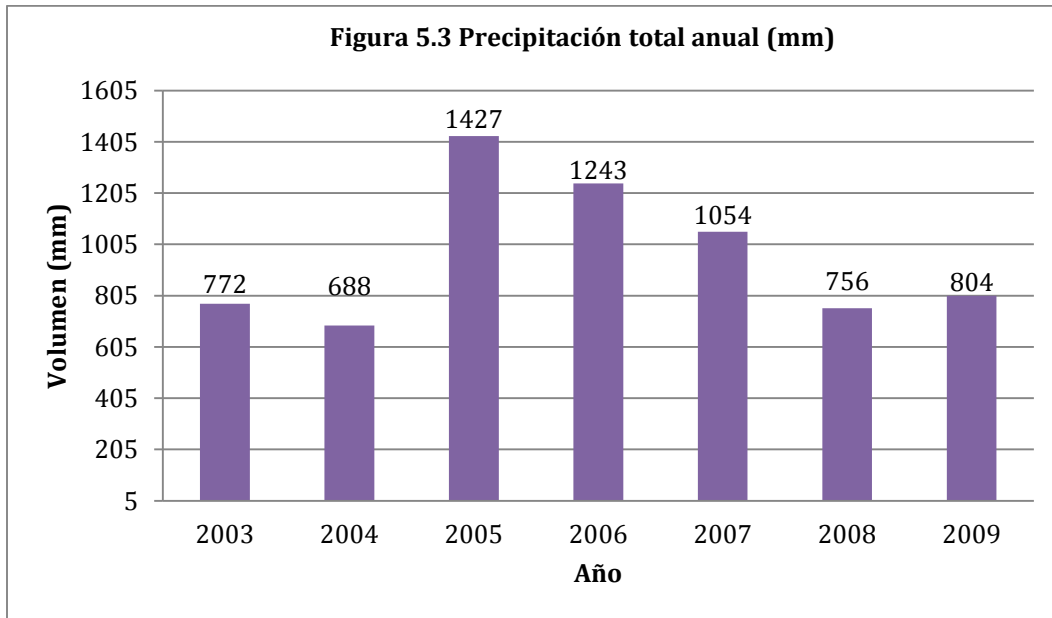
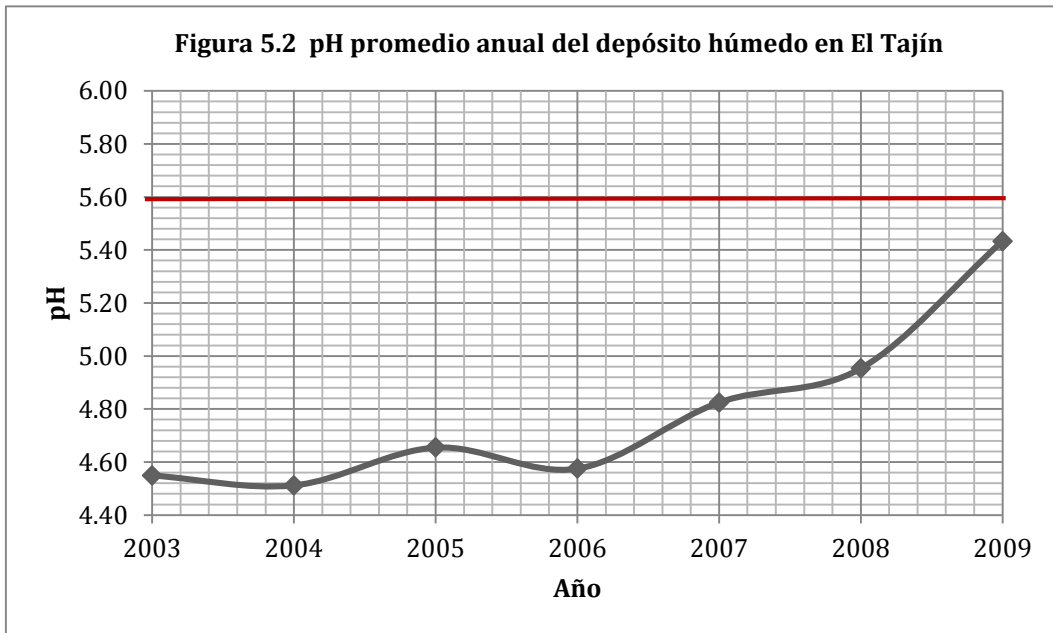
Tabla 5. 2 Resultados de la concentración ponderada anual de aniones y cationes del depósito húmedo en El Tajín, así como el pH (2003-2009)

Año	pH	Aniones			Cationes					
		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
		ppm			ppm					
2003	4.55	1.23	2.28	2.23	2.82E-05	0.55	0.38	0.15	0.12	0.29
2004	4.51	1.58	2.59	3.11	3.07E-05	0.73	0.70	0.58	0.16	0.49
2005	4.65	0.81	1.88	0.56	2.21E-05	0.25	0.28	0.11	0.19	0.13
2006	4.58	2.85	3.44	2.39	2.58E-05	1.34	0.91	0.27	0.11	1.06
2007	4.83	1.91	1.57	0.82	1.50E-05	0.66	0.30	0.14	0.12	0.39
2008	4.95	0.82	2.02	1.15	1.11E-05	0.15	0.24	0.08	0.73	1.15
2009	5.43	0.65	2.19	0.81	3.69E-06	0.11	0.19	0.72	0.08	0.76

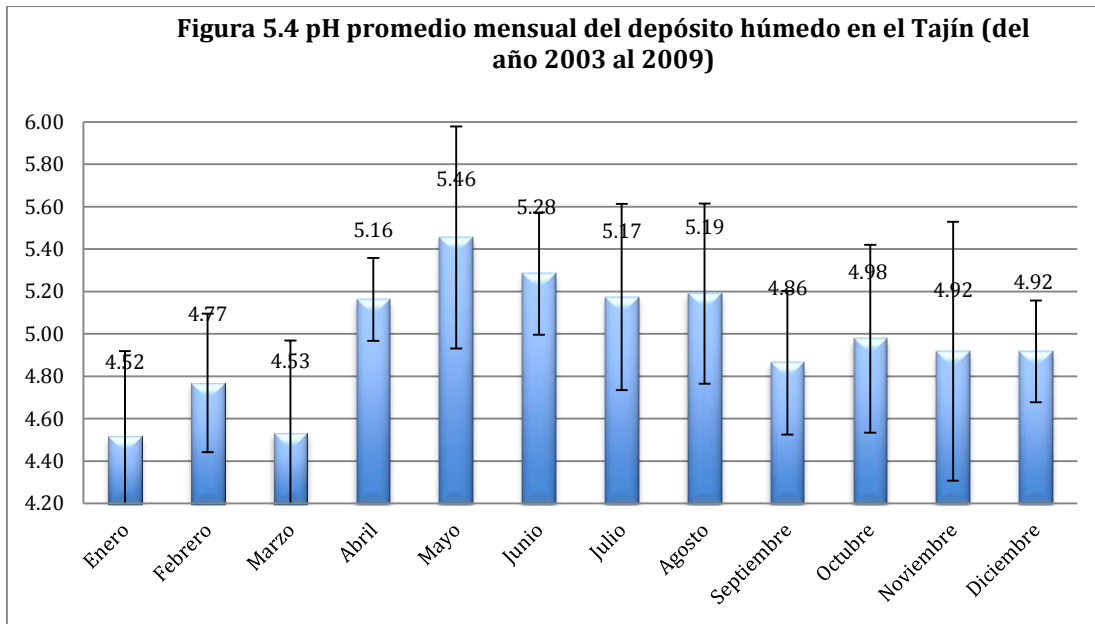
El valor promedio ponderado de pH para los siete años de estudio es inferior a 5.6, lo que indica la presencia de lluvia ácida, sin embargo, se observa una tendencia en la disminución de la acidez desde 2003 hasta el 2009 (Fig. 5.2).

Un aspecto importante de tomar en cuenta, es la precipitación total anual, donde el año con mayor volumen de precipitación fue el 2005, seguido por los años 2006, 2007, 2009 y 2003; mientras que los de menor volumen corresponden al 2004, seguido por 2008.

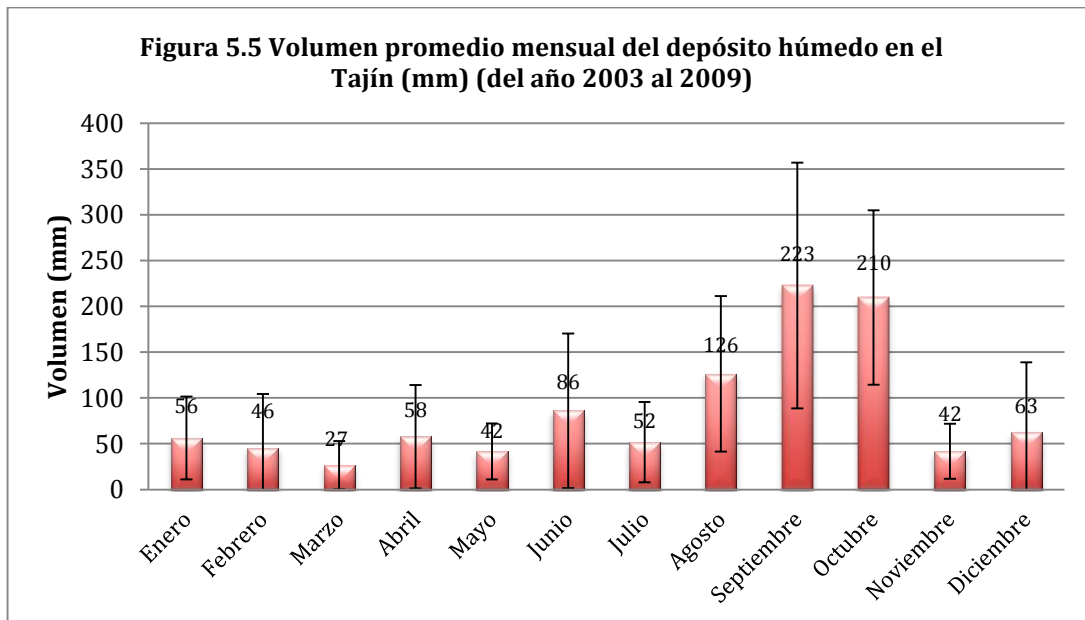
Entonces se puede suponer que la acidez para estos años, tuvo un importante aporte de iones provenientes del depósito seco (Fig. 5.3).



Para identificar los meses con mayor presencia de lluvia ácida, se ponderó el valor de pH obtenido, mes por mes, para cada año. En la figura 5.4 se observa que los valores con pH inferiores, se presentan en los meses de septiembre a marzo y en los meses de abril a agosto se tienen pH más altos. En el anexo A.1, se muestran los valores mensuales para cada año, en general, los meses de secas tienen los valores de pH más bajos.

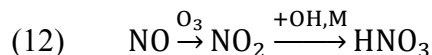
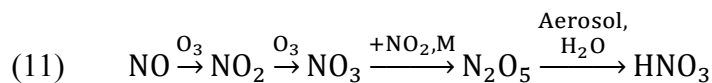
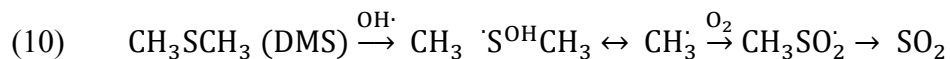
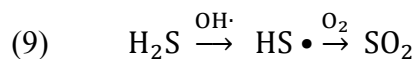


De igual forma, es importante conocer el volumen de agua precipitada, ya que conforme éste aumenta la concentración de partículas en el aire disminuye, es decir la atmósfera se va “lavando”. En la figura 5.5 se observa que los meses con mayor volumen de lluvia corresponden a junio, agosto, septiembre, octubre y diciembre. Se aprecia que para aquellos meses en donde la cantidad de agua precipitada es menor, el pH aumenta; para los meses cuyos volúmenes de agua son mayores, los valores de pH son bajos, encontrándose por debajo del 5.2. Cabe destacar que existen eventos de lluvia más ácidos inclusive con volúmenes de lluvia menores.



Los aniones que aportan mayor acidez al depósito atmosférico húmedo, son el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). Este último anión proviene en su mayoría del mar, cuya composición química está predominada por cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), aunque puede ser emitido por fuentes antropogénicas en forma de  $\text{HCl}$  en ciertos procesos de combustión. Generalmente en condiciones continentales se puede despreciar, sin embargo, El Tajín tiene un gran aporte de  $\text{Cl}^-$ , acarreado por los vientos provenientes del Este (ver anexos A.3 de trayectoria de retroceso).

Por otro lado, la formación de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) se debe primordialmente a la oxidación del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) proveniente de fuentes antropogénicas (ver reacciones 2, 3 y 4, pág. 22). Este aerosol constituye la mayor fuente de acidez durante la precipitación. Además, el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  puede ser formado en la atmósfera cuando se oxida el ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), proveniente de la degradación de compuestos orgánicos que contienen azufre desde el océano, las costas o los suelos (Reacción 9). O bien, del dimetil sulfuro (DMS) que es emitido desde el agua de mar como consecuencia de las reacciones enzimáticas del fitoplancton y zooplancton (Reacción 10) (Radojevic, 1992). Finalmente, el ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) es formado por la oxidación con  $\text{OH}^-$  (reacción rápida (11)); o bien con ozono ( $\text{O}_3$ ), más agua (reacción más lenta (12)) (Saiz-López, 2007):



Aunque se esperaría, debido a los datos de pH obtenidos, que la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  disminuyera con los años, en el año 2006, existe un aumento en su concentración, así como una gran presencia de  $\text{Cl}^-$  en el 2004.

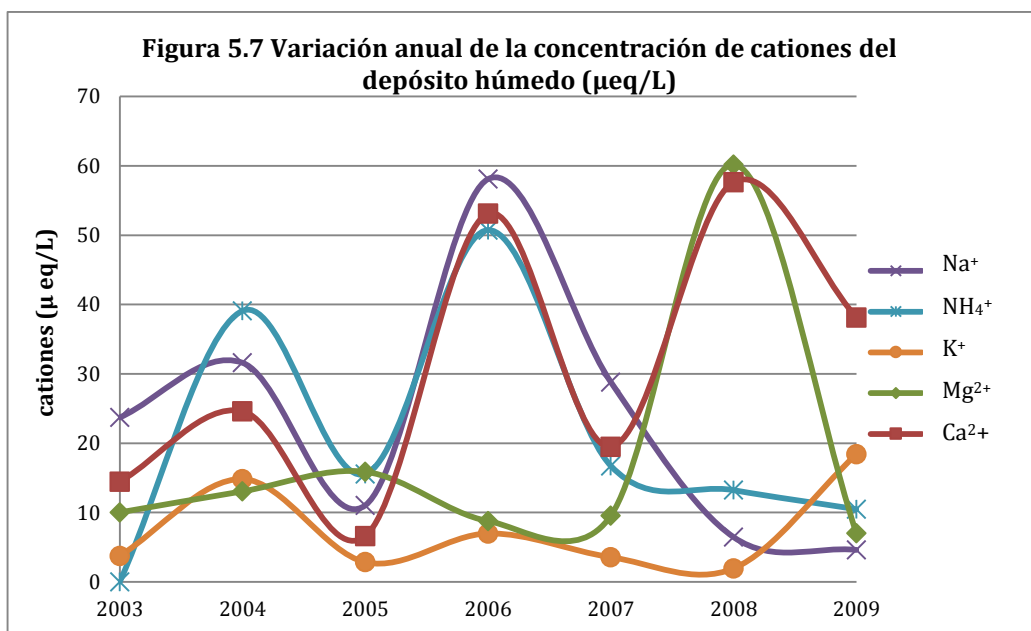
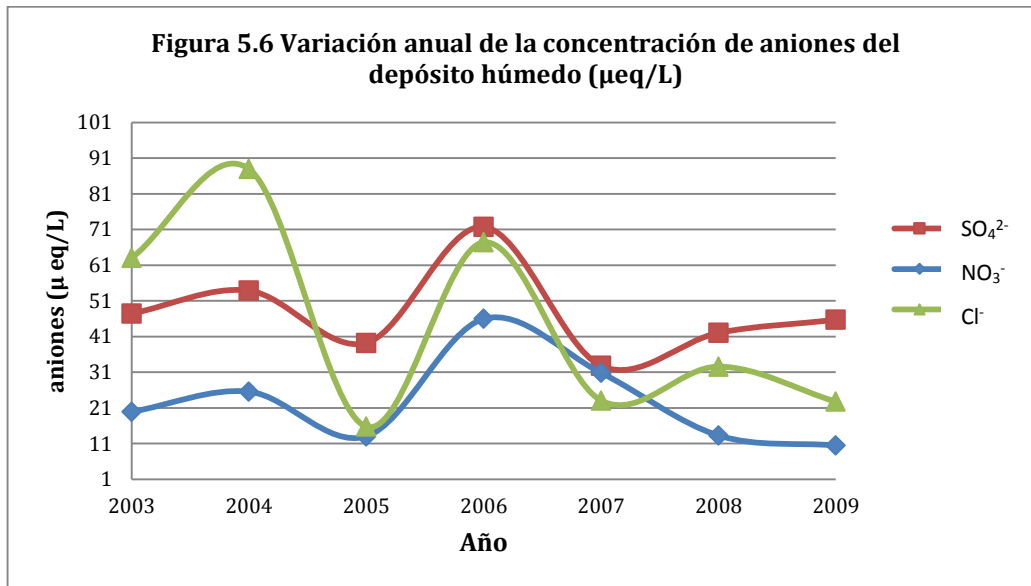
Se observa la misma tendencia, respecto al  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$ , de los cationes amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y sodio ( $\text{Na}^+$ ) (Figuras 5.6 y 5.7) lo que indica, probablemente, que estos iones se encontraban formando la sal correspondiente. Para el año 2004, no hay una



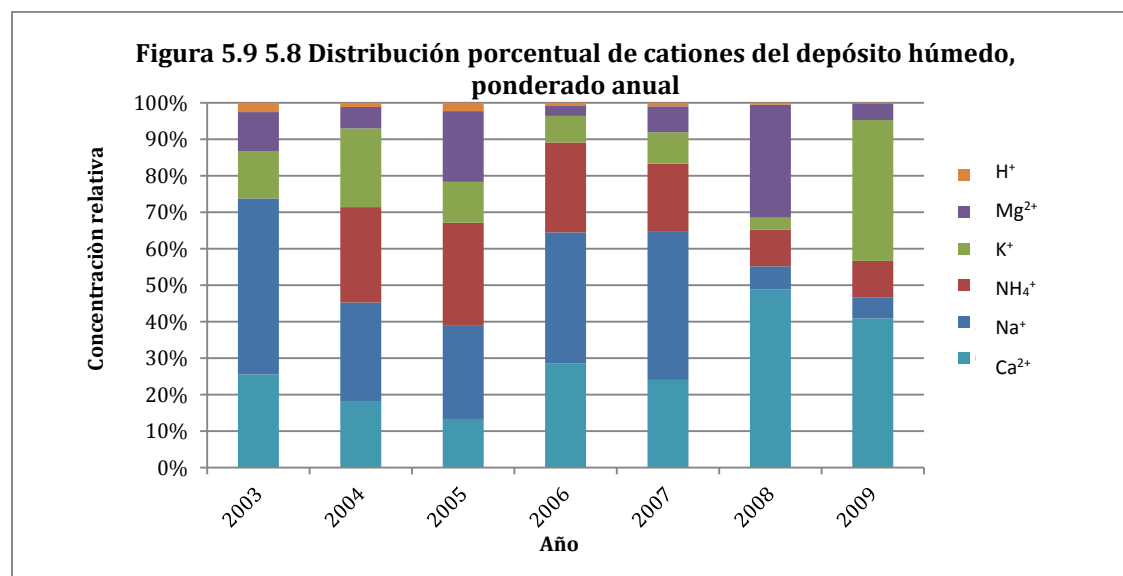
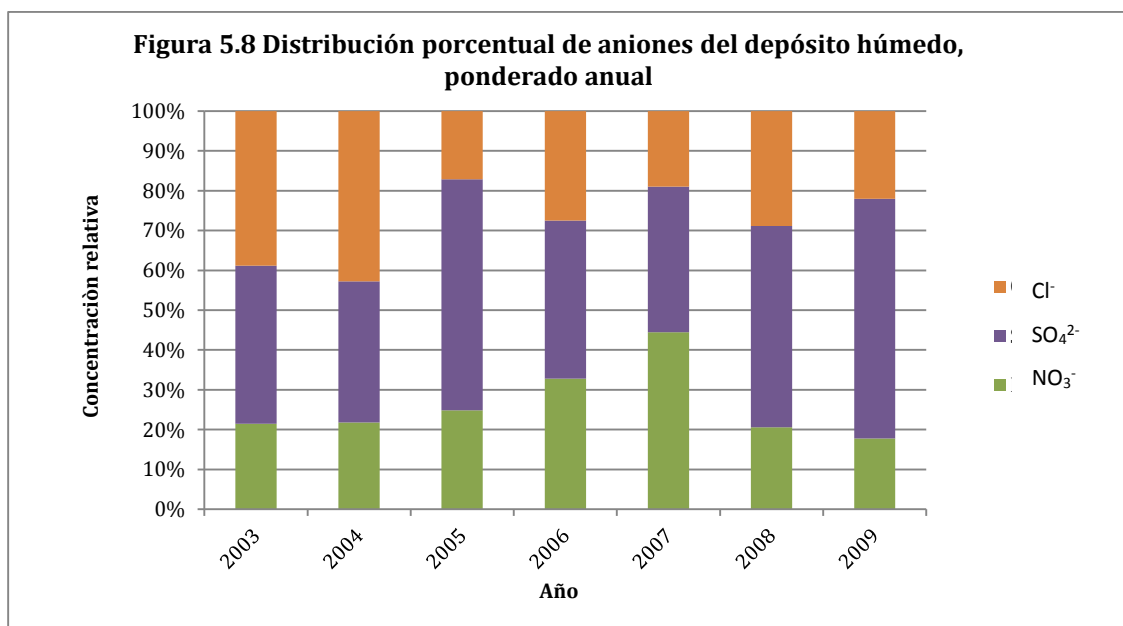
relación entre el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Na}^+$ , esto puede ser un indicador de que, además de emisiones marítimas de este anión, se presentó  $\text{HCl}$  de forma directa.

El amoníaco es el gas alcalino más abundante en la atmósfera, y sus reacciones, junto con los de las partículas, proporcionan el medio principal por el cual el ácido formado en la atmósfera se neutraliza antes de ser depositado (Lindberg, 1900).

Otras fuentes alcalinas, principalmente cationes alcalinotérreos, pueden provenir del suelo u otras fuentes y viajar en forma de aerosol, influyendo en la acidez de la precipitación.



En las figuras 5.8 y 5.9 se observan la distribución de aniones y cationes, respectivamente, expresada de manera porcentual. El anión que más influencia tiene en el depósito húmedo es el sulfato; también se aprecia la correspondencia del cloruro con el sodio, excepto para el año 2004 como ya se ha mencionado.



### 5.1.2 Depósito seco

Las muestras de depósito seco proveniente de la zona arqueológica de El Tajín, del año 2009 fueron descartadas por posible contaminación. Las fases acuosas de las muestras

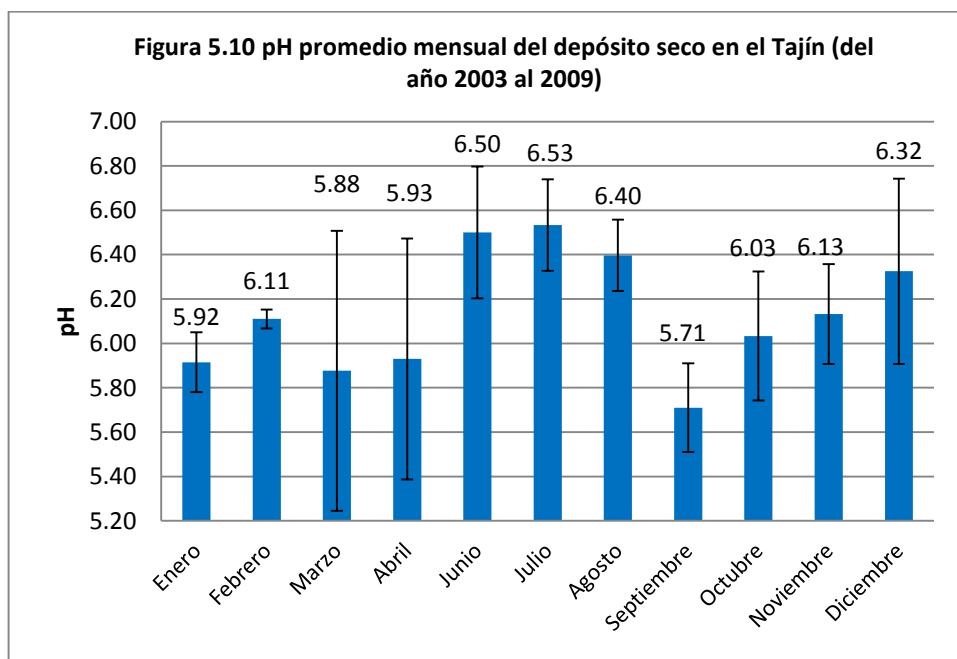
colectadas, de los años 2003 al 2008, presentaron valores de pH superiores a 5.6, excepto para dos muestras, correspondientes a los meses de agosto y diciembre de 2006.

En la tabla 5.3 se muestra la concentración promedio anual, en ppm, del periodo comprendido entre los años 2003 y 2008 para el depósito seco.

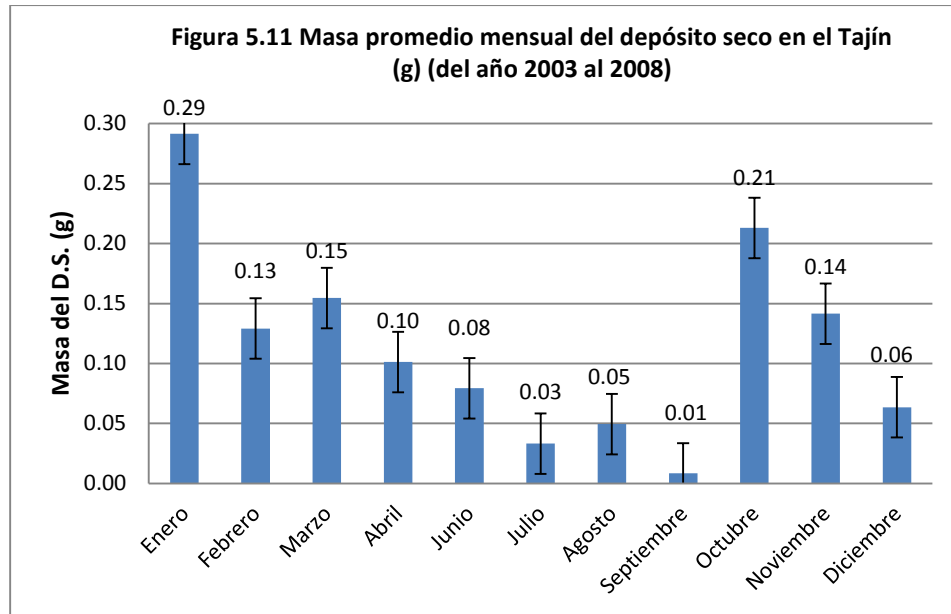
**Tabla 5.3 Concentración promedio anual de pH, aniones y cationes del depósito seco en El Tajín (2003-2008)**

Año	pH	Aniones						Cationes					
		F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
		ppm						ppm					
2003	5.98	<0.035	2.74	0.12	0.32	3.47	28.07	1.08E-03	1.87	<0.04	0.7	0.28	1.36
2004	6.34	0.57	21.43	6.86	2.4	31.58	40.1	5.06E-04	12.59	1.24	4.62	2.16	11.22
2005	5.97	0.2	7.72	1.41	3.95	13.52	28.35	1.56E-03	5.91	0.06	2.39	1.17	5.53
2006	6.47	0.09	2.33	1.27	6.16	7.53	72.63	3.83E-04	2.14	<0.04	1.94	0.75	4.82
2007	5.92	0.05	4.25	0.6	19.65	3.71	239.54	2.47E-03	3.62	0.68	2.73	1.41	8.57
2008	6.26	<0.035	5.6	0.16	0.55	1.83	10.96	1.30E-03	2.85	<0.04	0.43	0.32	0.99

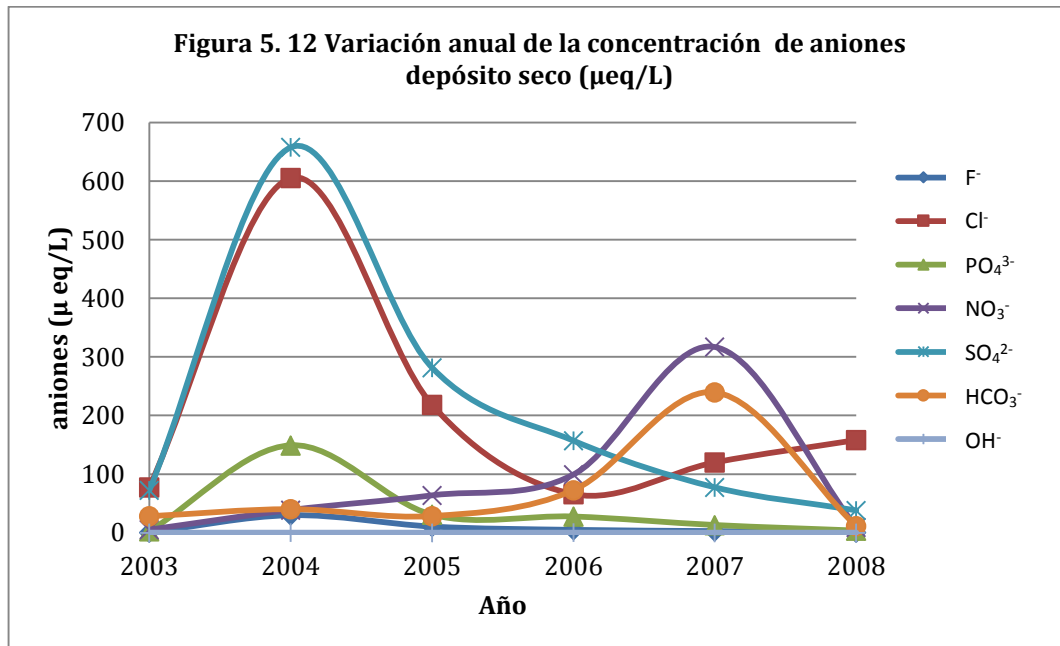
El valor ponderado de pH obtenido, mes por mes, para cada año en el depósito seco se muestra en la figura 5.10. Se observa que los valores con pH más bajos (< 6.4), se presentan de septiembre a abril y de junio a agosto se tienen pH más altos (> 6.4), un comportamiento muy similar al depósito húmedo.

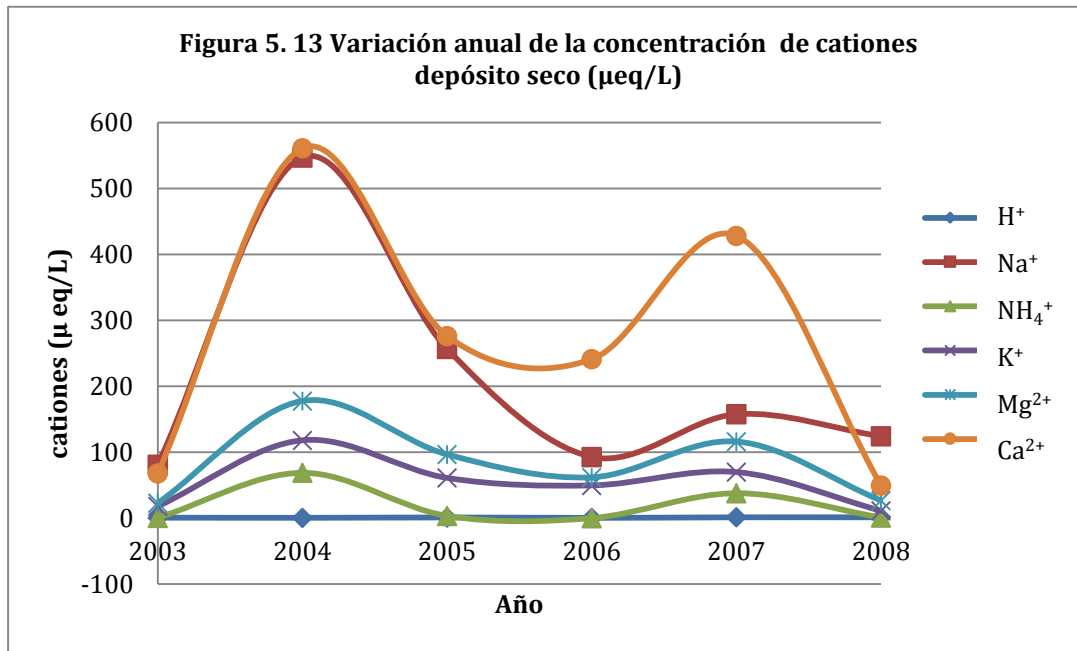


La masa de la fracción sedimentada de depósito seco (Fig 5.11) es mayor de octubre a junio y de julio a septiembre es menor.

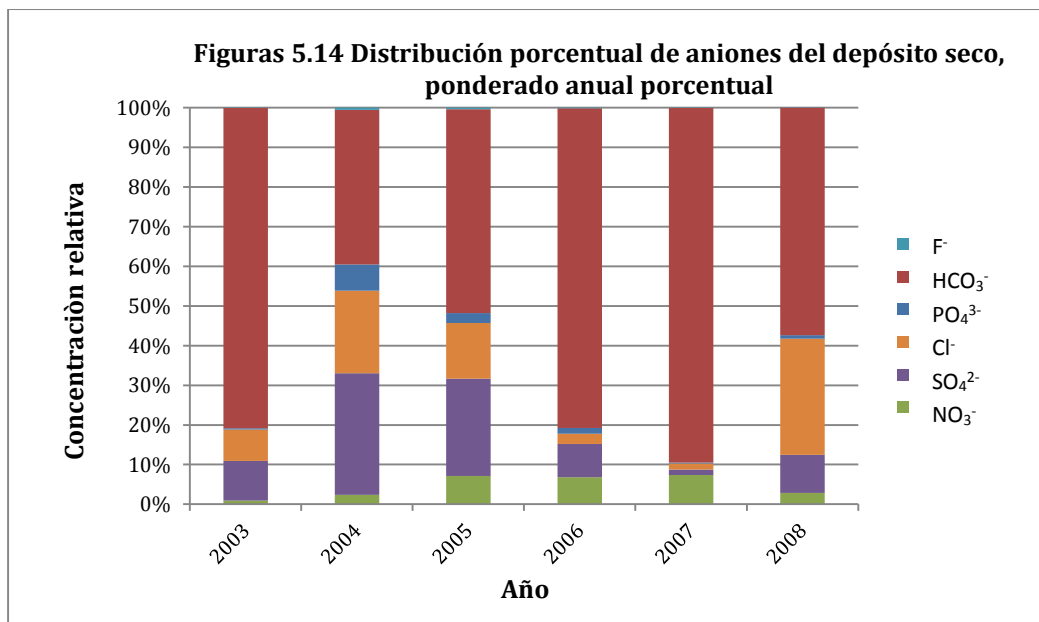


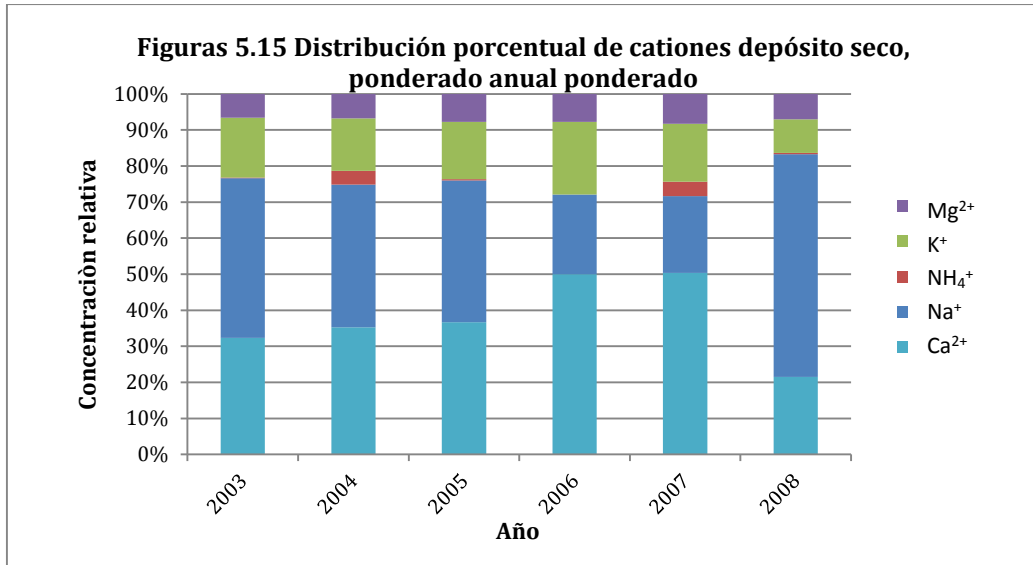
En el depósito seco, se observa claramente que los aniones predominantes para los años 2004 y 2005 son el  $\text{SO}_4^{2-}$  y el  $\text{Cl}^-$ ; mientras que en el año 2007 predomina el  $\text{NO}_3^-$  (Fig. 5.12). En cuanto a la concentración de cationes, el  $\text{Na}^+$  se ve claramente asociado al  $\text{Cl}^-$  y se observa un alto contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  en casi todos los años, principalmente en los años 2004 y 2007. (Fig. 5.12 y 5.13)





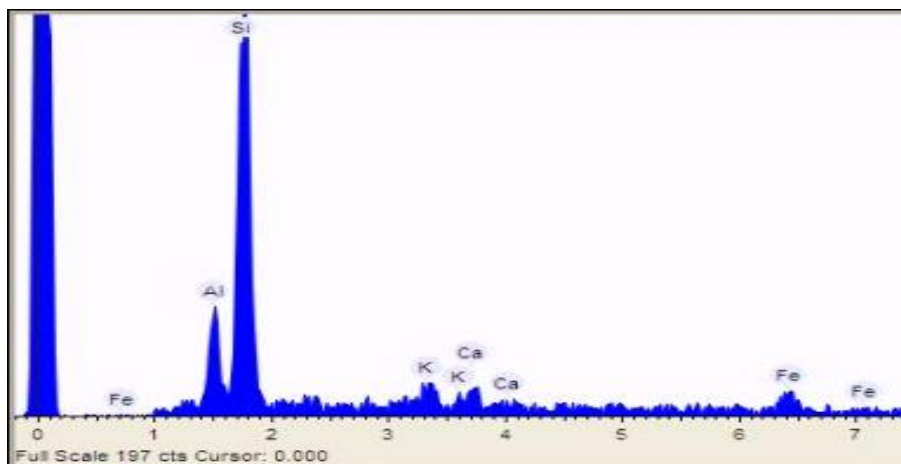
En las figuras 5.14 y 5.15 se observan la distribución porcentual de aniones y cationes, respectivamente, expresada de manera porcentual. El anión que más influencia tiene en el depósito seco es el bicarbonato, seguido de cloruros y sulfatos; el calcio y el sodio son los cationes más abundantes seguidos por potasio y magnesio.



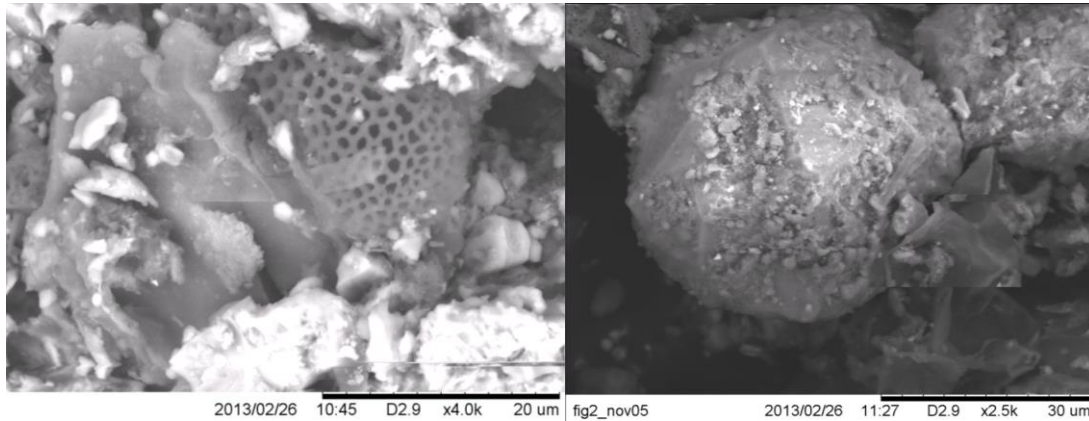


Se llevó a cabo, en el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM, la observación y caracterización de los sólidos insolubles con un microscopio electrónico de barrido HITACHI TM-1000, de bajo vacío, acoplado a un detector de energía dispersiva (EDS; por sus siglas en inglés), el cual permite coleccionar los Rayos X generados por la muestra y realizar diversos análisis semicuantitativos y de distribución de elementos.

Se seleccionaron las fases sólidas de 5 meses del año 2005: junio, agosto, septiembre, octubre y noviembre. A cada uno de ellos se les realizó la detección de elementos por triplicado, el promedio del material sedimentado está compuesto por silicio (60-70 %), aluminio (6-12%), potasio (4-10%), calcio (2-9%) y hierro (9-20%). En la figura 5.16 se muestra el espectro de noviembre de 2005, en donde claramente predomina el silicio.



**Figura 5.16 Espectro obtenido con microscopio electrónico de barrido de la fase sólida del depósito seco, luego de la digestión.**



**Figura 5.17** Imágenes tomadas con un microscopio electrónico de barrido de la fase sólida del depósito seco, luego de la digestión.

Debido a la composición, inferimos que se trata de silicatos, particularmente feldspatos, que son minerales formados por silicatos dobles de aluminio, de calcio, sodio o potasio (Strunz, 1970), que no interfieren con la acidez de las muestras debido a su baja solubilidad. Por lo tanto, la fase sólida insoluble del depósito seco no interfiere con el valor de pH y puede ser desechada.

En la figura 5.17, se muestran, del lado izquierdo un fragmento de coral, de un diámetro aproximado de 20  $\mu\text{m}$ , cuyo esqueleto está constituido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Veron 2000), que posiblemente no alcanzó a disolverse. Del lado derecho, se muestra un cuerpo formado en su mayoría por silicio.

### 5.1.3 Factor amortiguador

Los procesos físicos, químicos y biológicos ocurridos en la atmósfera, dan lugar a mecanismos de depósito, tanto húmedo, como seco. Cuando ocurre una precipitación, la lluvia arrastra cierta cantidad de contaminantes presentes en el aire, es decir, que la concentración de contaminantes, durante las primeras lluvias, depende de ambos tipos de depósito.

En ausencia de lluvia, las partículas presentes en el aire ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NaCl}$ ) son depositadas en el suelo por efecto de la gravedad; mientras que los gases ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{COV's}$ ) al entrar en contacto con la superficie, darán lugar a diversas reacciones químicas dependiendo de su reactividad y su solubilidad (Radojevic, 1992).

Por lo anterior, el análisis que interrelaciona ambos tipos de depósitos se vuelve necesario. Para ello se utiliza un factor de neutralización (F. N.) que involucre la cantidad de ácidos y bases presentes en la atmósfera, definido como:

$$F. N. = \frac{Base \left( \frac{\mu eq}{L} \right)}{\text{Ácido} \left( \frac{\mu eq}{L} \right)}$$

Los ácidos en la atmósfera pueden ser neutralizados por varias bases, principalmente amoníaco (NH<sub>3</sub>) y partículas de suelos carbonatados, por ejemplo carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). El NH<sub>3</sub> en su forma pura, se presenta en forma gaseosa, pero cuando neutraliza la acidez, se incorpora en la fase de aerosol (debido a la baja presión de vapor que adquiere). En particular, se condensa con el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> aerosol y se combina con HNO<sub>3</sub> gaseoso para producir un sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>x</sub>H<sub>2y-x</sub>SO<sub>4</sub>)<sub>y</sub>) o aerosol de nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), respectivamente. (Radojevic, M. 1992).

En las figuras de depósito seco (Fig. 5.14 y 5.15) existe una alta concentración de bicarbonatos y de calcio, lo que sugiere la presencia de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). Lo cual, sabemos que tiene su origen en la piedra caliza que conforman las construcciones de la zona arqueológica de El Tajín.

Conociendo la concentración de protones H<sup>+</sup> respecto al anión, se puede estimar la capacidad formadora de ácido sulfúrico, nítrico o clorhídrico. En la tabla 5.4 están indicadas las relaciones H<sup>+</sup>/anión. El H<sup>+</sup> respecto a los tres aniones (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup>), en el depósito seco es mucho menor (entre 98 y 99%). En el depósito húmedo, el sulfato es menor entre un 60 hasta un 90%; el protón de hidrógeno es más abundante que el nitrato para los primeros tres años del depósito húmedo, la suma de ambos depósitos da como resultado una correlación 1 a 1 para el último año y una concentración del protón inferior, para el resto de los años. Finalmente el protón es inferior que el cloruro, excepto para el año 2005.

La suma de los tres aniones respecto al H<sup>+</sup> indica que, este último, es inferior en una proporción 1 a 8 aproximadamente. (Tabla 5.5)



**Tabla 5. 4 Factor de neutralización del D. H., D.S. y la suma de ellos de los principales aniones respecto al H<sup>+</sup>**

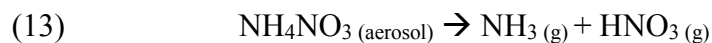
Año	H <sup>+</sup> / SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			H <sup>+</sup> / NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			H <sup>+</sup> / Cl <sup>-</sup>		
	D.H.	D.S.	D.H. + D.S	D.H.	D.S.	D.H. + D.S	D.H.	D.S.	D.H. + D.S
<b>2003</b>	0.6	0.02	0.0	1.4	0.2	0.0	0.4	0.0	0.0
<b>2004</b>	0.6	0.00	0.1	1.2	0.0	0.7	0.3	0.0	0.1
<b>2005</b>	0.6	0.00	0.1	1.7	0.0	0.2	1.4	0.0	0.1
<b>2006</b>	0.4	0.00	0.2	0.6	0.0	0.3	0.4	0.0	0.4
<b>2007</b>	0.5	0.01	0.4	0.5	0.0	0.1	0.6	0.0	0.5
<b>2008</b>	0.3	0.01	0.2	0.8	0.0	0.2	0.3	0.0	0.2
<b>2009</b>	0.1	-	0.2	0.4	-	1.0	0.2	-	0.5

**Tabla 5. 5 Factor de neutralización de ambos depósitos y la suma de ellos para los principales aniones respecto al H<sup>+</sup>**

Año	H <sup>+</sup> / SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + Cl <sup>-</sup>		
	D.H.	D.S.	D.H. + D.S
<b>2003</b>	0.22	0.01	0.1
<b>2004</b>	0.18	0.00	0.0
<b>2005</b>	0.33	0.00	0.0
<b>2006</b>	0.14	0.00	0.1
<b>2007</b>	0.17	0.00	0.0
<b>2008</b>	0.13	0.00	0.0
<b>2009</b>	0.05	-	0.0

Para conocer el efecto de las bases presentes en la atmósfera, que podrían neutralizar a los tres aniones que, para este caso particular, están fuertemente involucrados en la acidez de los depósitos húmedo y seco en El Tajín, se analiza la concentración de estos respecto al amoníaco y al calcio.

El amoníaco que neutraliza al H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> forma el sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), con el cloruro se forma el cloruro de amonio (NH<sub>4</sub>Cl) y finalmente con el nitrato se forma la sal llamada nitrato de amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), que es un aerosol que tiene la facilidad de transportarse en la atmósfera y en ciertas condiciones atmosféricas se puede disociar nuevamente:



Para los tres casos, la relación del ion amonio respecto al anión es muy grande (Tabla 5.6). En el depósito húmedo, la concentración de sulfato es del 30 al 70% mayor; respecto al nitrato, la concentración del ion amonio es 1 a 1 y en ocasiones 50 veces mayor. Como ya se ha mencionado, no es tan bueno, ya que el aerosol podría disociarse y se obtendría nuevamente el HNO<sub>3</sub>. Para el cloruro, en algunos casos la concentración es 50% menor y

para otros, 50% mayor respecto al ion amonio. Como se observa, para la suma de los depósitos, la concentración de  $\text{NH}_4^+$  es inferior.

**Tabla 5. 6 Factor de neutralización del D.H., D.S. y la suma de ellos de los principales aniones respecto al  $\text{NH}_4^+$**

Año	$\text{NH}_4^+/\text{SO}_4^{2-}$			$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$			$\text{NH}_4^+/\text{Cl}^-$		
	D.H.	D.S.	D.H. + D.S	D.H.	D.S.	D.H. + D.S	D.H.	D.S.	D.H. + D.S
2003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	0.7	0.0	0.1	1.5	0.0	0.7	0.4	0.0	0.1
2005	0.4	0.0	0.1	1.2	0.1	0.2	1.0	0.0	0.1
2006	0.7	0.0	0.2	1.1	0.0	0.3	0.8	0.0	0.4
2007	0.5	0.4	0.4	0.5	0.1	0.1	0.7	0.4	0.5
2008	0.3	0.2	0.2	1.0	0.1	0.2	0.4	0.1	0.2
2009	0.2	-	0.2	1.0	-	1.0	0.5	-	0.5

El calcio también es de gran interés, pues se puede observar en la tabla 5.7 que hay una gran concentración de este catión en el depósito seco, que en el húmedo, siendo más abundante en un gran porcentaje respecto a los aniones de interés.

**Tabla 5. 7 Factor de neutralización del D.H., D.S. y la suma de ellos de los principales aniones respecto al  $\text{Ca}^{2+}$**

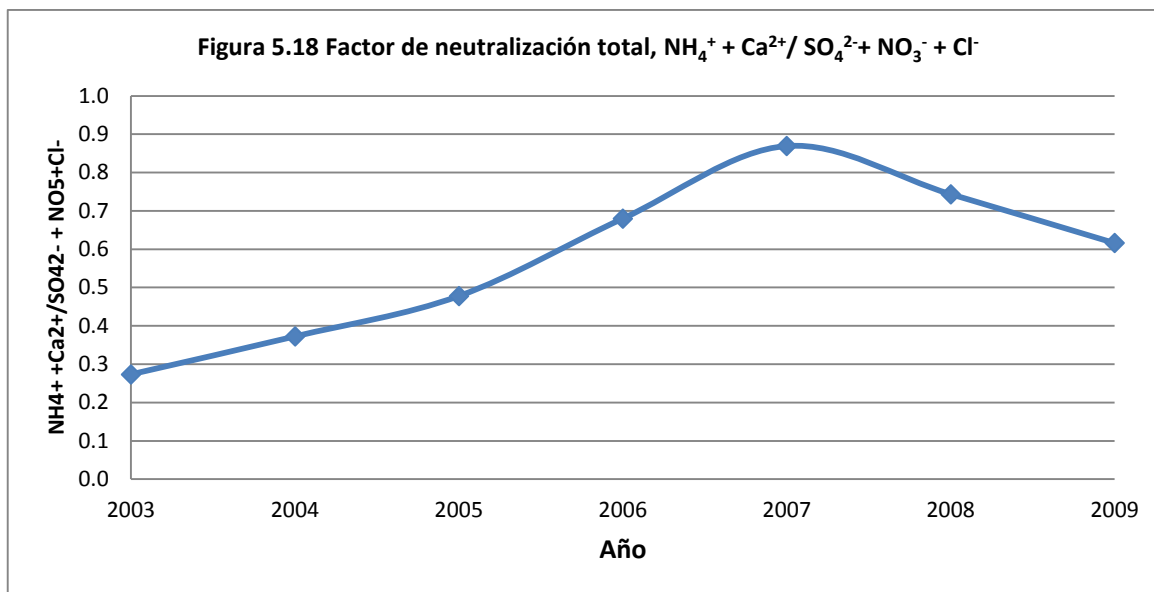
Año	$\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$			$\text{Ca}^{2+}/\text{NO}_3^-$			$\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$		
	D.H.	D.S.	D.H. + D.S	D.H.	D.S.	D.H. + D.S	D.H.	D.S.	D.H. + D.S
2003	0.3	0.9	0.7	0.7	12.1	3.2	0.2	0.8	0.5
2004	0.5	1.0	0.9	1.0	6.7	4.2	0.3	0.6	0.6
2005	0.2	1.0	0.9	0.5	4.3	3.7	0.4	1.3	1.2
2006	0.7	1.5	1.3	1.2	2.4	2.0	0.8	3.7	2.2
2007	0.6	4.3	3.5	0.6	1.4	1.3	0.8	4.9	4.2
2008	1.4	2.5	2.0	4.3	1.6	2.0	1.8	2.2	2.0
2009	0.8	-	0.8	3.6	-	3.6	1.7	-	1.7

Para conocer la influencia de los aniones y los cationes en la neutralización total de los depósitos húmedo y seco, se hace un balance total (Tabla 5.8)

**Tabla 5. 8 Factor de neutralización de ambos depósitos y la suma de ellos para los principales aniones respecto al  $\text{H}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$**

Año	$(\text{NH}_4^+ + \text{Ca}^{2+}) / (\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-)$		
	D.H.	D.S.	D.H. + D.S
2003	0.1	0.4	0.3
2004	0.4	0.4	0.4
2005	0.3	0.5	0.5
2006	0.6	0.8	0.7
2007	0.4	1.2	0.9
2008	0.8	0.9	0.7
2009	0.6	-	0.6

De la tabla 5.8, se infiere que para los depósitos húmedo y seco, la concentración de cationes es inferior que la de los aniones, excepto para el D.S. en el año 2007. Sin embargo, esta diferencia va disminuyendo, ya que la concentración de cationes aumenta y la de aniones disminuye. Es decir, existe una neutralización con el paso de los años, aunque para los últimos dos años esta tendencia decrece nuevamente:



## 5.2 Modelos atmosféricos

La calidad del aire depende en gran medida de la dinámica de la atmósfera, es decir la dirección y fuerza de los vientos, la radiación solar, la temperatura, la humedad y las precipitaciones. En este caso, se conoce la concentración de los iones que conforman el depósito ácido atmosférico en la zona arqueológica de El Tajín, pero es necesario conocer su procedencia, es decir, identificar las fuentes de emisión de los precursores del depósito ácido atmosférico, mediante las trayectorias del viento.

### 5.2.1 Vector del viento en la zona arqueológica de El Tajín

La dispersión de los contaminantes emitidos desde una fuente, depende de la velocidad y dirección del viento. En la zona arqueológica de El Tajín, las rosas de vientos (Anexo A.2), muestran que las direcciones del viento de los *promedios anuales*, provienen del Norte y/o Noroeste, cuyas velocidades alcanzan hasta  $4.0 \text{ ms}^{-1}$ .

Al hacer la evaluación mensual, *promedios mensuales*, se observa una mayor tendencia de los vientos provenientes del Norte, de diciembre a mayo, con velocidades aproximadas a 2

$\text{ms}^{-1}$ . De junio a noviembre la dirección de los vientos proviene de todas las direcciones con una clara tendencia de los vientos del Norte. Para estos meses la velocidad del viento supera los  $10 \text{ ms}^{-1}$ .

Por la localización geográfica de México, los vientos dominantes de la zona del Golfo de México, provienen del Este y del Norte (Fig. 5.19a). Los vectores de viento mensual, indican que los vientos provienen primordialmente del Este y Sureste (Anexo A.2). Sin embargo, los eventos de lluvia cuyos valores de pH fueron extremos, se presentaron cuando los vientos provenían del Norte, o en condiciones atmosféricas inestables, como ciclones (Fig. 5.19 b, c y d).

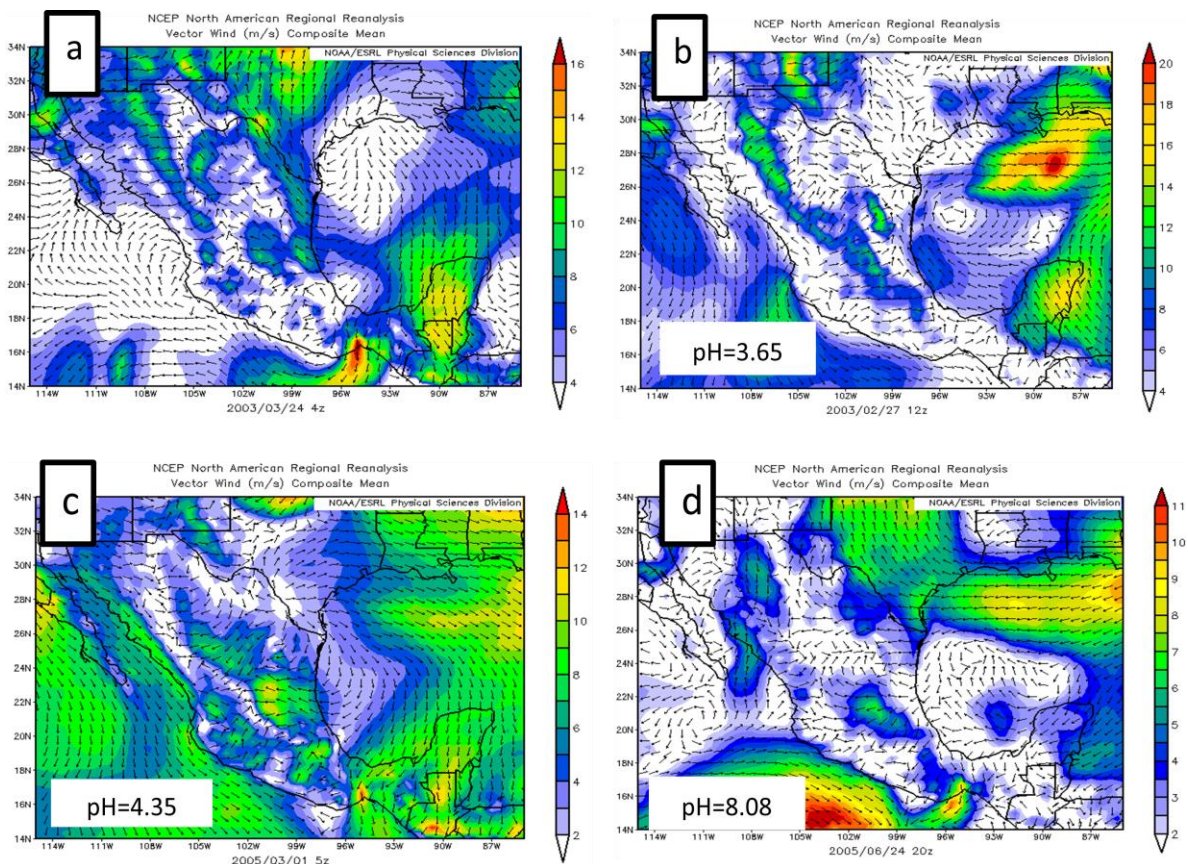


Figura 5.19 Vectores de viento, a) del N, atmósfera estable; b) atmósfera inestable, pH=3.65; c) del N, atmósfera estable, pH=4.35; d) atmósfera inestable pH=8.08.

La zona arqueológica de El Tajín está ubicada, aproximadamente, a 30 km del mar. La interacción de los vientos globales en el Golfo de México, con la proximidad del mar, da como resultado la presencia de vientos locales. A este efecto se le conoce como brisa marina, en la cual la radiación solar, eleva más la temperatura de la tierra que la del mar. El

aire que se encuentra sobre la superficie terrestre se calienta y al perder densidad, tiende a elevarse, con lo que disminuye localmente la presión, en consecuencia se produce un gradiente de presión desde el agua hacia la tierra. El aire frío que se encuentra sobre el mar se mueve hacia tierra para ocupar el lugar que ha dejado el aire caliente y refresca las costas con *brisas marinas*. El aire caliente ascendente se mueve hacia el mar en altura, desciende sobre el mar y forma una celda de convección. Durante la noche el efecto es el contrario: el mar es más caliente que el continente y la circulación del aire se invierte y da lugar a una *brisa terrestre*. La brisa marina puede llegar a velocidades de 4 a 7 ms<sup>-1</sup>, la brisa terrestre no suele superar los 2 ms<sup>-1</sup> (Casas, 1999).

Para apreciar la influencia de la brisa marina, se consideran la época de estiaje y la época de lluvias. En la figura 5.5, el mes con menor volumen de lluvias fue marzo, mientras que septiembre fue el de mayor volumen, por lo que se seleccionó un día de cada uno de estos meses.

La figura 5.20 representa un día de estiaje, en el cual no se presentaron eventos de lluvia, la velocidad del viento presenta valores de 1.6 ms<sup>-1</sup> por la tarde, las mañanas son muy estables. Durante la madrugada, los vientos provienen del oeste; conforme avanza el día, los vientos provienen del Este, es decir, que hay brisa marina.

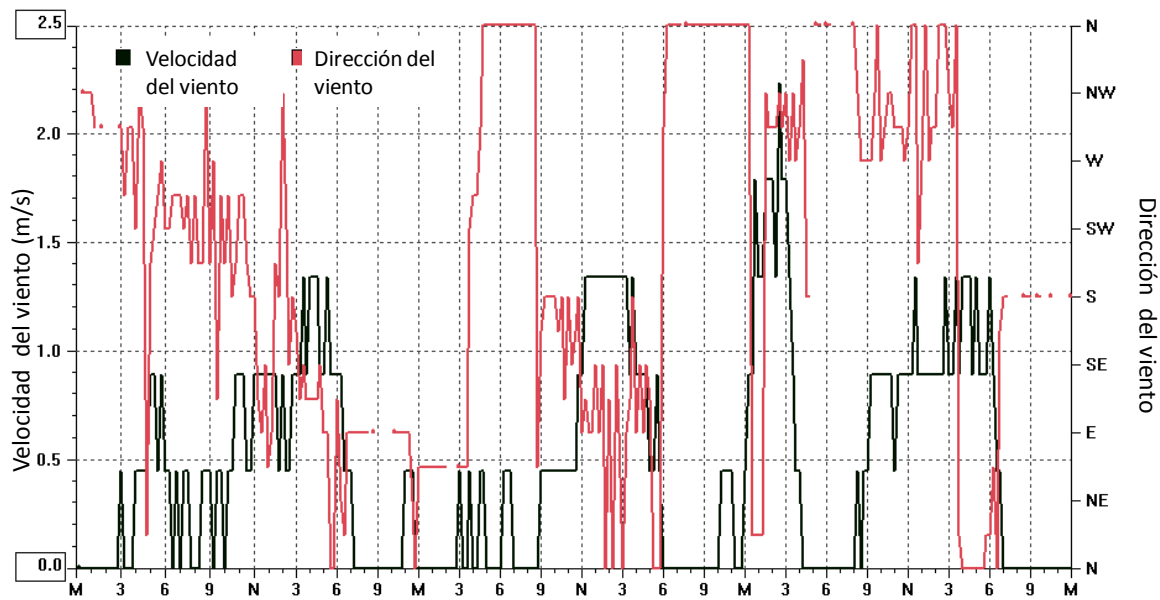


Figura 5.20 Velocidad y dirección del viento 24 horas, temporada de estiaje (17/3/03)

Para los meses de lluvia, en un día se pueden presentar varios eventos de precipitación. El comportamiento de velocidad del viento no varía mucho respecto al estiaje. La dirección del viento indica que durante la madrugada, provienen del oeste. Para el medio día se presentan corrientes por el oeste, este y sur, después de las 14:00 h, los vientos provienen del Norte (Fig. 5.21).

Figura 5.21 Velocidad y dirección del viento 24 horas, temporada de lluvias (15/9/03)

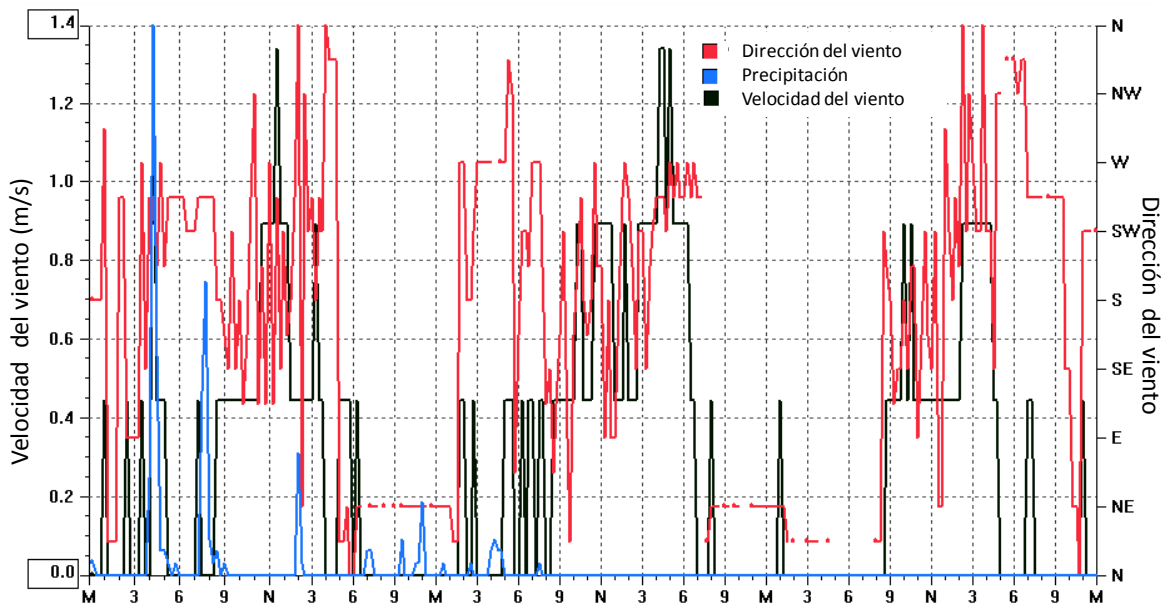


Figura 5.21 Velocidad y dirección del viento 24 horas, temporada de lluvias (15/9/03)

### 5.2.2 HYSPLIT

Para los siete años de estudio, se seleccionaron los 10 eventos de precipitación con los menores valores de pH. Se trazaron las trayectorias de retroceso con el modelo HYSPLIT, disponible a través de la NOAA (Draxler, 2013). Se empleó la base de datos de “REANALYSIS”, que almacena datos meteorológicos desde 1948 hasta el 2010.

El tiempo requerido para que un precursor se convierta en depósito ácido es gradual y puede tomar, inclusive, cuestión de días (Masters y Wendell, 2008). En este caso, se supuso que una partícula viaja en línea recta a una velocidad de entre 1.6 y 4.0 m/s (valores obtenidos de las gráficas de velocidad y las rosas de vientos de El Tajín (Anexo A.2)) y recorre una distancia de hasta 700 km, distancia que hay entre El Tajín y zonas industriales

importantes. Con base en ello, se seleccionó un tiempo de trayecto igual a 48 horas. Se empleó una malla de 30 km x 30 km; con un dominio dado por las siguientes coordenadas: 14° N a 34° N y 245° O a 275° O.

Para correr el modelo se deben introducir la fecha y hora a la cual se presentó el evento de depósito ácido húmedo, así como los datos de la ubicación de la zona arqueológica de El Tajín y la altitud a la que se quieren correr las trayectorias:

- Longitud: 20.44° N
- Latitud: 262.62°O
- Altura: 500 m

En la tabla 5.9 se presenta el comportamiento de los vientos, obtenido con las trayectorias de retroceso (Anexo A.3). Entre el 40 y el 80% de los eventos de depósito ácido atmosférico fueron consecuencia de vientos provenientes del Este, es decir son acarreados desde el Golfo de México, lo cual se ve reflejado en la alta concentración de los iones cloruro y sodio que están presentes en el agua de mar. Entre el 10 y 50% provienen del Norte y sólo los años 2004 y 2009 presentaron eventos importantes de depósito ácido, cuyos precursores posiblemente fueron emitidos desde el Sur.

**Tabla 5. 9 Porcentaje de proveniencia de los vientos de precursores de depósito ácido atmosférico, empleando trayectorias de retroceso.**

Año	Este (%)	Norte (%)	Sur (%)
2003	80	20	0
2004	40	50	10
2005	60	10	30
2006	80	20	0
2007	80	20	0
2008	80	20	0
2009	70	30	0

Debido a que las trayectorias de retroceso se obtienen a partir de la resolución de una ecuación, es necesario cerciorarse de que se está resolviendo adecuadamente y que el vector de viento efectivamente sigue la posición indicada. Para ello, el modelo se corre cambiando

discretamente las coordenadas de  $X_0$ , es decir las coordenadas de El Tajín. A manera de ejemplo se muestran en la figura 5.22 las trayectorias de retroceso para el día 27 de enero de 2003 a las 12 UTC, con coordenadas:

- $X_{El\ Tajin}$ : latitud  $20.44^\circ N$ , longitud  $262.62^\circ O$
- $X_{0,1}$ : latitud  $20.6^\circ N$ , longitud  $262.80^\circ O$
- $X_{0,1}$ : latitud  $20.32^\circ N$ , longitud  $262.40^\circ O$

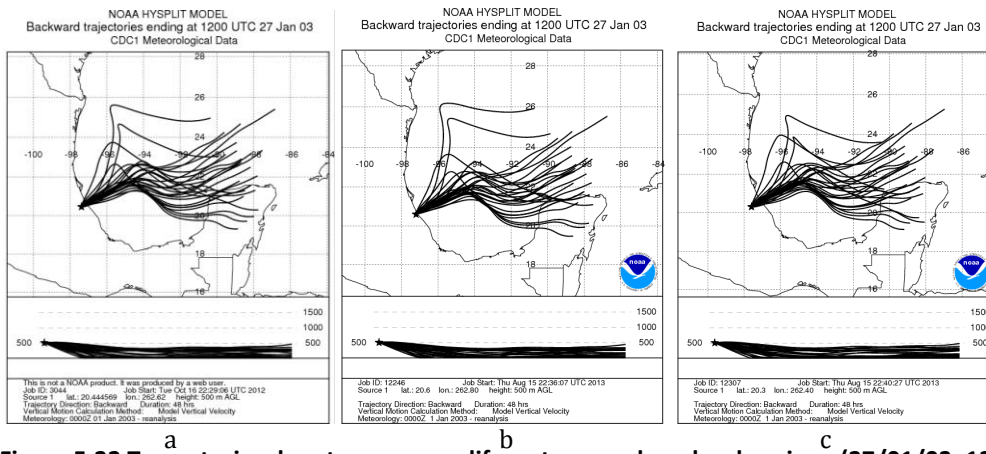


Figura 5.22 Trayectorias de retroceso con diferentes coordenadas de origen (27/01/03; 12UTC)

De igual manera, es importante ver que la trayectoria de retroceso que parte de El Tajín coincide con la trayectoria hacia adelante desde la fuente identificada, como se muestra en la Fig. 5.23:

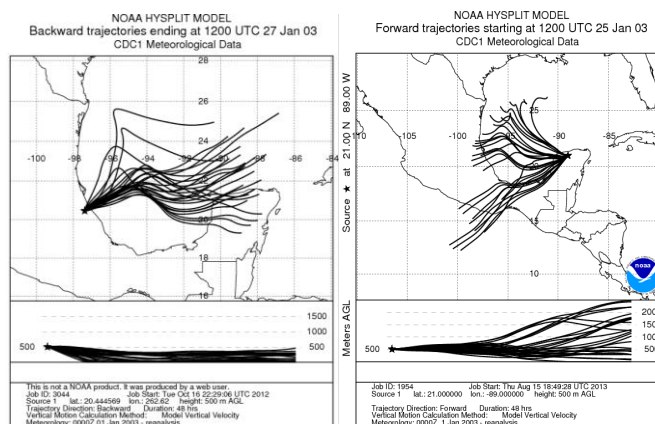


Figura 5.23 Trayectorias de retroceso desde El Tajín y hacia adelante desde la fuente (27/01/03; 12UTC y 25/01/03; 12UTC, respectivamente 48 horas de duración)



Finalmente, las trayectorias de retroceso obtenidas para cada evento, se compararon con los vectores de viento para esos mismos días, con la información meteorológica del reanálisis regional de Norte América (Fig. 5.24)

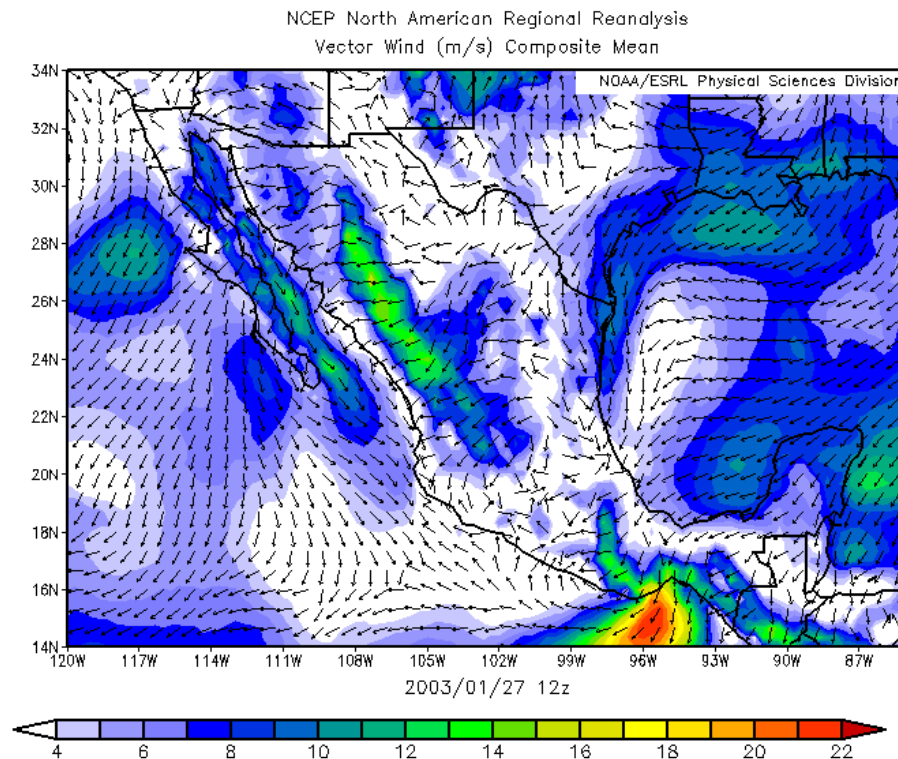


Figura 5.24 Vector de vientos (27/01/03; 12UTC)

### 5.3. Evaluación del impacto

La evaluación del impacto, en la zona arqueológica de El Tajín, consiste en la identificación y cuantificación de los efectos, sobre los monumentos, causados por el depósito ácido atmosférico. Lo anterior se llevó a cabo por medio de la matriz de Leopold y el método de Batelle-Columbus, respectivamente.

#### 5.3.1 Matriz de Leopold

Para identificar las acciones que generan efectos sobre los factores ambientales, relacionados a la lluvia ácida, se deben analizar las consecuencias y características de la

zona de estudio, considerando que el municipio de Papantla tiene una precipitación pluvial media anual de 1,186 mm, la que se puede considerar como alta.

Además, el municipio de Papantla tiene 3,220 pozos petroleros en explotación (INAFED, 2010).

### Cuerpos de agua

En el caso de cuerpos de agua, la lluvia ácida puede depositarse directamente sobre arroyos, lagos y pantanos, o bien, puede ser depositada sobre estos, luego de caer sobre bosques, campos, edificios y carreteras. En general, los lagos tienen un pH entre 6 y 8, aunque existen algunos con niveles ácidos. Cuando el suelo no provee al agua de sustancias amortiguadoras, el valor del pH baja, liberando el aluminio contenido en los suelos, el cual es altamente tóxico para muchas especies de organismos acuáticos (US-EPA, 2008).

Además, el nitrógeno contenido en la lluvia ácida provoca eutrofización, un enriquecimiento de nutrientes en los cuerpos de agua, causando cambios ecológicos en las redes alimentarias. Se estima que del 10 al 45% del nitrógeno producido por actividades humanas que llega a los estuarios y los ecosistemas costeros, es transportado y depositado a través de la atmósfera (US-EPA, 2008).

Los cuerpos de agua presentes en El Tajín son los ríos Tecolutla y Cazonas, el municipio de Papantla tiene 17 km de playas vírgenes.

### Suelos y bosques

En el caso de suelos y bosques, la lluvia ácida, aunada a factores de estrés ambiental, provoca un crecimiento más lento, lesión o muerte de los bosques por efecto de la liberación de sustancias tóxicas, principalmente aluminio, que a su vez se pueden reincorporar a los cuerpos de agua. El suelo puede neutralizar parte o la totalidad de la acidez del agua de lluvia ácida (capacidad amortiguadora), a pesar de ello, los árboles se siguen viendo expuesto al efecto ácido de la lluvia. Por otro lado, los cultivos de alimentos no son seriamente afectados debido al uso de fertilizantes que de igual forma, causan un efecto amortiguador (US-EPA, 2008).

El Tajín tiene un suelo de tipo feozem, regosol y vertisol, todos ellos tienen un alto contenido de carbonato de calcio. Su ecosistema está dominado por el bosque subtropical perennifolio, 14% de zona boscosa con árboles de maderas preciosas, 75% de pastizales y zonas agrícolas, de los cuales el 68% del territorio municipal está 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.

Los datos recabados en Inglaterra en el año de 1987, indican que las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> pueden provenir hasta un 73% y 35% respectivamente, de centrales eléctricas, respecto al total de las fuentes. Además un 45% de las emisiones de NO<sub>x</sub> provienen de transportes que circulan por carreteras (Radojevic, 1992). Como se ha mencionado ya, las trayectorias indican que los vientos que acarrearán una mayor acidez, provienen del Este y del Norte, donde existen centrales termoeléctricas, tales como la de Poza Rica y la de Adolfo López Mateos.

#### Materiales y construcciones

En los materiales, la lluvia ácida provoca la corrosión de metales, así como el deterioro de pintura y piedras, por ejemplo en mármol y caliza. Lo anterior, causa la degradación de objetos, estatuas o monumentos culturales, edificios, puentes y coches, que requieren altos costos de mantenimiento (US-EPA, 2008).

#### Visibilidad

La visibilidad disminuye por efecto de los sulfatos y nitratos formados en la atmósfera a partir de las emisiones de SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. Según la US-EPA, las partículas de sulfato representan del 50 al 70 % de la reducción de visibilidad, en la parte oriental de Estados Unidos de América (US-EPA, 2008).

#### Salud

Los SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> presentes en la atmósfera forman partículas finas de sulfato y de nitrato, que pueden ser transportadas largas distancias por los vientos y ser inhaladas por seres vivos, alojándose en los pulmones o penetrando al torrente sanguíneo; existe un gran aumento de las enfermedades y muertes prematuras por padecimientos cardiacos y

pulmonares. Los aerosoles de sulfato representan alrededor del 25% de las partículas finas (US-EPA, 2008).

Se identificaron 11 acciones que pueden causar efectos ambientales relacionados con la lluvia ácida, correspondientes a 5 categorías distintas. De igual forma, se identificaron 22 factores ambientales susceptibles a estas acciones, englobadas en tres grandes categorías (Tabla 5.10).

**Tabla 5. 10 Acciones y factores de la Matriz de Leopold**

ACCIONES	FACTORES			
<b>A. TRANSFORMACIÓN DEL TERRITORIO Y CONSTRUCCIÓN</b>	<b>A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS</b>		2. FAUNA a. Aves b. Animales terrestres	
a. Autopistas y carreteras	1. SUPERFICIE TERRESTRE	a. Suelos	<b>C. FACTORES CULTURALES</b>	
<b>B. EXTRACCIÓN DE RECURSOS</b>		b. Subterráneas		
a. Perforación de pozos b. Explotación forestal		c. Calidad		1. USO DE TERRITORIO a. Agricultura b. Zona residencial
<b>C. PROCESOS</b>		d. Erosión		c. Zona comercial
a. Abono y pastos (agricultura) b. Granjas y ganadería c. Generación energía eléctrica d. Industria e. Refinerías f. Serrerías (explotación de maderas)	2. AGUA	a. Subterráneas	2. RECREATIVOS a. Paisajes b. Monumentos	
<b>D. ALTERACIÓN DEL TERRENO</b>	3. ATMÓSFERA	a. Calidad (gases, partículas)	3. NIVEL CULTURAL a. Empleo	
a. Minas (jales)		a. Calidad del aire b. Lluvia ácida (Depósitos húmedo y seco)		
<b>E. CAMBIOS EN TRÁFICO</b>	<b>B. CONDICIONES BIOLÓGICAS</b>		4. SERVICIOS E INFRAESTRUCTURA a. Estructuras b. Red de transportes c. Red de servicios d. Eliminación de residuos	
a. Automóviles y camiones	1. FLORA	a. Cosechas		

Tabla 5.11 Matriz de Leopold			II. Acciones que pueden causar efectos ambientales										EVALUACIÓN						
			A.	B.	C. PROCESOS				D.	E.	Total de impactos	Positivos /negativos	Magnitud	Impacto					
			a. Autopistas y carreteras	a. Perforación de pozos	b. Explotación forestal	a. Abono y pastos	b. Granjas y ganadería	c. Generación energía eléctrica	e. Industria	f. Refinerías					g. Serrerías (expln. maderas)	a. Minas	a. Automóvil y camiones		
ACCIONES PROPUESTAS																			
I. Factores ambientales	A. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS	1. GEOLOGÍA	a. Suelos	3-1	7-2	9-3	7-2	5-2				8-3	7-3	3-2	8	-8	-43	-16	
			b. Subterráneas		7-2	7-4	7-2							10-3		4	-4	-31	-11
			c. Calidad	3-1	3-2	7-4	7-6		10-10	6-2	4-2			10-4		8	-8	-45	-31
			d. Erosión	8-2	8-2	5-6	2-2	5-2						8-2	10-2	7	-7	-30	-16
		2. AGUA	a. Subterráneas y superficiales			6-4	7-2		7-2	7-2	7-2	6-2	10-2		7	-7	-28	-9	
		3. ATMÓSFERA	a. Calidad (gases, partículas)	5-2			10-6		10-10	4-10	6-10	6-7	10-10	8-7	8	-8	-29	-31	
	b. Lluvia ácida (depósito húmeda y seca)			4-8	5-2	8-6		10-10	4-10	6-10	4-7	4-6	6-7	9	-8	-36	-39		
	c. Clima (micro, macro)				8-8				6-2	6-2	8-2			4	-4	-9	-7		
	B. COND. BIOLÓGICAS	1. FLORA	a. Cosechas y bosques			5-2	10-2	4-2		6-1	4-1	7-1	4-3	7	-6	-5	-4		
		2. FAUNA	a. Aves	3-1		8-6				6-1	6-1	9-1	4-1	6	-6	-11	-5		
	b. Animales terrestres y acuáticos		3-3		8-6				6-1	6-1	7-1	4-1	6	-6	-9	-3			
	C. FACTORES CULTURALES	1. USO DE TERRITORIO	a. Agricultura	3-3		6-3	10-2	4-2		6-2	6-2	7-1	3-2	8	-7	0	0		
			b. Zona residencial	4-7					10-10	6-8	6-8		7-2	5	-1	19	31		
			c. Zona comercial	10-10						10-10	10-8	10-8	10-8	10-3	6	0	60	47	
2. RECREATIVOS		a. Paisajes	2-4		8-8			5-10	8-8	8-8	8-2	4-1	5-2	8	-8	-44	-35		
		b. Monumentos	2-2			2-10		5-10	6-8	6-8		4-6	6-7	7	-7	-27	-47		
		c. Lugares o monumentos históricos	2-2			2-10		5-12	6-8	6-8	4-4	4-6	6-7	8	-8	-31	-51		
3. NIVEL CULTURAL		a. Empleo	10-10	6-6				5-2	7-2	7-2		8-7	6	0	15	3			
4. SERVICIOS E INFRAESTRUCTURA		a. Estructuras	3-3											1	0	3	3		
		b. Red de transportes	10-10										10-9	2	0	20	19		
		c. Red de servicios	10-10					2-2					10-10	3	0	22	22		
	d. Disposición de residuos sólidos	3-4	5-3				8-8			4-8	10-10		5	-4	-24	-25			
			-10	-6	-12	-8	-4	-7	-12	-12	-13	-16	-6	133	-107	-263	-205		

### 5.3.2 Método de Batelle-Columbus

La cuantificación de los datos obtenidos en la matriz de Leopold, se realizó con el método Batelle-Columbus. Primero se calificaron los factores ambientales que presentaron una mayor importancia y magnitud en los efectos ocasionados por el depósito ácido atmosférico, repartiendo 1000 puntos en total. El segundo paso fue calificar los componentes de cada categoría, repartiendo los puntos de esta última. Finalmente, se reparten estos puntos sobre las medidas de cada parámetro, según los puntos que cada componente tuviera (Tabla 5.11).

La contaminación ambiental atmosférica tiene la mayor calificación, para los fines de esta tesis, debido a que los óxidos de nitrógeno y azufre son los precursores del depósito ácido que, en contacto con los materiales y la biota de la zona arqueológica de El Tajín, produce un deterioro significativo, que debe ser analizados por especialistas de cada área.

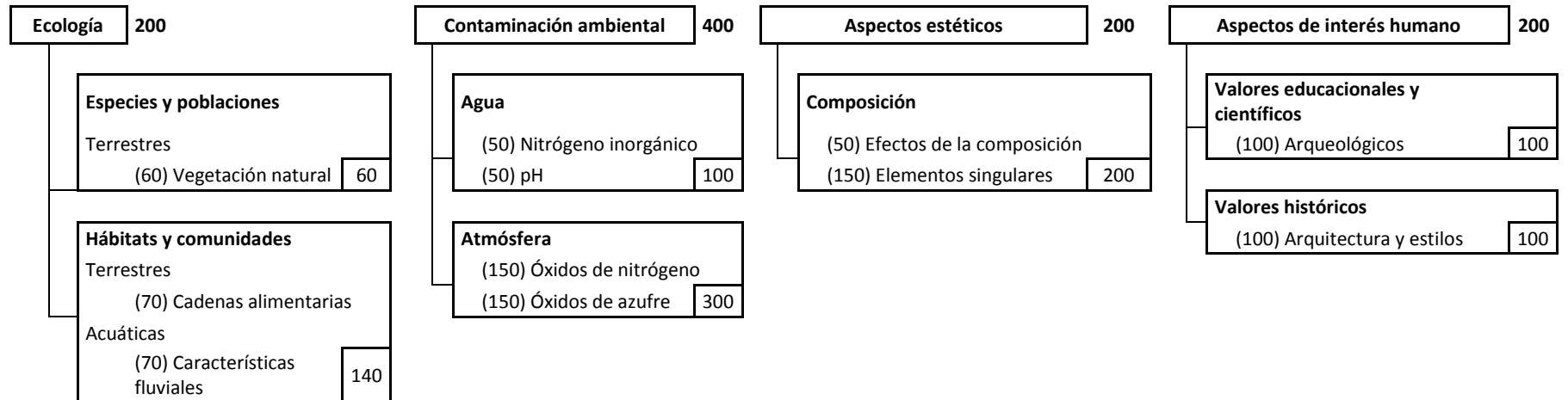
El deterioro de la roca caliza, por efecto de la lluvia ácida, se debe tanto a la solubilidad del material, causado por los iones que le confieren un pH ácido a la lluvia, como al desgaste producido por el impacto de las gotas. En ocasiones, la pérdida del material depende en su mayoría del volumen de precipitación y es independiente del pH (Reddy, 1988).

Las recesiones superficiales de los monumentos construidos con roca caliza en México, por efecto del pH y del volumen del depósito ácido, corresponden a 3.5 - 4.94  $\mu\text{m año}^{-1}$  (Soto, 1999); 5.08 - 9.91  $\mu\text{m año}^{-1}$  (Torres, 2009). Si además, se consideran los procesos erosivos como la velocidad del viento y el impacto de lluvia, los valores oscilan entre 14.25 y 28.63  $\mu\text{m año}^{-1}$  (Torres, 2009). El parámetro de tendencia central de los valores anteriores es igual a 16.06  $\mu\text{m año}^{-1}$ .

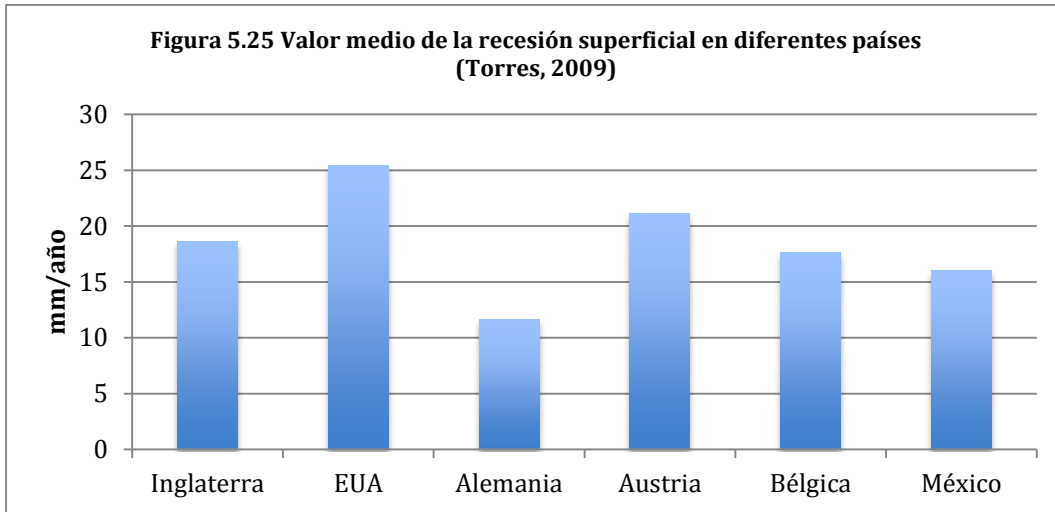
Suponiendo que, de forma constante, se obtuvo la recesión superficial más alta (28.63  $\mu\text{m año}^{-1}$ ) a partir del 2003, año en que comenzó a muestrearse la zona arqueológica de El Tajín, la recesión total para los 7 años de estudio es de 200.41  $\mu\text{m}$ . Si las condiciones ácidas se mantuvieran constantes, aproximadamente en 36 años el deterioro de estos monumentos sería de 1 mm, profundidad de algunos grabados presentados sobre monumentos arqueológicos.

Es importante conocer el impacto que existe en la actualidad, sobre la zona arqueológica de El Tajín, y compararlo con el impacto que se podría tener en caso de que

Tabla 5.12 Método de Batelle -Columbus



se lleve a cabo el PSD. El valor de recesión superficial que se consideró, fue el parámetro de tendencia central, es decir  $16.065 \mu\text{m año}^{-1}$ . Este valor se comparó con las recesiones superficiales presentadas en diferentes países, sobre el mismo material y en la gráfica 5.25 se observa que la recesión superficial en México, se encuentra en un valor intermedio.



Las medidas deben traducir a unidades adimensionales entre 0 y 1, según el índice de calidad, empleando una función de transformación adecuada. En este caso se evaluará el parámetro de *Valores históricos*, por la importancia que tiene la zona arqueológica de El Tajín (Fig 5.26).

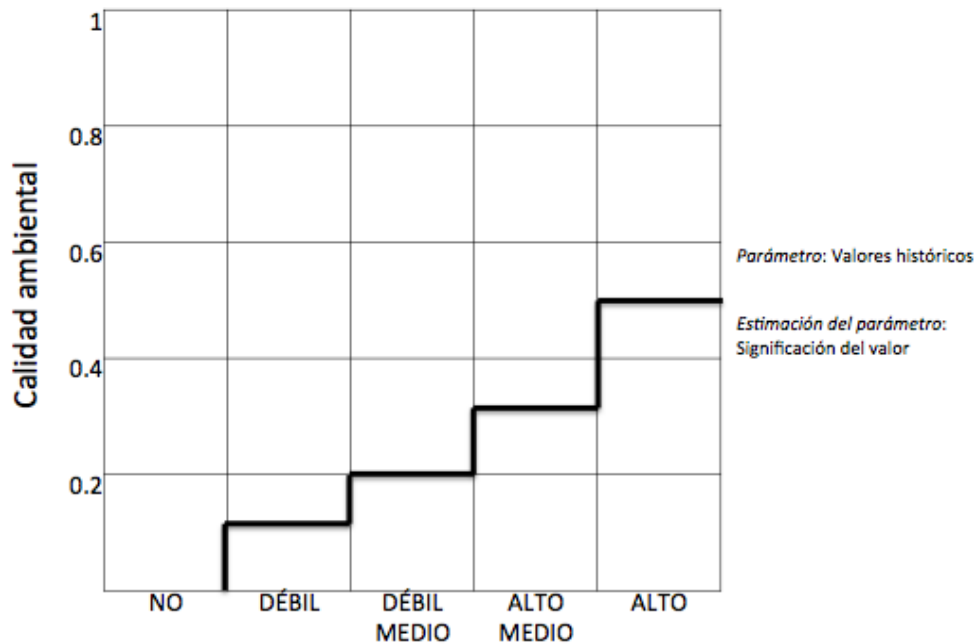


Figura 5.26 Calidad ambiental de valores históricos, método Batelle-Columbus



El deterioro se considera “alto medio”, que al transferir a unidades de calidad ambiental (CA), le corresponde un valor igual a 0.3. Este valor se pondera respecto a la importancia relativa (IR) de la tabla 5.12, para obtener las unidades de impacto ambiental (UIA):

$$UIAi_{(\text{sin PSD})} = CA(IR) = 0.3 * 100$$

$$UIAi_{(\text{sin PSD})} = 30$$

Si se aplica el PSD en la zona arqueológica de El Tajín, el deterioro podría disminuir de forma significativa, esperando llegar hasta un valor débil, cuya CA = 0.1, entonces:

$$UIAi_{(\text{con PSD})} = CA(IR) = 0.1 * 100$$

$$UIAi_{(\text{con PSD})} = 10$$

Se calcularon también las UIAi de los parámetros “valores educacionales y científicos” y de “composición”, que correspondieron, sin proyecto a 30 y 60, con proyecto a 10 y 20, respectivamente.

El impacto neto, se calcula con la sumatoria de las UIAi calculadas para cada parámetro. Para ello, se requiere un grupo multidisciplinario especializado en cada área. En esta tesis, únicamente se muestra el impacto neto sobre la recesión superficial de la zona arqueológica de El Tajín y sus efectos estéticos y de interés humano:

$$UIA_{(\text{debida al PSD})} = UIAi_{(\text{sin PSD})} - UIAi_{(\text{con PSD})}$$

$$UIA_{(\text{debida al PSD})} = (30+30+60) - (10+10+20) = 120-40$$

$$UIA_{(\text{debida al PSD})} = 80$$

Reduciendo en 40 unidades el impacto ambiental, valor que nos habla de la importancia que tiene la aplicación del PSD.

#### **5.4 Prevención del deterioro ambiental significativo**

Aunque existe una disminución en la acidez del depósito húmedo, al paso de los años en el intervalo de 2003 a 2009, se sigue presentando este fenómeno atmosférico que gradualmente va deteriorando la zona arqueológica de El Tajín, lo que hace inminente realizar acciones de control.

#### **5.4.1 Fuentes existentes y nuevas de emisión de precursores de depósito ácido**

Anualmente se emiten 15 millones de toneladas de óxido de azufre por fuentes antropogénicas. Aproximadamente el 86% de estas fuentes son el resultado de la combustión de combustibles fósiles en fuentes fijas, en su mayoría por centrales eléctricas de carbón. Alrededor del 5% es producto de fuentes móviles y las únicas fuentes importantes de emisiones de azufre que no están asociadas a la combustión son la refinación de petróleo, la fundición de cobre y la fabricación de cemento (Masters y Wendell, 2008).

En el Reino Unido, por ejemplo, el 73% de las emisiones de SO<sub>2</sub>, el 35% de NO<sub>x</sub> y el 69% de HCl provienen de centrales eléctricas (Radojevic, 1992). Las fuentes emisoras de precursores de depósito húmedo ácido en la zona arqueológica de El Tajín, identificadas con las trayectorias de retroceso, en su mayoría provienen del Este, seguidas de trayectorias del Norte. Por otra parte, las rosas de vientos indican que la mayor parte de los vientos provienen del Norte, se puede hablar de una importante contribución en el depósito seco de precursores provenientes desde ese punto cardinal.

Dicho lo anterior, es importante considerar el impacto que puede estar ocasionando la “Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos”, ubicada en el municipio de Tuxpan, Veracruz a unos 60 km de El Tajín. Esta planta consume anualmente alrededor de 3.7 millones de m<sup>3</sup> de combustóleo y libera a la atmósfera 257,000 ton/año de SO<sub>2</sub>, 22,000 ton/año NO<sub>x</sub> y 17,000 ton/año de PM<sub>10</sub> (INE, 2003).

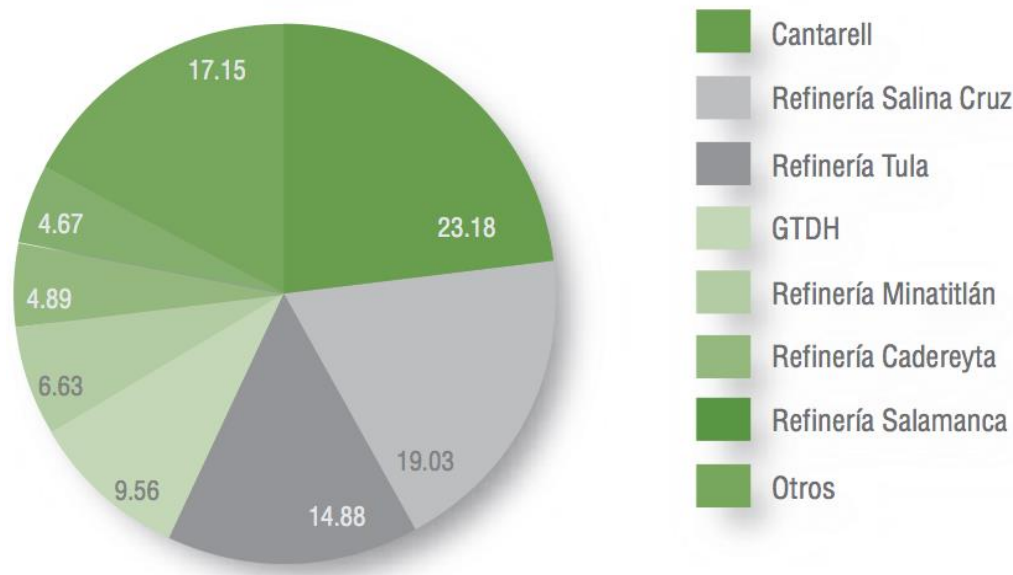
Otras fuentes importantes son los activos petroleros de Petróleos Mexicanos (PEMEX) (Fig. 5.27). Considerando que los vientos predominantes provienen del Norte y Este de El Tajín, las fuentes de precursores de lluvia ácida de interés son las refinerías de Madero y Cadereyta; en general los complejos procesadores de gas, así como las zonas productoras.



**Figura 5.27 Ubicación de las instalaciones de petróleos mexicanos (PEMEX, 2011)**

PEMEX es la mayor empresa de México y de América Latina, pues desarrolla toda la cadena productiva de la industria del petróleo, desde la exploración, hasta la distribución y comercialización de productos finales. En 2010, PEMEX obtuvo un rendimiento de operación de 545 mil 521 millones de pesos, registró ventas en el país por 683 mil 853 millones de pesos y los ingresos por exportaciones se ubicaron en 592 mil 907 millones de pesos (PEMEX, 2011).

En 2011, se emitieron 471,024 toneladas de SO<sub>x</sub>, mostrando una reducción del 50.2% en los últimos cuatro años, resultado de la disminución en la quema de gas amargo en el Activo de Explotación de Cantarell y del incremento de la recuperación de azufre en las Refinerías. Por otro lado, las emisiones de NO<sub>x</sub>, generadas por PEMEX, corresponden a 112,827 toneladas, las cuales tuvieron un incremento del 15.3% por el repunte en el consumo de combustóleo (Informe PEMEX, 2011). En la figura 5.28 se observa que los mayores contribuyentes son las refinerías, así como la plataforma de producción Cantarell.



**Figura 5.28 Participación de emisiones de SOx por instalación (PEMEX, 2011)**

Dentro de las perspectivas que PEMEX pretende implementar y que podrían tener un impacto sobre el sitio de interés son:

1) Mantener la plataforma de producción (Cantarell): Yacimiento petrolero que desde 1979 produjo barriles de petróleo, alcanzó un promedio de producción diaria de 3.1 millones en el periodo 2000-2010. A partir del 2004, inició su proceso natural de declinación. Para compensar dicha reducción en la producción, se ejecutaron nuevos proyectos como Ku-Maloob-Zaap (800 000 barriles diarios en 2011), Ixtal-Manik y Delta del Grijalva, lográndose una producción a finales de diciembre 2010, de 2 millones 574 mil barriles diarios. Se estima que la producción de Cantarell al cierre de la presente administración, será de alrededor de 416 mil barriles por día, lo que implica una reducción adicional de aproximadamente 35 mil barriles de sus niveles actuales (PEMEX, 2011).

2) Desarrollar campos complejos y reactivar campos marginales (pozos que se exploraron y taparon, o que ya terminaron su vida productiva, pero en los que todavía hay petróleo) e incrementar y mantener el aprovechamiento de gas natural (PEMEX, 2011).

A pesar de los nuevos proyectos y la reactivación de pozos, la reserva de hidrocarburos no ha incrementado, inclusive desde 1993 ha ido disminuyendo (Fig. 5.29). Se prevé una producción de 30 años, considerando las reservas totales con las que se cuenta

actualmente. Por lo que se puede considerar que no habrá un incremento significativo en las emisiones de precursores de depósito ácido, por parte de estas fuentes.

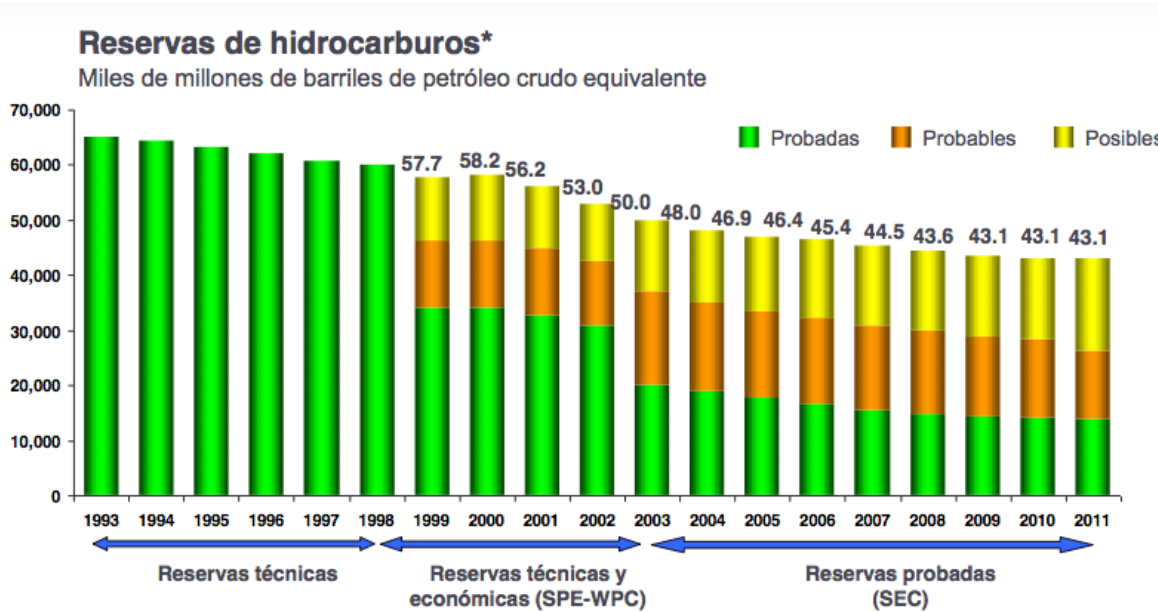


Figura 5.29 Reservas de hidrocarburos en México (PEMEX, 2011)

#### 5.4.2 Tecnología existente para control de emisiones de SO<sub>2</sub>

La combustión del petróleo y sus derivados forman parte importante en la economía de los países, pues son la principal fuente de energía en la mayoría de ellos. Sin embargo, la quema de estos hidrocarburos tiene importantes impactos ambientales negativos. En consecuencia, se busca un inminente desarrollo sustentable, que a la vez que permite la competitividad y el crecimiento económico de cada país, se reduzcan las emisiones a la atmósfera, se logre un manejo adecuado de residuos, así como de tratamiento de agua y finalmente, se promueva la remediación de sitios contaminados.

En México, la SEMARNAT en coordinación con otras dependencias del gobierno federal, son responsables de implantar programas para disminuir las emisiones de las industrias de jurisdicción federal. En la Ley reglamentaria del artículo 27 constitucional, en el ramo del petróleo, el artículo 9º indica que:

“La industria petrolera... es de la exclusiva jurisdicción federal. En

consecuencia, únicamente el Gobierno federal puede dictar las disposiciones técnicas, reglamentarias y de regulación que las rijan.

Con el fin de promover el desarrollo sustentable de las actividades que se realizan en los términos de esta Ley, en todo momento deberán seguirse criterios que fomenten la protección, la restauración y la conservación de los ecosistemas, además de cumplir estrictamente con las leyes, reglamentos y demás normatividad aplicable en materia de medio ambiente...”

La estrategia de protección ambiental de Petróleos Mexicanos, para reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> a la atmósfera incluye la modernización de la infraestructura por recuperación de azufre en dos de sus plantas de gas en 2001 y 2005. Utilizó tecnología Super Claus, con un tercer catalizador de oxidación selectiva con eficiencias de reducción de emisiones de 98.5% en plantas con capacidad mayor de 300 td<sup>-1</sup>. En las plantas restantes se utilizó tecnología Claus modificado, la cual consiste en tres reactores catalíticos. Todas las plantas cuentan con sistemas de desgasificación, para eliminar H<sub>2</sub>S. Se monitorean de forma continua las emisiones de bióxido de azufre a la atmósfera, verificando que cumplan con la NOM-137-SEMARNAT-2003 y con la US-EPA (PEMEX, 2009).

#### **5.4.3 Control de emisiones de precursores de depósito ácido en El Tajín**

La tecnología disponible y acciones de remediación para controlar las emisiones de SO<sub>2</sub> en la zona de estudio, que se recomiendan para ser empleadas por las fuentes de precursores de depósito ácido identificadas son:

##### *Reducción del contenido de azufre en el combustible y/o uso de aditivos.*

Al cambiar el combustible o reducir la cantidad de azufre se pueden reducir las emisiones de SO<sub>2</sub> entre un 30 y 90% (Masters y Wendell, 2008). En la planta termoeléctrica de Tuxpan, se utiliza combustóleo con una concentración de azufre de aproximadamente 2% en peso, lo que corresponde a una emisión de SO<sub>2</sub>, de alrededor de 1.7 g/MJ. En Estados Unidos el estándar de emisión corresponde a 0.5 g•MJ<sup>-1</sup> (EPA; 40 CFR, parte 60).

El uso de aditivos mejora las propiedades del combustible, facilitando la combustión o bien, neutralizan los gases de la chimenea debido a su alta reactividad con el  $\text{SO}_3$ , alcanzando reducciones en la emisión de  $\text{SO}_x$  de hasta 70%. Los aditivos deben ser agregados en la línea antes de los quemadores, en una proporción aproximada de 1 litro de aditivo por 1000 litros de combustible.

### *Tecnología de Desulfurización*

Las técnicas existentes emplean absorbentes, generalmente cal o piedra caliza, para eliminar el  $\text{SO}_2$  de los gases. El costo de estos tratamientos puede llegar hasta unos 200 millones de dólares anuales para centrales eléctricas de gran tamaño (Masters y Wendell, 2008).

El agua de mar también puede emplearse como un absorbente, ya que de forma natural tiene un pH entre 8 y 9; esta alcalinidad se debe a la presencia de bicarbonato. El valor de pH se puede ver disminuido por el equilibrio que ocurre con el bióxido de carbono atmosférico, que se disuelve en la parte superficial del mar para formar ácido carbónico.

Debido a la ubicación de las fuentes emisoras de precursores de depósito ácido que afecta la zona arqueológica de El Tajín, localizadas en zonas costeras, se propone que las industrias utilicen como absorbente el agua de mar. Antes de su descarga al mar, el agua marina es tratada en piletas de aeración. Debido a que este sistema no utiliza reactivos ni genera subproductos, su instalación es económicamente conveniente en todas aquellas plantas ubicadas en zonas costeras (Radojevic, 1992).

La absorción del  $\text{SO}_2$  se lleva a cabo en una torre empacada, donde parte del agua de mar se pone en contacto con el gas, en contracorriente. El efluente absorbido ácido fluye por gravedad hasta la planta de tratamiento del agua de mar, por medio de la aireación el azufre se oxida a sulfato. La concentración de sulfatos se incrementa ligeramente, respecto a los valores normales del agua de mar, pero se sigue manteniendo dentro de las variaciones ocurridas de forma natural, por lo que se puede descargar nuevamente al océano, en este caso, al Golfo de México (Bill, et al; 2005).

Este procedimiento logra hasta el 99% de remoción de  $\text{SO}_2$  por absorción y entre 10 y 20% de  $\text{NO}_x$  ya que el agua de mar actúa como refrigerante.

### *Tecnología in situ*

La implementación de tecnología a veces requiere fuertes inversiones, así como de permisos ante las autoridades, que se traducen en tiempo donde los procesos se mantienen y las emisiones se siguen produciendo. Ante este panorama, se buscan alternativas inmediatas y temporales que detengan o minimicen el impacto que tiene el depósito ácido atmosférico sobre El Tajín. Una de ellas es el recubrimiento sobre las construcciones, cuyo principal objetivo es aislar la lluvia de la piedra caliza que conforma esta zona arqueológica. Sin embargo, este tipo de decisiones conllevan a un impacto visual negativo.

Una segunda alternativa es el barnizado del material pétreo con algún material impermeabilizante, como por ejemplo las resinas o compuestos alifáticos que sean transparentes. El material con que se barnice debe seleccionarse luego de realizar pruebas en una cámara de intemperismo.

Un método indirecto de control, consiste en lograr que transcurra un tiempo suficiente para que las condiciones meteorológicas diluyan o dispersen las emisiones, fijando periodos durante los cuales se puedan realizar las operaciones que emiten contaminantes precursores de depósito ácido. En el caso de la zona arqueológica de El Tajín, las velocidades de viento más altas, se alcanzan en el intervalo comprendido entre las 12:00 y las 20:00 horas, lo cual favorece la dispersión de los contaminantes atmosféricos.



# CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

## VI. Conclusiones y recomendaciones

1. El depósito atmosférico húmedo, durante los 7 años de estudio, resultó tener un pH inferior a 5.6, lo cual indica la presencia de lluvia ácida. Los aniones que se asocian mayoritariamente al ion hidronio ( $H^+$ ) son:  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  y  $Cl^-$ .
2. La fracción sedimentable del depósito atmosférico seco tiene un elevado contenido de carbonato de calcio, que en disolución se presenta como bicarbonato por tener un pH ácido. La presencia de esta sal fue incrementando a lo largo de los años, durante el periodo de estudio.
3. El factor de neutralización, indica que no existen bases suficientes para neutralizar los ácidos contenidos en el depósito húmedo y seco, motivo por el cual la lluvia manifiesta un valor de pH inferior a 5.6.
4. Las trayectorias de retroceso indican que la mayoría de las fuentes emisoras de precursores de lluvia ácida se encuentran al Este.
5. Para la implementación del PSD se identificaron los impactos sobre El Tajín ocasionados o relacionados con la lluvia ácida, para lo cual se seleccionaron 11 acciones capaces de causar efectos ambientales relacionados sobre 22 factores ambientales. El resultado mostró un total de 132 impactos que fueron calificados con un signo más o menos, según si se trataba de un efecto benéfico o negativo, resultando en 107 impactos negativos.
6. El método de Batelle-Columbus mostró que de aplicarse el PSD, se lograría una disminución en el impacto ambiental que sufre la zona arqueológica de El Tajín, por efecto del depósito ácido.
7. La elaboración del PSD para El Tajín, implica la mejora y/o renovación de tecnología, se recomienda:
  - a. La reducción de azufre en los combustibles empleados en las centrales termoeléctricas.
  - b. La desulfurización con agua de mar, ya que las fuentes principales de emisiones de precursores de depósito ácido están ubicadas cerca de la costa, lo que mantendría bajos costos de operación y en reactivos absorbentes.

- c. Proteger los monumentos del desgaste ocasionado por los agentes de la intemperie, principalmente depósito ácido atmosférico, aislándolos con algún tipo de recubrimiento que puede ir desde el barnizado con resinas hasta el techado.
- d. Operar las fuentes emisoras de precursores de depósito ácido en periodos establecidos, tomando en cuenta las condiciones meteorológicas favorables para la dispersión de contaminantes atmosféricos.

Se recomienda:

- Realizar pruebas, en una cámara de intemperismo acelerado, del deterioro que podría sufrir el material pétreo con el que se encuentra constituida la zona arqueológica de El Tajín, usando diferentes resinas impermeables y sometiéndolo a condiciones similares a las del depósito ácido que existe en la zona.
- Hacer un análisis costo-beneficio de la tecnología disponible para la disminución de emisiones de SOx y NOx considerando las características de cada una de las fuentes.

# BIBLIOGRAFÍA

## VII. Bibliografía

- Ayala, M., W. Chamocho, J. Gamboa, J. Gobbi, A. Lazo, J. Porta y O. Rodas. 1990. *Diseño y plan maestro de manejo de la reserva El Tajín, Veracruz*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.
- Behrends, B., G. Liebezeit. 2006. *A Theoretical Environmental Impact Assessment of the Use of a Seawater Scrubber to Reduce SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> Emissions from Ships*. Alemania.
- Bill, A.; Levallois-Perret; Svein-Ole S. *Tecnologías de Desulfurización de ALSTOM: Reduciendo emisiones de óxidos de azufre en plantas de generación de energía*. Conferencia Exploring Power Plant Emissions Reduction – Technologies & Strategies. Reino Unido, 2005.
- Bravo A. H., R. Soto A., R. Sosa E, P. Sánchez A., A.L. Alarcón, J. Kahl & J. Ruíz. 2006. Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico. *Environmental Pollution*. **144**, 655-660.
- Bravo A.H., Sosa E.R., Sánchez A.P., Soto R., Alarcón J.A.L., 2005. *Precipitación ácida en la costa del Golfo de México*. p 535-552. En: Botello. A.V., Rendón J-Osten Von., Gol-Bouchot G. y Agraz-Hernández C. (Eds). *Golfo de México Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias*. 2da Edición. Universidad. Autónoma. De Campeche. Universidad. Nacional. Autónoma. De México. Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Casas, M. Carmen Castillo, M. Alarcón Jordán. *Meteorología y Clima*. Ediciones UPC, 1999.
- Canter, L., Sadler, B., 1997. A tool kit for effective EIA practice review of methods and perspectives on their application. A Supplementary Report of the International Study of the Effectiveness of Environmental Assessment. International Association for Impact Assessment.
- Cheng, J. R. y Castillo, R. A. 1984. Study of Marble Deterioration at City Hall, Schenectady New York. *Journal of the Air Pollution Control Association*. **34** (1), 15-19.
- Cheremisinoff, Paul N., Angeki C. Morresi. *Environmental Assessment & Impact Statement Handbook*. 2° edición. Ed. Ann Arbor Science.1997. EUA.
- Coria, I. D. Impacto ambiental: Características y metodología. *Invenio*. **11** (20), 125-135.
- Draxler, R.R.; Rolph, G.D., 2013. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Modelo de acceso a través de la NOAA ARL READY

- Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- EPA: Environmental Protection Agency Leyes y reglamentos. <http://www.epa.gov/lawsregs/laws/> (Consulta: 20 noviembre 2011)
- EPA, 40CFR, parte 60. Estándares de desempeño para fuentes nuevas (NSPS). [http://www.epa.gov/ttn/caaa/t3/fr\\_notices/himwi\\_prop\\_032812.pdf](http://www.epa.gov/ttn/caaa/t3/fr_notices/himwi_prop_032812.pdf) (Consulta: 20 noviembre 2011)
- Factoravicha, P.M., P.M. Jacovkisa & Canzianib P, 2006. Nuevos modelos lagrangeanos para el transporte de constituyentes en la atmósfera. *Mecánica computacional*. XXV, 2733-2743.
- Golden, Jack; Robert P.Ouellette; Saari, Sharon; Paul N. Cheremisinoff. *Environmental Impact Data Book*. 2° edición, Ann Arbor Science. 1980.
- HARRIS, Daniel C. *Análisis químico cuantitativo*. 2ª edición. Ed. Reverté S.A. 1999. España. P. 273
- INAFED: Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México. **Estado de Veracruz**. 2010
- INEM: Inventario Nacional de Emisiones de México, 1999. SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, 2006.
- INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático: <http://www.inecc.gob.mx/calair-herramientas-analisis/582-calair-tipos-modelos/> (Consulta: 15 marzo 2012)
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. XIV CENSO INDUSTRIAL, XI CENSO COMERCIAL Y XI CENSO DE SERVICIOS. Censos Económicos 1994 Veracruz. Aguascalientes, Ags., 1997.
- INEGI, Perfil sociodemográfico de la población que habla lengua indígena [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/poblacion\\_indigena/leng\\_indi/PHLI.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/poblacion_indigena/leng_indi/PHLI.pdf) (Consulta: 13 septiembre 2013)
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía: [www.censo2010.org.mx/](http://www.censo2010.org.mx/) (Consulta: 25 noviembre 2011)
- INAH: Instituto Nacional de Antropología e Historia, Zonas arqueológicas <sup>1</sup> <http://www.gobiernodigital.inah.gob.mx/ZonasArqueologicas/todas/htme/za02508a.html> (Consulta: 23 noviembre 2011)

- INE: Instituto Nacional de Ecología. *Evaluación del impacto de las emisiones de la termoeléctrica de Tuxpan en la calidad del aire de la región, usando el sistema de modelado de dispersión CALMET-CALPUFF*. 2003
- Kahl, J.D.W., H. Bravo-Álvarez, R. Sosa-Echeverría, P. Sánchez-Álvarez, A.L. Alarcón-Jiménez, & R. Soto-Ayala, 2007. Characterization of atmospheric transport to the El Tajín archaeological zone in Veracruz. *Atmósfera*. **20**(4), 359-371.
- Krupa, S.V., 2002. *Sampling and physico-chemical analysis of precipitation: a review*. *Environmental Pollution* 120, 565-594.
- Leopold, L. B.; Clarke F. E.; Hanshaw, B. B.; Balsley J. R. A Procedure for Evaluating Environmental Impact. *Geological Survey Circular 645*, 9ª edición. US Geological Survey, Washington DC, 1971.
- Ley Reglamentaria del artículo 27 constitucional en el ramo del petróleo.
- LGEEPA: Ley General del Equilibrio Ecológico y la protección al Ambiente <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgeepa.htm> (Consulta: 28 noviembre 2011)
- Masters, G. M. P. E Wendell. *Introduction to Environmental Engineering and Science*. 3ed. Pearson, prentice-hall. 2008.
- Miss Ortega, Magaly. *Diseño del programa para la prevención del deterioro ambiental significativo (PSD) en la Reserva de la biósfera de Calakmul, Campeche*. Tesis de maestría en Ingeniería Ambiental. UNAM, México. 2011
- NADP National Atmospheric Deposition Program/ National Trens Network. (2004) [www.nadp.sws.uiuc.edu](http://www.nadp.sws.uiuc.edu) (Consulta: noviembre 2011)
- Palache, C., Berman H., y Frondel C. *Dana's System of Mineralogy*. 7ª edición. Nueva York: John Wiley and Sons, 1944.
- PEMEX: Petróleos Mexicanos, *Informe de Responsabilidad Social*, 2011
- PEMEX: Petróleos Mexicanos, *Estrategia de Protección Ambiental de Petróleos Mexicanos*, 2009.
- PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Reglamentos <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/v/323/1/mx/reglamentos.html>. (Consulta: 20 septiembre 2013)
- Rau, John G; David C. Wooten. *Environmental Impact Analysis Handbook*. McGraw-Hill. EUA 1980.

- Radojevic, M., R.M. Harrison. *Atmospheric Acidity, sources, consequences and abatement*. Elsevier Applied Science. 1992.
- Reddy, M. Michael. 1988. Acid rain damage to carbonate stone: A quantitative assessment based on the aqueous geochemistry of rainfall runoff from stone. *Earth Surface Processes and Landforms*. **13** (4), 335-354.
- Rolph, G.D., 2013. Real-time Environmental Applications and Display sYstem (READY) Website (<http://ready.arl.noaa.gov>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Saiz-López, A., J. Albaladejo-Gordon. 2007. Seasonal Variation of NO<sub>x</sub> Loss Processes Coupled to the HNO<sub>3</sub> Formation in a Daytime Urban Atmosphere: A Model Study. *Water Air Soil Pollut.* **182**, 197-206.
- Skoog, D., D. West, Holler J., y Crouch S. *Química Analítica*. 7a edición. McGraw-Hill, 2000.
- Sosa, E. R., H. Bravo A., P. & P. Sánchez A. 2009. La importancia de la prevención del deterioro ambiental significativo en latinoamérica. ACODAL (Asociación colombiana de ingeniería sanitaria y ambiental). Año 51, No. 224. Pp 45-52 ISSN 020-0798. Bogotá, Colombia.
- Sosa, E. R., H. Bravo A., P. & P. Sánchez A. 2007. Prevention of Significant Deterioration, a proposal for its application in Latin American countries. *100<sup>th</sup> Annual Conference & exhibition of the Air & Waste Management Association*. Pittsburg, Pennsylvania. June 2007
- Soto Ayala, Rogelio. *Efectos de la lluvia ácida sobre el material constituyente de los monumentos mayas mexicanos*. Tesis de doctorado en Ingeniería Ambiental. UNAM, México. 1999
- SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente. Inventario de fuentes fijas. [http://portal.veracruz.gob.mx/portal/page?\\_pageid=53,3840491&\\_dad=portal&\\_schema=PORTALn](http://portal.veracruz.gob.mx/portal/page?_pageid=53,3840491&_dad=portal&_schema=PORTALn) (Consulta: 23 noviembre 2011)
- SEMARNAT; Secretaría Del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Normas Oficiales Mexicanas Vigentes en contaminación ambiental [http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes\\_copy%281%29.aspx](http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Pages/normasoficialesmexicanasvigentes_copy%281%29.aspx) (Consulta: 28 noviembre 2011)
- SEMARNAT. Definición y objetivos de la Manifestación de Impacto Ambiental <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/impactoambiental/Paginas/evaluacion.aspx> (Consulta: 28 noviembre 2011)



SEMARNAT. Proyectos de Normas Oficiales Mexicanas en Consulta Pública  
<http://www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/normas/Pages/proyectosdenormasoficialesmexicanas.aspx> (Consulta: 28 noviembre 2011).

Strunz, H *Mineralogische Tabellen*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft, 1970.

Torres González, Fidel A. *Efecto de la lluvia en materiales pétreos del patrimonio histórico del Estado de Campeche*. Tesis de maestría en Ciencias marinas, en Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma de Campeche. México, 2009

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Criterios de selección: <http://whc.unesco.org/en/criteria/> (Consulta: octubre 2011).

US-EPA: US. Environmental Protection Agency. "Quality assurance handbook for air pollution measurement systems", V-5 Precipitation Measurement Systems. EPA – 600/R-94/038e. 1994.

Veron JEN. Corals of the World. AIMS, Australia, Vol.1. 2000. 469 pp.

Vidal de los Santos, E., J. Franco. *Impacto ambiental: una herramienta para el desarrollo*. AGT Editor. México, 2009.

*Abreviaturas*

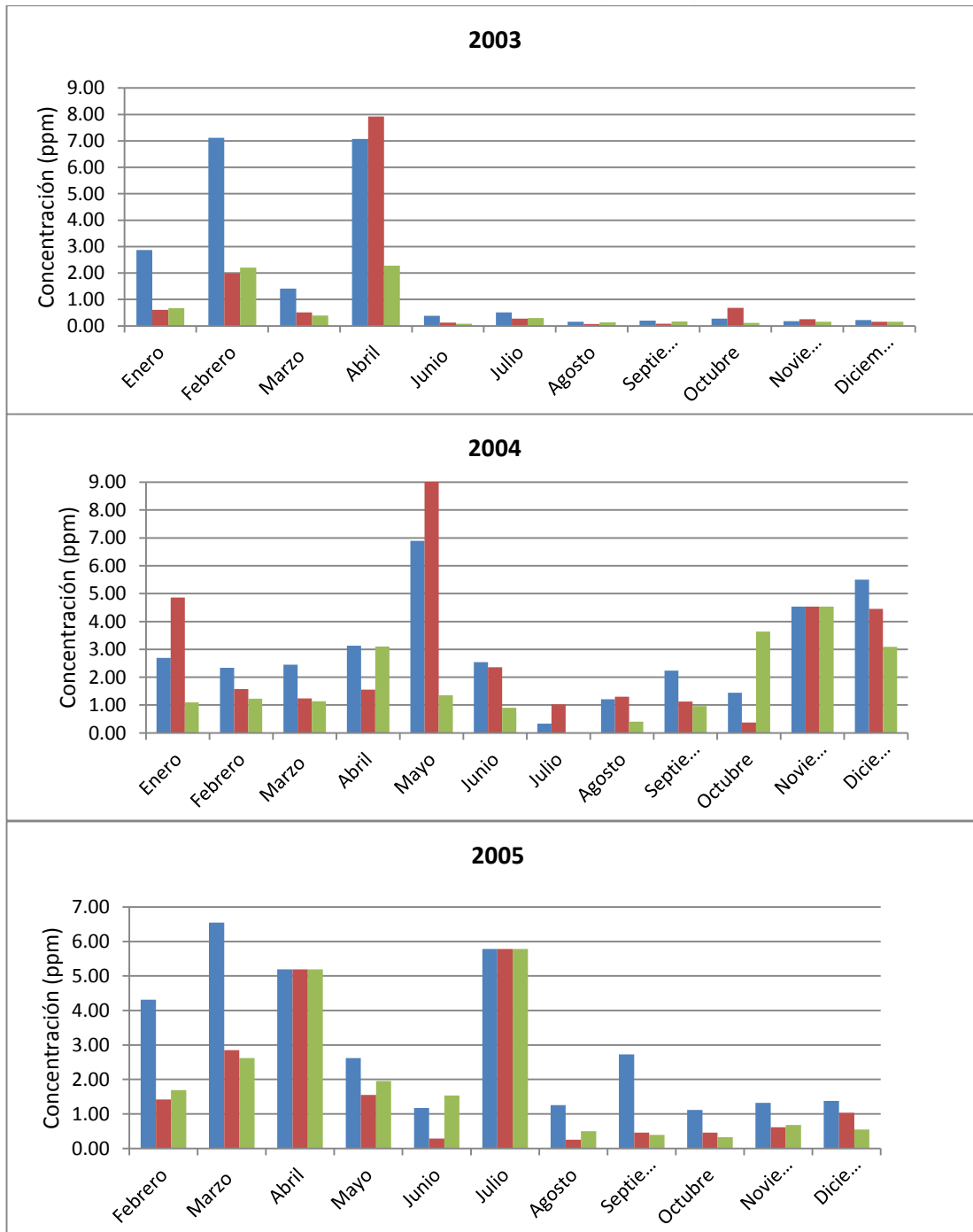
---

BACT	Mejor Tecnología de Control Disponible
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
D.H.	Depósito húmedo
D.S	Depósito seco
DOF	Diario Oficial de la Federación
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
INEM	Inventario Nacional de Emisiones de México
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
MIA	Manifestación de Impacto Ambiental
NAAQS	Normas Nacionales de Calidad del Aire Ambiental
PSD	Prevención del Deterioro Significativo
SEMARNAT	Secretaría Medio Ambiente y Recursos Naturales
UIA	Unidades de Impacto Ambiental
US-EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
UTC	Tiempo Universal Coordinado

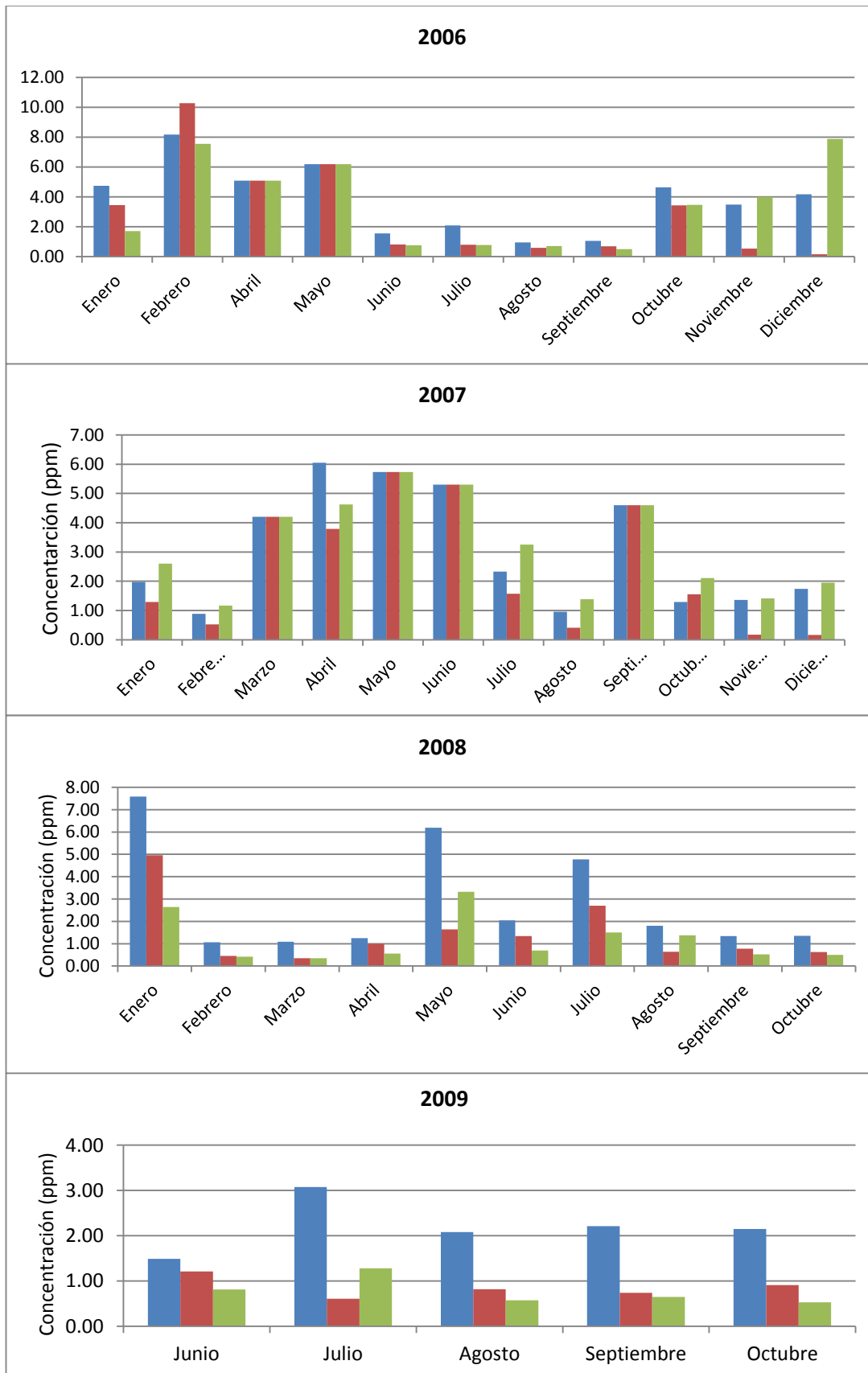
# ANEXOS

## A. Anexos

### A.1 Aniones predominantes del D.H. (ponderado mensual)

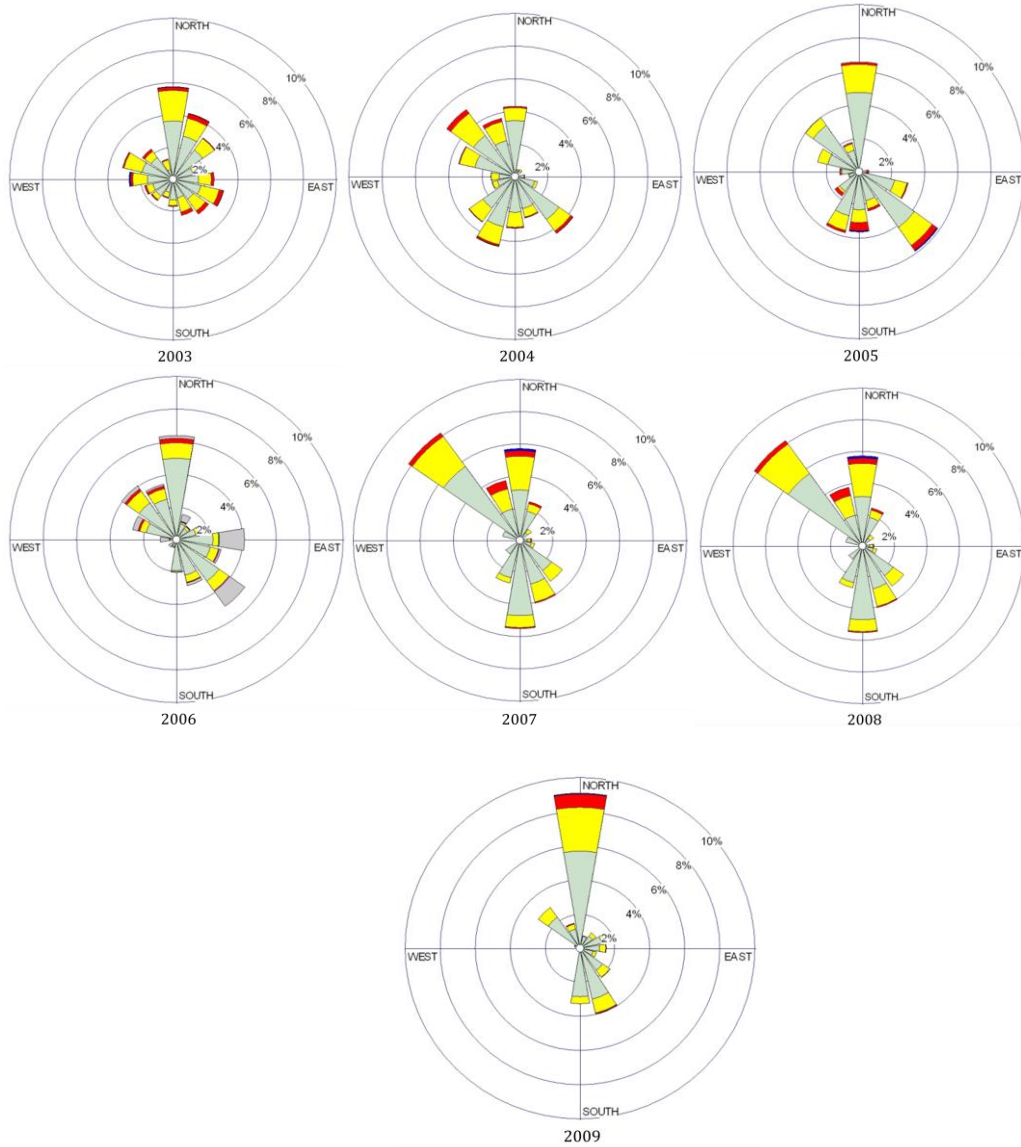


PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN



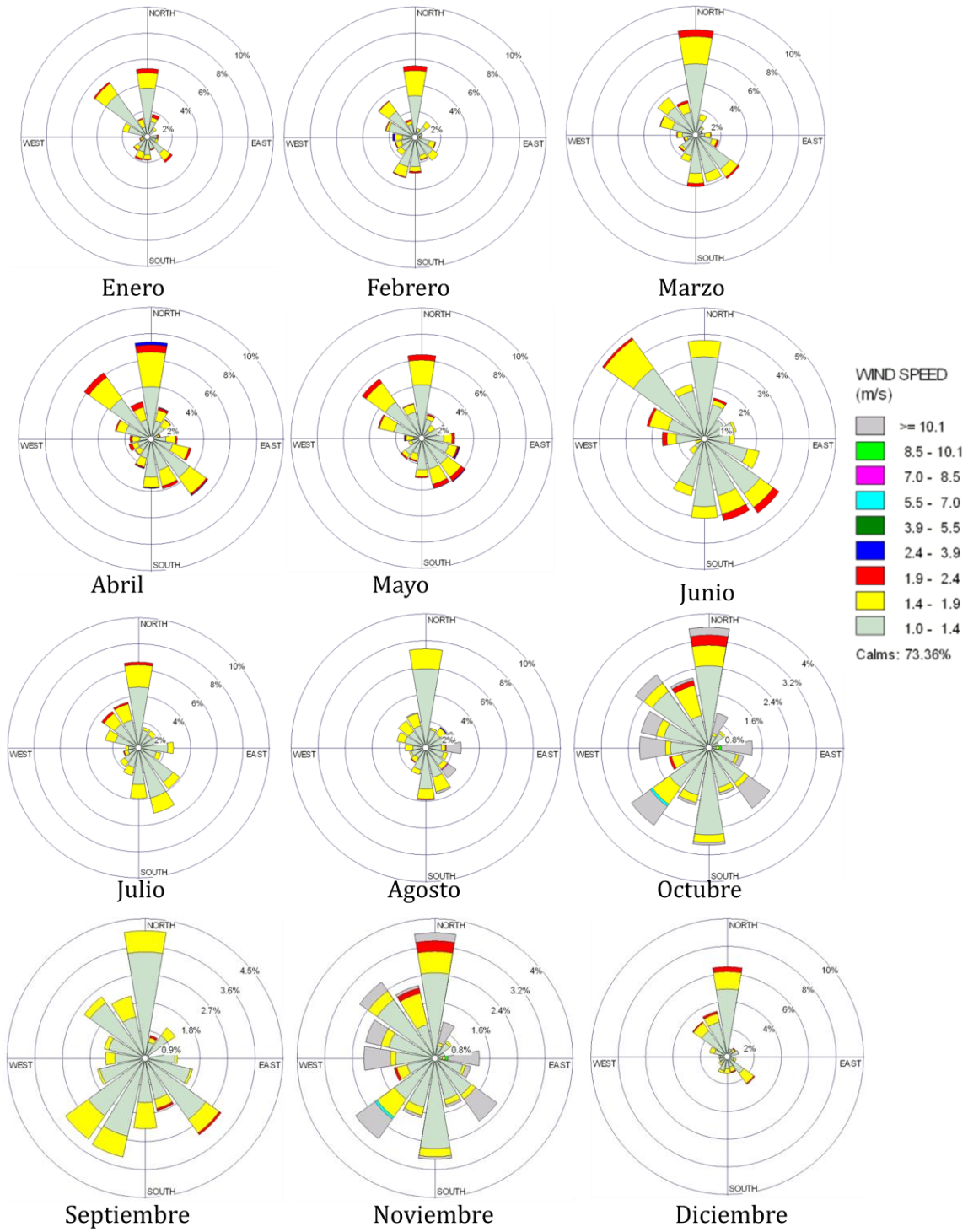
## A.2 Rosas de los vientos.

### *Anuales*

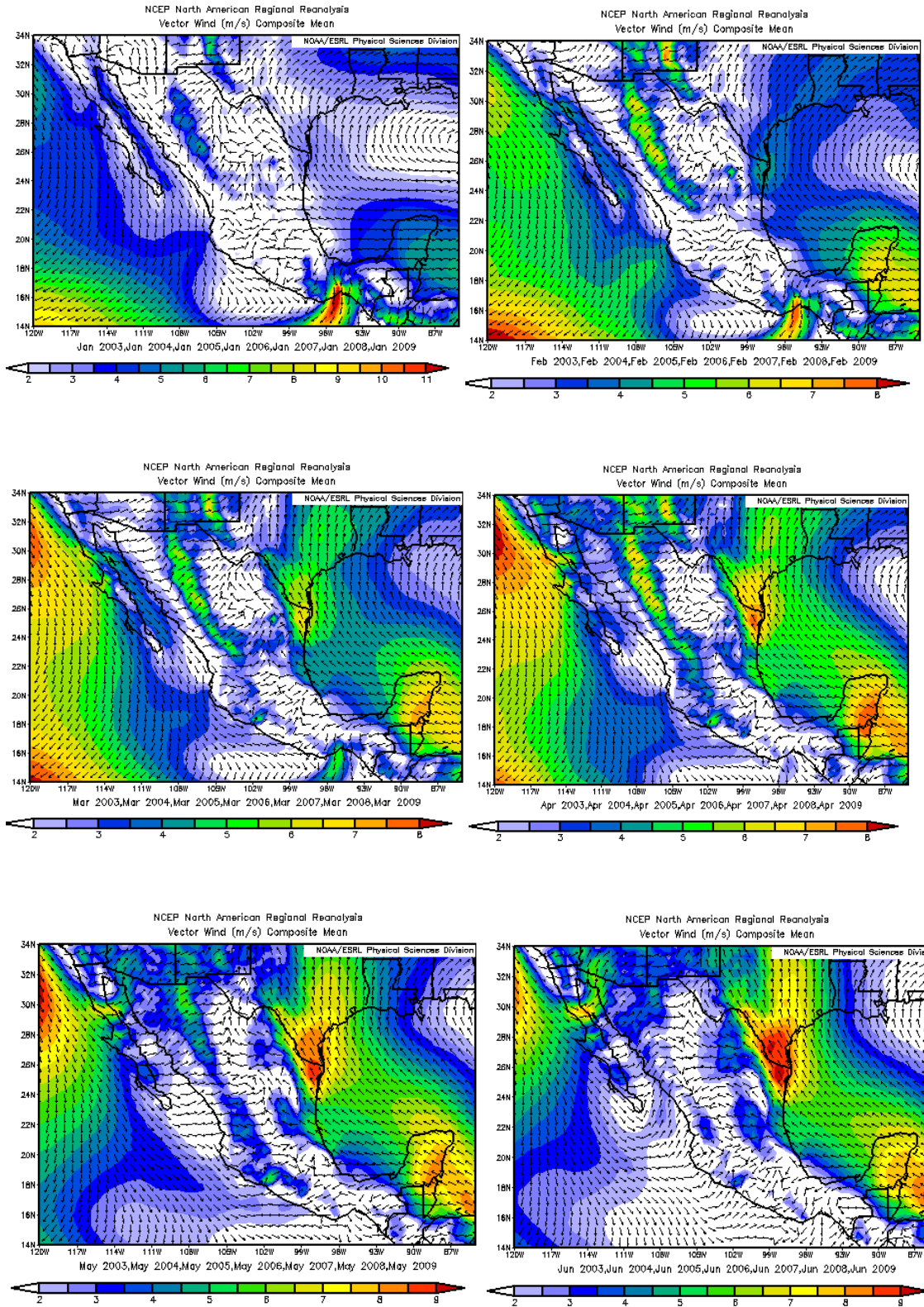


PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

Mensuales (del 2003 al 2009)

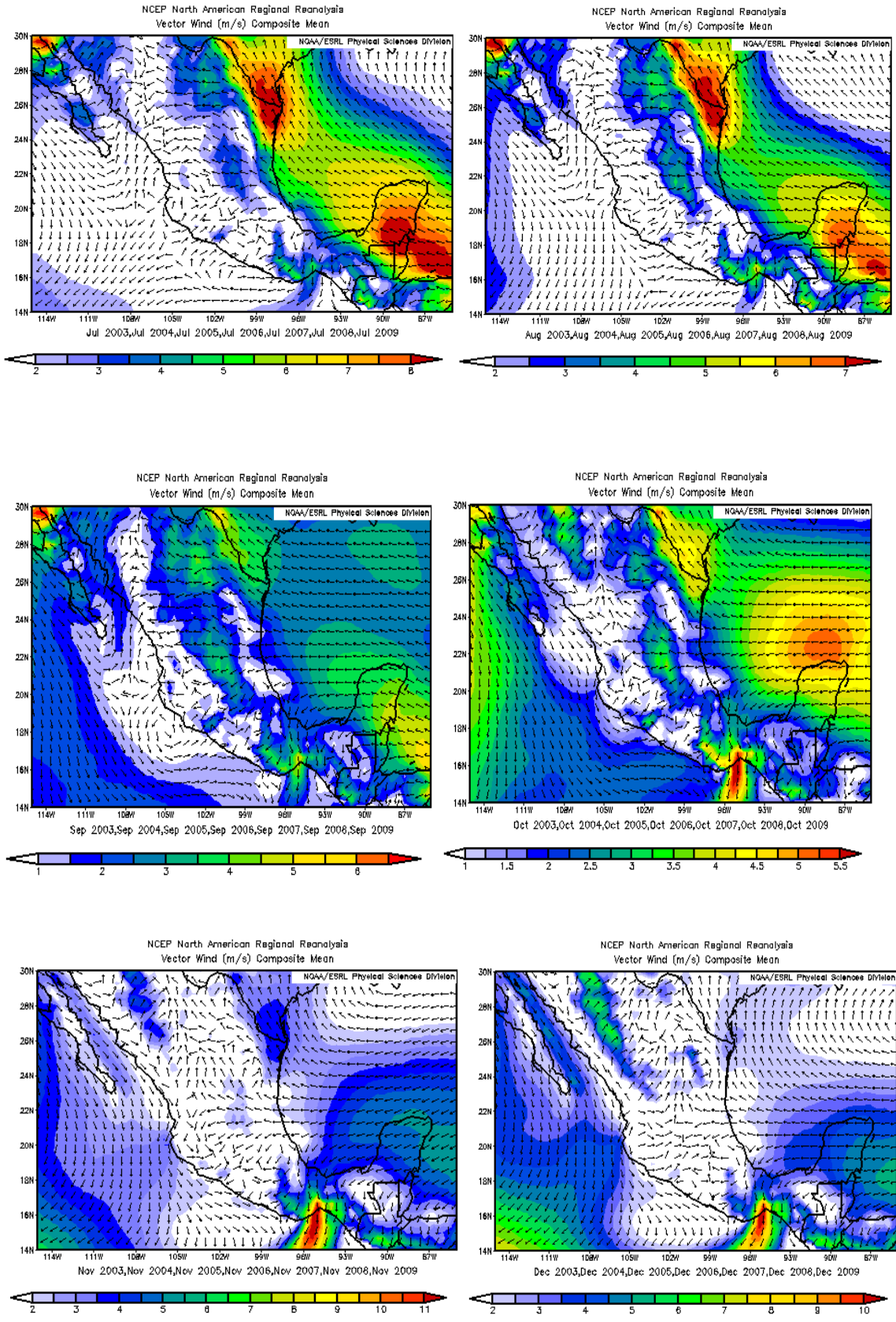


*Vector del viento, promedio mensual (2003 a 2009, a 925mbar)*



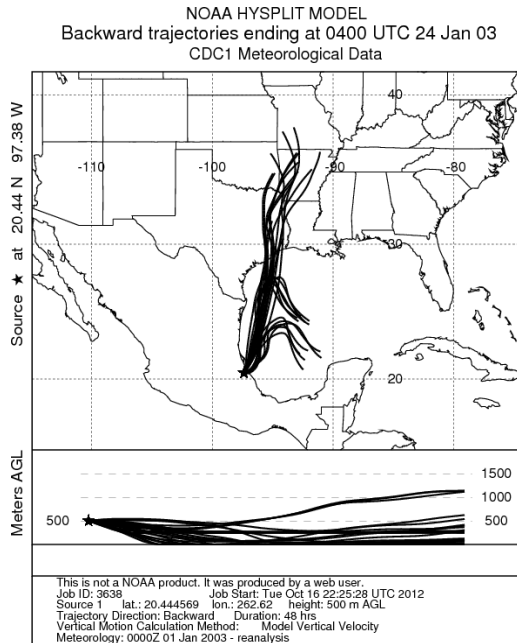


PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

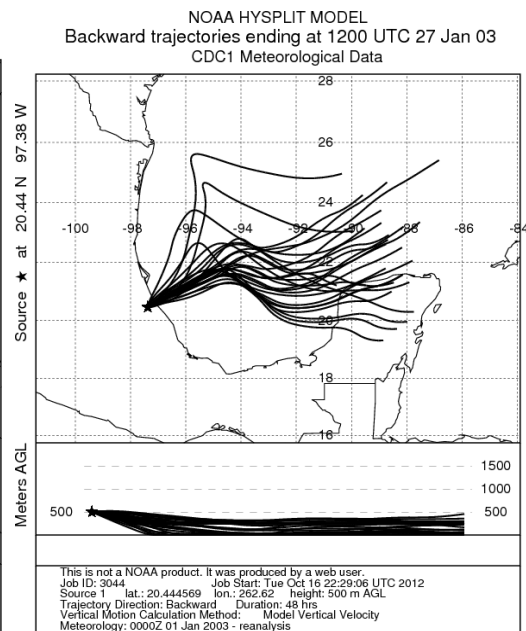


**A.3 Trayectorias de retroceso de El Tajín (2003-2009).**

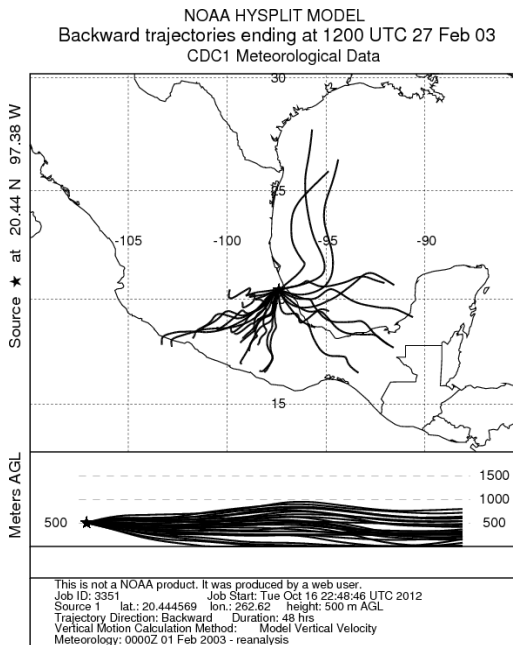
**2003**



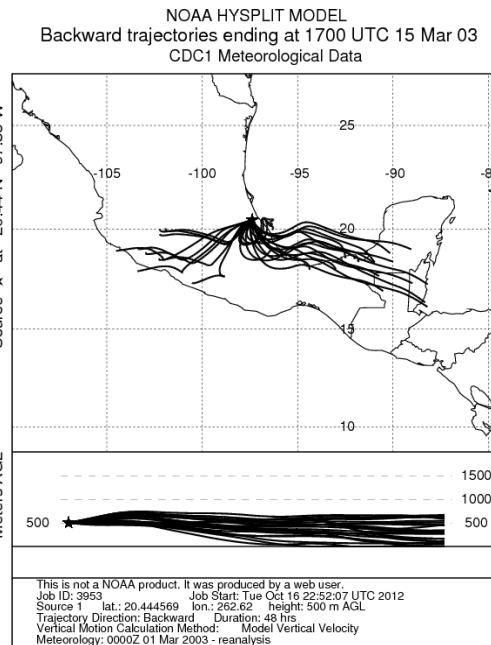
23/Ene/03 (17:00; pH=4.38)



27/Ene/03 (6:00; pH=4.26)

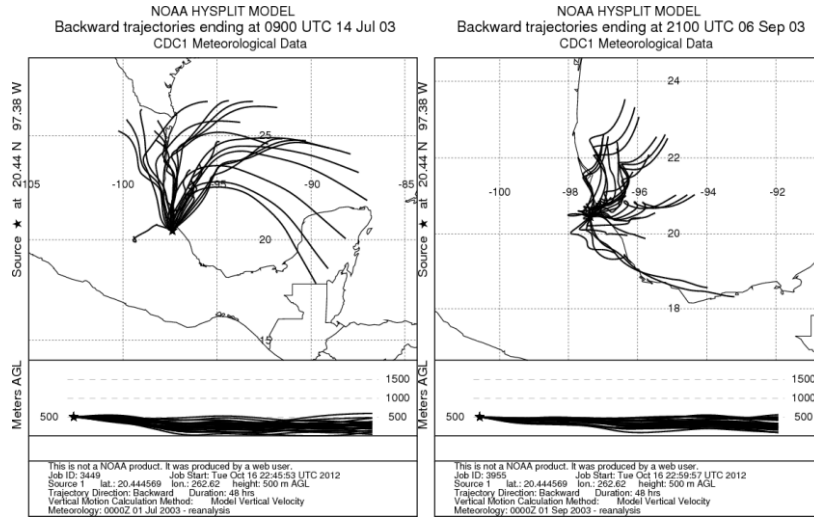


27/Feb/03 (17:00; pH=3.65)



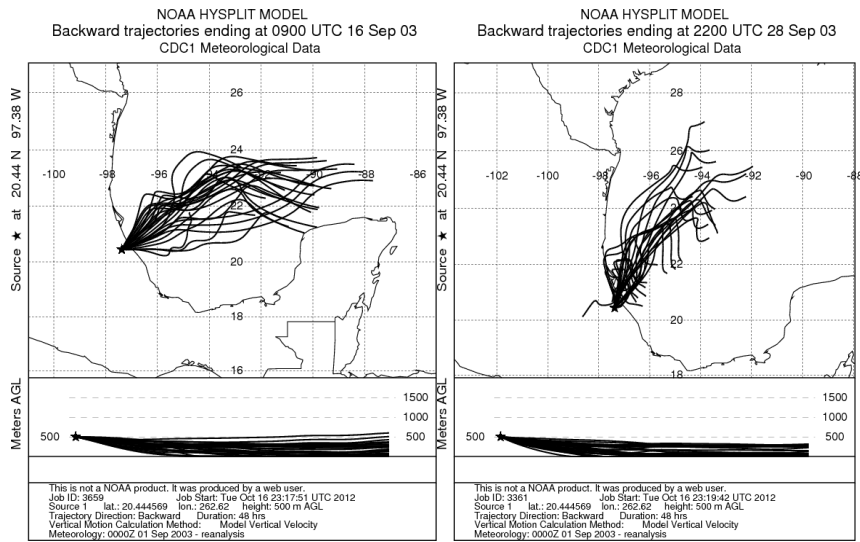
15/Mar/03 (11:00; pH=4.18)

**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**



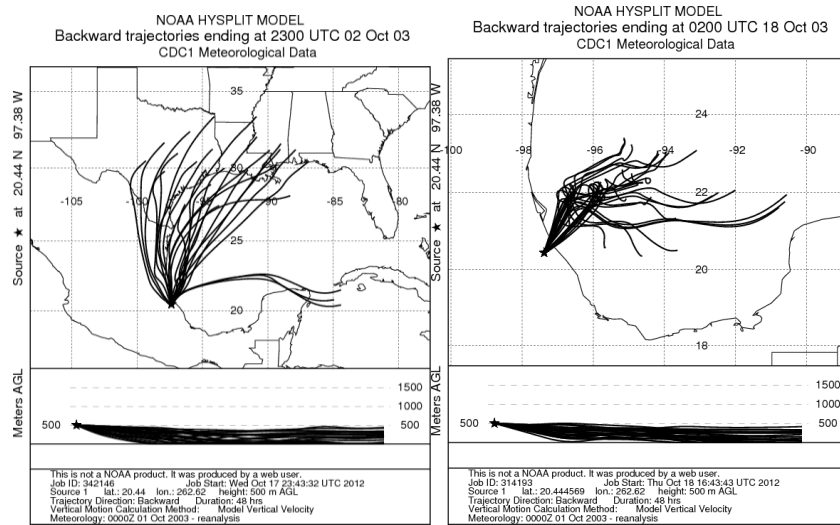
**14/Jul/03 (4:00; pH=4.28)**

**6/Sept/03 (16:00; pH=4.22)**



**16/Sept/03 (4:00; pH=4.36)**

**28/Sept/03 (17:00; pH=4.06)**

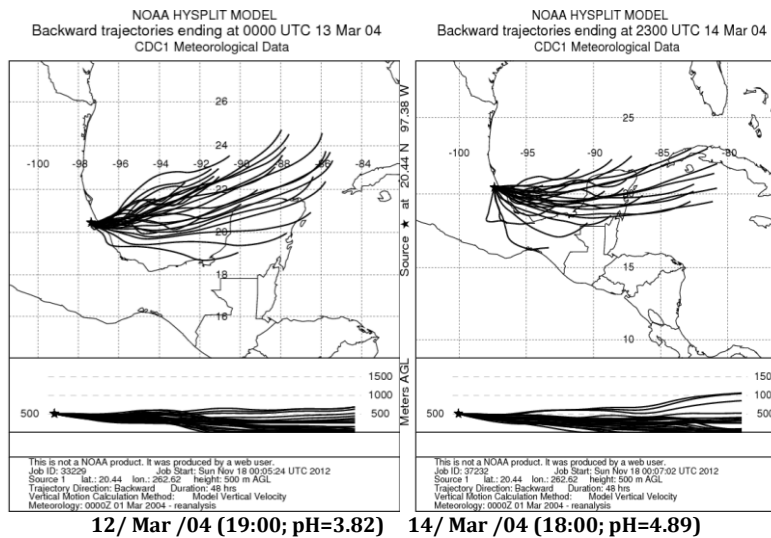
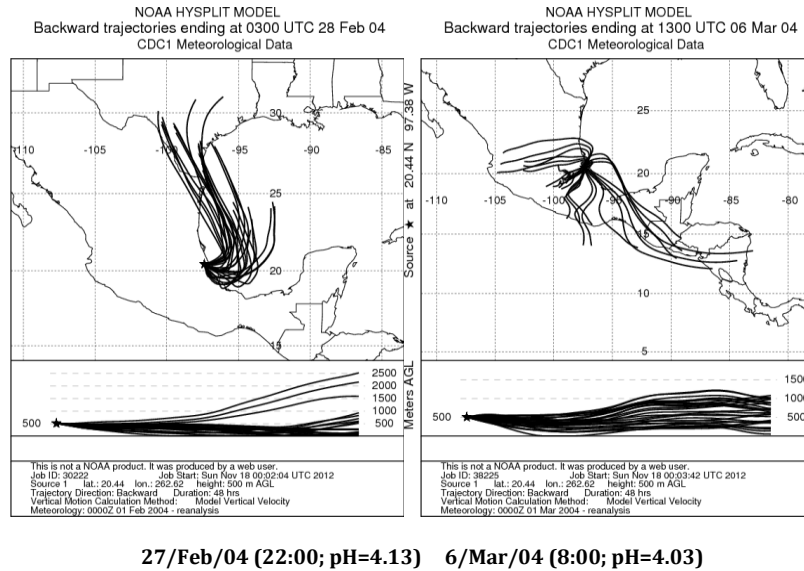
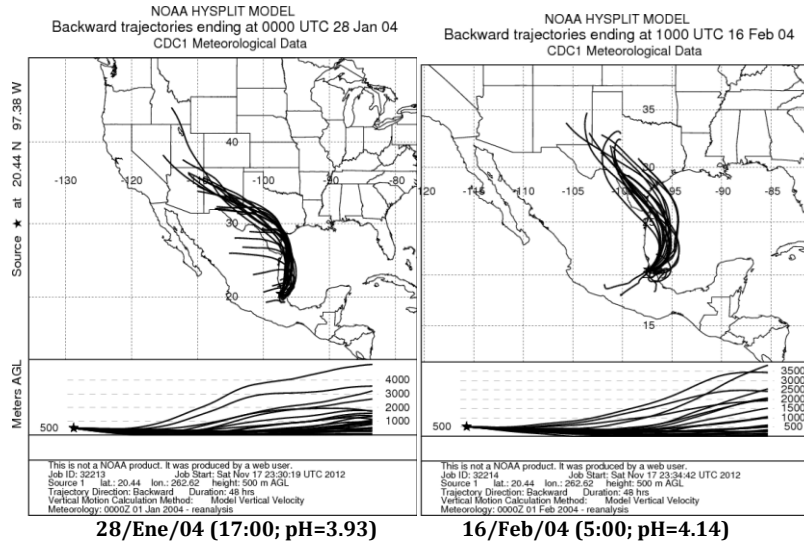


**2/Oct/03 (17:00; pH=4.35)**

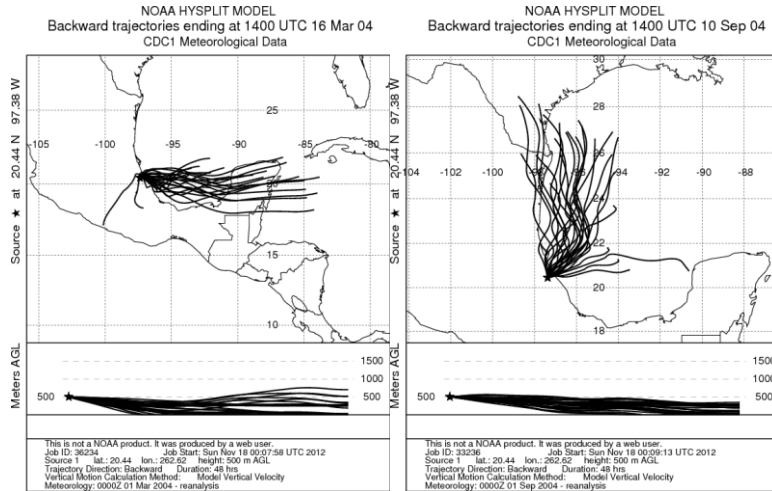
**17/Oct/03 (21:00; pH=4.13)**

PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

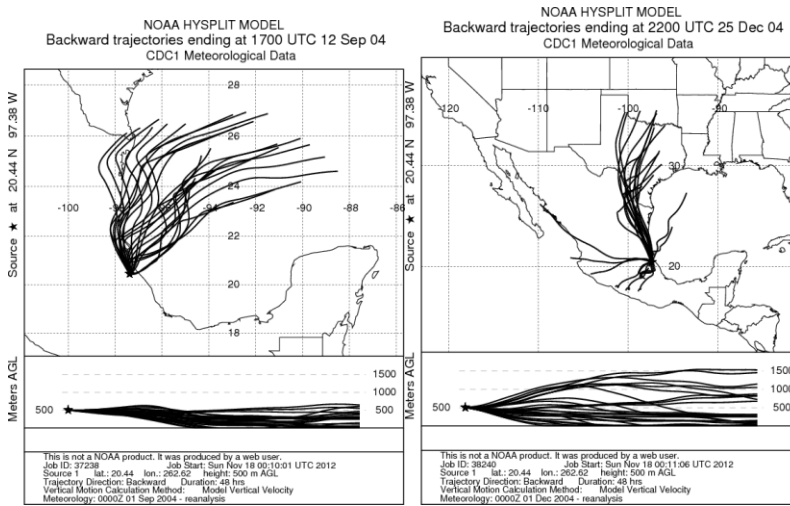
2004



**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**

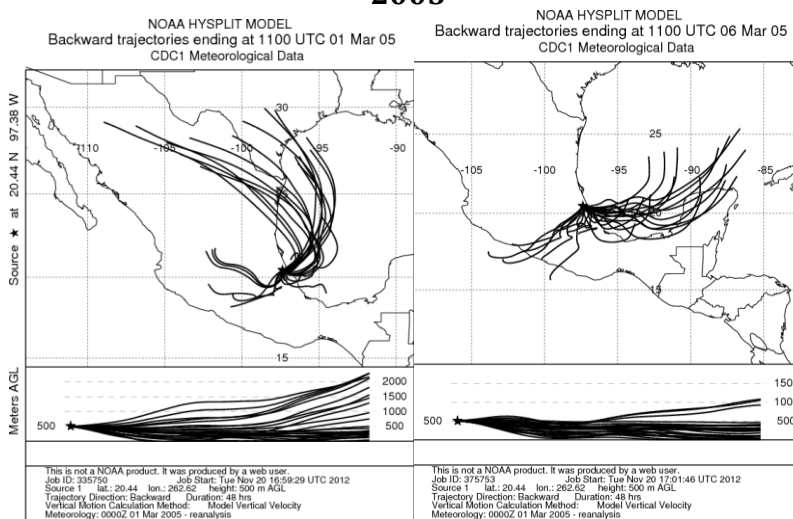


**16/Mar/04 (9:00; pH=3.98) 10/ Sep/04 (8:00; pH=3.99)**



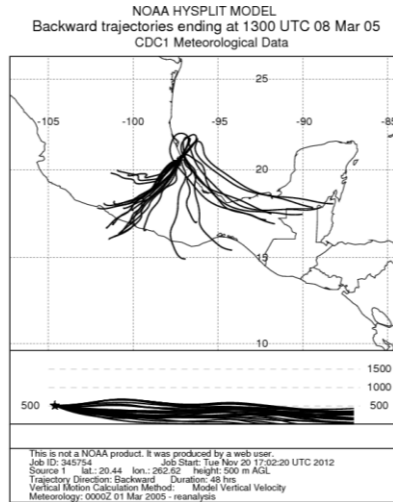
**12/ Mar /04 (11:00; pH=4.12) 25/Dic/04 (17:00; pH=4.0)**

**2005**

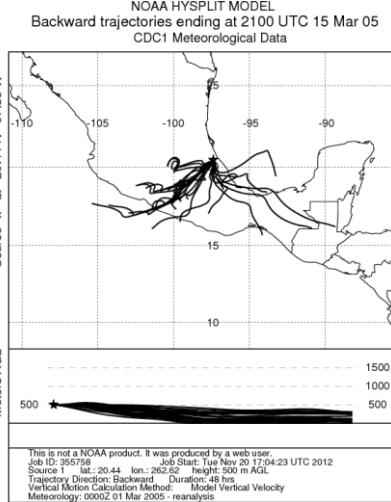


**1/Mar/05 (5:00; pH=4.35) 6/Mar/05 (5:00; pH=4.39)**

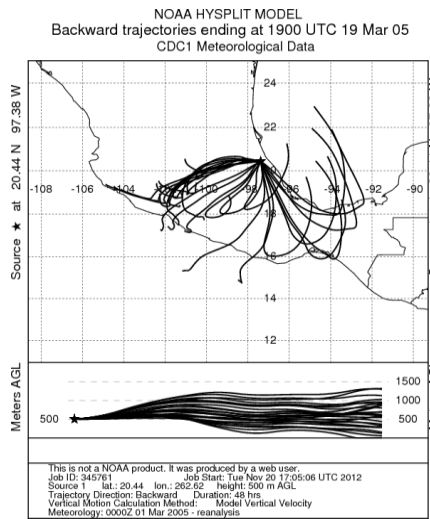
PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN



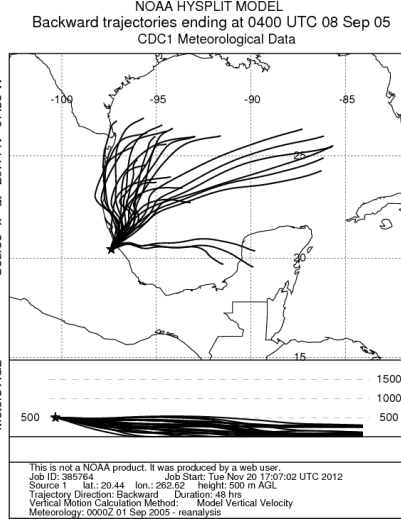
8/Mar/05 (7:00; pH=4.12)



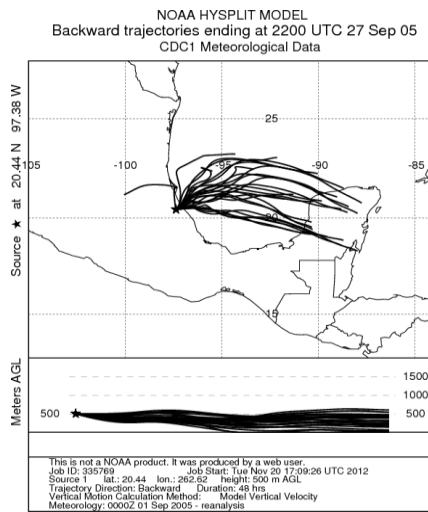
15/Mar/05 (3:00; pH=4.11)



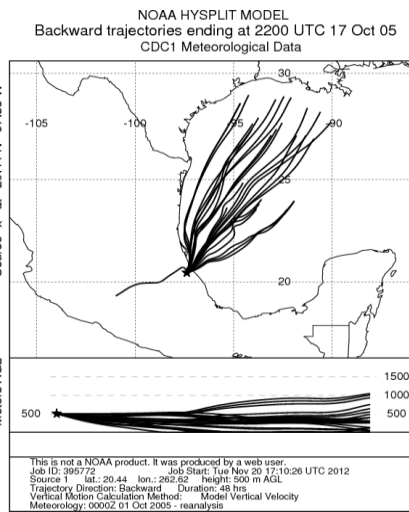
19/Mar/05 (13:00; pH=4.30)



7/Sept/05 (23:00; pH=4.39)

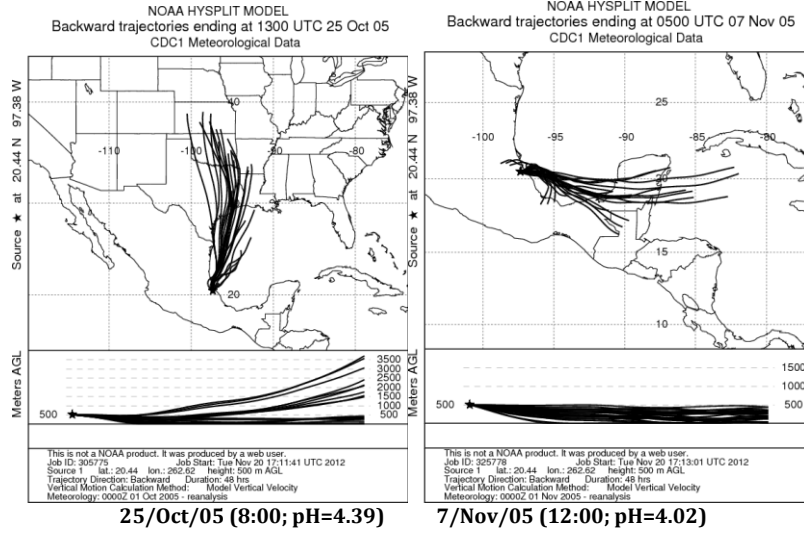


27/Sept/05 (17:00; pH=4.29)

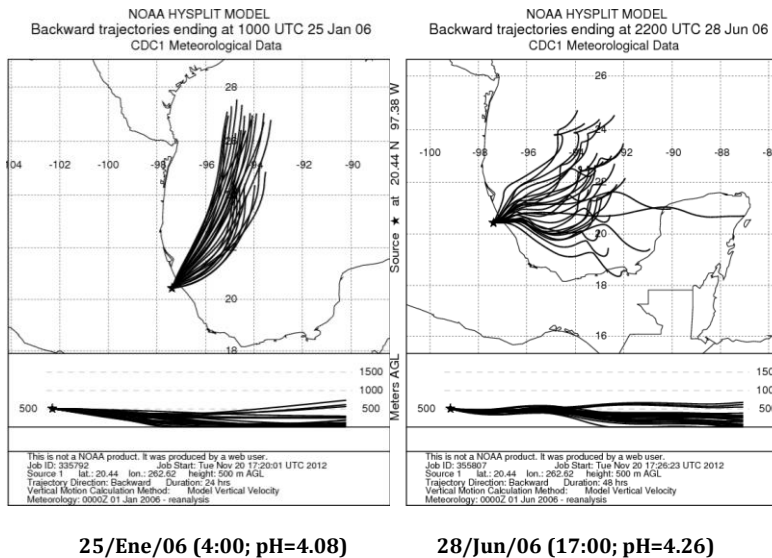
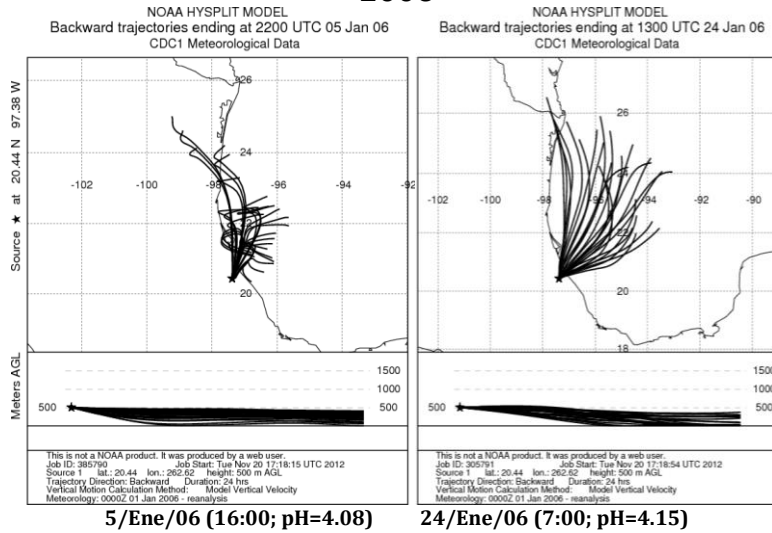


17/Oct/05 (17:00; pH=4.10)

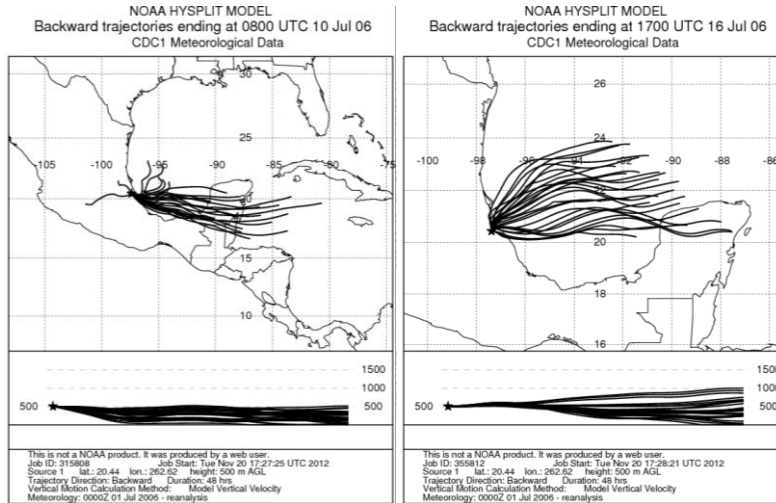
**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**



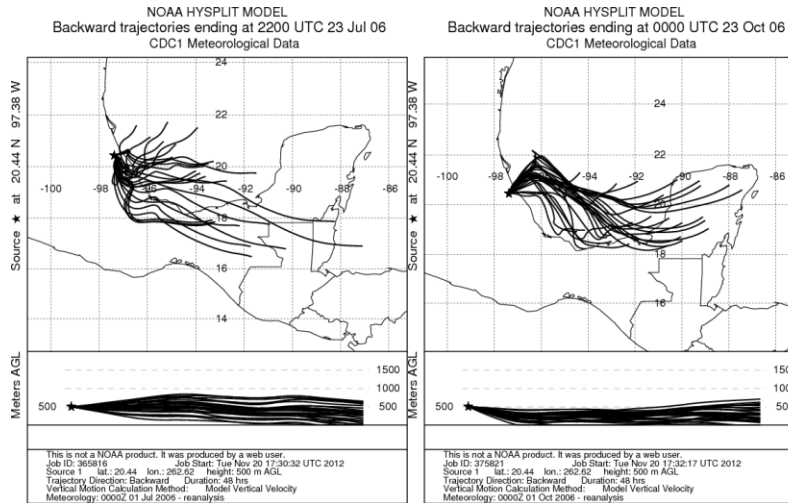
**2006**



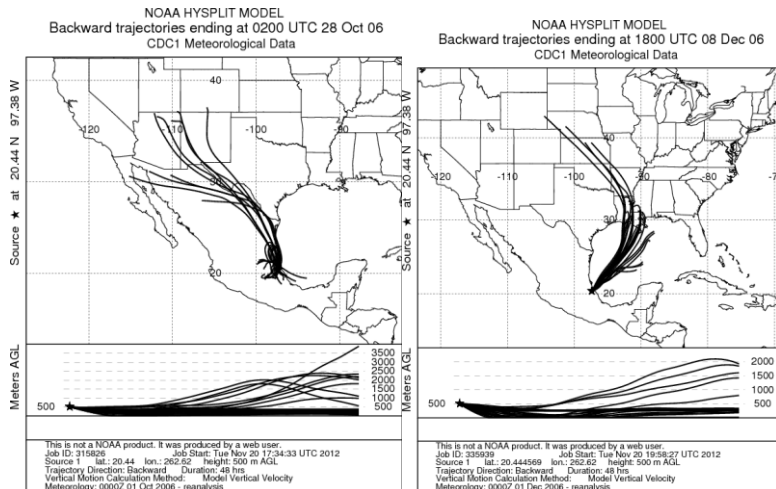
**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**



**10/Jul/06 (3:00; pH=4.22)    16/Jul/06 (12:00; pH=4.19)**



**23/Jul/06 (17:00; pH=4.31)    22/Oct/06 (19:00; pH=3.84)**

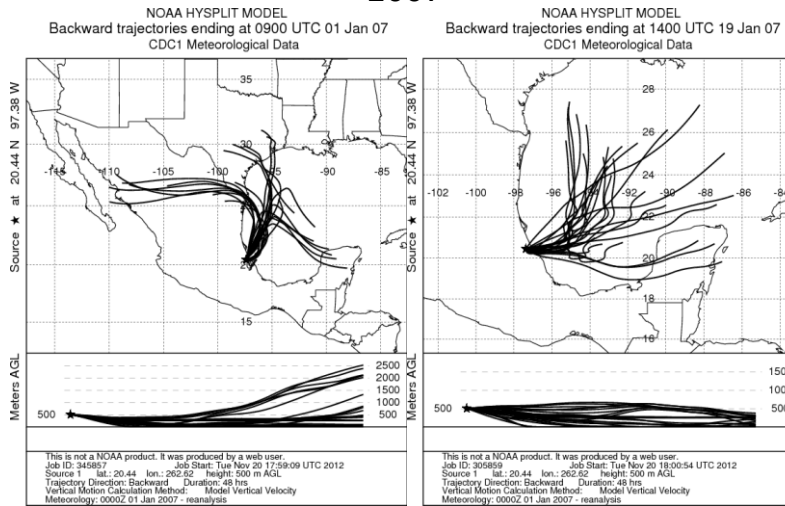


**27/Oct/06 (21:00; pH=3.94)    8/Dic/06 (12:00; pH=4.15)**



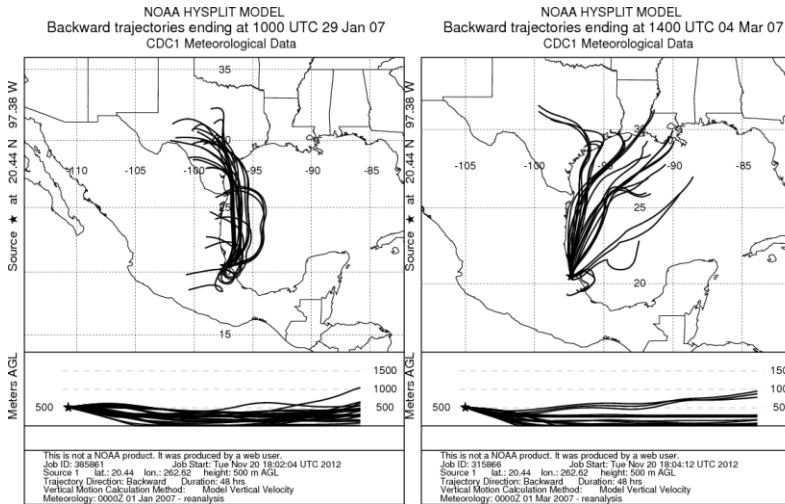
PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN

2007



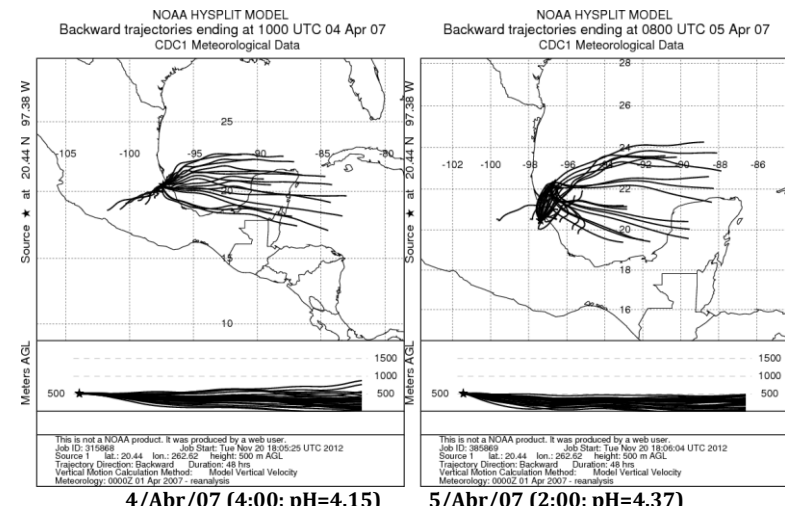
1/Ene/07 (3:00; pH=4.36)

19/Ene/07 (8:00; pH=4.28)



29/Ene/07 (4:00; pH=4.18)

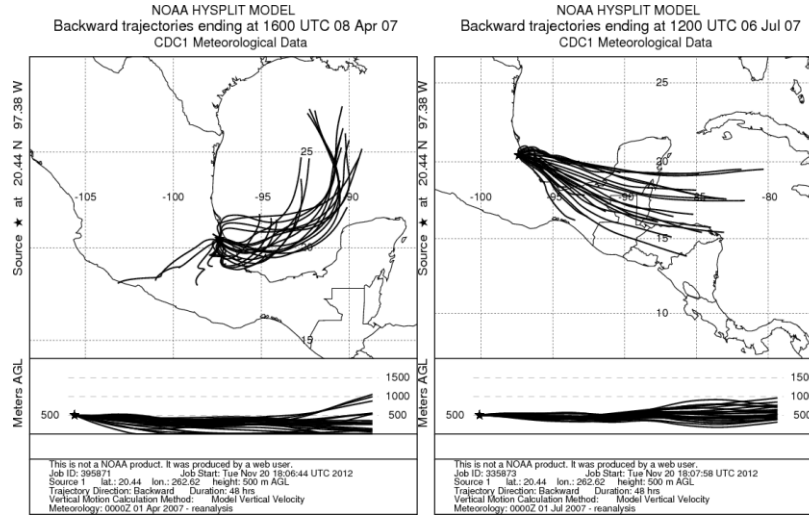
4/Mar/07 (8:00; pH=4.20)



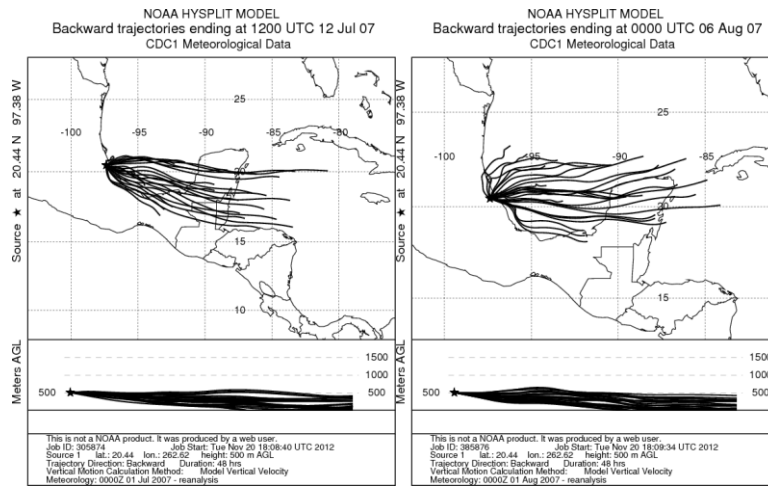
4/Abr/07 (4:00; pH=4.15)

5/Abr/07 (2:00; pH=4.37)

**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**

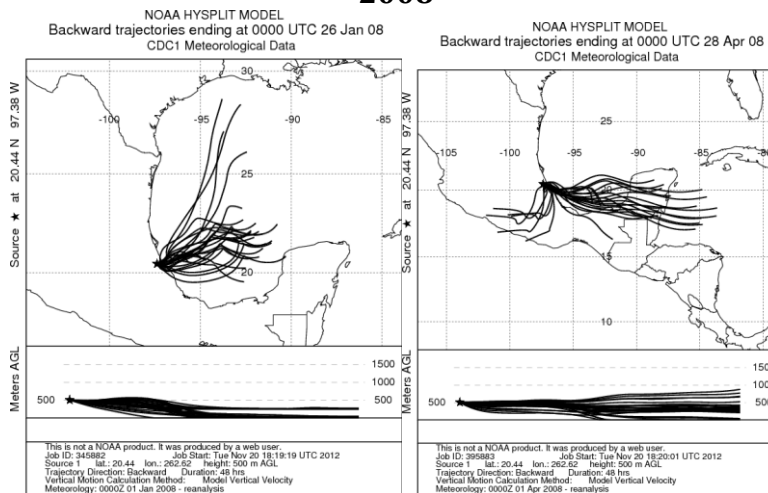


**8/Abr/07 (10:00; pH=4.39)      6/Jul/07 (7:00; pH=4.40)**



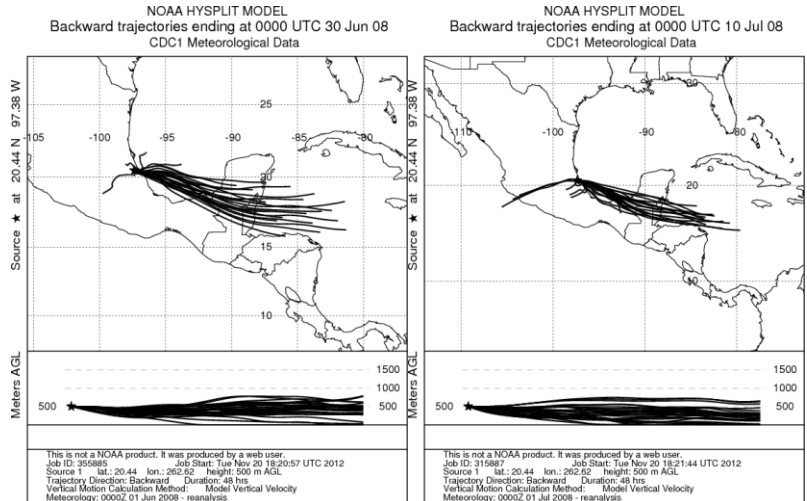
**12/Jul/07 (7:00; pH=4.04)      6/Ago/07 (7:00; pH=4.50)**

**2008**

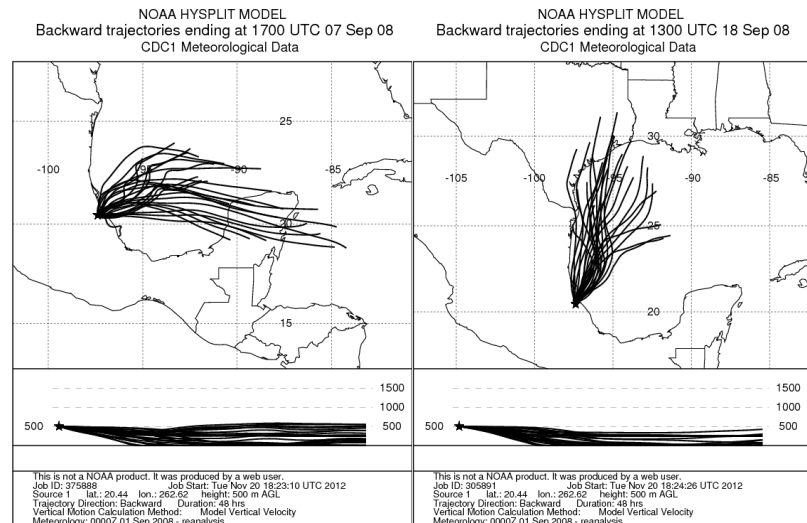


**26/Ene/08 (6:00; pH=4.47)      28/Abr/08 (7:00; pH=5.10)**

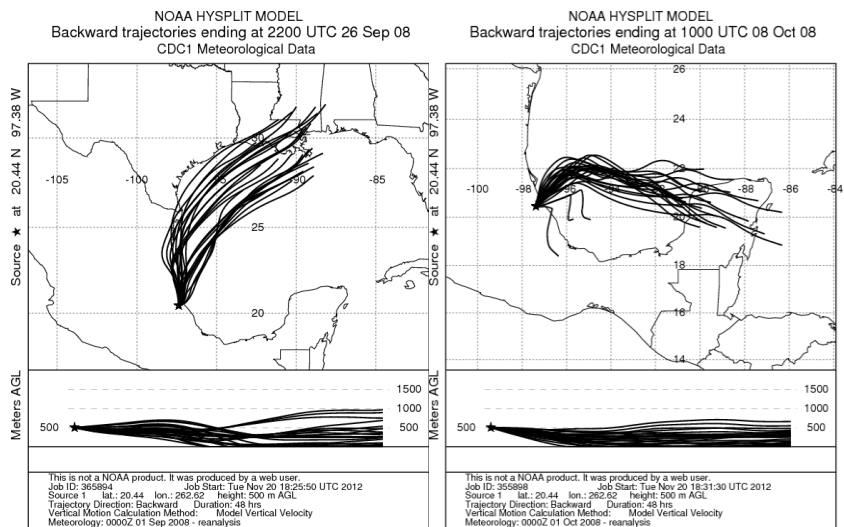
**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**



**30/Jun/08 (7:00; pH=4.80)      10/Jul/08 (7:00; pH=4.20)**

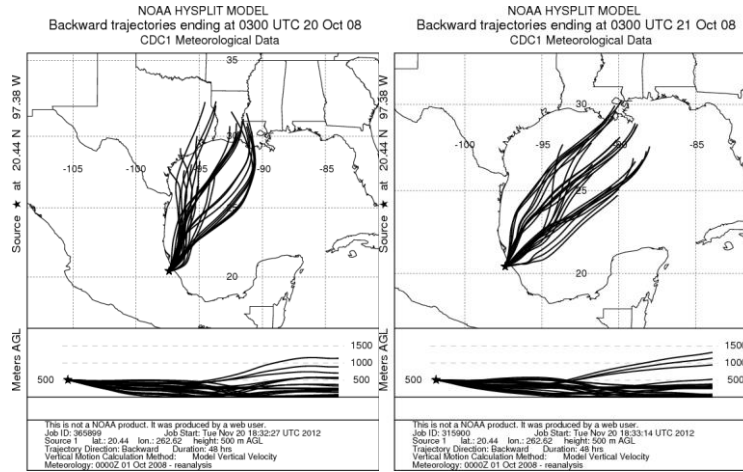


**7/Sept/08 (12:00; pH=5.00)      18/Sept/08 (8:00; pH=5.12)**



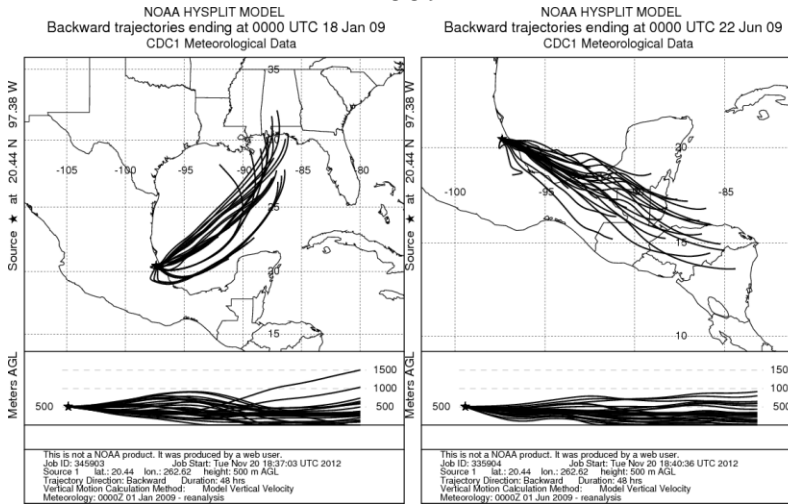
**26/Sept/08 (17:00; pH=4.20)      8/Oct/08 (5:00; pH=5.12)**

**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**

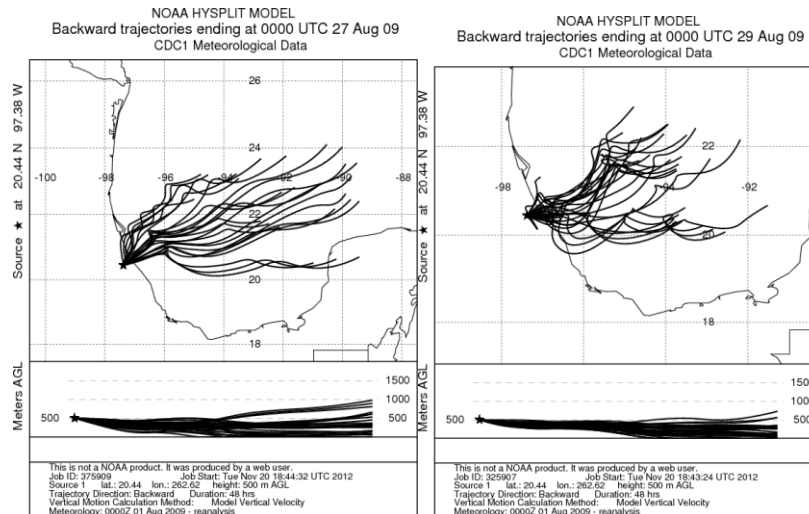


**19/Oct/08 (22:00; pH=5.10) 20/Oct/08 (22:00; pH=5.00)**

**2009**

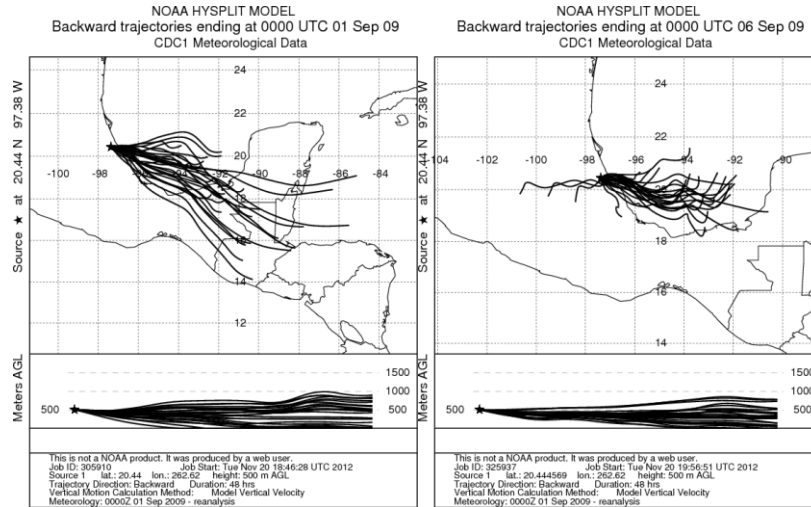


**18/Ene/09 (6:00; pH=5.39) 22/Jun/09 (7:00; pH=5.44)**



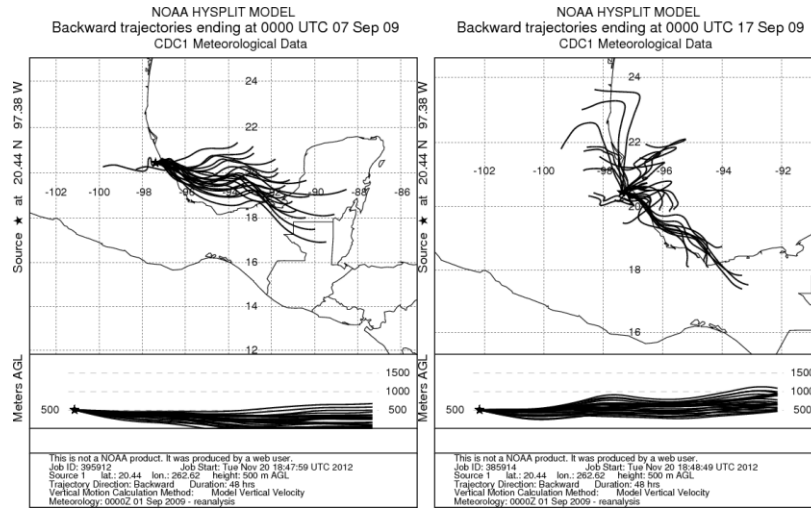
**27/Ago/09 (7:00; pH=4.84) 29/Ago/09 (7:00; pH=5.03)**

**PROGRAMA PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO AMBIENTAL SIGNIFICATIVO EN LA ZONA ARQUEOLÓGICA DE EL TAJÍN**



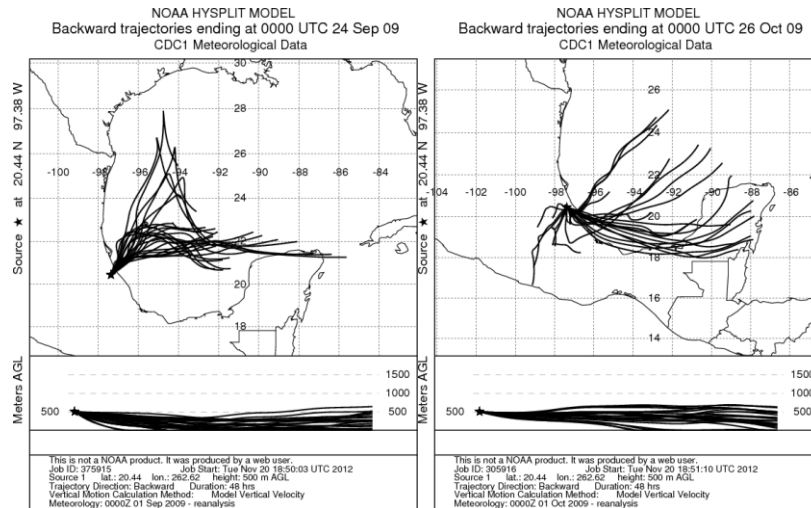
**1/Sept/09 (7:00; pH=5.30)**

**6/Sept/09 (7:00; pH=4.76)**



**7/Sept/09 (7:00; pH=5.24)**

**17/Sept/09 (7:00; pH=5.19)**



**24/Sept/09 (7:00; pH=5.34)**

**26/Oct/09 (6:00; pH=5.50)**

#### **A.4 Criterio para declarar patrimonio de la humanidad (UNESCO, 2011)**

Un “*Patrimonio de la Humanidad Cultural y Natural*” está formado por monumentos, conjuntos y parajes que poseen un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia, y por monumentos naturales, formaciones geológicas, parajes naturales que poseen un valor excepcional desde un punto de vista estético o científico”.

Para ser incluido en el la lista de Patrimonios de la Humanidad un sitio debe tener un sobresaliente valor universal y debe satisfacer al menos uno de los siguientes criterios de selección:

- Testimoniar un importante intercambio de valores humanos a lo largo de un periodo de tiempo o dentro de un área cultural del mundo, en el desarrollo de la arquitectura o tecnología, artes monumentales, urbanismo o diseño paisajístico.
- Aportar un testimonio único o al menos excepcional de una tradición cultural o de una civilización existente o ya desaparecida.
- Ofrecer un ejemplo eminente de un tipo de edificio, conjunto arquitectónico o tecnológico o paisaje, que ilustre una etapa significativa de la historia humana.
- Ser un ejemplo eminente de una tradición de asentamiento humano, utilización del mar o de la tierra, que sea representativa de una cultura (o culturas), o de la interacción humana con el medio ambiente especialmente cuando éste se vuelva vulnerable frente al impacto de cambios irreversibles.
- Estar directa o tangiblemente asociado con eventos o tradiciones vivas, con ideas, o con creencias, con trabajos artísticos y literarios de destacada significación universal. El comité considera que este criterio debe estar preferentemente acompañado de otros criterios.
- Contener fenómenos naturales superlativos o áreas de excepcional belleza natural e importancia estética.
- Ser uno de los ejemplos representativos de importantes etapas de la historia de la tierra, incluyendo testimonios de la vida, procesos geológicos creadores de formas geológicas o características geomórficas o fisiográficas significativas.

### **A.5 Determinación de concentraciones de aniones y cationes, por cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC). [Protocolo de muestreo húmedo y seco de la SCA-CCA-UNAM]**

La técnica analítica instrumental para la identificación y cuantificación de los iones se basa en el Método EPA 300.1, fundamentada en el método de separación de cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC por sus siglas en inglés).

Para realizar el análisis se filtra la muestra previamente a través de una membrana de 0.2  $\mu\text{m}$ , se introduce por un inyector en un “loop” con capacidad de 100  $\mu\text{L}$ , se lleva la muestra por presión mediante una corriente de la fase móvil (FM) hacia el interior de la columna o fase estacionaria (FE), donde los analitos de la muestra se distribuyen entre la FM y la FE, por diferencia de polaridad y tamaño se realiza su separación. La respuesta se realiza a través de un detector de conductividad, cuyo principio se basa en la medición de la diferencia de conductividad de la FM y la FE, más la muestra; esta diferencia se registra, amplifica y se envía como señal a un registrador, como un pico en el recorrido del dispositivo. Los analitos son identificados cualitativamente por el tiempo de retención del pico y la cuantificación se obtiene por la medida de la altura del pico o por el área del pico, que es comparado con estándares certificados con concentraciones conocidas. El tiempo de retención se define como el tiempo que tarda un analito en recorrer la columna cromatográfica, desde su inyección hasta alcanzar el punto máximo de su elución.

Las condiciones cromatográficas para la determinación de las concentraciones de aniones y cationes, se muestran en la tabla A.1:

Tabla A.1 Condiciones cromatográficas para determinación de aniones y cationes

	ANIONES	CATIONES
<b>Fase Móvil</b>	Ac. Ftálico en 10% de Acetona	EDTA/HNO <sub>3</sub> 100mM
<b>Columna</b>	Aniónica PRP-X100. 4.6 mm x 75 mm ,15 cm long Tamaño partícula 6 µm Capacidad 30± 3 µeq/ml Resina de polimetacrilato con un grupo. funcional de amonio cuaternario	Catiónica M/D Marca Waters IC-PACK 3.9 X150mm Tamaño partícula 5 µm Capacidad 1.5± 0.2 µeq/g Base de sílica empaquetada con polibutadieno / copolimero de ácido maleico
<b>Flujo de la columna</b>	2 ml/min	1 ml/min
<b>Conductividad del Eluyente</b>	970 µs	1020 µs

Durante el análisis por HPLC se utilizan reactivos de alta pureza para la preparación de las soluciones y agua desionizada, filtrada a través de un filtro Millipore de 0.2 µm, para eliminar los sólidos en suspensión.

Los recipientes en los que se prepararán las disoluciones serán de polipropileno, para evitar contaminaciones.

#### DETERMINACIÓN DE ANIONES.

##### *Preparación del eluyente de aniones*

Fase móvil: disolver 0.3322 g de ácido ftálico en 100 ml de acetona (grado HPLC), agregar 900 ml de agua desionizada (conductividad 0.05 µS) y mezclar con el ácido ftálico disuelto en acetona, finalmente ajustar a un pH de 5 con NaOH concentrada. Filtrar a través de una membrana de 0.2 µm.

##### *Curva de calibración de aniones*

Se realiza a partir de soluciones estándares certificados (High Purity) de 1000 ppm de cada uno de los aniones (Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Tomar 1.0 mL de cada solución estándar y aforar a 100.0 mL, obteniéndose una concentración de 10 ppm, de la cual se prepararan una serie de soluciones estándar con concentraciones conocidas. Para realizar la curva de calibración de aniones se utilizarán las concentraciones de 0.05 ppm, 0.1 ppm, 0.2 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 2 ppm, 4 ppm y 6 ppm, de cada uno de los aniones a determinar.



### *Cromatogramas y curva de calibración de aniones*

Inyectar las soluciones estándar para hacer la curva de calibración con un tiempo de elución de 16 min. En los cromatogramas obtenidos, se indican los tiempos de retención para cada uno de los aniones, así como el área o altura de los picos, valor que es directamente proporcional a la concentración del anión en el estándar.

### *Análisis de las muestras para determinar la concentración de aniones*

Filtrar las muestras antes de analizar con una membrana de 0.2  $\mu\text{m}$ . Inyectar 300  $\mu\text{L}$ , de los cuales solo pasan 100  $\mu\text{L}$ . El cromatograma obtenido indica el área y la altura de los picos para cada anión, con lo cual se calcula la concentración de cada anión, a partir de la ecuación de regresión lineal de la curva de calibración.

## DETERMINACION DE CATIONES

### *Preparación del eluyente de cationes*

Fase móvil: disolver 0.0292 g de sal disódica de EDTA con agua desionizada, adicionar 189  $\mu\text{l}$  de  $\text{HNO}_3$  Ultrex y aforar a 1 L con agua desionizada. Filtrar a través de una membrana 0.2  $\mu\text{m}$ .

### *Curva de calibración de aniones*

Se realiza a partir de soluciones estándares certificados (High Purity) de 1000 ppm de cada uno de los cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ). Tomar 1.0 mL de cada solución estándar y aforar a 100.0 mL, obteniéndose una concentración de 10 ppm, de la cual se prepararon una serie de soluciones estándar con concentraciones conocidas. Para realizar la curva de calibración de aniones se utilizarán las concentraciones de 0.05 ppm, 0.1 ppm, 0.2 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 2 ppm, 4 ppm y 6 ppm, de cada uno de los aniones a determinar.

### *Cromatogramas y curva de calibración de cationes*

Inyectar las soluciones estándar para hacer la curva de calibración con un tiempo de elución de 12 min. En los cromatogramas obtenidos, se indican los tiempos de retención

para cada uno de los aniones, así como el área o altura de los picos, valor que es directamente proporcional a la concentración del anión en el estándar.

*Análisis de las muestras para determinar la concentración de cationes*

Filtrar las muestras a través de una membrana de 0.2  $\mu\text{m}$ , inyectar 300  $\mu\text{L}$ , sólo pasan 100  $\mu\text{L}$ , al término de la elución (12 minutos) se obtiene un cromatograma con su área o altura de pico para cada catión. Se calcula la concentración de cada catión a partir de la ecuación de regresión lineal de la curva de calibración.

*Límites de detección*

Los límites de detección de los aniones son los siguientes:

Na <sup>+</sup>	0.03 ppm
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.04 ppm
K <sup>+</sup>	0.05 ppm
Mg <sup>2+</sup>	0.04 ppm
Ca <sup>2+</sup>	0.06 ppm
Cl <sup>-</sup>	0.08 ppm
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.11 ppm
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.11 ppm
F <sup>-</sup>	0.04 ppm
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.05 ppm

