



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN CIENCIAS APLICADAS**

**Descripción del Clima y Modelación Numérica de  
Fenómenos Meteorológicos en San Luis Potosí,  
México**

Tesis que presenta

**Luis Felipe Pineda Martínez**

Para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias Aplicadas**

En la opción de

**Ciencias Ambientales**

Codirectores de la Tesis:

Dr. José Noel Carvajal Pérez

Dra. María Teresa Cavazos Pérez

San Luis Potosí, S.L.P., Septiembre de 2005.



# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

COPIA CERTIFICADA

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 005 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 22 días del mes de septiembre del año 2005, se reunió a las 12:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. David Alberto Salas de León</b>	<b>Presidente</b>	<b>UNAM</b>
<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Alfredo Ávila Galarza</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>UASLP</b>
<b>Dr. José Noel Carbajal Pérez</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS  
EN LA OPCIÓN DE CIENCIAS AMBIENTALES**

sustentó el C.

**Luis Felipe Pineda Martínez**

sobre la Tesis intitulada:

*Descripción del Clima y Modelación Numérica de Fenómenos Meteorológicos en San Luis Potosí, México*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**  
**Dra. María Teresa Cavazos Pérez (CICESE)**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 13:30 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fé el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 22 días del mes septiembre de 2005.



  
**Mtra. Ma. Élica Lucio Aguilar**  
Jefa del Departamento de Asuntos Escolares

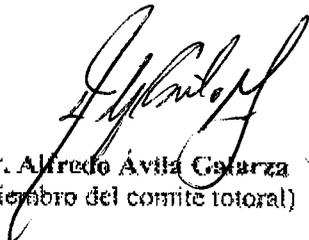
La presente tesis de Maestría en Ciencias en la especialidad de Ciencias Ambientales fue elaborada por Luis Felipe Pineda Martínez y aprobada el 20 de 09 de 2005 por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Ingeniería Ambiental y Manejo de Recursos Naturales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.



Dr. José Noel Carbajal Pérez  
(Director)



Dr. María Tereza Cavazos Pérez  
(Codirector)



Dr. Alfredo Ávila Galarza  
(Miembro del comité tutoral)

Esta tesis fue elaborada en la División de Ingeniería Ambiental y Manejo de Recursos Naturales del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la codirección de los doctores José Noel Carbajal Pérez y Maria Tereza Cavazos Pérez.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (No. 182528).

A Gabriela y Sandy

## **Agradecimientos**

A mis padres y hermanos por todo su apoyo, por toda la confianza que siempre han depositado en mí.

A mis compañeros y amigos Armando, Gabriel, Rafael, Angélica, Eduardo y Leonardo.

A los profesores de la división de Ingeniería Ambiental y Manejo de Recursos Naturales Renovables.

# Índice

	Página
Resumen	x
Abstract	xi
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 2. Climatología para el estado de San Luis Potosí</b>	<b>4</b>
2.1 Introducción	4
2.2 Metodología	5
2.3 Resultados	6
2.3.1 Clasificación del clima de San Luis Potosí	9
2.4 Climogramas	12
<b>Capítulo 3. Metodología</b>	<b>14</b>
3.1 Área de estudio	14
3.2 Modelo MM5	16
3.2.1 Ecuaciones básicas del modelo MM5	17
3.2.2 Configuraciones	18
3.2.2.1 TERRAIN	18
3.2.2.2 MM5 mm5.deck	19
<b>Capítulo 4. Resultados y discusión</b>	<b>21</b>
4.1 Análisis de sensibilidad	21
4.2 Validación de resultados	25
4.3 Modelación de eventos de invierno	31
4.3.1 Análisis sinóptico	31
4.3.2 Modelación de frentes fríos	36
4.3.3 Variación vertical del viento y de la temperatura potencial	39
4.4 Modelación de eventos de verano	41
4.4.1 Ondas de calor	41
4.4.2 Periodos sin evento	44
4.5 Estructura Vertical	46
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>
Anexo 1	52

# Índice de figuras

	Página
2.1 Agrupación de estaciones de acuerdo a su ubicación geográfica y elevación del terreno en metros.	5
2.2 Distribución de las variables de precipitación y temperatura para cada mes del año del total de las estaciones en las componentes 1 y 2.	7
2.3 Componentes 1 y 2 para cada estación en función de la precipitación y temperatura mensual.	8
2.4 Agrupamiento grueso de estaciones de acuerdo a precipitación mensual con restricción geográfica.	8
2.5 Localización de tipos de climas para el Estado de San Luís Potosí.	11
2.6 Climogramas de los tipos de clima para el estado de San Luís Potosí.	12
2.7 Series de tiempo de estaciones de las tres principales zonas en San Luís Potosí, del periodo de 1961 a 1997.	13
3.1 Región del Norte de México, mostrando líneas de elevación del terreno en metros.	14
3.2 Topografía del dominio D2 incluyendo al Estado de San Luís Potosí	15
3.3 Diagrama del sistema de modelación MM5.	16
3.4 Dominio principal (D1) de simulación en el norte/centro de La República Mexicana con tres dominios anidados (D2, D3, y D4).	19
4.1 Resultados de sensibilidad de temperatura del aire (T) y humedad relativa (RH) para dos valores de humedad del suelo del 1 de diciembre de 2005.	22
4.2 Resultados de sensibilidad. Periodo del 1 de mayo de 2005.	23
4.3 Correlación de los datos observados de temperatura (°C) horaria con resultados del modelo MM5 de todos los periodos modelados para un total de 33 días	25
4.4 Temperatura (°C) horaria promediada para todos los periodos modelados.	26
4.5 Serie de tiempo de temperatura de los periodos de la estación de verano de 2004.	26
4.6 Temperatura en los periodos de invierno, se indica la hora de entrada del frente frío al Valle de San Luís Potosí.	27
4.7 Correlación de los datos observados de Humedad Relativa (HR) superficial con resultados del modelo MM5 para el total de los periodos modelados.	28
4.8 Humedad Relativa (HR) horaria promediada del total de periodos simulados.	28
4.9 Series de tiempo de humedad relativa de estación de verano.	29
4.10 Series de tiempo de HR durante el invierno.	30

	Página
4.11 Evolución sinóptica del pasaje de un frente frío. (a) 1, (b) 2 y (c) 3 de Diciembre de 2004 a las 0006 TL	32
4.12 Lluvia total acumulada a 24 hrs. (mm). Para el 1 de Diciembre a las 12 hrs. TL.	33
4.13 Evolución sinóptica del frente frío del 13-15 de Diciembre de 2004 a las 0006 TL. (a) 13, (b) 14, y (c) 15 de Diciembre.	34
4.14 Lluvia total acumula a 24 hrs. al 14 de Diciembre de 2004.	35
4.15 Entrada del frente frío del 24 de Diciembre de 2005.	36
4.16 Frente frío del 19 de enero de 2004. (a) 00, (b) 06, (c) 12 y (d) 18 hrs. TL.	37
4.17 Frente frío del 10 de febrero de 2005. (a) 00, (b) 06, (c) 12 y (d) 18 hrs. TL.	38
4.18 Sección trasversal (W-E, Lat. 22° 20') del dominio 2, secuencia de las 18, 00, 06 y 12 de los días 12 y 13 de Diciembre de 2004.	39
4.19 Temperatura superficial, vectores de viento y la presión a nivel del mar en contornos: 1 de Mayo de 2004 y 1 de Junio de 2005, 06, 12 y 18 TL.	41
4.20 Frente cálido del 10 de Julio de 2005: 00, 06, 12 y 18 hrs. (TL).	42
4.21 Frente cálido del 18 de agosto de 2004: 00, 06, 12 y 18 hrs. (TL).	43
4.22 Días sin eventos en los periodos del 1 de Abril y 15 de Octubre de 2004: 00, 06, 12 y 18 hrs. (TL).	44
4.23 Sección transversal (W-E, Lat. 21° 50') del dominio 2 a las 00, 06, 12 y 18 hrs. TL., para el 13 de diciembre de 2005.	46
4.24 Sección perpendicular (N-S, 101° 02' long) para el dominio dos el día 13 de Diciembre de 2005.	47

# Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1 Clasificación de los subtipos subhúmedos, de acuerdo a la relación P/T.	9
Tabla 2.2 Clasificación de los subtipos secos, de acuerdo a la relación P/T.	10
Tabla 3.1 Configuración de dominios para el módulo TERRAIN.	18
Tabla 3.2 Relación de experimentos numéricos realizados.	19
Tabla 4.1 Valor de RMSE.	23

**Pineda-Martínez Luis Felipe (2005). Descripción del clima y modelación numérica de fenómenos meteorológicos en San Luis Potosí, México**

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Departamento de Ingeniería Ambiental y Manejo de Recursos Naturales.

## **Resumen**

Aplicando los resultados del modelo de mesoescala MM5, desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) de Estados Unidos, se realiza un análisis de una variedad de fenómenos meteorológicos relevantes en las diferentes estaciones del año. Se pone especial énfasis en los períodos de invierno y verano que afectan a la región del Estado de San Luis Potosí. El presente trabajo se basa en 11 simulaciones en los años 2004 y 2005. De esta amplia gama de simulaciones, se desprende que el modelo MM5 reproduce aceptablemente la circulación atmosférica en el Estado de San Luis Potosí bajo condiciones extremas de frentes fríos, frentes cálidos y situaciones normales sin eventos importantes. No obstante que la zona de estudio se caracteriza por tener una gran complejidad fisiográfica y presenta gran variedad de climas, la comparación de los resultados del modelo con los datos observados refleja una muy buena concordancia. El estado de San Luis Potosí se encuentra localizado en la Mesa del Centro y es susceptible al efecto de frentes fríos y ondas cálidas provenientes del Golfo de México. Los frentes fríos de mayor intensidad registrados en el invierno del 2004, se presentaron en el mes de Diciembre, ocasionando heladas y temperaturas por debajo de los 0° C en el valle de San Luis Potosí. Por otro lado, en los meses de Mayo de 2004 y Julio de 2005 se presentaron dos casos extremos de ondas cálidas. En este trabajo se analizó la influencia de estos fenómenos en el comportamiento del clima regional en el estado de San Luis Potosí. Los resultados calculados concuerdan bien con datos observados en estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio. Finalmente, la adaptación del modelo resulta ser adecuada para su utilización como sistema de predicción para la región de San Luis Potosí.

**Pineda-Martínez Luis Felipe, (2005). Climate description and numeric modeling of meteorological phenomenon in San Luis Potosí, México**

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Departamento de Ingeniería Ambiental y Manejo de Recursos Naturales.

## **Abstract**

Applying the results of the mesoescala model MM5, developed by the State University of Pennsylvania and the National Center for Atmospheric Research (NCAR) of The United States, is realized an analysis of a variety of meteorological relevant phenomena on the different seasons of the year. It puts on special emphasis in the winter and summer periods that they concern to the region of San Luis Potosí State. The present work is based on 11 simulations on the year 2004 and 2005. Of this wide scale of simulations, it is clear that the model MM5 reproduces acceptably the atmospheric circulation in San Luis Potosí State, in extreme conditions of cold fronts, warm fronts and normal situations without important events. Nevertheless, the zone of study is characterized for having a great topography complexity and presents great climate variety, the comparison of the model results with the observed information reflects a good agreement. The State of San Luis Potosí is located in the high plateau of the center and is capable to the effect of cold fronts and hot waves coming from Gulf of Mexico. The cold fronts of major intensity registered in the winter of 2004, they appeared in December, causing frosts and temperatures below the 0 ° C in San Luis Potosí Valley. On the other hand, in May, 2004 and July, 2005 they presented two extreme cases of hot waves. In this work, is analyzed the influence of these phenomena in the behavior of the regional climate in San Luis Potosí State. The calculated results agree well with the observed ones on meteorological stations located in the zone of study. Finally, the adjustment of the model turns out to be adapted to utilize it as weather forecasting system for San Luis Potosí.

# Introducción

La historia de la ciencia de la atmósfera se ha desarrollado en base a la necesidad de la predicción del estado del tiempo. Primeramente, esta necesidad surge de la importancia de los eventos de lluvia para la producción de cultivos y prevención de poblaciones ante eventos de desastre relacionados con el clima como sequías, inundaciones, huracanes, nevadas y frentes.

La experiencia humana de algunas de las primeras predicciones del tiempo se basaba en observaciones del comportamiento de animales. La migración de aves se relacionaba con el cambio en la temperatura y vientos. A finales del siglo XVIII, la predicción se convirtió en una profesión o un arte más que en una ciencia. Aunque para este periodo ya se contaba con datos medidos por instrumentos que habían sido desarrollados hasta entonces, estos datos no eran siempre utilizados (Jacobson, 1999).

El tiempo es el estado de la atmósfera en un tiempo y lugar dado, mientras que el clima es lo que se espera en escalas largas de tiempo, incluso geológicas. La clasificación del clima se hace a partir de un conocimiento fisiográfico de la región a estudiar y de observaciones de un largo periodo de tiempo.

En base al conjunto de datos meteorológicos disponibles, se han realizado descripciones del clima de manera global clasificándolo de acuerdo principalmente a la temperatura y precipitación, como es el caso del sistema de clasificación de Köppen (1936). Esta clasificación distingue entre clases principales de climas en el mundo representada geográficamente en regiones determinadas. Además, la vegetación puede dar indicios importantes para la determinación de los biomas principales asociados a un tipo de clima específico (García, 1988). Por lo anterior, se ha realizado en este trabajo una clasificación para el estado de San Luis Potosí en base a la información obtenida de estaciones meteorológicas de esta región las cuales están a cargo de la Comisión Nacional del Agua (CNA).

Dentro de las clasificaciones del clima de México, García (1988) realizó una descripción del clima basado en el sistema de Köppen con algunas modificaciones. Esta clasificación considera una modificación de acuerdo a los rangos de temperatura máximas y mínimas de una base de datos de estaciones meteorológicas de todo el país. Otra modificación importante que realiza García al sistema Köppen es una sub-clasificación de estaciones húmedas de acuerdo a una relación entre la temperatura media anual y la precipitación anual acumulada media. Esta relación permite distinguir entre zonas climáticas similares de acuerdo a su grado de humedad, y parte de esas modificaciones serán aplicadas a la descripción realizada en este trabajo para el clima de San Luis Potosí.

Por otra parte, la clasificación tradicional en climas cálidos, templados y fríos, atendía, más que nada, a la concepción del clima como el estado medio de la atmósfera, sin tener demasiado en cuenta su dinámica (Jacobson, 1999). El desarrollo de las primeras ideas de que la predicción del tiempo atmosférico debería basarse en leyes físicas fue hasta principios del siglo pasado.

Para 1903 Vilhelm Bjerknes (1862-1951) propuso la primera teoría de predicción basada en las leyes de movimiento de Newton, en la ley de gases ideales y las leyes de la termodinámica (Nebeker, 1995). En 1922, Lewis Fry Richardson desarrolló el primer sistema de predicción numérico. El método de Richardson se basaba en una simplificación del método de Bjerknes (Randall, 2000). Las técnicas de cálculo utilizadas se realizaban manualmente y consistían en hacer una división por celdas en mallas y una solución por diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales (Randall, 2000).

Los modelos numéricos son representaciones computarizadas de los procesos termodinámicos, químicos y radiativos que ocurren en la atmósfera. Desde su llegada en 1948, los modelos numéricos han sido usados para el estudio del tiempo, el clima y la contaminación del aire (Jacobson, 1999), entre otras aplicaciones.

Con el fuerte desarrollo de la computación la complejidad y resolución de los modelos ha ido aumentando y cada vez se logran estudiar fenómenos de manera acoplada, como el efecto invernadero, transporte de aerosoles y química de la atmósfera (Jacobson, 1999). Utilizando un modelo general de circulación atmosférica se puede obtener mayor información acerca del comportamiento de los vientos, temperatura, presión y lluvias en un dominio geográfico determinado (Hanna y Yang, 2001).

También existen modelos numéricos de mesoescala que se han desarrollado e implementado en diferentes partes del mundo para estudiar y describir fenómenos en escalas determinadas. Los modelos atmosféricos de mesoescala se utilizan por ejemplo para estudios de análisis en transporte de partículas, precipitaciones, eventos extremos de lluvia y vientos, entrada de frentes fríos y cálidos y clima regional (Lee et al, 2003; Owen, 2003, Giorgi y Mearns, 1999).

El modelo de mesoescala MM5 desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania (PSU) y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) está dentro de los sistemas de modelación que se han desarrollado para la predicción del tiempo. En el presente estudio, se utilizó el MM5 para investigar una serie de frentes fríos y ondas cálidas que se observaron en San Luis Potosí durante el invierno y verano de 2004 y 2005. Las salidas del modelo son comparadas con mediciones observadas para evaluar su precisión.

La región norte del país se caracteriza por presentar fuertes gradientes de temperatura, velocidad y dirección del viento, tanto geográfica como estacionalmente. Además, las diferentes clases de cobertura de vegetación y la topografía hacen que el balance de radiación neta tenga grandes variaciones. Los sistemas montañosos de la zona norte del país ocasionan que el sistema de vientos se canalice en gran escala por la Mesa del Centro presentando zonas de alta turbulencia (Gómez, 2004).

En un análisis estadístico de los vientos realizado por Ordaz-Delgado (1996) muestra que no existe un patrón determinado en la dirección y velocidad del viento en la región del Valle de San Luis Potosí, pero también se encontró que los días de calma son muy pocos (menos del 1%). Los casos de vientos extremos en San Luis Potosí son comunes y se presentan generalmente en los meses de invierno. Estos vientos han sido analizados en el trabajo de Gómez (2004) en el que se hace un análisis del efecto de la circulación atmosférica al sistema de vientos en el Valle de San Luis Potosí.

El estado de San Luis Potosí se encuentra localizado en la provincia fisiográfica de la Mesa del Centro. Además, parte importante del territorio de estado abarca hasta la región de la Llanura Costera del Golfo de México. Por la posición y las características geográficas en esta zona se hace importante la influencia de los fenómenos meteorológicos como frentes fríos y cálidos.

La interacción de frentes fríos y cálidos ocasiona inestabilidades en la atmósfera relacionados con modificaciones en patrones regionales de climas en las zonas donde ocurre la interacción de estas masas de aire. Estas inestabilidades en la atmósfera finalmente determinan las variaciones en el clima regional. Debido principalmente a que ocasionan precipitaciones, aumentos y disminuciones en la temperatura por el movimiento de esas masas de aire con diferentes propiedades de humedad y temperatura.

En el presente trabajo se realiza primeramente una clasificación y una descripción del clima del Estado de San Luis Potosí en base a algunas modificaciones al trabajo de García (1988) incorporando técnicas estadísticas de análisis multivariable. Como parte central y segundo objetivo de la tesis, se simulan y analizan mediante el modelo de mesoescala MM5, algunos casos de fenómenos meteorológicos que ocurren en invierno y verano (frentes fríos y cálidos), los cuales afectan a la región del norte del país, en particular a la mesa del centro. Finalmente con la adaptación del modelo, se implementará como un sistema de predicción del estado del tiempo en forma continua para la región del norte del país.

# Climatología para San Luis Potosí

## 2.1 Introducción

Los conceptos de clima y estado del tiempo hacen referencia a escalas de tiempo diferentes. El tiempo se puede definir como el estado de la atmósfera en un momento determinado, mientras que el clima es el resultado de cada uno de estos estados del tiempo a lo largo de un periodo de tiempo más largo (Jacobson, 1999).

El clima del norte de México se caracteriza por tener una gran variación de acuerdo a la conformación geográfica. Las grandes formaciones montañosas de las cordilleras oriental y occidental hacen que las corrientes de los vientos sean poco uniformes y ocasionen zonas de turbulencia a gran escala, así como zonas de alta convección.

El estado de San Luis Potosí se localiza en el centro del país y se caracteriza por tener una gran variedad de vegetación de acuerdo a las diferencias de altitud. En el estado se distinguen tres zonas principales: la zona del Altiplano en el oeste, la Zona Media y la Huasteca en el este del estado (Fig. 2.1).

En la región del estado de San Luis Potosí hay una variedad de patrones climáticos que se producen debido a la latitud, altitud y a la topografía, las cuales generan un gradiente de humedad en la atmósfera que va de la zona de la Mesa Central a la zona de la Huasteca, que es más baja y más húmeda debido a la influencia de los vientos del Golfo de México.

Las grandes masas de aire húmedo que llegan del Golfo de México ocasionan un aumento en el contenido de vapor de agua en las zonas costeras y de baja altitud, como en la Huasteca, ocasionando grandes precipitaciones y temperaturas cálidas. Debido al incremento de altitud hacia tierras continentales y hacia el oeste, estas masas van perdiendo temperatura debido al ascenso adiabático y contenido de humedad debido a la precipitación en zonas más bajas y al efecto de sombra orográfica, lo que ocasiona que en la Mesa del Centro se presenten pocas lluvias (Holecheck, 1998).

El objetivo de esta parte de la tesis es hacer una descripción del clima de San Luis Potosí. Para esto, es necesario contar con un buen número de estaciones y una buena cantidad de observaciones meteorológicas en un tiempo considerablemente largo.

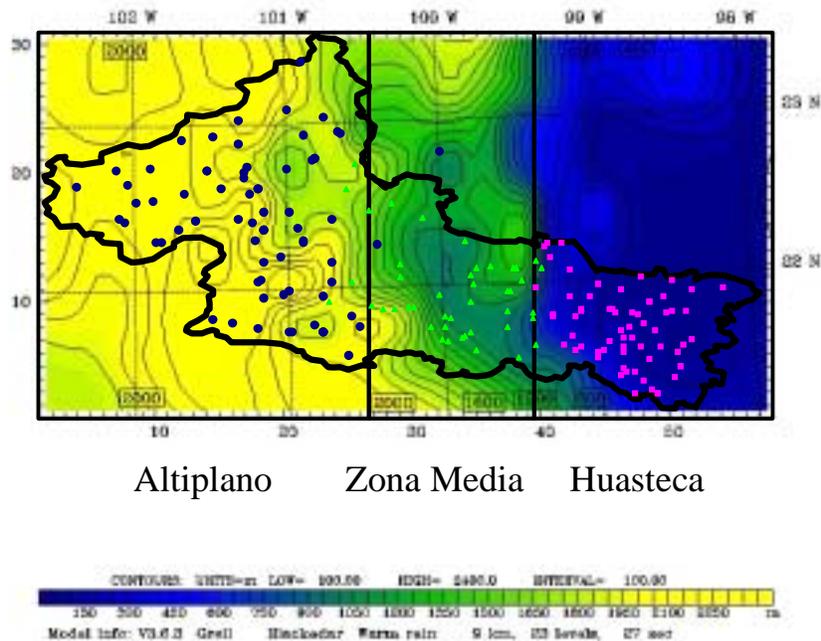
## 2.2 Metodología

Se obtuvieron observaciones diarias de temperatura y precipitación de un total de 173 estaciones meteorológicas ubicadas en el Estado de San Luis Potosí a cargo de la CNA para un periodo promedio de 28 años de 1961 a 1997 (Anexo 1).

Para cada estación se obtuvo un registro diario de cada una de las variables los cuales se usaron para obtener un promedio mensual para los años de registro de cada estación. No obstante, los periodos de registro variaban para cada una de las estaciones de acuerdo a su antigüedad o a observaciones perdidas o falta de datos de algunas fechas.

Una vez obtenido el promedio mensual por año de cada estación se utilizaron las series temporales de la precipitación y la temperatura media mensual para hacer un análisis estadístico multivariable de componentes principales de una matriz de covarianza para determinar un patrón de la distribución espacial y temporal en grupos de estaciones determinado por estas variables.

También, se realizó un análisis del conjunto de estaciones para agruparlas de acuerdo a su posición geográfica (Fig. 2.1), delimitando en tres zonas principales al estado de San Luis Potosí. Se restringió en primer lugar de acuerdo a la altitud siendo por debajo de 500 msnmm la zona llamada “La Huasteca”, por arriba de este nivel y hasta 1,500 msnmm “La Zona Media” y por ultimo la región del “Altiplano” por arriba de los 1,500 msnmm.



**Figura 2.1** Agrupación de estaciones de acuerdo a su ubicación geográfica y elevación del terreno en metros. Se definieron tres zonas: el Altiplano, la Zona Media y la Husteca.

Por último, obtenidos los patrones de la matriz de estaciones determinados por el tipo de clima y región geográfica específicos, se realizó una clasificación del clima para cada zona de acuerdo al criterio de Köppen modificado por García (1988). Se consideraron intervalos de temperatura de acuerdo a las adaptaciones hechas por García para la zona de la Mesa Central y el norte de México.

### 2.3 Resultados

El análisis de componentes principales (ACP), es una técnica que envuelve un análisis en base a los valores y vectores propios de la matriz de correlación ó covarianza. El objetivo principal del análisis de componentes principales, es reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos pero conservando la variabilidad original. Para este trabajo, se utilizó la matriz de covarianza para hacer un análisis de componentes principales considerando la temperatura media y la precipitación acumulada de cada mes del año como variables, la cual se obtiene de la siguiente forma:

$$S = (s_{i,j}) \quad (2.1)$$

Cada elemento de la matriz corresponde a la covarianza calculada por:

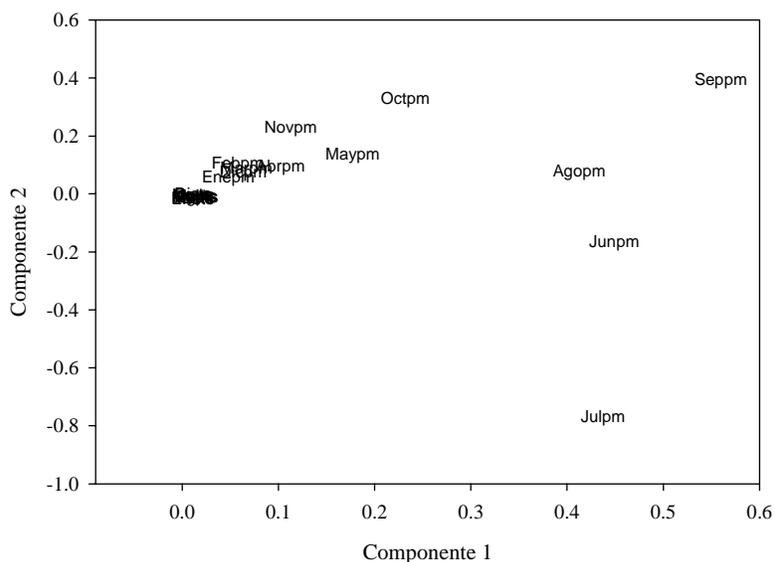
$$s_{i,j} = cov(X_i) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{i,j} - \bar{X})^2}{(n-1)} \quad (2.2)$$

Donde,  $S$  es la matriz de covarianza,  $s_{ij}$  son los valores de covarianza por cada elemento y  $X_{ij}$  corresponde al *jesimo* elemento del cada *iesimo* vector de datos.

De la matriz de covarianza se obtuvieron los vectores y valores propios, de los cuales se realizó el análisis de componentes principales. Cada vector propio tiene su correspondiente valor propio para nuestra matriz de covarianza, el cual representa un ajuste lineal del conjunto de datos normalizados por su valor medio. De hecho, el vector propio con el mayor valor propio corresponde al primer componente, y así una vez encontrados los valores propios se ordenaran del mayor al menor lo que dará el orden de importancia de cada componente. Los vectores propios definen un nuevo sistema coordenado en el cual relaciona la variabilidad de los datos. Éste sistema coordenado, esta orientado tal que cada nuevo eje esta orientado en la dirección de la máxima variabilidad de los datos y cada eje es ortogonal a los demás ejes (Wilks, 1995).

En la figura 2.2, se muestra el análisis de componentes principales de precipitación y temperatura para cada mes del año. Cada variable se obtuvo de un promedio mensual anual del total de años de la base de datos. Las variables fueron normalizadas con la media total y divididas por la desviación estándar para evitar la disparidad entre magnitud y unidades. En la figura 2.2, se muestran las variables de precipitación y temperatura (ultimas dos letras, pm y ts) por mes que corresponde las primeras tres letras para un total de 24 variables para el total de las 173 estaciones meteorológicas.

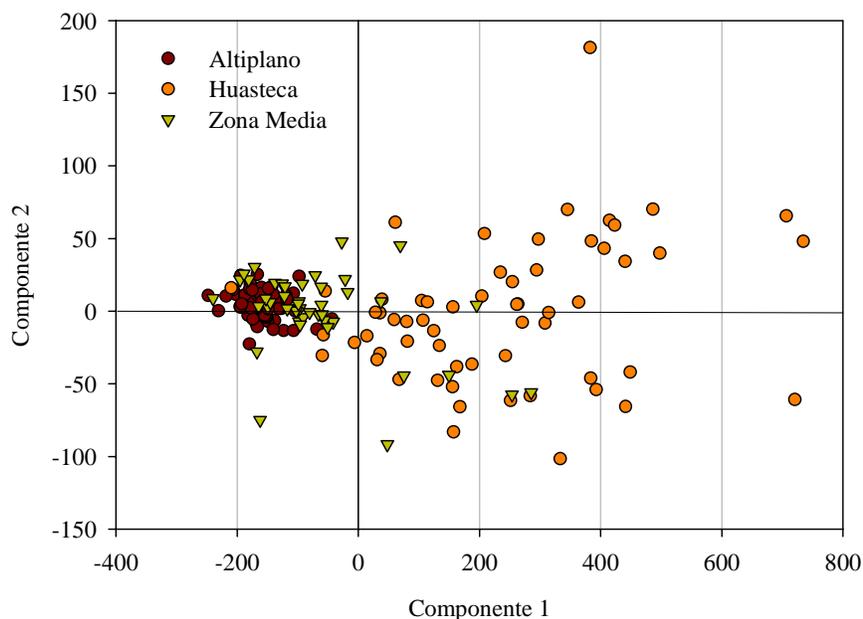
El análisis de componentes principales, para las variables en función de cada estación, indicó una mayor distribución de las variables de precipitación mensual en el eje del primer componente (Fig. 2.2). La varianza explicada por las dos primeras componentes fue del 90.87%. La primera componente fue asociada a las variables de precipitación mensual en época de verano para los meses de Junio (junpm) a Septiembre (seppm) y meses con una cantidad extraordinaria de precipitación en el mismo periodo.



**Figura 2.2** Distribución de las variables de precipitación y temperatura para cada mes del año del total de las estaciones en las componentes 1 y 2.

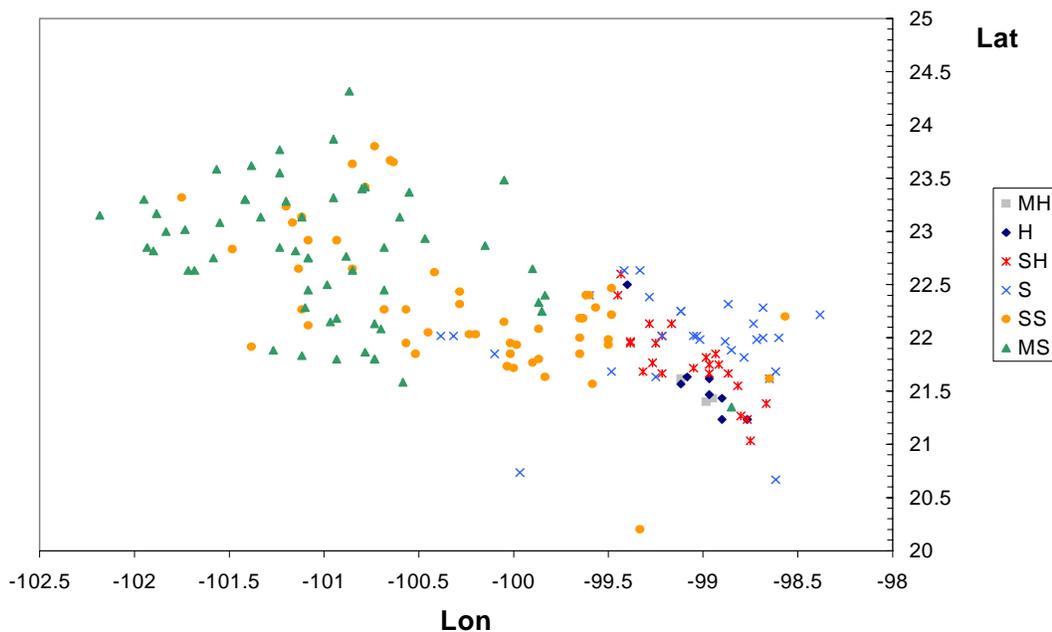
Debido a que la gradiente de variación de los meses del año con mayor precipitación es en dirección del eje del componente uno, estas variables determinen la mayor variabilidad de los datos. Por lo que, para esta región sólo se distinguen dos periodos climáticos importantes en al año. Estos periodos marcan las dos principales estaciones del año: la estación seca que va de Octubre a Mayo y una estación húmeda en los meses de Junio a Septiembre.

En el análisis de componentes principales para matriz de covarianza de las estaciones en función de las variables de precipitación y la temperatura mensuales, correspondiente a la transpuesta de la matriz de datos del análisis anterior (Fig. 2.3), se observa que existe un patrón de estaciones que tienen en una máxima variación en el eje del primer componente, la varianza explicada por las dos primeras componentes fue del 96.69%. Esto significa que las estaciones pueden ser clasificadas en proporción a la precipitación principalmente ya que el análisis fue hecho con las mismas 24 variables y éstas determinaron la máxima variación de acuerdo al análisis anterior en la figura 2.2. Además, se encontró que las estaciones se agrupan en regiones geográficas en la distribución del eje del primer componente (Fig. 2.3).



**Figura 2.3** Componentes 1 y 2 para cada estación en función de la precipitación y temperatura mensual. Se muestra disposición geográfica de las estaciones en las tres principales regiones del estado.

Por lo anterior, se realizó una clasificación gruesa en grupos de estaciones considerando un gradiente en la precipitación neta, determinada por el primer componente principal, se determinaron 6 principales grupos como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4** Agrupamiento grueso de estaciones de acuerdo a precipitación mensual con restricción geográfica. Como clasificación gruesa se propone estaciones: Muy húmedas (MH), Húmedas (H), Semi-Húmedas (SH), Secas (S), Semisecas (SS) y Muy Secas (MS).

Una vez obtenida esta clasificación burda, se calculó la media mensual para cada variable con el fin de realizar una clasificación de acuerdo a la de Köppen (1936) con algunas modificaciones hechas por García (1988). No se consideró los cambios en los intervalos de temperatura realizados por García debido a que para el total de datos en el estado de San Luis Potosí el promedio de la temperatura es de 16.8° C menor de 18° C considerada en la clasificación de Köppen para el mes más frío. La nueva sub-clasificación fue de acuerdo con la humedad de la estación según los factores usados por García (1988), así como las modificaciones para la designación de clima.

### 2.3.1 Clasificación del clima de San Luis Potosí

De acuerdo a lo anterior se encontró la siguiente clasificación de regiones climáticas para el estado de San Luis Potosí, los cuales se muestran en el mapa de la Figura 2.5.

Para las estaciones Húmedas (H) de acuerdo a la clasificación es un clima (*Cfga*, Fig. 2.6a) *templado húmedo con lluvias todo el año*, es decir el rango de precipitaciones para la estación húmeda no es más de diez veces la precipitación del mes más húmedo y menor de tres veces la precipitación del mes más seco. Este tipo de estaciones se localiza en la zona de la Huasteca con temperaturas mayores de 22° C para el mes cálido.

El clima (*Cfgb*<sup>3</sup>, Figura 2.6b) *templado húmedo con lluvias todo el año*, al igual que el anterior en patrones de precipitación pero con la diferencia de ser más cálido con temperaturas medias mensuales mayores de 10° C durante más de cuatro meses. Este tipo de climas se encuentra en la zona de la Huasteca en los municipios de Xilitla y Tamapatz.

Para la Zona Media encontramos dos tipos de climas: el primero (*Cw<sub>1ga</sub>*, Fig. 2.6d) *templado subhúmedo con lluvias en verano* (Tabla 2.1), las características para este tipo de clima son: temperaturas media para el mes más frío entre los -3 y 18° C; la precipitación para el mes más húmedo a la mitad del año en el verano diez veces mayor a la del mes más seco que debe ser mayor de 40 mm. Además, presenta temperaturas mayores a los 10° C en promedio y una temperatura máxima para el mes más cálido mayor a los 22° C, que por lo general se presenta en la primera parte de año. Para la sub-clasificación *W<sub>1</sub>* se utilizó sólo el criterio de la relación entre la precipitación total y la temperatura media (P/T), y el criterio de García para estaciones más secas dentro de la clasificación de los subhúmedos (*Cw*), tabla 2.1. Este tipo de clima se puede encontrar en la región de Cd. Valles hasta el municipio del Naranjo al noreste del estado y hasta el municipio de Tamuin y Tanquian más al sur.

**Tabla 2.1** Clasificación de los subtipos subhúmedos, de acuerdo a la relación P/T

Símbolos de los subtipos	Cociente P/T	Designaciones
<i>C(w<sub>0</sub>)</i>	< 43.2	El más seco de los subhúmedos
<i>C(w<sub>1</sub>)</i>	entre 43.2 y 55.0	Intermedio
<i>C(w<sub>2</sub>)</i>	> 55.0	El más húmedo de los subhúmedos

También dentro de la Zona Media encontramos la clasificación ( $Cw_{2ga}$ , Fig. 2.6e) *templado subhúmedo con lluvias en verano* (Tabla 2.1), con las mismas características al anterior sólo que este se caracteriza por ser el más húmedo de los climas Subhúmedos ( $Cw$ ). Este clima se extiende desde el municipio de Tamasopo hasta Cd. del Maíz incluyendo parte de la Zona Media en Cd. Valles y Matlapa.

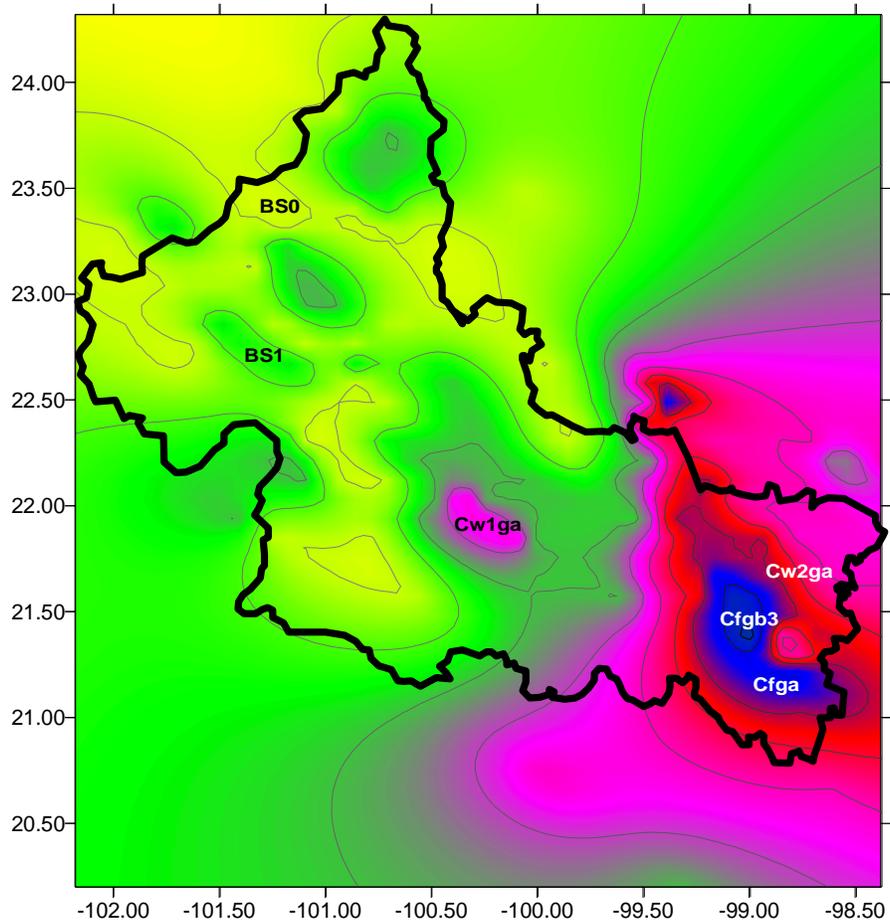
Los climas *secos o áridos* ( $BS$ ; Fig. 2.6f) se localizan en la zona del Altiplano Potosino y se caracteriza por una baja precipitación (entre 300 y 500mm) en la época húmeda de verano. Para esta región del altiplano hacemos la subdivisión de climas secos de acuerdo a García, pero sólo usando la relación  $P/T$  como indicador de las estaciones más secas dentro de esta clasificación como se muestra en la tabla 2.2. De esta forma encontramos sólo dos clases de clima para esta zona la  $BS_0$  y  $BS_1$ .

**Tabla 2.2** Clasificación de los subtipos secos, de acuerdo a la relación  $P/T$

Simbolos de los subtipos	Cociente $P/T$	Designaciones
$BS_0$	< 22.9	El más seco de los $BS$
$BS_1$	> 22.9	El menos seco de los $BS$

En esta zona este tipo de clima se asocia a vegetación típica del semidesierto del altiplano donde se pueden encontrar matorral desértico micrófilo en altitudes entre 1,000 y 2,300 m sobre el nivel del mar (Rzedowski, 1961). Este tipo de vegetación esta asociada con zonas de pastizales, mezquites, especies arbustivas, y en menos proporción algunas especies de agaves y cactáceas dentro de las zonas con clima seco en la clasificación  $BS_1$ , siendo el menos seco de esta clasificación.

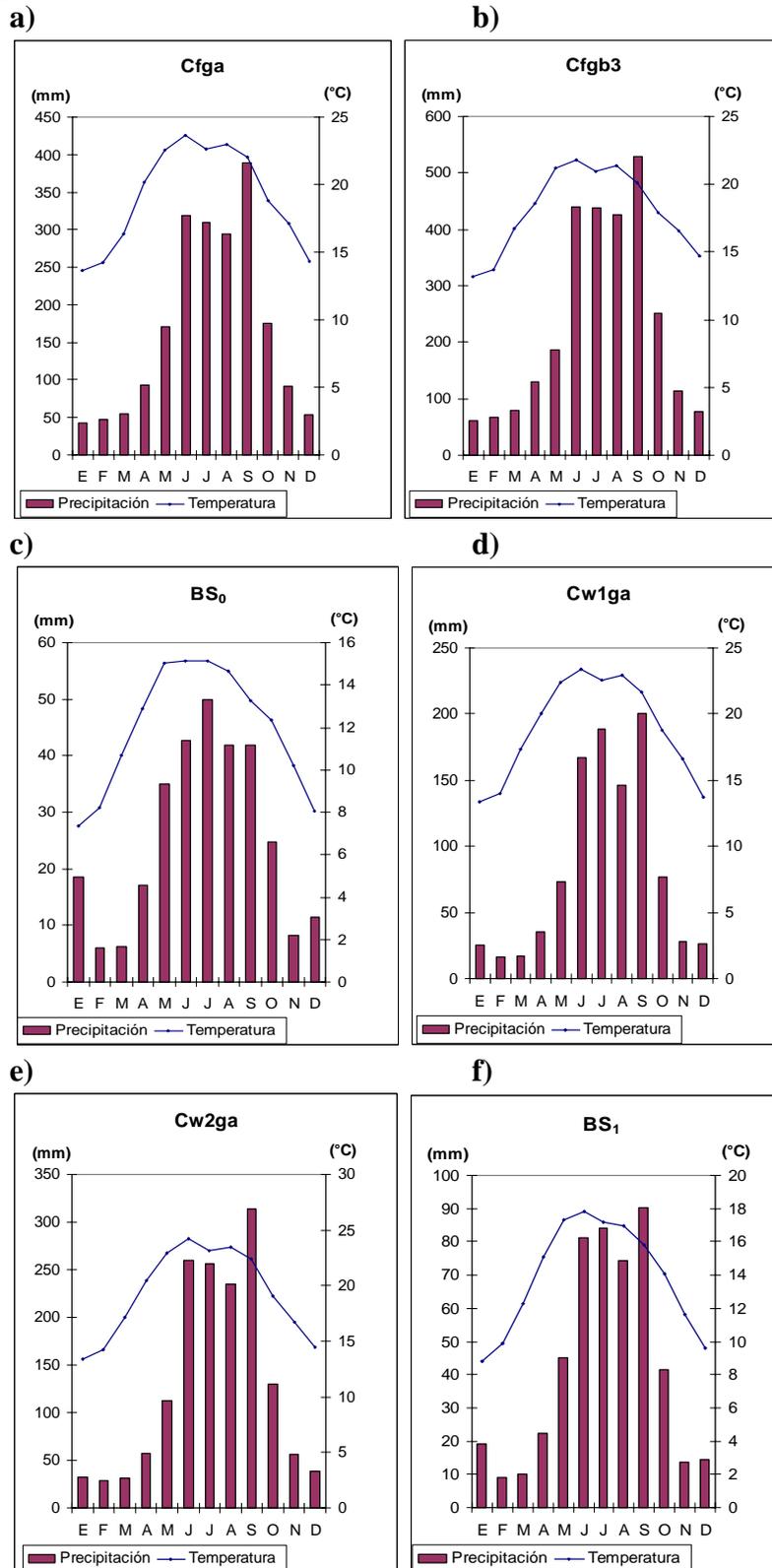
En las regiones de clima árido seco ( $BS_0$ , Fig. 2.6c) se asocia, más bien, a un tipo de matorral desértico rosetófilo. Este tipo de vegetación se caracteriza por presentar especies de agaves, como lechugillas, yucas, algunas acacias y especies de cactáceas (Rzedowzki, 1961).



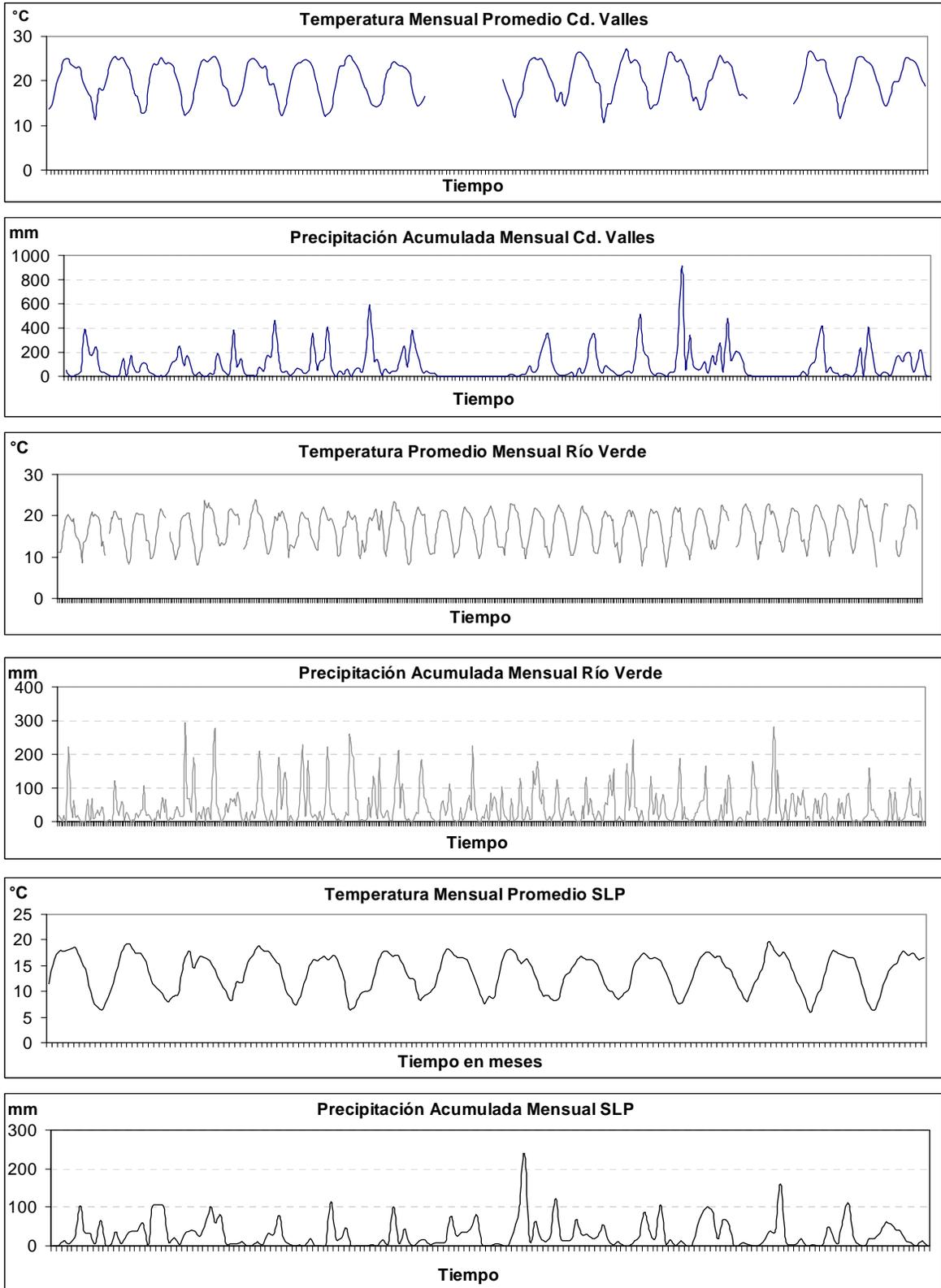
**Figura 2.5** Localización de tipos de climas para el Estado de San Luis Potosí.

En conclusión, la variedad de climas dentro de una región está determinada por factores geográficos principalmente. Además, la cobertura vegetal también juega un papel muy importante en flujos de energía y calor. En sitios como éste donde los contraste en altitud son tan marcados crea ambientes y sitios de vegetación característica y climas que van de acuerdo con su posición geográfica y composición vegetativa.

## 2.4 Climogramas



**Figura 2.6** Climogramas de los tipos de clima para el estado de San Luis Potosí. Datos obtenidos de estaciones meteorológicas a cargo de la CNA.



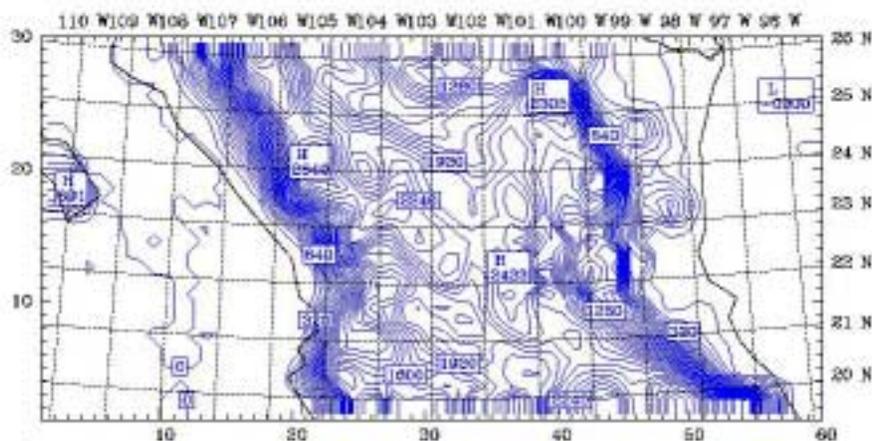
**Figura 2.7** Series de tiempo de estaciones de las tres principales zonas en San Luis Potosí, del periodo de 1961 a 1997. Datos obtenidos de estaciones meteorológicas a cargo de la CNA.

# Metodología

## 3.1 Área de estudio

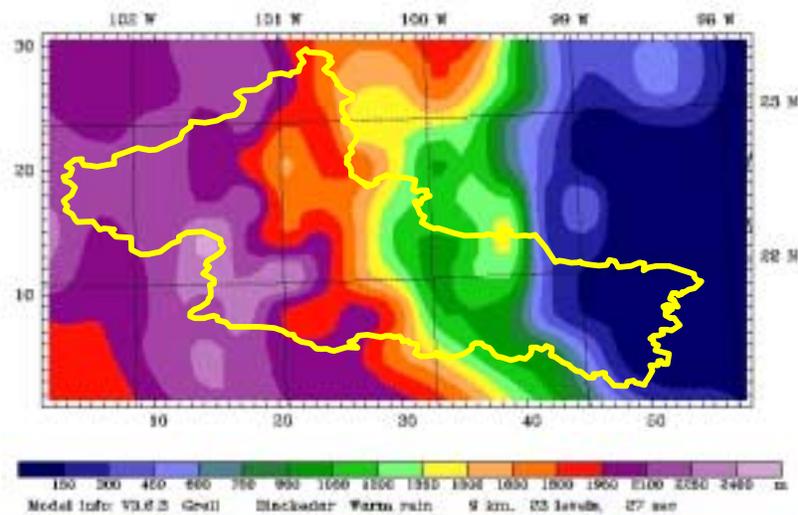
El área de estudio comprende la parte norte de la República Mexicana en un primer dominio de modelación (Fig. 3.1). La zona del norte de México se caracteriza por tener una gran complejidad en fisiografía con dos grandes formaciones montañosas cerca de los dos litorales, zonas de planicies y llanuras costeras. La Sierra Madre Oriental inicia al sur del estado de Texas, siguiendo adyacente al litoral este del país, dando forma a la llanura costera del Golfo de México, para terminar interceptando al Eje Neo-volcánico. La Sierra Madre de Occidente, de extensión un poco mayor, delimita a la cuenca costera del Golfo de California, inicia en las Montañas Rocosas en el estado de Nuevo México continuando hacia el sur entre los límites de los estados de Sonora y Chihuahua hasta el sureste del estado de Zacatecas e intercepta al Eje Neo-volcánico en el centro de la República. Estas cordilleras alcanzan elevaciones de hasta 3,000 m en los puntos más altos. Así mismo, encierran a las provincias fisiográficas de la Mesa del Centro y las grandes llanuras del norte en las regiones del Altiplano y el desierto de Chihuahua (INEGI 2002).

Debido a su gran barrera orográfica, estas cordilleras influyen directamente en la distribución regional del clima y tipos de vegetación. En las llanuras costeras favorecen un clima cálido húmedo con lluvias en la mayor parte del año en zonas de altitudes de medias a bajas (Fig. 3.1). En este tipo de climas encontramos vegetación típica de selva baja y bosques húmedos. La zona del altiplano se extiende del norte del estado de Guanajuato (~21° N) hasta las llanuras del norte en el estado de Chihuahua, en el límite norte del área de estudio. La Altiplanicie se caracteriza por presentar en general un clima que va de cálido seco a climas áridos con vegetación típica del semidesierto como los pastizales y matorrales micrófilos y rosetofilos (Rzedowzki, 1961, INEGI 2002).



**Figura 3.1.** Región del Norte de México, mostrando líneas de elevación del terreno en metros.

El estado de San Luis Potosí (Fig. 3.2) se encuentra localizado en la parte centro oriente de la República Mexicana. La disposición de la fisiografía del estado es bastante compleja ya que se encuentra en la zona de transición que va de la zona costera del Golfo de México hasta la zona de la Mesa del Centro a través de la Sierra Madre Oriental en la zona media del estado.



**Figura 3.2** Topografía del dominio D2 incluyendo al Estado de San Luis Potosí.

Dentro de la zona costera, al sureste del estado, encontramos la región de la Huasteca Potosina en la transición de la llanura costera a la Sierra Madre Oriental con una elevación en promedio alrededor de los 500 m. El valle de Río Verde se encuentra en la zona media del estado dentro de la provincia de la Sierra Madre Oriental en altitudes cercanas a los 1,200 m representando el 35.58% de la superficie total del estado. Por último, la parte alta del estado se localiza dentro de la Mesa del Centro en la región llamada el Altiplano Potosino; esta zona representa la mayor parte del territorio del estado con un 42.04% del total (INEGI, 2002). En forma contrastante, el Altiplano se caracteriza por presentar un clima semidesértico diferente a las otras zonas como se menciona más a detalle en el capítulo anterior.

El valle de San Luis Potosí que se localiza aproximadamente a 22° 20' latitud norte y a 100° 45' de longitud oeste está ubicado en la provincia fisiográfica Mesa del Centro y delimitado por la sierra de San Miguelito, orientada de noroeste-sureste, tiene una altitud máxima de 2,360 m. y está clasificada como sierra alta con mesetas. La sierra de Villa de Zaragoza situada al sureste y al este de Villa de Reyes designada sierra alta limita al valle por occidente y oriente. El valle está orientado de norte a sur aproximadamente, tiene una altitud media de aproximadamente 1,800 m. El sistema de valles forma parte de la región hidrológica RH 37 "El Salado". La zona se encuentra dentro de la cuenca de la presa San José-los Pilares (INEGI, 2002).

Las características fisiográficas del valle influyen en gran parte la entrada de frentes fríos en invierno además de crear eventos de vientos de gran intensidad sobre todo en los primeros meses del año (Gómez, 2004). Los vientos dominantes en la ciudad de San Luis

Potosí provienen principalmente de las direcciones E, ENE y NE. Los vientos menos frecuentes son los del S y SSE. Los periodos de calma son escasos (Ordaz et al, 1997).

### 3.2 Modelo MM5

El modelo de mesoescala MM5V3.5 fue desarrollado por la Universidad Estatal de Pennsylvania (PSU) y el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) de Estados Unidos. La quinta generación del modelo de mesoescala es la última versión desarrollada. Este modelo ha sido utilizado en varias instituciones alrededor del mundo por su alta definición en la detección de sistemas atmosféricos de mesoescala. El código fuente está escrito en lenguaje Fortran 90 y cuenta con una amplia gama de parametrizaciones de radiación, superficie terrestre, capa límite planetaria, convección y física de nubes.

El MM5 cuenta con 5 módulos básicos: TERRAIN, REGRID, INTERPF, MM5 y GRAPH aunque también cuenta con otros módulos opcionales, como se muestra en la Figura 3.3. Los datos de topografía y meteorológicos son procesados e interpolados horizontalmente por los programas TERRAIN y REGRID de coordenadas geográficas (latitud/longitud) a puntos de malla a una proyección Lambert-Conformal. Una vez realizada esta interpolación no es necesario incluir más detalles de mesoescala en los datos. Aunque, cuando se tienen observaciones superficiales de redes regionales de mediciones esta pueden ser incluidas en un re-análisis de datos (programas LITTLE\_R/RAWINS). La interpolación vertical es llevada a cabo por el programa INTERPF, la interpolación cambia de niveles de presión a coordenadas sigma para poder ser leídos por el programa MM5. Los programas gráficos (GRAPH y RIP) se usan para visualizar las salidas de todo el sistema de modelación. El modelo tiene la capacidad de anidamiento múltiple hasta 9 dominios que pueden ser corridos al mismo tiempo. La relación entre distancias de malla en anidamiento debe ser de 3:1. Cada sub-dominio tiene un dominio madre en el cual está completamente embebido.

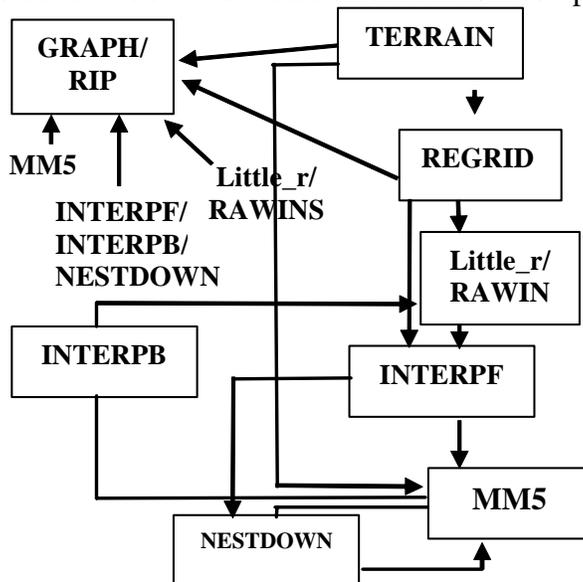


Figura 3.3. Diagrama del sistema de modelación MM5.

### 3.2.1 Ecuaciones básicas del modelo MM5

El modelo MM5 es un modelo no-hidrostático por lo que considera el aporte de la componente vertical. En estos términos, las coordenadas  $(x, y, \sigma)$  son consideradas en las ecuaciones básicas de un modelo no-hidrostático, en donde la coordenada  $\sigma$  esta en términos de la presión usada par determinar los niveles verticales del modelo, dada por:

$$\sigma = \frac{(P_0 - P_t)}{(P_{S0} - P_t)} \quad 3.1$$

Donde  $P_0$  es la presión de referencia,  $P_t$  es la presión superior constante,  $P_{S0}$  es la presión de referencia en la superficie.

Las ecuaciones básicas del modelo se expresan con una transformación de coordenadas  $z$  a coordenadas  $\sigma$  como se muestra a continuación:

Presión:

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot \mathbf{V} = -\mathbf{V} \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left( \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad 3.2$$

Momento en la dirección  $x$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla u + v \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) - e w \cos \alpha - \frac{u w}{r_{earth}} + D_u \quad 3.3$$

Momento en la dirección  $y$ :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left( \frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) = -\mathbf{V} \cdot \nabla v - u \left( f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) + e w \sin \alpha - \frac{v w}{r_{earth}} + D_v \quad 3.4$$

Momento en la dirección  $z$ :

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0 g}{\rho p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g p'}{\gamma p} = -\mathbf{V} \cdot \nabla w + g \frac{\rho_0 T'}{p T_0} - \frac{g R_d p'}{c_p p} + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{earth}} + D_w \quad 3.5$$

Donde  $e$  es la fuerza de Coriolis expresada por:

$$e = 2\Omega \cos \lambda, \quad \alpha = \phi - \Phi_c \quad 3.6$$

$\lambda$  es la latitud,  $\phi$  el la longitud y  $\Phi_c$  el la latitud central.

Termodinámica:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{\partial p'}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad 3.7$$

Términos de advección:

$$\mathbf{V} \cdot \nabla A \equiv m u \frac{\partial A}{\partial x} + m v \frac{\partial A}{\partial y} + \dot{\sigma} \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad 3.8$$

Donde

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} u - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} v \quad 3.9$$

Términos de divergencia:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g \partial w}{p^* \partial \sigma} \quad 3.10$$

## 3.2.2 Configuraciones

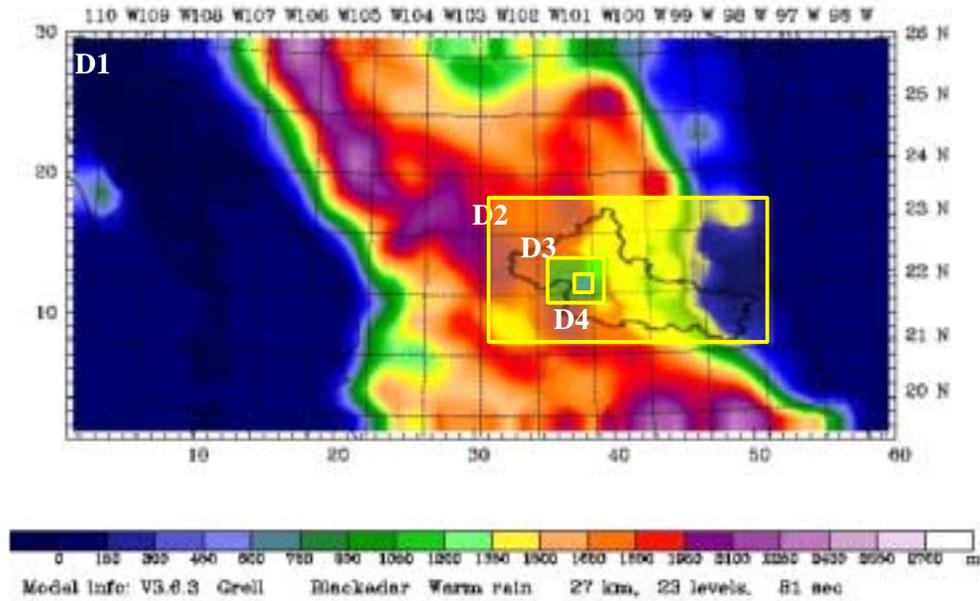
### 3.2.2.1 TERRAIN

Se establecieron 4 dominios de simulación en el norte de la República Mexicana (Fig. 3.4) El primer dominio (D1, dominio madre) centrado en 25° de latitud norte y -103° de longitud, en una malla de 60 puntos en la dirección E-W y 30 en la dirección N-S con una resolución de 27 Km. El segundo dominio (sub-dominio D2) tiene una resolución de 9 Km., en una malla de 31x58 puntos partir del punto (8, 32) del dominio madre en la zona centro-norte del país. El tercer dominio (sub-dominio D3) con una resolución de 3 Km. en una malla 31x40 puntos en la zona que comprende al Estado de San Luis Potosí y un último nivel de anidamiento en un cuarto dominio (D4) con una malla de 31x31 puntos y una resolución de 1 Km., (tabla 3.1).

**Tabla 3.1** Configuración de dominios para el módulo TERRAIN

Dominio	NESTIX	NEXTJX	Dist. (Km)
1	30	60	27
2	31	58	9
3	31	40	3
4	31	31	1

Se obtuvieron datos de topografía y uso suelo de la base de datos de la *U. S. Geological Survey* (USGS) en una resolución de 30" que fueron usados como condiciones iniciales. Los datos atmosféricos de las variables requeridas para inicializar el modelo como: presión al nivel del mar, viento, temperatura, humedad relativa y altura geopotencial para los niveles de superficie y de altura a 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 y 100 mb se obtuvieron del *Data Support Section of Scientific Computing Division* de la NCAR.



**Figura 3.4** Dominio principal (D1) de simulación en el norte/centro de La República Mexicana con tres dominios anidados (D2, D3, y D4).

### 3.2.2.2 MM5 *mm5.deck*

El código fuente del programa fue obtenido vía *ftp* de la página *WEB* del modelo MM5. Fue compilado y corrido en una estación de trabajo *Dec\_alpha* de dos procesadores *Compac Tru64* a 64 bits. Se utilizaron las configuraciones originales del modelo para los experimentos en el archivo *configure.user*. Se realizaron 11 experimentos numéricos del modelo en diferentes fechas como se muestra en la tabla 3.2. Las fechas fueron seleccionadas para simular el comportamiento de algunos eventos típicos de la región de estudio durante las dos estaciones principales del año y dos en periodos sin la presencia de eventos (ver capítulo 2).

**Tabla 3.2** Relación de experimentos numéricos realizados.

Experimento	Estación	Periodo	Año	Tipo de Evento
R-1	verano	1-4 Abr	2004	Sin evento
R-2	verano	1-4 May	2004	Onda de calor
R-3	verano	10-14 Jul	2004	Onda de calor
R-4	verano	18-21 Ago	2004	Onda de calor
R-5	verano	15-18 Oct	2004	Sin evento
R-6	invierno	1-4 Dic	2004	Frente frío
R-7	invierno	12-15 Dic	2004	Frente frío
R-8	invierno	22-25 Dic	2004	Frente frío
R-9	invierno	19-22 Ene	2005	Frente frío
R-10	invierno	9-12 Feb	2005	Frente frío
R-11	verano	1-4 Jun	2005	Onda de calor

En los experimentos de invierno se analizó el comportamiento de la entrada de frentes fríos de gran intensidad a la zona de estudio. Todos los experimentos se iniciaban a 0000 hrs (UTM) con una duración de 72 horas con un paso de tiempo de 81 minutos y datos de salida cada hora. Para las épocas cálidas del año se realizaron el mismo tipo de experimentos para analizar el comportamiento de los golpes de calor provocados por ondas cálidas.

Con resultados se obtuvieron gráficas usando los paquetes gráficos de *NCAR-graphics* y el módulo RIP (Grell et al, 1994). Para cada dominio se graficaron diversas variables de salida a nivel de superficie, las cuales se discuten en el siguiente capítulo.

# Resultados y discusión

## 4.1 Análisis de sensibilidad

El modelo MM5 cuenta con varias parametrizaciones para simular fenómenos que ocurren a escalas más pequeñas que las de la malla del modelo; es decir, fenómenos que no son resueltos numéricamente por el modelo. Las parametrizaciones que incluye el MM5 son: la de radiación, capa límite planetaria, nubes cúmulos y superficie terrestre. Esta última se basa en las categorías de uso de suelo; sin embargo, la aproximación de clases de vegetación puede ser muy burda para regiones de estudio específicas donde se puede tener una gran variación en la distribución de uso de suelo. Las características de un determinado tipo de vegetación o uso de suelo varían en cuanto a su contenido de humedad, albedo y rugosidad, por lo que se puede hacer un ajuste de estos parámetros para tratar de hacer una aproximación a las condiciones regionales donde el modelo ha sido adaptado.

El estado de San Luis Potosí se caracteriza por presentar una variedad de tipos de vegetación en las tres zonas principales del estado (ver capítulo 2). En mayor proporción en el dominio 2 (Fig. 3.4) la vegetación dominante es el pastizal y matorral micrófilo y rosetofofilo (Rzedowski, 1961 y Huber-Sannwald, 2002) con el 59% de la superficie del Estado de San Luis Potosí. Este tipo de vegetación, típica del semidesierto, se presenta ante condiciones de baja humedad.

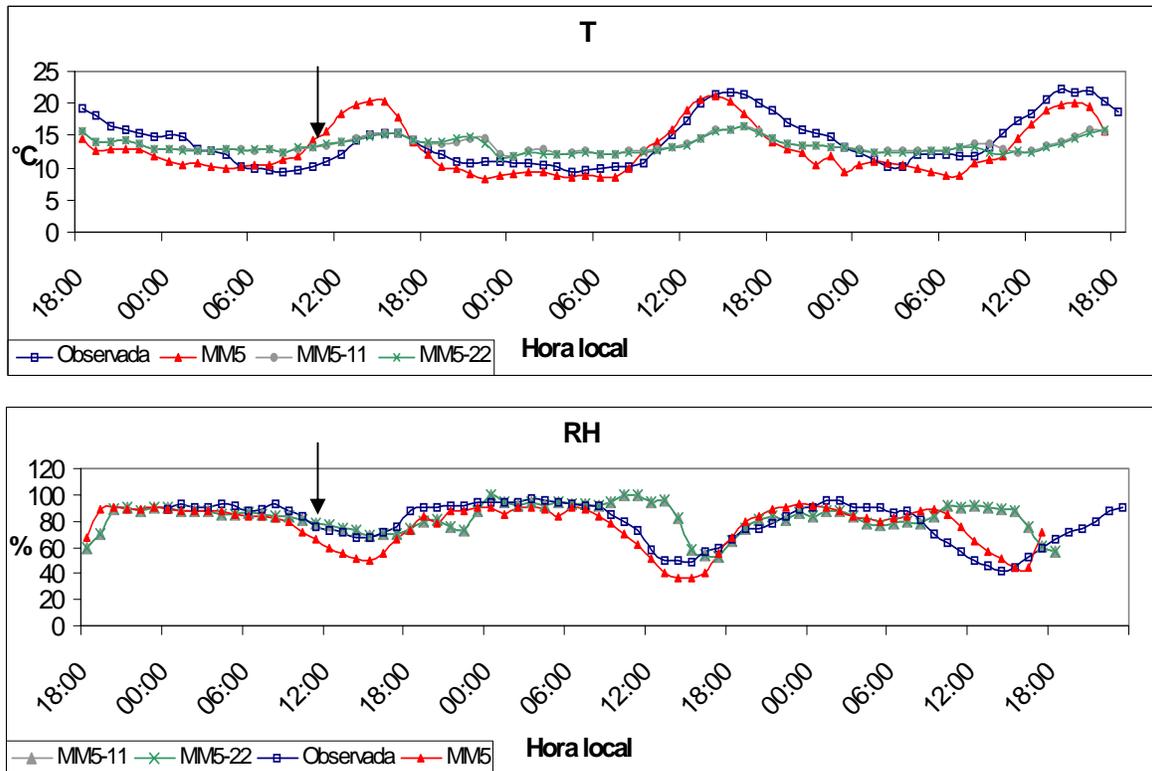
Encontramos que los parámetros de contenido humedad de suelo del esquema de superficie terrestre del MM5 están un 20% encima de los reportados en estudios regionales para San Luis Potosí (Medina-Roldan, 2003). De acuerdo a lo anterior se experimentó con humedades de suelo más bajas (11 y 22%) ponderando de acuerdo a la cobertura del pastizal, con respecto a las otras clases de vegetación, para las corridas del 1 de diciembre y 1 de mayo de 2005 y se tomaron como control (MM5-C) los valores (30% de humedad) originales del modelo.

En la figura 4.1, se observa cómo la variación de la humedad del suelo altera el comportamiento de la temperatura del aire y de la humedad relativa. No obstante, en el control (MM5-C) se observa una mayor aproximación al comportamiento real. Esto podría indicar que para las categorías de vegetación en el uso de suelo, un incremento en la humedad implica un mayor aporte al balance de energía.

La temperatura presenta un comportamiento diario con un valor mínimo a las 6:00 y un máximo alrededor de las 14:00 hrs. y un decremento hacia la tarde y noche en comportamiento normal (Fig. 4.1). En el caso de la humedad relativa presenta un comportamiento similar a la temperatura con máximos y mínimos que se presentan en forma inversa en tiempos similares. Ante la presencia de masas de aire, se altera éste

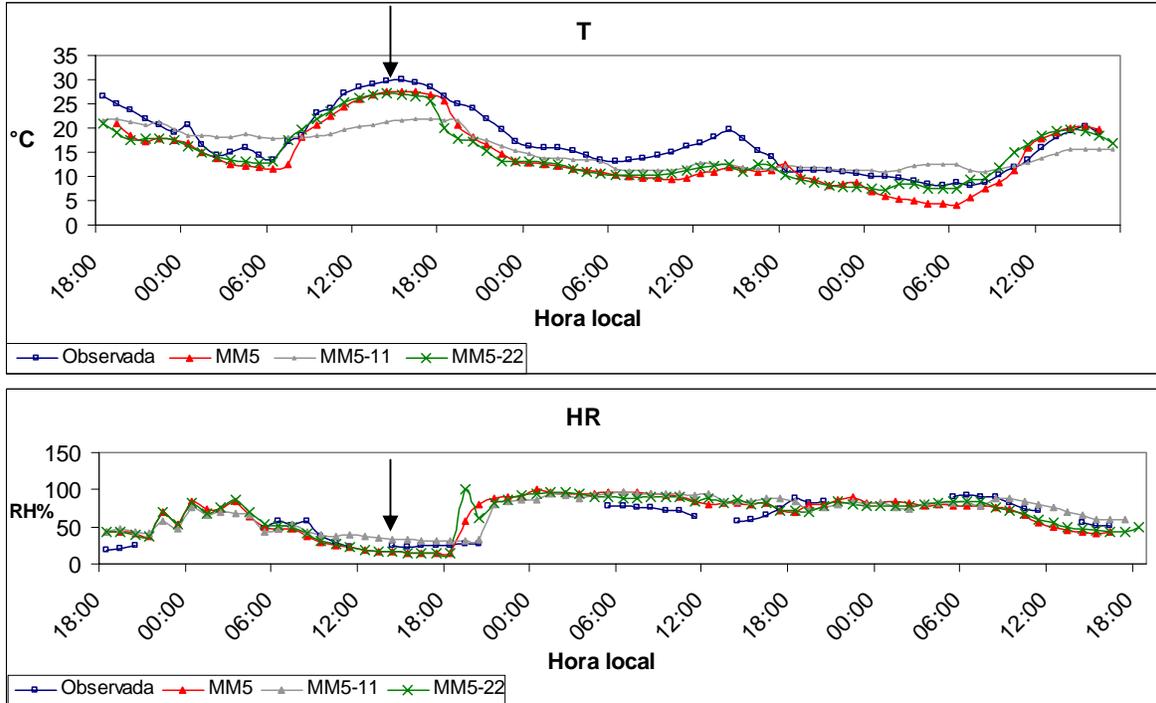
comportamiento normal de la temperatura y la humedad relativa causando un aumento o disminución de éstas en función de las características de la masa de aire.

El frente frío que se presentó el 1 de Diciembre entro al Valle de San Luis Potosí aproximadamente a las 11:00 TL causando la disminución de la temperatura para este día durante el paso de la masa de aire frío. Mientras que la humedad relativa permaneció alta durante el paso del frente frío debido al gran contenido de humedad de la masa de aire.



**Figura 4.1** Resultados de sensibilidad de temperatura del aire (T) y humedad relativa (RH) para dos valores de humedad del suelo del 1 de diciembre de 2005. MM5-11: 11% menos humedad de suelo, MM5-22: 22% menos humedad comparada con la humedad control MM5-C.

La correlación para este análisis de invierno en general mostró una menor correspondencia que el control. Para la temperatura, los coeficientes de correlación (R) mostraron un menor ajuste ( $R_{11}=0.7247$  y  $R_{22}=0.6897$ ) con respecto a las observaciones. En el caso de la humedad relativa, el comportamiento fue totalmente fuera del rango de aproximación del control.



**Figura 4.2** Resultados de sensibilidad. Periodo del 1 de mayo de 2005. Se muestra la entrada de una onda cálida.

En la estación de verano se realizaron los mismos experimentos para el 1 de mayo de 2004 en la entrada de un frente cálido a las 14:00 TL ocasionando un aumento extraordinario de la temperatura máxima y una disminución de la humedad relativa de este día. Se modificaron los parámetros de humedad del suelo con los mismos valores usados en el análisis de invierno. En la figura 4.2, se observa la misma variación de los resultados de cada valor de humedad con respecto a las observaciones. Aunque, para el valor de la humedad de 22% existe una mejor correspondencia que para el valor de 11%. En la tabla 4.1 se muestran los valores de RMSE (Root Mean Standard Error) para cada una de las pruebas de contenido de humedad del modelo con respecto a las observaciones, así como una comparación entre los valores de MM5-11 y MM5-22.

**Tabla 4.1** Valor de RMSE.

Variable	MM5-C/OBS	MM5-11/OBS	MM5-22/OBS	MM5-11/MM5-22
HR (%) -V	17.00	14.77	18.05	13.38
T(°C) -V	3.60	3.97	3.12	3.32
HR(%) -I	10.98	16.42	16.79	3.77
T(°C) -I	2.87	3.13	3.18	0.31

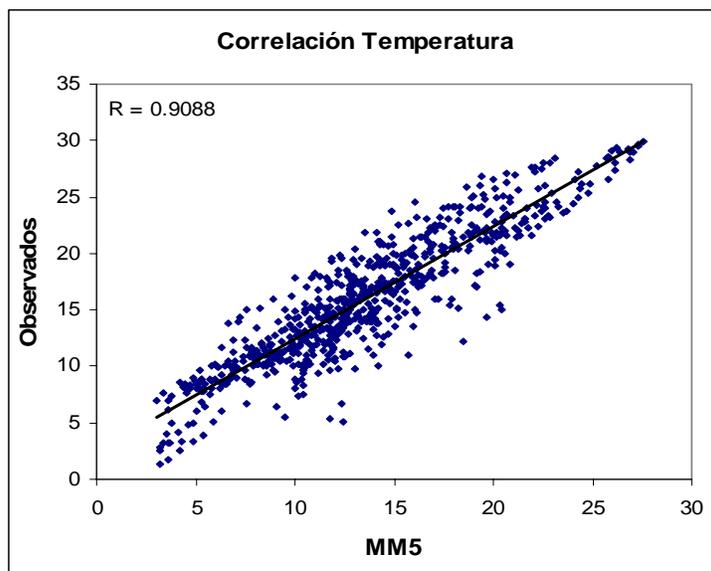
Para valor de RMSE, se observa la mayor aproximación del control con respecto a los datos observados y con respecto a los demás valores al analizar la combinación de ambas variables en los dos periodos, invierno (I) y verano (V). También, se observa una mayor correspondencia entre los valores de 22 y 11% de humedad, con excepción de la humedad relativa de verano.

La parametrización del modelo resulta estar en una buena aproximación con respecto a un valor específico para un dominio. Aunque, las categorías de uso de suelo son generalizadas, el balance de energía constituye una buena aproximación del modelo. La variación de la aproximación del modelo varió más en la estación de verano que en invierno lo que implica que el aumento de la temperatura en la entrada de un frente cálido influye en el cálculo del balance de energía en el modelo. Se puede concluir que los valores de humedad de acuerdo a las categorías de vegetación del modelo (MM5-C) proporcionan resultados que se aproximan más a las observaciones por lo que este valor es usado en las corridas realizadas.

## 4.2 Validación de resultados

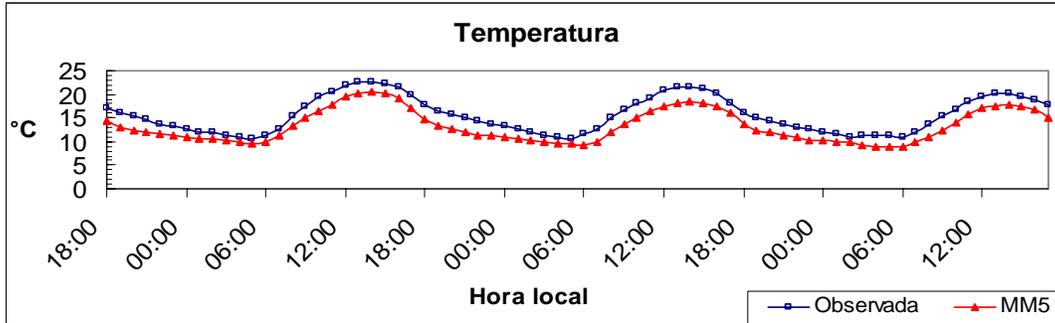
Los modelos de predicción se basan en ecuaciones de movimiento no lineales que describen los fenómenos en la atmósfera. No obstante, la solución de estas ecuaciones se hace por métodos de aproximación numérica. El modelo MM5 se basa en la solución de las ecuaciones por el método de diferencias finitas por lo que la aproximación de los resultados depende en mucha medida de los pasos de tiempo, condiciones iniciales y de frontera. En base a esto se realizó un análisis de la aproximación del modelo en el cual los datos correspondientes a cada periodo se compararon con datos medidos. De esta forma se obtuvieron series de tiempo para la temperatura y humedad relativa.

Los resultados del modelo obtenidos en este trabajo fueron comparados con datos medidos en el Observatorio Tangamanga II, ubicado en la Cd. de San Luis Potosí (Lat. 22° 12' 27" N, long. 101 01' 20" W, 1883.32 m), a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), del cual se obtuvieron datos horarios observados. En la figura 4.3 se muestra la correlación de los datos observados de temperatura con respecto a los datos simulados por el modelo. El coeficiente de correlación (R) tiene un valor de 0.908 lo que indica una muy buena aproximación.



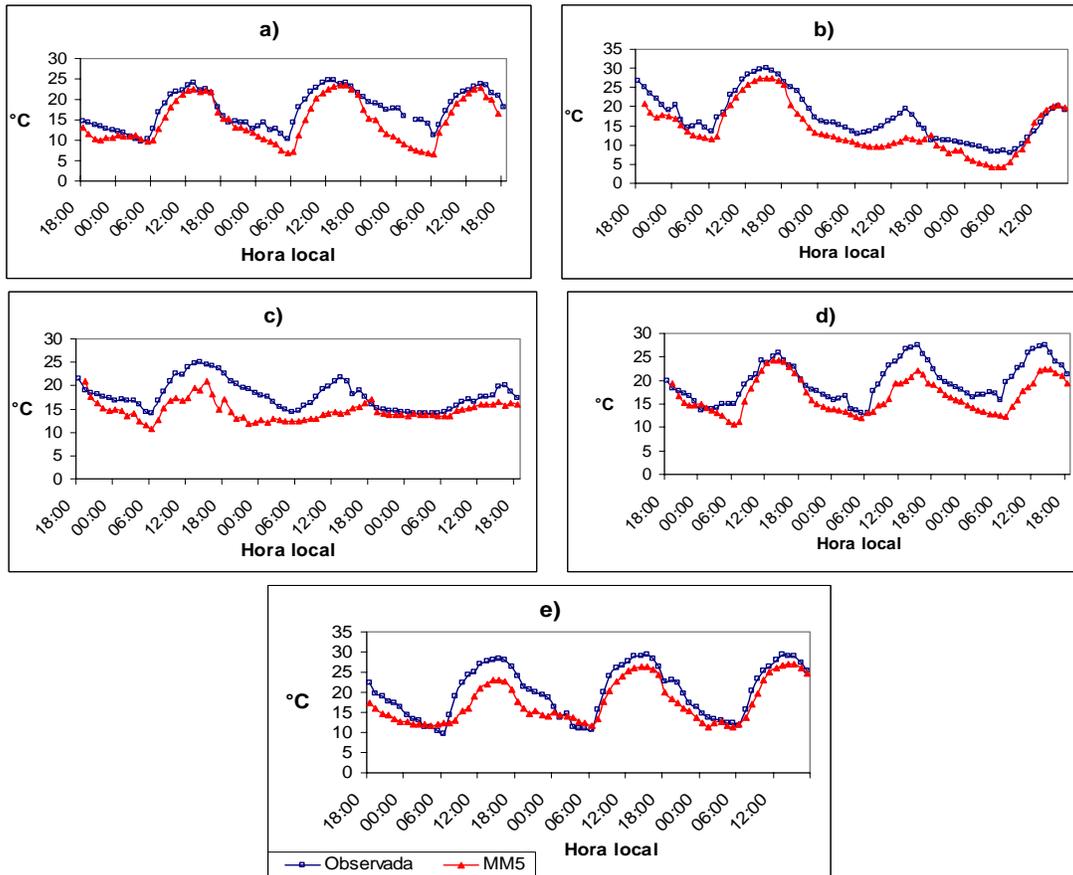
**Figura 4.3** Correlación de los datos observados de temperatura (°C) horaria con resultados del modelo MM5 de todos los periodos modelados para un total de 33 días (ver Tabla 3.2) para el dominio 4.

En la figura 4.4 se muestra el comportamiento de la temperatura media horaria para el total de los periodos que se modelaron comparados con datos observados. Se aprecia que de manera general el modelo subestima los valores de temperatura, pero es capaz de reproducir el ciclo diario, con valores máximos a las 14:00 y mínimos a las 6:00. Por otro lado, también se observa que el comportamiento del modelo se aproxima al comportamiento real y los valores están dentro del rango de aproximación de correlación del grafico anterior. El análisis general del comportamiento de la temperatura está dentro de lo esperado del promedio.



**Figura 4.4** Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) horaria promediada para todos los periodos modelados.

Sin embargo, cuando se analiza el comportamiento diario para cada periodo se pueden apreciar variaciones anómalas en el ciclo diario. Ante la presencia de frentes fríos y cálidos el comportamiento de la temperatura es mucho más variable; se observan por ejemplo disminuciones en la temperatura en periodos diurnos durante el pasaje de frentes fríos, mientras que se observan aumentos de temperatura nocturnos por efectos de frentes cálidos.

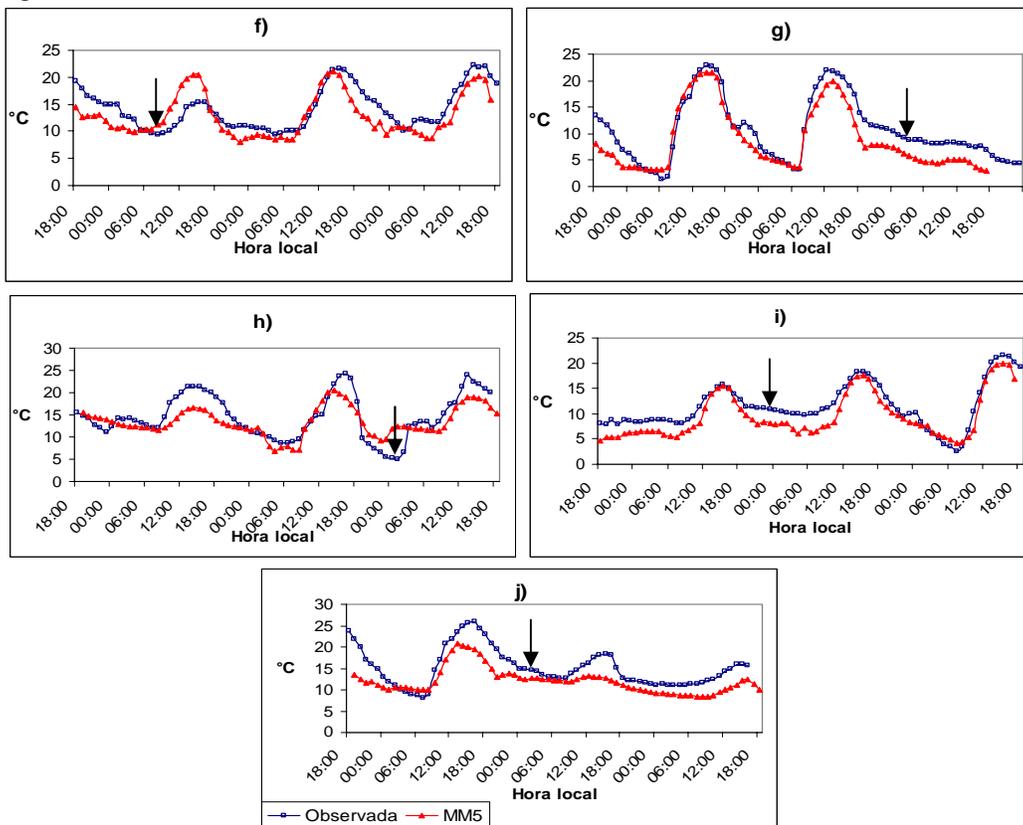


**Figura 4.5** Serie de tiempo de temperatura de los periodos de la estación de verano de 2004. Las líneas con triángulos muestran los datos obtenidos del modelo MM5 y la línea con cuadros los datos observados en el Observatorio Tangamanga II, SMN. a) Del 1 al 4 de abril, b) 1 al 4 de mayo, c) 10 al 14 de julio, d) 18 al 22 de agosto y e) 20 al 24 de octubre.

Como se muestra en las figuras 4.5a y 4.5d el comportamiento de la temperatura es menos variable en los meses de transición en Abril y Octubre que en las temporadas de contrastes térmicos fuertes como son el verano (Fig. 4.5b y 4.5c) y el invierno (Fig. 4.6i y 4.6j). Las variaciones de la temperatura pueden llegar a ser altas en periodos de tiempo relativamente cortos (Stull, 2000).

El comportamiento de las temperaturas en la época de verano está en función de los movimientos de las masas de aire caliente de ondas tropicales. Estas masas provienen en gran parte de la intensificación de la zona de convergencia intertropical (Holton, 1992). Por otra parte, la simulación de la temperatura por el modelo es buena y refleja bien la variación diaria. Sin embargo, en la mayoría de los casos se ve una sub-estimación del modelo.

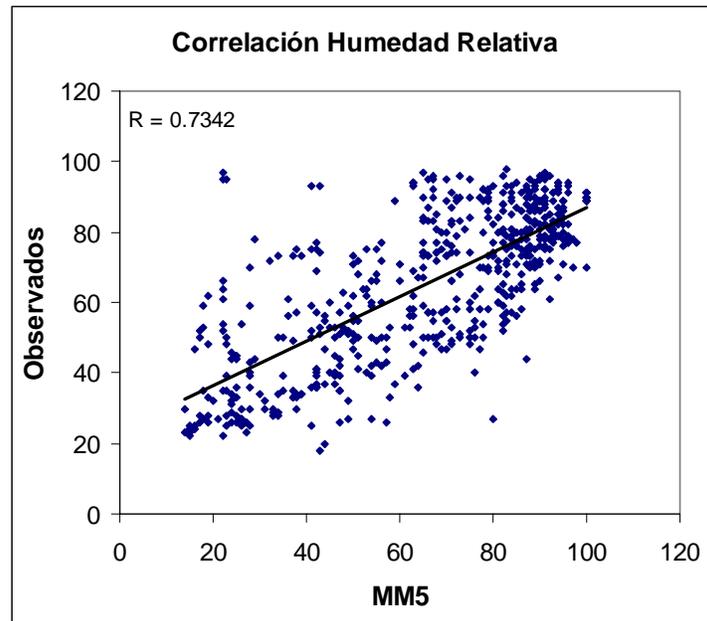
En la figura 4.6 se muestran las series de tiempo de temperatura para la estación de invierno así como la hora de la entrada del frente frío a la zona del Valle de San Luis Potosí. En esta estación la entrada de frentes fríos ocasiona que el comportamiento de la temperatura sea irregular en todos los periodos analizados. En todos los casos, el descenso de la temperatura es debido al paso de la masa de aire. Es importante señalar que la predicción adecuada de la hora de entrada de frentes fríos y ondas cálidas es una de las metas principales de esta investigación.



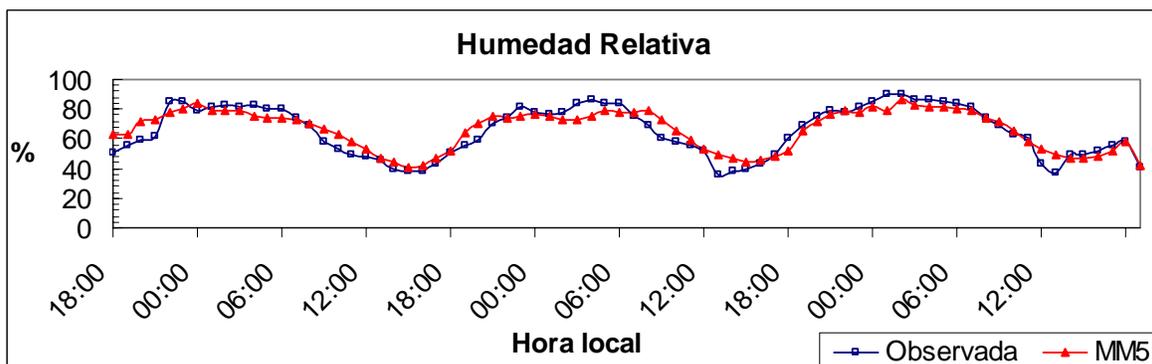
**Figura 4.6** Temperatura en los periodos de invierno, se indica la hora de entrada del frente frío al Valle de San Luis Potosí. (f) 1 al 3 de Diciembre de 2004, (g) 12 al 14 de Diciembre de 2004, (h) 22 al 24 de Diciembre de 2004, (i) 19 al 21 de Enero del 2005 y (j) 9 al 11 de Febrero de 2005.

De la misma forma que en la estación de verano, para el periodo de invierno las masas de aire alteran el comportamiento de la temperatura de manera significativa. No obstante, los parámetros que aportan información del nivel de la aproximación del modelo MM5 son varios, de los cuales sólo se discuten algunos en este trabajo. Además, se observó que la temperatura es estimada en buena aproximación por el modelo en su variación diaria.

El contenido de vapor de agua del aire puede ser expresado como humedad absoluta, específica, relativa o razón de mezcla. La humedad relativa (HR) es la tasa de la cantidad de vapor de agua con respecto a la cantidad de saturación al punto de rocío (Stull, 2000). Esta variable puede dar gran información de la aproximación del modelo, debido a que puede ser muy susceptible a cambios en la disponibilidad de humedad en la atmósfera (Weaver et al, 2002). De esta forma encontramos una correlación para esta variable de manera similar a la temperatura. En la figura 4.7 se ve la relación entre el dato observado y el modelado de humedad relativa.

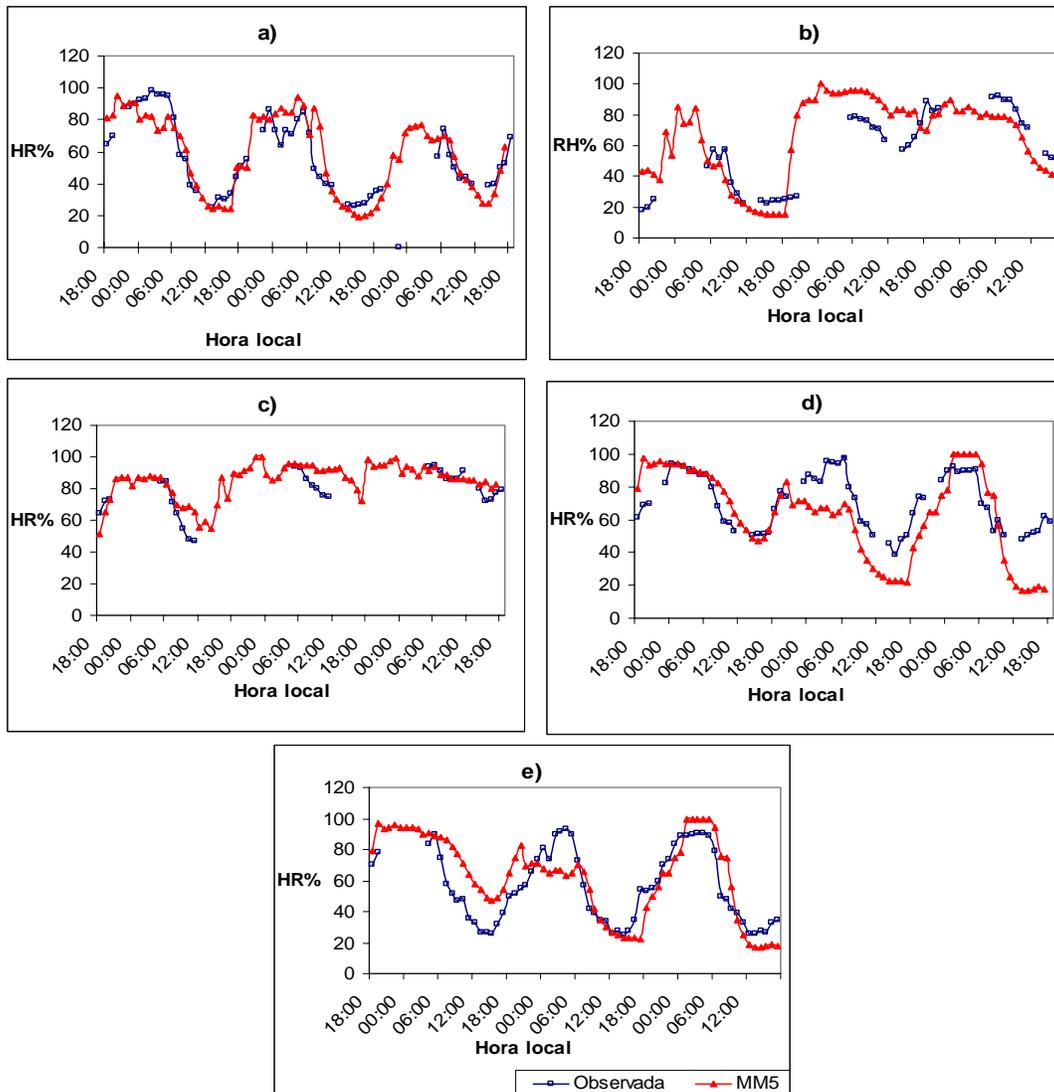


**Figura 4.7** Correlación de los datos observados de Humedad Relativa (HR) superficial con resultados del modelo MM5 para el total de los periodos modelados.



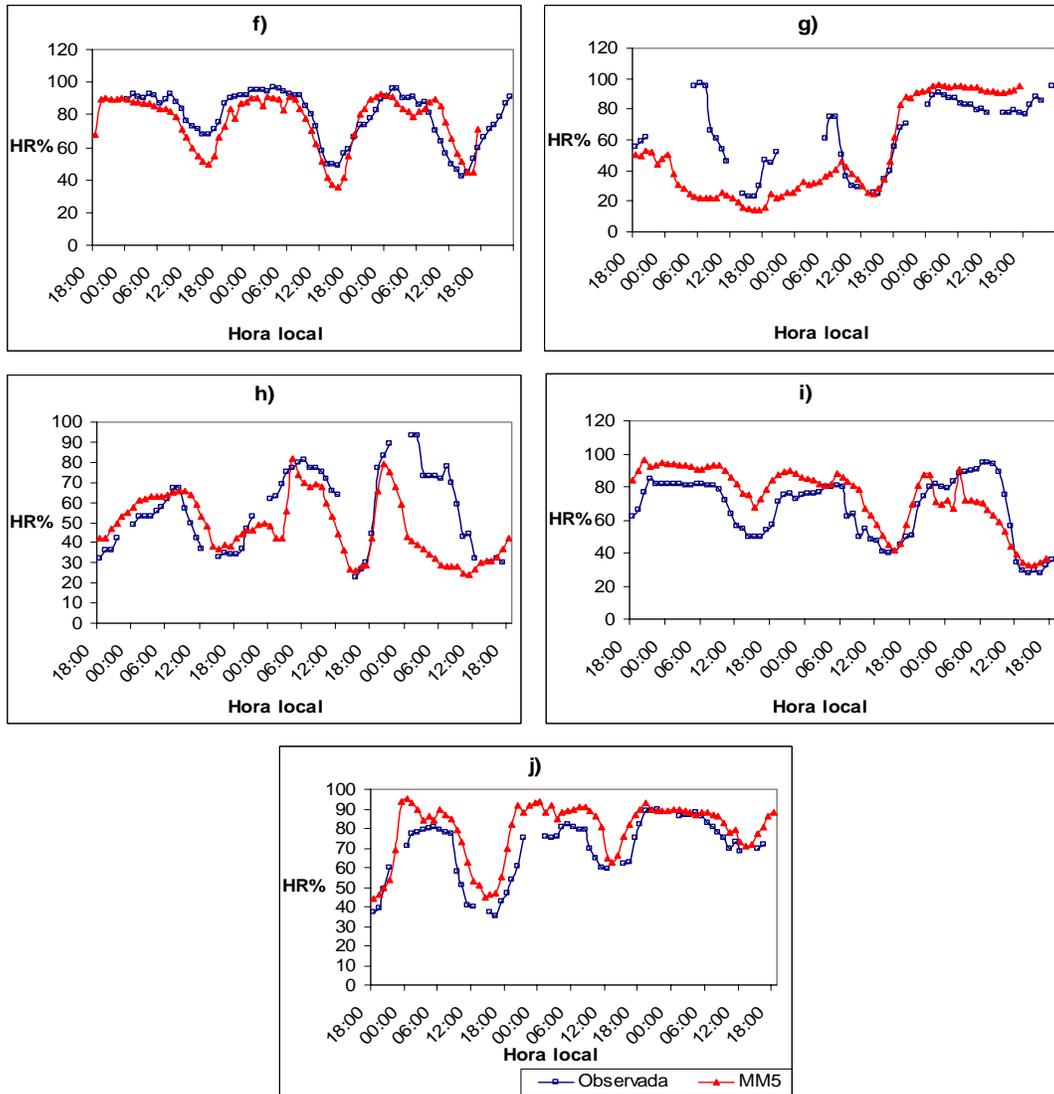
**Figura 4.8** Humedad Relativa (HR) horaria promediada del total de periodos simulados.

La humedad relativa tiene una gran variación bajo distintos factores que determinan la disponibilidad o cantidad de agua en la atmósfera (Jacobson, 1999). Por lo tanto, este parámetro tiene una gran variación diaria y en un análisis horario los resultados pueden variar mucho entre los datos medidos y los modelados (Fig. 4.9) (Randall, 2000).



**Figura 4.9** Series de tiempo de humedad relativa de estación de verano: a) Del 1 al 4 de Abril, b) 1 al 4 de Mayo, c) 10 al 14 de Julio, d) 18 al 22 de Agosto y e) 20 al 24 de Octubre.

Debido a la variación de la humedad relativa la precisión del modelo es menor, ya que no es capaz de determinar las variaciones tan grandes que pueden presentarse en condiciones de alto contenido de humedad (Granier, 2003). La sobre estimación de la humedad relativa se debe a que las esquematizaciones de capa limite y nubes no representan fenómenos con alto contenido de humedad, mayor al 80%. Por lo que, para estos procesos atmosféricos puede alcanzar valores cercanos de la saturación sin considerar el vapor de agua en la formación de nubes (Vautard et al, 2004, Chiriaco et al, 2004)



**Figura 4.10** Series de tiempo de HR durante el invierno. (f) 1 al 3 de Diciembre de 2004, (g) 12 al 14 de Diciembre de 2004, (h) 22 al 24 de Diciembre de 2004, (i) 19 al 21 de Enero del 2005 y (j) 9 al 11 de Febrero de 2005.

Como se puede observar en la serie de gráficas, el modelo presenta al principio inestabilidades propias de la técnica numérica y después de un tiempo tiende a estabilizarse. Aunque existen errores en la estimación de algunos máximos o mínimos en tiempo y magnitud con respecto a las observaciones, la representación del comportamiento diario de estos parámetros está bien aproximada. Esto representa una gran ventaja, debido a que con el uso de este modelo se puede obtener información bastante confiable para cada punto de malla del dominio de simulación.

### **4.3. Modelación de eventos de invierno**

Una masa de aire es un volumen extenso de la atmósfera cuyas propiedades físicas, usualmente temperatura potencial y humedad son relativamente homogéneas dentro de ésta. Un frente frío se produce cuando una masa de aire frío avanza hacia latitudes menores y su borde delantero se introduce como una cuña entre el suelo y el aire caliente. La intensidad y duración de cada uno de los frentes fríos que entran por el norte del país depende en mucho de la masa de aire frío que se mueve por gradientes horizontales de la temperatura, ocasionado por efectos de inestabilidad baroclínica (Holton, 1992).

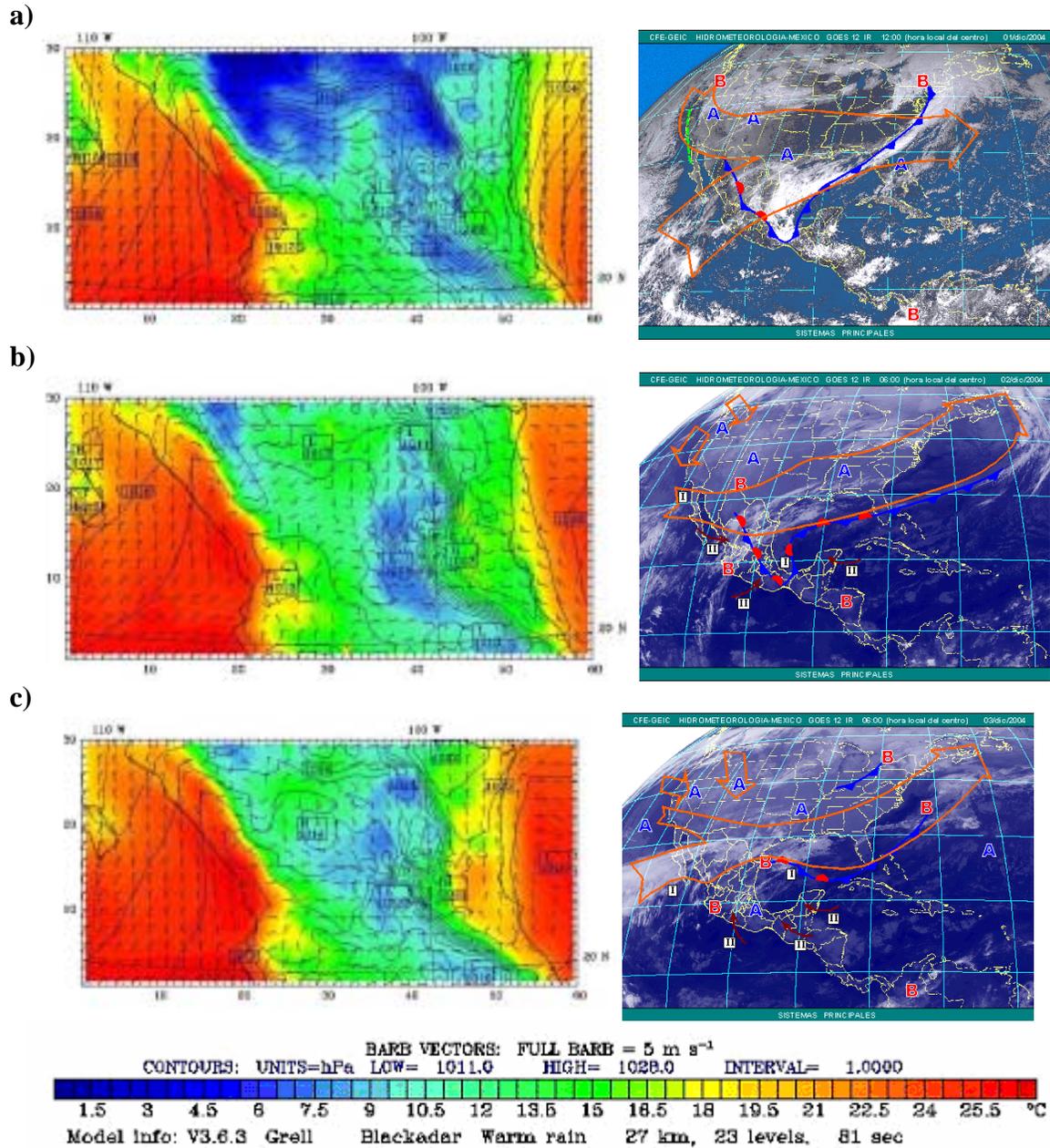
Debido a la conformación geográfica de la Mesa del Centro, ésta es susceptible al paso de frentes fríos que se canalizan y entran por esta zona delimitada por la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, las cuales delimitan el Altiplano Potosino en la Mesa del Centro.

#### **4.3.1 Análisis sinóptico**

Se puede estudiar el estado actual de la atmósfera mediante un análisis sinóptico de la información meteorológica generada en una determinada región aplicando conceptos de masas de aire, frentes o ciclones (Holton, 1992). Para los análisis sinópticos se pueden utilizar imágenes de satélite y los resultados del modelo MM5.

El primer frente frío de gran intensidad registrado en el invierno del 2004 se observó del 1 al 3 de Diciembre ocasionando heladas y temperaturas por debajo de los 0° C en el Valle de San Luis Potosí. En las imágenes de la figura 4.11 se puede observar que las temperaturas más baja de este periodo se observaron el 1 de Diciembre cuando el frente frío superficial ya estaba bien establecido en el Golfo de México con una gran cantidad de nubosidad sobre la altiplanicie Mexicana (Fig. 4.11a); a lo largo de la Sierra Madre Occidental se observó un frente estacionario lo que permitió la interacción de aire cálido del Pacífico con aire frío del noreste, lo que posiblemente produjo las heladas en el Altiplano.

En la figura 4.11 se observa, también, que las masas de aire frío del norte se desplazan del altiplano hacia el Golfo de México cubriendo de nubosidad a grandes extensiones de tierra continental, ocasionando fuertes vientos en las zonas del frente. Este fenómeno, causa lo que se llama inestabilidad baroclínica, la cual esta asociada con el corte vertical de velocidades. El aumento de estas inestabilidades se debe al gradiente horizontal de temperatura media (Holton, 1992).

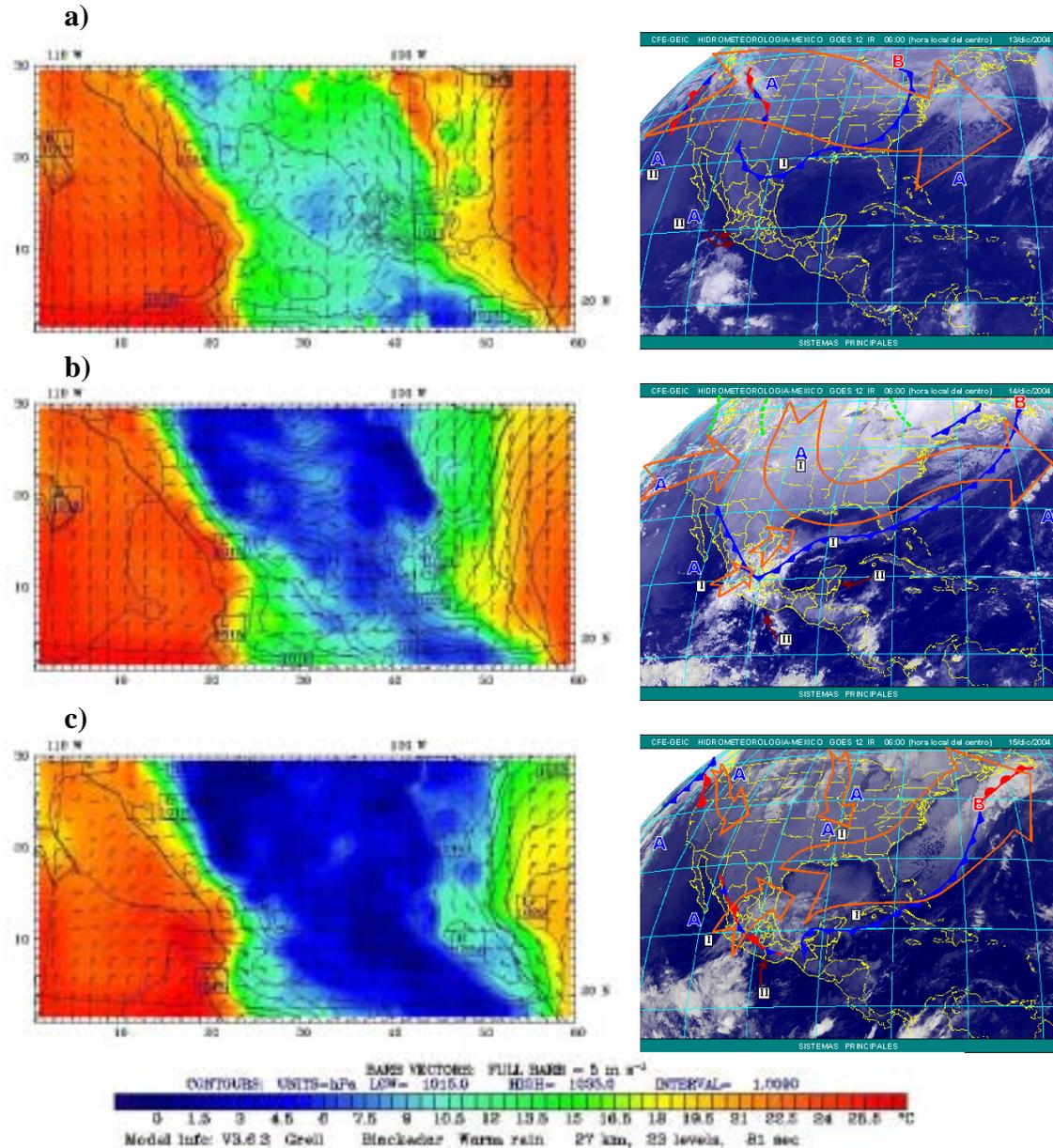


**Figura 4.11** Evolución sinóptica del pasaje de un frente frío. (a) 1, (b) 2 y (c) 3 de Diciembre de 2004 a las 0006 TL. Izq.: Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos. Der.: imágenes de satélite indicando la posición de la corriente de chorro con flechas naranjas y la posición de los frentes fríos y estacionarios.

La onda fría permaneció hasta el 3 de Diciembre, aunque la máxima intensidad del frente fue el 1 de Diciembre, como se puede observar en la figura 4.11. Además, de la entrada de la masa de aire frío del norte se observa una corriente de chorro. Ésta corriente de chorro, es resultado del balance geostrófico, determinado principalmente por zonas de baja y alta presión de gradientes horizontales de temperatura (Stull, 2000).



Los siguientes frentes de gran intensidad en esta temporada de invierno se presentaron los días del 11 al 14 y del 22 a 25 de Diciembre del 2004. Para el día 19 de Enero del 2005 se presentó otro con temperaturas cercanas a los 0° C y uno más el 9 de Febrero del 2005.



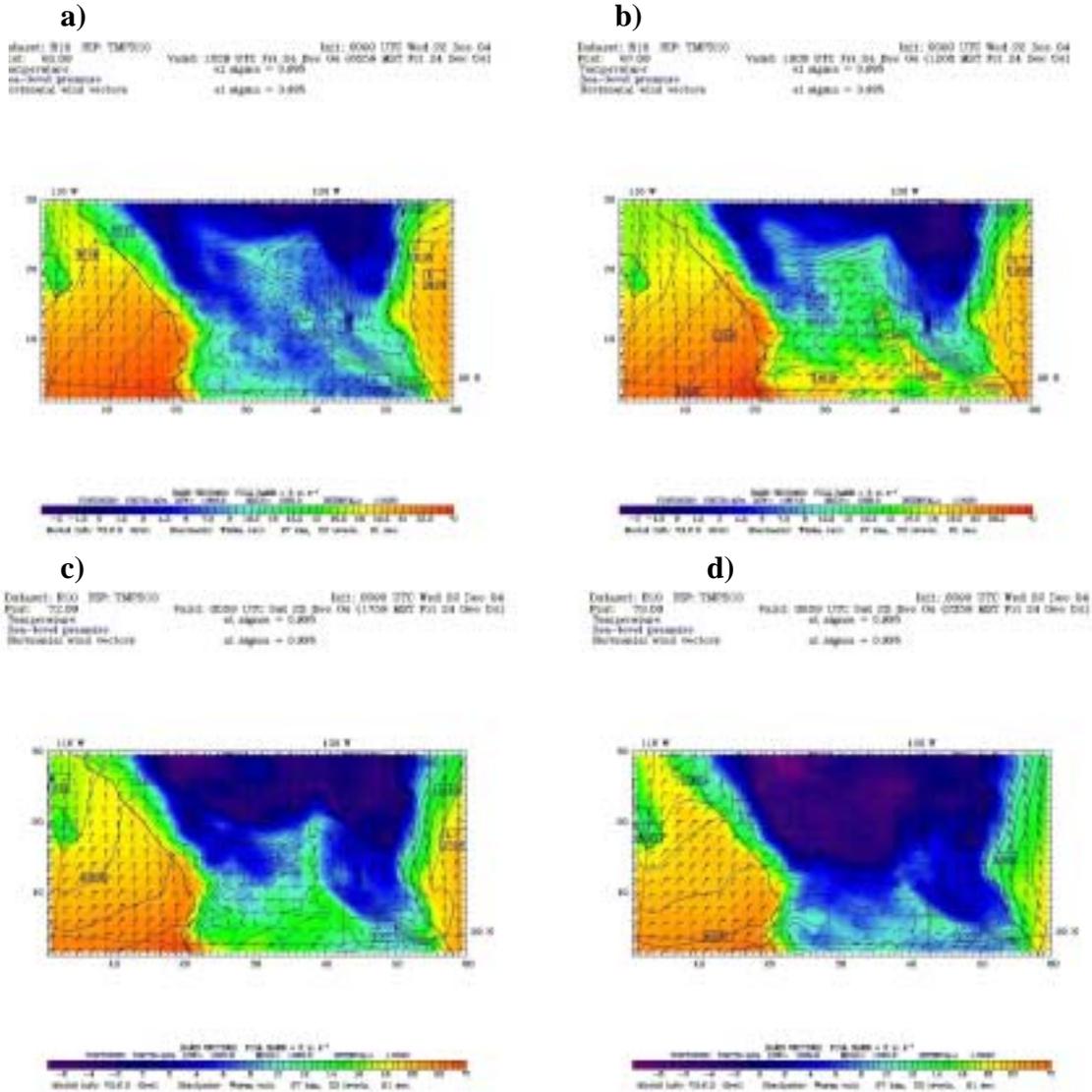
**Figura 4.13** Evolución sinóptica del frente frío del 13-15 de Diciembre de 2004 a las 0006 TL. (a) 13, (b) 14, y (c) 15 de Diciembre. . Izq.: Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos. Der.: imágenes de satélite indicando la posición de la corriente de chorro con flechas naranjas y la posición de los frentes fríos y estacionarios.

En esta segunda secuencia sinóptica (Fig. 4.13), se observa una buena correspondencia entre la imagen de satélite con la imagen obtenida del modelo en tiempos e intensidad de la entrada del frente frío. También, se observa la tendencia de los vientos a rotar en sentido de la dirección del frente y después a regresar por efecto de conservación de vorticidad



### 4.3.2 Modelación de frentes fríos

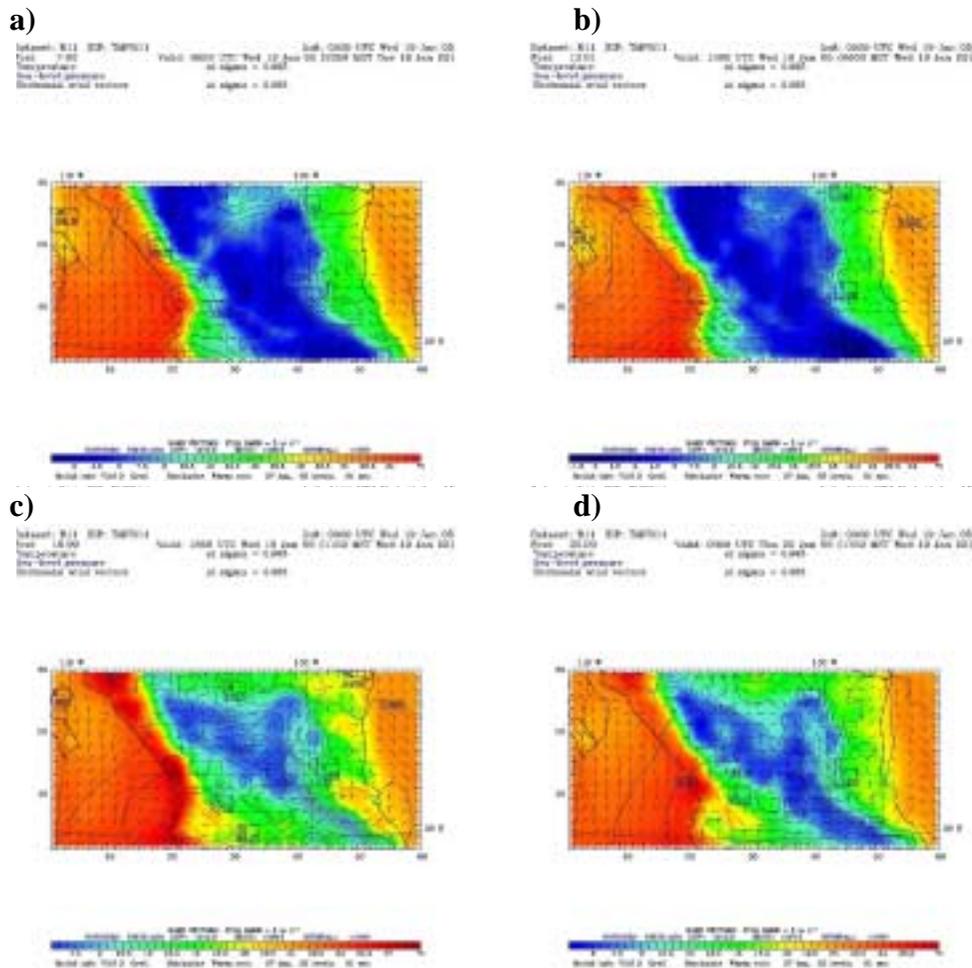
El frente frío del 24 de Diciembre de 2005 fue el de mayor importancia en la región de estudio para este periodo de invierno. En la figura 4.15 se muestra como el área de impacto de las bajas temperaturas (menores de 0° C) se va incrementando a medida que el frente se desplaza hacia el sureste.



**Figura 4.15** Entrada del frente frío del 24 de Diciembre de 2005. Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos. (a) 06, (b) 12, (c) 18 y (d) 00 TL.

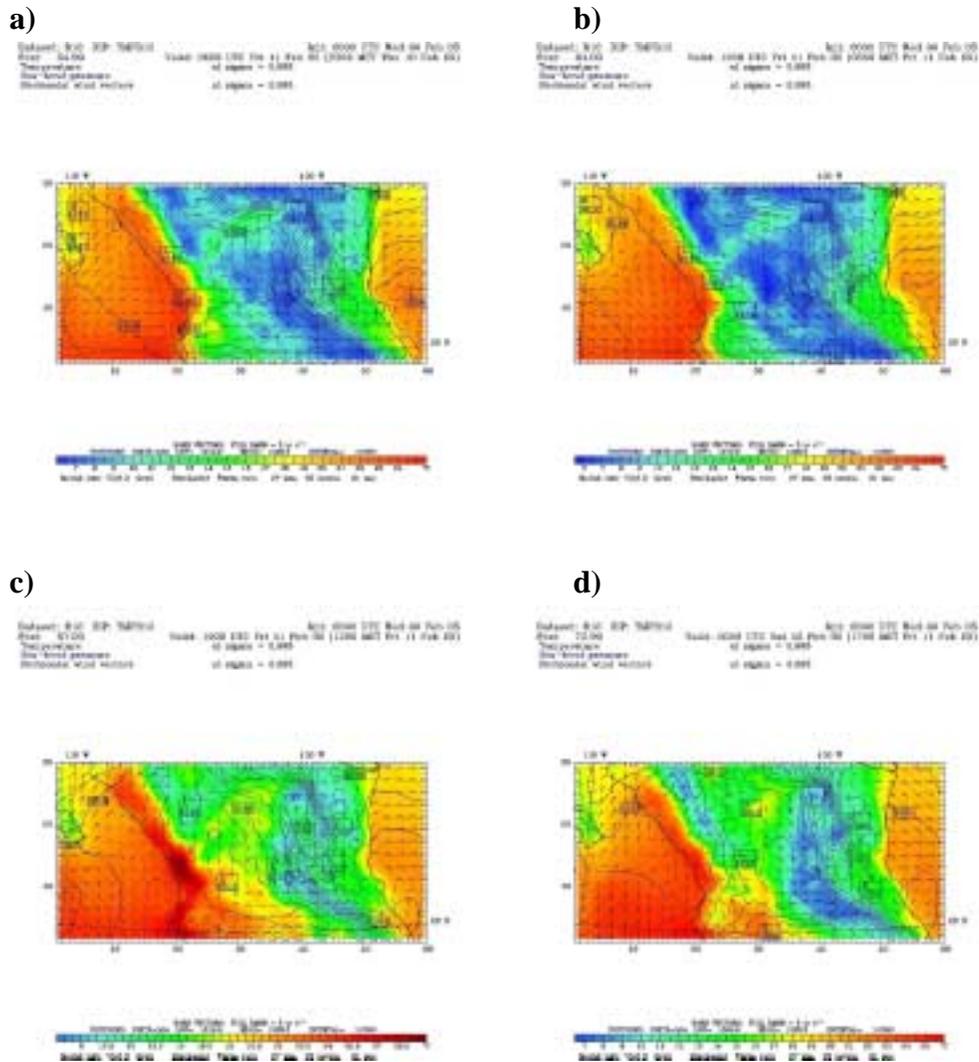
Las masas de aire más frías ocasionan gradientes de presión y temperatura más grandes por lo que los efectos en factores climáticos son más marcadas. Con el paso de masas más grandes de aire frío, de mayor densidad, se ocasiona una perturbación de los vectores de viento como se observa en las figuras 4.15, 4.16 y 4.17.

En la figura 4.16 se muestra el frente frío del 19 de Enero de 2005. Al igual que los anteriores, este frente causa bajas temperaturas a su paso y una vez que esta establecido en la Mesa del Centro. También, es importante observar como las vectores de viento cambian de dirección hacia un sentido del desplazamiento del frente.



**Figura 4.16** Frente frío del 19 de enero de 2004. (a) 00, (b) 06, (c) 12 y (d) 18 hrs. TL. Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos.

En general, se puede afirmar que la precisión del modelo es bastante aceptable. Para fenómenos de mesoescala, los resultados que apreciamos son buenos cuando se analizaron en secuencias sinópticas, debido a que la intensidad de los máximos y mínimos se presentan en tiempos muy aproximados a los tiempos reales de los fenómenos meteorológicos modelados. Esto es importante ya que la adaptación del modelo se considera aceptable para herramienta de predicción.

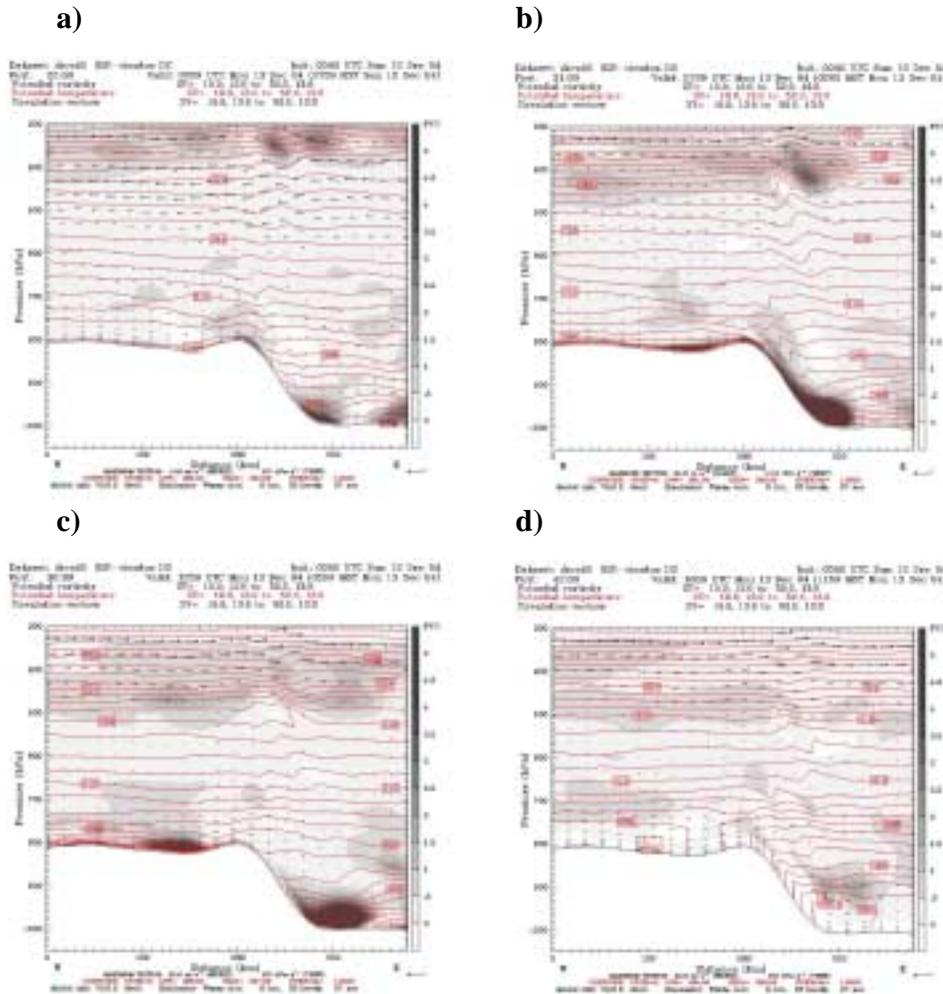


**Figura 4.17** Frente frío del 10 de febrero de 2005. (a) 00, (b) 06, (c) 12 y (d) 18 hrs. (TL). Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos.

La mayoría de los fenómenos de temperaturas bajas, debidas a la presencia de masas de aire frío del norte, están asociadas a precipitaciones de invierno. El alto contenido de humedad de las masas de aire cálido que chocan con masa de aire frío se condensa en la zona de entrapamiento formando nubosidades. En este proceso, la dirección de los movimientos de las masas de aire caliente y frío una con respecto a la otra son importantes (Stull, 2000).

### 4.3.3 Variación vertical del viento y de la temperatura potencial

El efecto que causan estos fenómenos meteorológicos puede llegar a ser de consecuencias desastrosas especialmente en comunidades localizadas en zonas altas del norte de México, ya que las temperaturas registradas durante estos periodos puede ser por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$  por varias horas consecutivas e incluso por varios días. El comportamiento de los vientos presenta un patrón uniforme antes de la perturbación frontal debido a los gradientes horizontales de temperatura. En la figura 4.18 se muestra una sección transversal donde se observa el patrón de vientos en dirección perpendicular al frente.



**Figura 4.18** Sección trasversal (W-E, Lat.  $22^{\circ} 20'$ ) del dominio 2, secuencia de las 18, 00, 06 y 12 de los días 12 y 13 de Diciembre de 2004. Se muestran los vectores de velocidad, la vorticidad (colores) y temperatura potencial en contornos.

Antes de la entrada del frente (Fig. 4.18a) las líneas de temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ) se mantienen aproximadamente horizontales en un estado de atmósfera estable. Sin embargo, cuando la cuña del frente llega a estas latitudes por efecto de movimiento baroclínico de masas los vientos son perturbados ocasionando zonas de convergencia, subsidencia y alta vorticidad (Fig. 4.18b y 4.18c) (Holton, 1992). Las zonas oscuras representan altos valores de vorticidad y por tanto están asociadas a regiones de mucha turbulencia.

También, causa una variación en la estructura vertical de la temperatura potencial a la entrada del frente (Fig. 4.18d). Ésta perturbación, produce los grandes vientos en la zona de la Mesa del Centro en la época de invierno en los meses de Enero y Febrero (Gómez, 2004). Aunque, para este caso se presentó un evento de viento extremo a final del frente del día 13 de Diciembre del 2005. Esos vientos se caracterizan por presentar ráfagas bastante fuertes.

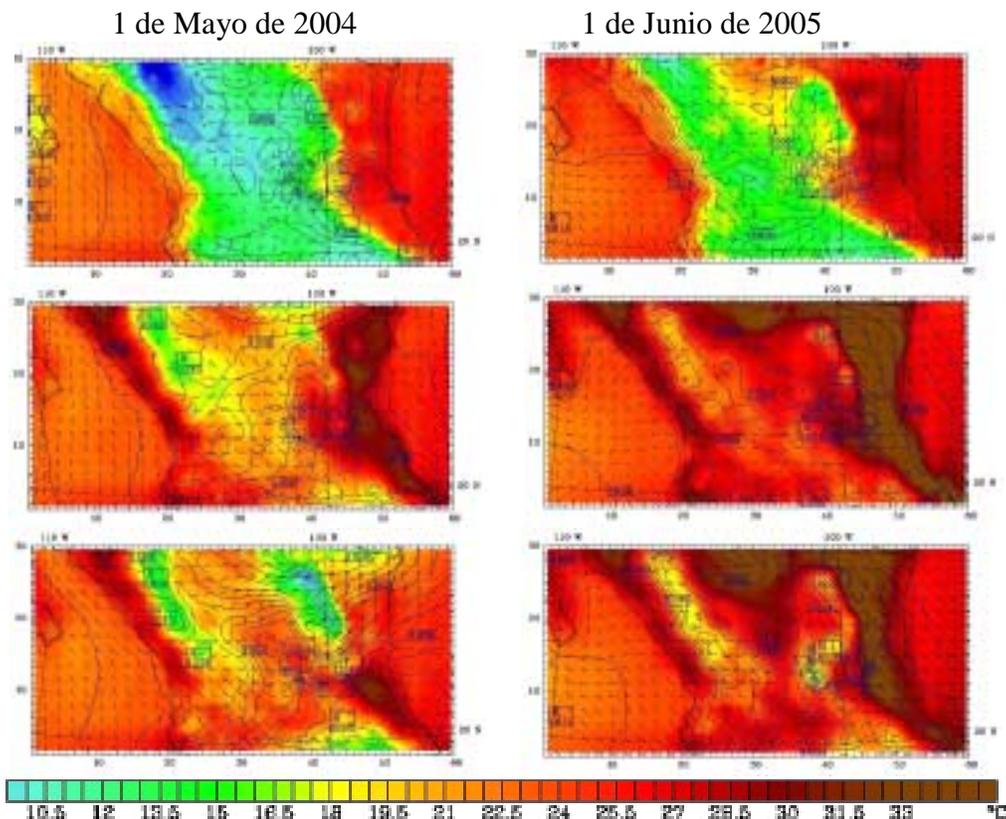
#### 4.4 Modelación de eventos de verano

Las masas de aire cálido se forman a partir de volúmenes de la atmósfera que permanecen durante el tiempo suficiente sobre una superficie del océano con alta humedad relativa y temperatura cerca de los 30° de latitud. Los frentes cálidos se producen cuando una masa de aire caliente avanza hacia latitudes mayores y su borde delantero asciende sobre el aire más frío.

Las masas de aire caliente ocasionan un aumento de las temperaturas sobre todo en la época de primavera-verano en los meses de Mayo y Junio (García, 1988). Debido a la intensificación de la zona de convergencia intertropical el efecto de los frentes fríos es menor en esta época del año. Estas masas de aire provienen de la zona del ecuador por las regiones del Océano Pacífico y del Golfo de México (INEGI, 2002).

##### 4.4.1 Ondas de calor

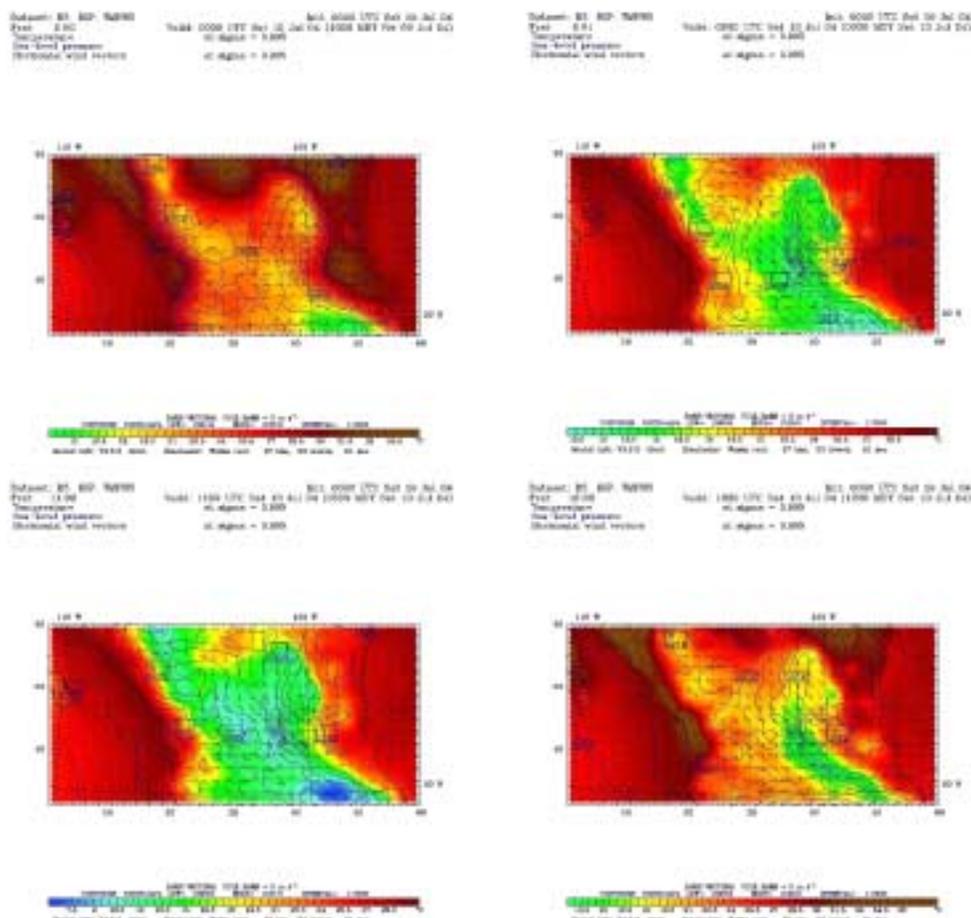
Dentro de la estación de verano o húmeda se realizaron cuatro corridas del modelo para observar los fenómenos de ondas de calor. Los resultados de la modelación de estos fenómenos se muestran un aumento en la temperatura en los meses de Mayo del 2004 y el mes de Junio del 2005 como se muestra en la figura 4.19.



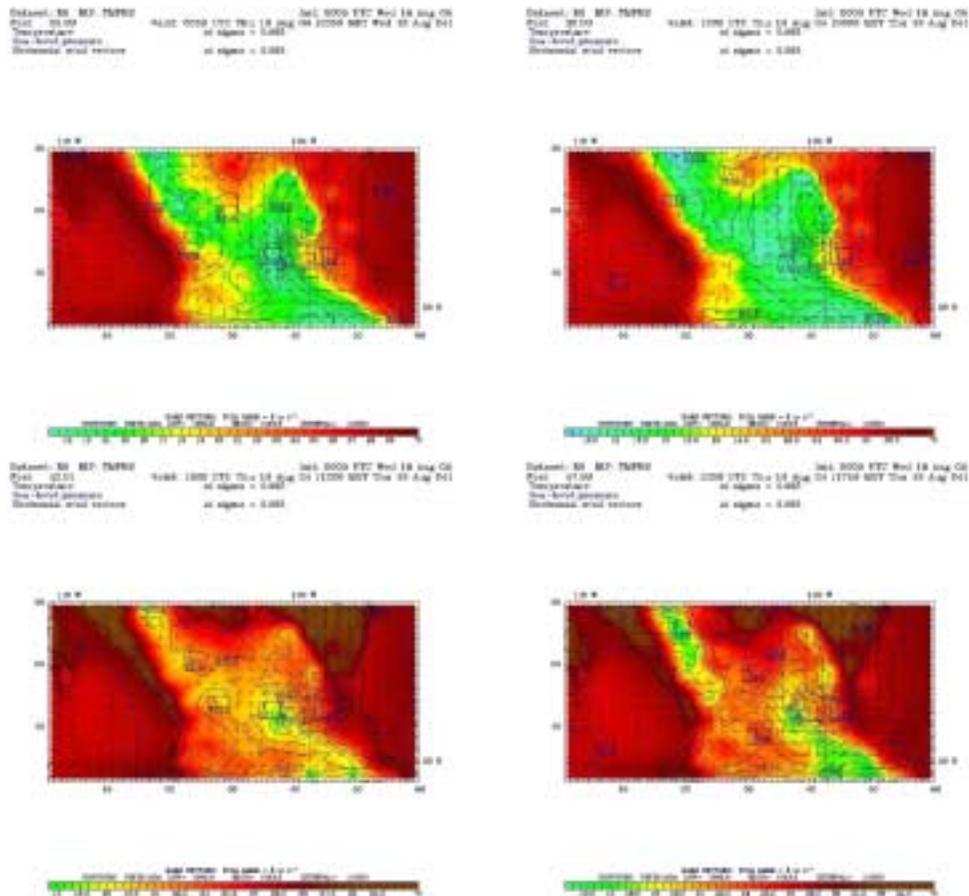
**Figura 4.19** Temperatura superficial, vectores de viento y la presión a nivel del mar en contornos: A la derecha se muestra el periodo del 1 de Mayo del 2004 y a la izquierda la del 1 de Junio del 2005, 06, 12 y 18 TL.

En las secuencias de imágenes se observa que se alcanzan temperaturas por arriba de los 33° C en las zonas cercanas a las costas. Esto se debe a la influencia de masas de aire caliente que vienen del Caribe y del Pacífico, además de existir un claro efecto por la altitud ya que en las zonas bajas la temperatura es más alta. Se observa el caso contrario en zonas de gran altitud, en las formaciones montañosas de las Sierras Madre Oriental y la Occidental así como la Mesa del Centro que mantienen temperaturas más bajas. Esto se explica porque el aire fresco y seco que desciende a sotavento de la montaña (viento katabático) (Stull, 2000) después de haberse condensado toda la humedad del lado de barlovento ocasiona bajas precipitaciones por el efecto de la sombra geográfica o sombra de lluvia (Holecheck, 1998).

En la secuencia de temperatura superficial para el 10 de Julio y el 18 de Agosto de 2004 (Fig. 4.20 y 4.21), se ve que los efectos de frentes cálidos disminuyen en intensidad. Al intensificarse la zona de convergencia intertropical y las ondas tropicales ocasionan depresiones tropicales y huracanes que promueven la formación de nubosidad que se transporta a tierras continentales. Por lo que, a partir de la segunda mitad del año por lo general se registran temperaturas más bajas debido a que existe una mayor cantidad de aire más húmedo.



**Figura 4.20** Frente cálido del 10 de Julio de 2005: 00, 06, 12 y 18 hrs. (TL). Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos.



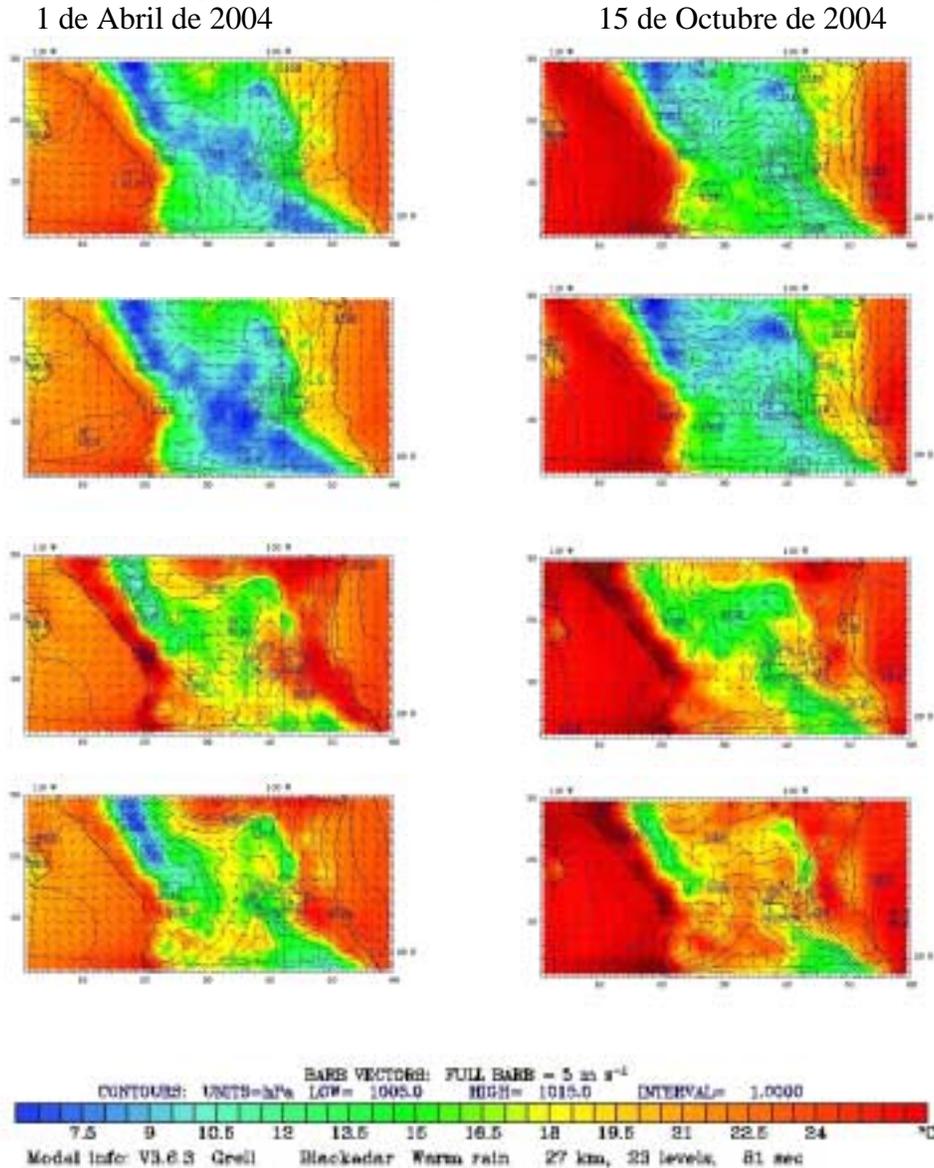
**Figura 4.21** Frente cálido del 18 de agosto de 2004: 00, 06, 12 y 18 hrs. (TL). Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos.

El transporte de masa de aire cálido y con alta humedad relativa ocasiona vientos ligeros y zonas de baja presión. Estas zonas por lo general crean niebla y nubes bajas. Si hay humedad suficiente se observan todos los géneros de nubes estratiformes las cuales provocan precipitaciones. La entrada de estas ondas calidas se presentan en los meses de Abril a Julio lo que ocasiona las máximas temperatura en la primera mitad del año. Por otro lado, tienen un alto impacto en las zonas más calidas dentro las Llanuras Costeras y próximas a la Huasteca con temperaturas superiores a los 38° C.

#### 4.4.2 Periodos sin evento

En contraste con los resultados de los apartados anteriores para periodos en los cuales no hay un efecto de cambios en el comportamiento de la atmósfera por masas de aire el comportamiento del clima permanece constante sin variaciones fuertes.

Para ver el comportamiento de periodos sin la presencia de eventos se realizaron dos corridas de modelo en los meses de Abril y Octubre. En la figura 4.22 se muestra un ejemplo de un día en los periodos de inicio y final de la estación calida de verano.



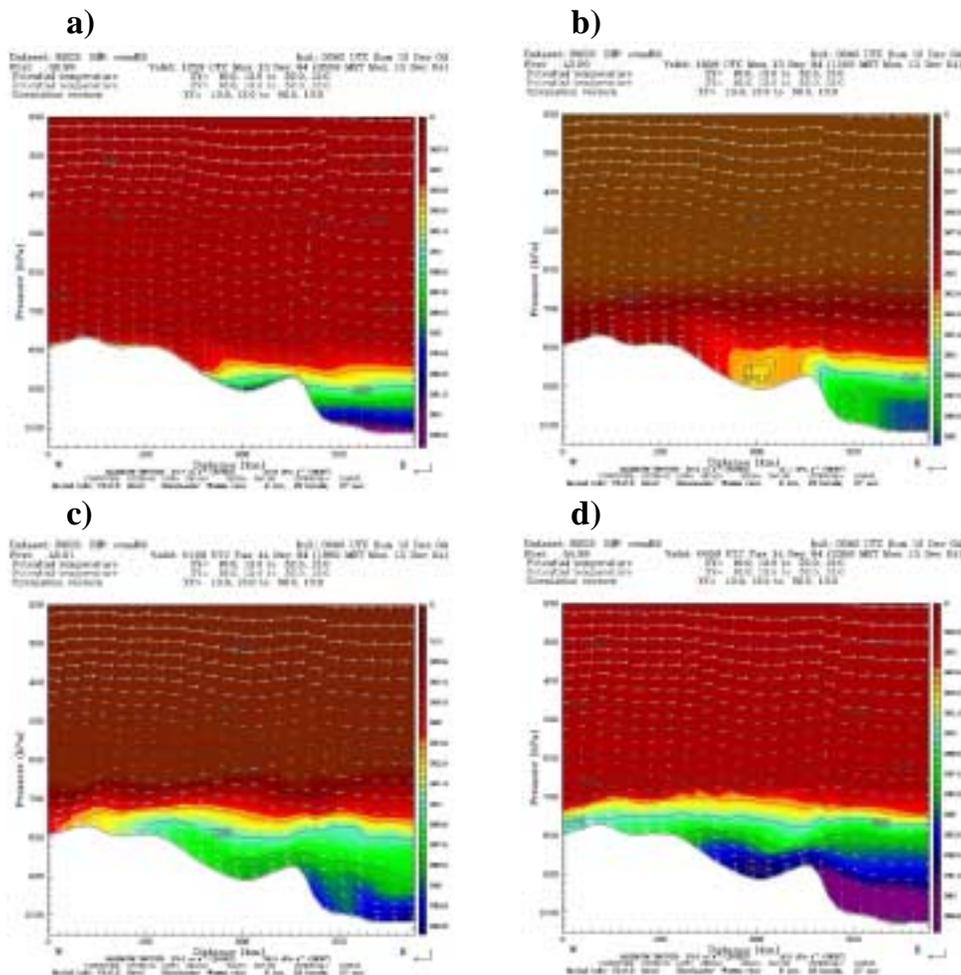
**Figura 4.22** Días sin eventos en los periodos del 1 de Abril y 15 de Octubre de 2004: 00, 06, 12 y 18 hrs. (TL). Se muestran los vectores de velocidad, la temperatura (colores) y la presión a nivel del mar en contornos.

En este caso se observa que las temperaturas máximas no pasan de los  $\sim 28^{\circ}$  C y las mínimas no son menores de  $\sim 7^{\circ}$  C. Por lo anterior, se puede decir que los factores que afectan los patrones del clima a mediano plazo a nivel regional están asociados a eventos extremos en las estaciones de invierno y de verano. A mediada que la frecuencia de estos eventos es mayor el promedio de la temperatura y precipitación acumulada varía a lo largo del año afectando así el patrón de clima regional. Lo anterior indica que, periodos de tiempo relativamente cortos (algunos años) se podría realizar un análisis de la variación del clima regional en función de eventos como los que se describen en este trabajo.

## 4.5 Estructura Vertical

La estructura de la atmósfera se refiere al estado del aire a diferentes alturas. La estructura varía de acuerdo a las condiciones de radiación solar en una dinámica temporal. La tropósfera se extiende del suelo a una altura promedio de 11 Km pero sólo la parte más baja es influenciada por la superficie. La Capa Límite Planetaria (CLP) se define como la parte de la atmósfera sobre la cual la superficie de la tierra tiene una gran influencia (Stull, 1988).

En la figura 4.23 se muestra una sección transversal a lo largo del dominio dos (de Oeste a Este, Latitud N 21° 50') para la corrida del modelo del día 13 de Diciembre del 2005. Las variaciones en la temperatura muestran el efecto de la entrada de las masas de aire frío en la estratificación vertical de la atmósfera.



**Figura 4.23** Sección transversal (W-E, Lat. 21° 50') del dominio 2 a las 00, 06, 12 y 18 hrs. (TL), (a, b, c y d respectivamente) para el 13 de diciembre de 2005.

En la figura 4.23 se aprecian los vectores de viento por encima de la capa de entrampamiento (~1,500 m) que corresponden a una corriente de chorro asociada a la inestabilidad baroclínica del frente. La CLP esta determinada principalmente por flujos turbulentos del viento en la zona de mezcla durante el día y la estratificación de la temperatura durante la noche forma la capa estable (Stull, 1988).



El movimiento de estas masas de aire define líneas de igual temperatura potencial que son una referencia de la zona frontal. Debido a que las masas de aire son muy grandes, el efecto de frentes fríos altera el comportamiento regional de temperatura y vientos. En condiciones normales de la atmósfera, se pueden distinguir diferentes comportamientos como vientos anabáticos y katabáticos (Fig. 4.24a). Estos vientos se producen en sistemas montaña-valle. En zonas montañosas como el altiplano potosino, estos eventos son bastante comunes.

## Conclusiones

En base a datos meteorológicos de 173 estaciones, se efectuó un análisis estadístico para estimar los parámetros climáticos dominantes en la región. Se encontró que, el análisis multivariable es una herramienta muy útil para determinar patrones regionales de clima.

La adaptación de modelo MM5 a la región del norte de México, con énfasis en el Estado de San Luis Potosí, ha sido realizada con mucho éxito. Tomando en cuenta la complejidad de la orografía y lo diverso de los eventos meteorológicos que tienen lugar, el grado de aproximación que se alcanzó en el total de las simulaciones realizadas fue bastante bueno. Esta serie de experimentos sobre los eventos meteorológicos más extremos en el Estado de San Luis Potosí, han permitido calibrar el modelo MM5 para hacer predicciones rutinarias del tiempo. Esto fue uno de los fines principales de este estudio.

El estado de San Luis Potosí se ubica en una zona donde ocurren una cantidad importante de eventos meteorológicos, debido a la interacción entre frentes fríos y cálidos y la compleja orografía. Los cálculos han permitido estimar los cambios drásticos en la estructura vertical y horizontal de la atmósfera ante la presencia de los eventos extremos en gradientes de temperatura y humedad en todo el dominio de estudio. Estos procesos afectan las condiciones de estabilidad de la atmósfera y en consecuencia el estado del tiempo inmediato. El conocer y entender estos fenómenos tiene un carácter social muy importante.

Se ha encontrado que los eventos de mayor importancia en las estaciones de invierno y verano son los frentes fríos y cálidos. Ellos juegan un papel relevante en el comportamiento del clima a nivel regional debido a su frecuencia e influencia en el comportamiento estacional del clima a largo plazo.

Finalmente es conveniente resaltar que el uso de suelo es un factor que debe ser precisado con mayor exactitud en trabajo de campo para mejorar las predicciones pues se ha demostrado que alteran el contenido de humedad en la atmósfera. El cambio de uso de suelo puede acarrear cambios en patrones regionales de clima en periodos de mediano plazo.

# Bibliografía

Chiriac M., Vautard R., Chepfer H., Haefelin M., Morille Y., Protat A. y Wanherdrick Y. 2004. **The ability of MM5 to simulate thin clouds: systematic comparisons with lidar/radar measurements.** Air Chemistry, 5th WRF / 14th MM5 PSUNCAR Users' Workshop, Colorado.

Edwards, P.N., 2000, **A Brief History of Atmospheric General Circulation Modeling.** In **D.A. Randall (Ed.):** *General Circulation Development, Past Present and Future: The Proceedings of a Symposium in Honor of Akio Arakawa.* New York: Academic Press, 67-90.

García, E. 1988, **Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.** *Offset Larios*, México, D.F.

Giorgi, F., y Mearns L.O., 1999: **Introduction to special section: Regional climate modeling revisited.** *J. Geophys. Res.*, 104, 6335–6352.

Gochis D. J., Shuttleworth W. J. y Yang Zong-Liang, 2002, **Sensitivity of the Modeled North American Monsoon Regional Climate to Convective Parameterization.** *Monthly Weather Review.* American Meteorological Society, **130**, 1282-1298

Gómez R., J., 2004, **An extreme wind event over the San Luis Potosi Valley, Mexico,** Tesis de maestría. Instituto potosino de investigación Científica y tecnológica, a.c. *Departamento de ingeniería ambiental y manejo de recursos naturales.* San Luis Potosí, México.

Granier, C., Kanakidou, M. y Kasibhalta P., 2003, **Modelling.** En: **Atmospheric Chemistry in a Changing World.** Brasseur, Prinn y Pszenny. (Eds.). *Springer.* Heidelberg, Alemania

Grell, G.A., Dudhia, J. y Stauffer, D. R., 1994, **A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5),** NCAR Tech. Note, TN-398+STR, 138 pp., *Natl. Cent. for Atmos. Res.*, Boulder, Colorado.

Hanna, S.R. y Yang, R., 2001, **Evaluations of Mesoscale Models Simulations of Near-Surface Winds, Temperature Gradients and Mixing Depths,** *J. Appl. Meteor.* **40**, pp 1095-1104.

Holecheck, J.L., Pieper, R. D. y Herbel C. H. 1998. **Range Management: principles and practices.** *Prentice Hall.* Upper Saddle River.

Holton J. R. 1992. **An introduction to dynamic meteorology.** *Academic Press.* 3<sup>o</sup> Edición, pp 265-309

Huber-Sannwald, E. 2002. **Land use change and biodiversity: A local or global issue.** *Reportes del IPICYT.*; 1 :110-117

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2002, **Síntesis de información Geográfica del Estado de San Luis Potosí.** Aguascalientes, México, pp. 15-20, 23-32,

Jacobson Mark Z. 1999. **Fundamentals Atmospheric Modelling.** 1° Edición *Cambridge University Press.* Reino Unido.

Lee, M., Kang, I.-S. Maps, B.-E., 2003: **Impact of Cumulus Convection Parameterization on Aqua-planet AGCM Simulations of Tropical Intraseasonal Variability.** *J. Meteor. Soc. Japan*, vol.81, 963-992

Medina Roldan, E. 2003. **Dinámica del Contenido de humedad del Suelo a lo largo de un Gradiente de Condición de Pastizal en el Noreste de Jalisco.** Tesis de licenciatura, Facultad de ciencias Biológicas, Universidad De Guadalajara, Jalisco, México.

Nebeker F., 1995. **Calculating the Weather: Meteorology in the 20th Century.** *New York: Academic Press.*

Ordaz-Delgado, A. L., Reynaga T., Ávila-Galarza, A. y Villegaz G., 1997. **Análisis preliminar de vientos en la ciudad de San Luis Potosí.** *Second Interamerican Environmental Congress. Work Report.*

Phillips N. A., 1956. **The General Circulation of the Atmosphere: A Numerical Experiment .** *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 82, 352, 123-164.

Royal Meteorological Society, 1991. **Meteorological Glossary,** HMSO *Bookshop* Londres.

Rzedowski, J., 1961. **Vegetación del Estado de San Luis Potosí.** *PhD Thesis* UNAM. p.

Stull, R.B., 1988. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology.** *Kluwer Academic Publishers,* Londres.

Stull R. B. 2000. **Meteorology for Scientifics and Engineers.** 2° Edicion. *Brook/scole.*

Vautard R., Beekmann M., Bessagnet B., Blond N., Hodzic A., Honore C., Menut Malherbe L., Rouil L. y Roux J., 2004. **The use of mm5 for operational ozone/NOx/aerosols prediction in Europe: strengths and weaknesses of mm5:** Air Chemistry, 5th WRF / 14th MM5 PSUNCAR Users' Workshop, Colorado.

Weaver, C. P., S. Baidya Roy, y R. Avissar, 2002, **Sensitivity of simulated mesoscale atmospheric circulations resulting from landscape heterogeneity to aspects of model configuration,** *J. Geophys. Res., 107(D20)*, pp 8041.

Wilks, D. S., 1995. **Statistical Methods in the atmospheric Sciences.** Academic press, California

# Anexo 1

Relación de estaciones meteorológicas del estado de San Luis Potosí

ID	Nombre	Clima	Latitud	Longitud	Altitud (m)
1	AGUA BUENA, TAMASOPO	Cw2ga	21.95	-99.38	372.00
2	ALTAMIRA, CD. SANTOS	Cw2ga	21.67	-98.97	45.00
3	AQUISMON, AQUISMON	Cfga	21.63	-99.08	45.00
4	ARMADILLO DE LOS INFANTES	BS1	22.27	-100.68	1620.00
5	BALLESMI, CD. VALLES	Cw2ga	21.75	-98.97	30.00
6	CARDENAS, CARDENAS (DG)	BS1	22.00	-99.65	1200.00
7	CEDRAL, CEDRAL	BS1	23.80	-100.73	1800.00
8	CERRITOS, CERRITOS	BS1	22.43	-100.28	1135.00
9	S. MARTIN CHALCHICUAUTLA	Cw2ga	21.38	-98.67	1877.00
10	CHARCAS, CHARCAS (DG)	BS1	23.13	-101.12	2057.00
11	CIUDAD DEL MAIZ (DG)	BS1	22.40	-99.62	1239.00
12	CIUDAD VALLES, CD. VALLES	Cw1ga	21.98	-99.02	95.00
13	COL. ALVARO OBRGON	BS1	22.28	-99.57	1239.00
14	DAMIAN CARMONA, TAMASOP	Cw2ga	22.13	-99.28	2200.00
15	EBANO, EBANO	Cw1ga	22.22	-98.38	2200.00
16	EJIDO ABRITAS, CD. MAIZ	Cfga	22.50	-99.40	2200.00
17	EL COCO, TAMUIN	Cw1ga	22.13	-98.73	20.00
18	EL CHOY, CIUDAD VALLS	Cw1ga	21.97	-98.88	1200.00
19	EL ESTRIBO, SALINAS	BS0	23.08	-101.55	1777.00
20	EL FISCAL	Cw1ga	20.67	-98.62	30.00
21	EL GRITO, MOCTZUMA	BS1	22.65	-101.13	1729.00
22	EL HUIZACH, GUADALCAZA	BS0	22.93	-100.47	1250.00
23	EL NARANJO, (DG)	Cw1ga	22.63	-99.33	330.00
24	EL PEAJE, S. L. P.	BS1	22.12	-101.08	1860.00
25	EL PUJAL, CD. VALLS	Cw2ga	21.85	-98.93	50.00
26	REQUETEMU VILLA TERRAZA	Cfga	21.43	-98.90	89.00
27	EL SALTO, CD. DEL MAIZ	Cw2ga	22.60	-99.43	405.00
28	EL TIGRE, CD. VALLS	Cw1ga	22.25	-99.12	405.00
29	ETA. 131,CD. FERNANDEZ	BS1	21.95	-100.02	999.00
30	FARO GALLINAS, RIO VERDE	BS1	22.03	-100.23	918.00
31	GALLINAS, AQUISMON	Cw2ga	21.95	-99.25	300.00
32	GUADALCAZAR, GUADALCAZA	BS1	22.62	-100.42	1675.00
33	LA MAROMA, CATORCE	BS0	23.48	-100.05	1940.00
34	LA SALITRRA, ZARAGOZA	BS1	21.95	-100.57	1850.00
35	LAGUNILLAS, LAGUNILLAS	BS1	21.57	-99.58	1390.00
36	LAS ADJUNTAS, TAMUIN	Cw1ga	21.98	-98.72	25.00
37	MORITAS, CD. VALLES	Cw2ga	21.75	-98.92	40.00
38	LOS PILARES, S. L. P.	BS0	22.45	-101.08	1675.00
39	MAITINEZ (A. LA ISLA)	Cw1ga	22.38	-99.28	1675.00
40	MATHEUALA, MATHEUAL(SMN)	BS1	23.65	-100.63	1615.00
41	MATHEUALA, MATHEUAL(DG)	BS1	23.67	-100.65	1677.00
42	MEXQUITIC, MEXQUITIC	BS1	22.27	-101.12	2062.00
43	MICOS, CD. VALLES	Cw2ga	22.13	-99.17	2060.00

ID	Nombre	Clima	Latitud	Longitud	Altitud (m)
44	MOCTZUMA, MOCTZUMA(DG)	BS0	22.75	-101.08	1670.00
45	NOGAL OSCURO, CD. FNDZ.	BS1	22.03	-100.20	1035.00
46	OJO CALINTE, V. D REYES	BS0	21.87	-100.78	1750.00
47	OJO DE AGUA, ALAQUINES	Cw1ga	21.85	-100.10	1775.00
48	PALO BLANCO, VILLA GP.	BS0	23.13	-100.60	1300.00
49	PAPAGAYOS, CD. DEL MAIZ	Cw2ga	22.40	-99.45	1300.00
50	PAREDES, RIO VERDE	BS1	21.72	-100.00	1300.00
51	PASO DE SAN ANTONIO	Cw1ga	22.02	-100.38	991.00
52	PASTORA, RIO VERDE	BS1	22.15	-100.05	1009.00
53	CD. SANTOS, CD. SANTOS	Cfga	21.62	-98.97	225.00
54	PEDRO MONTOYA, RIO VERDE	BS1	21.63	-99.83	883.00
55	PEÑON BLANCO(A. TEPOCATA)	BS0	22.63	-101.72	2100.00
56	PONCIANO ARRIAGA, CD. V	Cw1ga	22.02	-99.22	2000.00
57	PRESA DE GUADALUPE	BS0	22.87	-100.15	1200.00
58	PRESA PALOMAS, ALAQUINES	BS1	22.18	-99.65	1210.00
59	VILLA DE RAMOS	BS0	22.85	-101.93	2210.00
60	RAYON, RAYON	BS1	21.85	-99.65	942.00
61	RINCON DEL PORVENIR	BS0	22.28	-101.10	2062.00
63	SAN A. DE LOS GUAYABOS	Cw1ga	21.68	-99.48	1415.00
64	SAN DIEGUITO, CD VALLES	Cw2ga	22.02	-99.22	1415.00
66	SAN FRANCISCO, RIO VERDE	BS1	22.08	-99.87	1020.00
67	SAN JOSE ALBURQUERQUE	BS1	21.85	-100.52	1860.00
68	SAN JUAN DE MICO	Cw1ga	22.63	-99.42	19.00
69	SAN LUIS POTOSI (DG)	BS0	22.15	-100.97	1877.00
71	SAN NICOLAS TOLENTINO	BS1	22.27	-100.57	1445.00
72	SANTA CRUZ, AQUISMON	Cw2ga	21.72	-99.05	1200.00
73	REFORMA, A. STA. MARIA)	BS0	22.75	-101.58	2000.00
74	SANTA MARIA DEL RFUGIO	BS0	23.77	-101.23	1961.00
75	SANTA MARIA DEL RI(DG)	BS0	21.80	-100.73	1703.00
76	SANTA ROSA, CD. VALLES	Cw1ga	22.02	-99.05	70.00
77	SANTO DOMINGO	BS1	23.32	-101.75	1415.00
78	SANTIAGO, VILLA ARRIAGA	BS0	21.88	-101.27	2198.00
80	S.L.C.A. PONCIANO ARRIAG	Cw1ga	20.73	-99.97	35.00
81	SOLEDAD DIAZ GUTIRREZ	BS0	22.18	-100.93	1882.00
82	TAMAPATZ, AQUISMON	Cfgb3	21.62	-99.12	32.00
84	TANCULIN, TAMAZUCHALE	Cfga	21.57	-99.12	100.00
85	TANQUIAN, TANQUIAN D .	Cw1ga	21.62	-98.65	77.00
86	TANLACUT, SANTA CATARINA	Cw2ga	21.68	-99.32	100.00
87	TANLAJAS, TANLAJAS	Cw2ga	21.67	-98.87	150.00
88	TANTIZOHUICHE, CD. VALLES	Cw2ga	21.82	-98.98	77.00
90	TANZABACA, TAMASOPO	Cw2ga	21.67	-99.22	120.00
91	TEMAMATLA, TAMAZUNCHAL	Cfga	21.23	-98.77	120.00
92	TIERRA BLANCA	Cfga	21.23	-98.90	150.00
93	TIERRA NUEVA, TIERRA NUEVA	BS0	21.58	-100.58	1778.00
94	VANEGAS, VANEGAS	BS0	23.87	-100.95	1735.00
95	VELAZCO, TAMUIN	BS1	22.20	-98.57	49.00
96	VENADO, VENADO	BS1	22.92	-101.08	1795.00
97	VIGAS, RIO VERDE	BS1	21.80	-99.87	1786.00

ID	Nombre	Clima	Latitud	Longitud	Altitud (m)
98	VILLA DE ARISTA	BS0	22.63	-100.85	1649.00
99	ARISTA, VILLA HIDALGO	BS1	22.65	-100.85	1560.00
100	VILLA DE ARRIAGA (DG)	BS1	21.92	-101.38	2198.00
101	VILLA DE REYES	BS0	21.80	-100.93	1819.00
102	VILLA HIDALGO	BS0	22.45	-100.68	1620.00
103	VILLA JUAREZ, V. JUAREZ	BS1	22.32	-100.28	1060.00
104	VICHINCHIJOL, EBANO	BS1	20.20	-99.33	180.00
105	XILITLA, XILITLA	Cfgb3	21.40	-98.98	1035.00
106	ZARAGOZA, ZARAGOZA	BS0	22.13	-100.73	2000.00
107	EL PEÑON, TAMUIN	Cw1ga	22.32	-98.87	1890.00
108	EL TULLILO, EBANO	Cw1ga	22.28	-98.68	1810.00
109	MOCTEZUMA, MOCTEZU(SMN)	BS0	22.75	-101.08	1670.00
110	OJO DE AGUA SECO	BS1	22.22	-99.48	1775.00
111	SAN LUIS POTOSI (SMN)	BS0	22.50	-100.98	1877.00
112	SANTA MARIA DEL RIO	BS0	21.80	-100.73	1703.00
113	SAN VICENTE	Cw1ga	21.68	-98.62	32.00
114	RIO VERDE, RIO VERDE(DG)	BS1	21.93	-99.98	987.00
115	CARDENAS, CARDENAS(SMN)	BS1	21.98	-99.50	1202.00
116	CIUDAD DEL MAIZ (SMN)	BS1	22.40	-99.60	1253.00
117	AGUA NUEVA, TAMASOP(DG)	Cw2ga	21.97	-99.38	372.00
122	CHAPULHUACANITO	Cw2ga	21.23	-98.77	120.00
123	LAS GARZAS, CD. VALLES	Cw1ga	22.25	-99.12	400.00
124	SAN JOSE DE LIMON, TAMUIN	Cw1ga	22.00	-98.68	19.00
125	TLAMAYA, XILITLA	Cfgb3	21.43	-98.95	150.00
126	EL SALTO PLANTA HIDROM.	BS0	22.33	-99.87	288.00
127	VILLA DE ARRIAGA (SMN)	BS1	21.93	-99.50	2000.00
132	EL NARANJO ETA 55 CD. M	Cw1ga	22.40	-99.60	1200.00
133	LA GLORIA, TANLAJAS	Cw1ga	21.82	-98.78	2100.00
134	SAT. MA. DEL RIO TA.156	BS0	21.80	-100.73	1700.00
135	ETA. 170,TANQUIAN D	BS1	21.62	-98.65	77.00
136	TANLU. SANTA CATARINA	Cw1ga	21.63	-99.25	150.00
137	VIENTE DE NOVIEMBRE	Cw2ga	21.77	-99.27	1735.00
138	TAMAZUNCHALE	Cw2ga	21.03	-98.75	110.00
139	TAMUIN, TAMUIN	Cw1ga	22.00	-98.60	22.00
142	LA PRESA, VILLA DE GPE.	BS1	23.63	-100.85	1660.00
144	LA CARDONCITA, CATORCE	BS0	23.55	-101.23	2100.00
145	LAGUNA SECA, CHARCAS	BS0	23.32	-100.95	2020.00
146	LA VICTORIA, STO. DOMINGO	BS0	23.62	-101.38	2150.00
147	JESUS MARIA, V. SANTIAGO	BS0	23.15	-102.18	990.00
148	SALINAS DE HIDALGO	BS0	22.63	-101.68	2099.00
149	SANTA ELENA, TAMUIN	Cw1ga	21.88	-98.85	30.00
150	GUANAME, VENADO	BS0	22.85	-101.23	1950.00
151	SAN JUAN DEL SALADO	BS0	23.30	-101.95	1940.00
152	SAUZ DE CALRA	BS0	23.30	-101.42	2070.00
154	SAN FRANCISCO	BS0	23.30	-101.42	2190.00
156	BUNAVISTA, CD. VALLES	Cw1ga	22.02	-99.03	215.00
158	CHARCAS, CHARCAS	BS0	23.13	-101.12	2020.00
159	LA MORITA, CD. DEL MAIZ	BS0	21.35	-98.85	1020.00

ID	Nombre	Clima	Latitud	Longitud	Altitud (m)
160	COYOTILLOS, CHARCAS	BS0	23.28	-101.20	2180.00
161	LA HERRADURA, V. D RAMOS	BS0	23.02	-101.73	2140.00
162	EL CARMEN, MTHUALA	BS0	23.37	-100.55	1355.00
163	BLEDOS, VILLA D RYS	BS0	21.83	-101.12	1980.00
164	LLANOS DEL CARMEN	BS0	22.85	-100.68	1600.00
165	SAN JOSE DE CORONADO	BS0	23.58	-101.57	2240.00
166	VILLA DE RAMOS	BS0	22.82	-101.90	2210.00
167	MATLAPA, MATLAPA	Cw2ga	21.27	-98.80	133.00
168	BUNAVISTA, GUADALCAZAR	BS0	23.42	-100.78	1800.00
169	BUNAVISTA, VILLA DE GPE	BS1	23.42	-100.78	1800.00
170	EL CHARCO, RIO VERDE	Cw1ga	22.02	-100.32	1200.00
171	HUIZACHAL, RIO VERDE	BS1	21.73	-100.03	990.00
172	MANANTIAL DE MEDIA LUNA	BS1	21.85	-100.02	1010.00
173	PRESA ALVARO OBREGON	BS1	22.18	-99.63	1210.00
174	PUERTO LOBOS, CD. MAIZ	BS1	22.47	-99.48	1210.00
175	EL SALADO, VENGAS	BS0	24.32	-100.87	1715.00
176	SAN JUAN DEL TUZAL	BS0	23.13	-101.33	2110.00
177	SANTA CATARINA	BS1	22.05	-100.45	1200.00
179	XOCONOXTLE, ZARAGOZA	BS0	22.08	-100.70	1035.00
180	CAÑADA VERDE, CHARCAS	BS1	23.08	-101.17	2050.00
181	EL ASTILLERO, VILLA GPE	BS0	23.40	-100.80	1750.00
182	TAMPAMOLON, TAMPAMOLON	Cw2ga	21.55	-98.82	100.00
183	EL TULE, VENADO	BS0	22.82	-101.15	1714.00
186	HUICHIHUAYAN, HUHUTLA	Cfga	21.47	-98.97	125.00
187	TEPEYAC, CD. DEL MAIZ	BS0	22.65	-99.90	1025.00
188	CORONADO, VENADO	BS1	22.92	-100.93	1680.00
189	EL HOSPITAL, CHARCAS	BS1	23.23	-101.20	2190.00
190	LIBERTAD, CD. DEL MAIZ	BS0	22.40	-99.83	1020.00
191	SAN ANTONIO DEL MEZQUITE	BS0	23.17	-101.88	2080.00
192	SAN FRANCISCO II	BS0	22.77	-100.88	1610.00
193	SAN JOSE DEL TAPANCO	BS1	21.77	-99.90	900.00
194	SAN RAFAEL, VILLA RAMOS	BS0	23.00	-101.83	2145.00
195	LAS TABLAS, CD. DEL MAIZ	BS0	22.25	-99.85	1030.00
196	EL TORO, VILLA DE RAMOS	BS1	22.83	-101.48	1960.00