



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

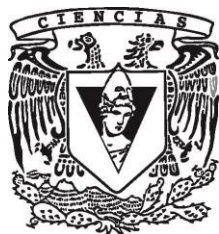
FACULTAD DE CIENCIAS

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO DE
COBERTURA DE SUELO PARA EL AÑO 1807 EN LA
CUENCA DE MÉXICO EMPLEANDO MODELACIÓN
NUMÉRICA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
PRESENTA:**

ALEJANDRA LABRADA SANTANA



**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ERIKA DANAÉ LÓPEZ ESPINOZA**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

He desplegado mi orfandad sobre la mesa, como un mapa. Dibujé el itinerario hacia mi lugar al viento. Los que llegan no me encuentran. Los que espero no existen. Y he bebido licores furiosos para transmutar los rostros en un ángel, en vasos vacíos.

Alejandra Pizarnik

*A Griselda Santana y Jorge Labrada, por todo el amor y apoyo.
A Karen, Erick, Paty, Dany y Óscar, acompañantes desde los
primeros años.
Mi familia por elección y amor: Carol, Arturo, Ale, Clau,
Rossier, las preciosas.
Por creer que lo lograría y aquí está.*

Agradecimientos

A mis introductores al mundo: Jorge y Griselda, gracias por siempre brindarme el apoyo y amor para no caer.

Karen y Erick, por todas las risas y las enseñanzas, les amo.

Carol y Arturo, gracias por las melancolías.

A mis amigos y amigas, por ser parte de la familia que pude elegir.

Claudia, por hacer los días menos grises.

Dra. Erika, infinitas gracias por el apoyo y la paciencia en todo el desarrollo de la investigación. Por lo aprendido y lo vivido.

Agradezco también el apoyo técnico y académico del M. en C. Octavio Gómez Ramos y la M. en C. Dulce Rosario Herrera, cuyas contribuciones me facilitaron el uso del cluster Ometéotl. En general al grupo Interacción Océano-Atmósfera del Centro de Ciencias de la Atmósfera, por compartir sus conocimientos conmigo.

Este trabajo forma parte de los proyectos de investigación UNAM-DGAPA-PAPIIT IA10437LANCAD-UNAM-DGTIC-393.

A todas las personas que creyeron en mi.

Resumen

Con el transcurso del tiempo, la superficie terrestre ha experimentado cambios en su cobertura en términos de la acelerada expansión de las ciudades y el incremento poblacional. Dichos procesos de cambio superficial tienen impacto directo en las variables meteorológicas, tales como la temperatura, la humedad, la nubosidad, la precipitación, etc. Uno de los factores de mayor impacto en el sistema climático es el cambio de cobertura y uso de suelo (LULC, por sus siglas en inglés). El cambio de LULC tiene implicaciones en diferentes escalas temporales y espaciales, por lo que puede alterar el intercambio de energía y diferentes balances que impactan consecuentemente la interacción entre la tierra y la atmósfera.

El acelerado incremento de la mancha urbana en la zona sur y centro de la Cuenca de México tiene como mecanismo fundamental el proceso de metropolización; ello deviene, entre otras cosas, en la demanda de recursos estrechamente relacionados con modificaciones de la superficie terrestre, tales como la pérdida de la cubierta vegetal y la desecación del sistema de lagos. En esta tesis se estudió el impacto que han tenido tales modificaciones en la temperatura, precipitación y magnitud del viento en las zonas sur y centro de la Cuenca de México, empleando para ello el modelo de predicción numérica meteorológica (NWP, por sus siglas en inglés) de última generación: *Weather Research and Forecasting* (WRF).

Para llevar a cabo el análisis, se realizaron simulaciones numéricas considerando como condiciones iniciales y de frontera las salidas del modelo de pronóstico climático *Climate Forecast System* (CFS) con una resolución temporal de 6 horas y una resolución espacial de 0.25 grados. Se configuró un dominio padre y dos dominios anidados en torno a la Cuenca de México empleando una resolución horizontal de 15 km, 5 km y 1 km. El periodo de simulación abarca del 11-06-2016 a las 00UTC al 19-06-2016 a las 00UTC considerando un periodo de estabilización (*spin-up*) del modelo de 24 h. Con lo anterior se realizaron dos estudios, el primero involucra la comparación de dos simulaciones cuya configuración difiere en la activación del esquema de cúmulos; en una de ellas se mantiene activado para todos los dominios y en la otra se desactiva para el dominio con resolución más fina (1km).

A partir del análisis realizado se encontró que emplear el esquema de cúmulos en los tres dominios genera mejores pronósticos de temperatura a 2 metros, mientras que desfavorece el pronóstico de precipitación, pues se observó que los valores simulados se aproximan más a lo observado cuando se desactiva dicho esquema para el dominio de resolución más fina. Respecto a la magnitud de viento, el pronóstico muestra mejor comportamiento cuando se desactiva el esquema de cúmulos para la red REDMET, contrario a la red EMAS.

En el segundo estudio se analizó el impacto del cambio de LULC entre 1807 y 2016, manteniendo la configuración con la parametrización de cúmulos desactivada. Se encontró un aumento de la temperatura en superficie del año 1807 a 2016 en zonas caracterizadas por hallarse cerca de y sobre la mancha urbana, con valores de hasta 0.69 °C; así mismo, en la región donde hubo pérdida del sistema de lagos se encontró un mayor DTR, tal que las diferencias del año 2016 menos 1807, alcanzan valores de 4.75 °C. El impacto más evidente se presenta en las temperaturas máximas y mínimas donde se encontraba el casi extinto cuerpo lacustre, elevando las temperaturas mínimas en 3.25 °C y reduciendo las temperaturas máximas en 2 °C; esto puede suponer que las temperaturas máximas se incrementaron hacia el año 2016 y las mínimas eran reguladas por el proceso de liberación de calor durante la noche por parte del sistema de lagos. En términos de la precipitación, se halló que del año 1807 a 2016 los valores acumulados diarios tuvieron un incremento máximo de 13.64 mm y de 0.56 mm para los valores horarios; con importantes desfases en la ocurrencia de eventos de estos últimos. Así mismo, se encontró que la magnitud de viento es mayor en el año 1807 en comparación con el año 2016 en la región donde se encuentran los cuerpos de agua de mayor extensión, resultado del contraste de rugosidad en la superficie; sin embargo, para la zona central la magnitud de viento es mayor en el año 2016, reflejando que la rugosidad no es el único parámetro que regula los valores de velocidad.

Índice

Agradecimientos	V
Resumen	VII
1. Introducción	1
1.1. Cambio de cobertura y uso de suelo	1
1.2. LULCC en México	1
1.2.1. Proceso de metropolización	2
1.3. Factores importantes de LULCC y sus implicaciones en la Cuenca de México	3
Cobertura vegetal	4
Sistema de lagos	4
Expansión urbana	5
1.3.1. Modelación numérica de la Cuenca de México	5
1.4. Objetivo general	7
1.4.1. Objetivos específicos	7
1.5. Organización de la tesis	7
2. Marco Contextual	9
2.1. Modelación numérica y su relación con LULCC	9
2.1.1. Balance neto radiativo	9
2.1.2. Balance hídrico	10
2.2. Modelo WRF	10
2.2.1. Datos externos	11
2.2.2. Sistema de preprocesamiento	11
Geogrid	11
Ungrib	12
Metgrid	12
2.2.3. Sistema de procesamiento	12
2.2.4. Herramientas de post-procesamiento	12
2.2.5. Parametrizaciones	12
2.3. Fenómenos asociados al LULCC	13
2.3.1. Isla de calor urbana	13
2.3.2. Rugosidad en superficie	13
2.3.3. Ciclo hidrológico	14
2.4. Parámetros estadísticos	14
2.4.1. Coeficiente de correlación de Pearson	14
2.4.2. Raíz del error cuadrático medio	14
2.4.3. Bias o sesgo	15

3. Metodología	17
3.1. Descripción del área de estudio	17
3.2. Condiciones de LULC para la Cuenca de México	19
3.2.1. Año 1807	19
Cobertura vegetal	20
El sistema de lagos de la Cuenca de México	20
Expansión urbana	21
3.2.2. Año 2016	22
3.3. Configuración del modelo WRF	24
3.3.1. Casos de estudio y configuración final del modelo	25
3.4. Datos observacionales	26
4. Resultados	29
4.1. Parametrización de cúmulos	29
Estaciones Meteorológicas Automáticas - EMAS	30
Red de Meteorología y Radiación Solar - REDMET	34
Sistema de Aguas de la Ciudad de México - SACMEX	36
4.2. Estimación de condiciones meteorológicas del año 1807	39
4.2.1. Transiciones de LULC de 1807 a 2016	39
Temperatura	40
Precipitación	53
Magnitud de viento	57
5. Conclusiones y recomendaciones	61
5.1. Casos de estudio - parametrización de cúmulos	61
5.2. Condiciones meteorológicas entre los años 1807 y 2016	62
5.3. Conclusiones generales	64
5.4. Recomendaciones	64
A. Mapa de vegetación potencial propuesto por Rzedowski	65
B. Propuesta de Alexander Von Humboldt de las condiciones de la Nueva España en el año 1804	67
C. Extracto del mapa propuesto por Ubaldo Vargas respecto a las condiciones del sistema de lagos a principios del siglo XIX	69
D. El sistema de lagos en el siglo XVI	71
E. Estaciones con datos inconsistentes	73
Bibliografía	75

Índice de figuras

1.1. Expansión de la mancha urbana sobre la Ciudad de México de 1807 a 1950. De 1970 a 2013 se considera Cd.Mx. y entidades a su alrededor	3
2.1. Diagrama de flujo de los principales procesos de una simulación numérica en el modelo WRF.	11
2.2. Representación gráfica del fenómeno de isla de calor urbana.	13
3.1. Mapa de las sierras principales que rodean la Cuenca de México.	18
3.2. Los climas de la Cuenca de México.	19
3.3. Estimación de las condiciones de LULC para el año 1807.	22
3.4. Condiciones de LULC para el año 2016.	23
3.5. Configuración de los tres dominios empleados en las simulaciones numéricas.	24
3.6. Ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas en el análisis.	27
4.1. Serie de tiempo de precipitación horaria de la estación Tezontle.	31
4.2. Diagrama de las transiciones de uso de suelo identificadas del año 1807 al 2016.	39
4.3. Puntos virtuales con transición de cuerpo de agua a urbanización.	40
4.4. Serie de tiempo de temperatura horaria referente a la ubicación de la estación Acolman.	41
4.5. Serie de tiempo de precipitación horaria referente a la ubicación de la estación Acolman	41
4.6. Promedio de temperatura en superficie, referencia al periodo nocturno.	43
4.7. Promedio de temperatura en superficie, referencia al periodo diurno.	44
4.8. Promedio de temperatura máxima para el año 2016.	46
4.9. Promedio de temperatura máxima para el año 1807.	47
4.10. Diferencia del promedio de temperatura máxima.	48
4.11. Promedio de temperatura mínima para el año 2016.	49
4.12. Promedio de temperatura mínima para el año 1807.	50
4.13. Diferencia del promedio de temperatura mínima.	51
4.14. Precipitación total acumulada en todo el periodo de estudio para el año 1807.	54
4.15. Precipitación total acumulada en todo el periodo de estudio para el año 2016.	55
4.16. Mapa de las diferencias de precipitación en todo el periodo (año 1807-2016).	56
4.17. Mapa de diferencia de viento promedio en superficie (año 1807-año 2016).	59

Índice de Tablas

3.1. Homologación de las clases del mapa de vegetación potencial a las empleadas por el LULC USGS del modelo WRF.	20
3.2. Configuración general empleada en las simulaciones numéricas con el modelo WRF.	25
3.3. Nombre de las estaciones meteorológicas referentes a la Figura 3.6.	28
4.1. Estadísticos referentes a las estaciones EMAS para el caso de estudio 1, donde se emplea la parametrización de cúmulos BMJ.	32
4.2. Estadísticos referentes a las estaciones EMAS para el caso de estudio 2, donde el modelo resuelve explícitamente.	33
4.3. Estadísticos referentes a las estaciones REDMET para el caso de estudio 1, donde se emplea la parametrización de cúmulos BMJ.	35
4.4. Estadísticos referentes a las estaciones REDMET para el caso de estudio 2, donde el modelo resuelve explícitamente.	35
4.5. Estadísticos referentes a las estaciones SACMEX para el caso de estudio 1, donde se emplea la parametrización de cúmulos BMJ.	36
4.6. Estadísticos referentes a las estaciones SACMEX para el caso de estudio 2, donde el modelo resuelve explícitamente.	37
4.7. Resumen de qué simulación generó mejor pronóstico para las variables meteorológicas.	38
4.8. Temperaturas [°C] máximas, mínimas y DTR para el punto virtual 1 (19.40N, 99.01O) en el periodo de simulación.	52
4.9. Temperaturas [°C] máximas, mínimas y DTR para el punto virtual 2 (19.49N, 99.05O) en el periodo de simulación.	52
4.10. Valores de rugosidad para las cobeturas de suelo presentes en la zona de estudio.	57
4.11. Promedio de las diferencias de los valores obtenidos del año 2016 menos los obtenidos en el año 1807.	60

Capítulo 1

Introducción

1.1. Cambio de cobertura y uso de suelo

El cambio de cobertura y uso de suelo, también conocido como *Land Use and Land Cover Change* (LULCC), es un término empleado para designar las múltiples transformaciones que experimenta la superficie terrestre, generalmente atribuidas a causas antropogénicas (Ellis y Pontius, 2007). Actualmente, gran parte de dichas transformaciones se relacionan con la expansión de la agricultura. De esta manera, la actividad humana se posiciona como uno de los factores que provoca más alteraciones en la superficie terrestre, en el ciclo del agua y en los ciclos biogeoquímicos, influyendo así a escala regional, continental e incluso global (Hurtt et al., 2011). Sin embargo, el LULCC se puede dividir en relación a sus causas: naturales (inundaciones, sequías, incendios forestales, etc.) y antropogénicas (deforestación, agricultura, urbanización, etc.) (Ward et al., 2014). Qu et al. (2013) mencionan que el LULCC es uno de los procesos más importantes por medio del cual el ser humano ejerce forzamientos en el sistema climático. Por consiguiente, estudiar el LULCC provee conocimientos para entender parte de la interacción de la superficie terrestre con la atmósfera y los intercambios de energía, materia y momento que existen en dicha interacción. Así, por ejemplo, modificaciones en la cobertura superficial, además de generar cambios en las propiedades físicas de la superficie (e.g. rugosidad), devenien en cambios en la dinámica con la capa atmosférica adyacente (Arnfield, 2003).

1.2. LULCC en México

Un aspecto importante de la Cuenca de México se remite al establecimiento de sus primeros pobladores sobre el sistema de lagos (época prehispánica); hecho que prevalece actualmente y, además, se encuentra relacionado con el crecimiento demográfico y el proceso de centralización (Ezcurra, 2003).

Es sabido que, en México como en muchos países, el proceso de centralización y en general de metropolización incrementaron con la llegada de la época industrial en el siglo XX. Ciertamente, dichos procesos están vinculados con el LULCC, que en el caso de la Cuenca de México no son exclusivos de la colonización (e.g. surgimiento de chinampas en la época prehispánica), si no también de la desecación del sistema de lagos y el decremento de la cobertura vegetal (Ezcurra, 2003).

Los procesos relacionados con el LULCC, la pérdida de la biodiversidad y el deterioro ecosistémico no son casos aislados de las actividades antropogénicas y, sin duda, requieren estudios regionales que abunden en ello. En el caso de México

surgen dificultades al momento de realizarlos. Por una parte, los datos disponibles para cuantificar el LULC y sus cambios, tienden a ser insuficientes y poco confiables, convirtiéndose en un problema si se pretende hacer un análisis sobre la condición de dichos recursos (Velázquez et al., 2002).

En términos del deterioro ecosistémico, también relacionado con la pérdida de la biodiversidad, se debe notar que las regiones más cercanas al punto urbano tienden a ser las más afectadas, debido a que generalmente la demanda de recursos en una ciudad supera a la cantidad que por sí misma la zona puede proveer¹, por tanto se recurre a emplear los servicios ecosistémicos de zonas rurales. Con lo que respecta a la Cuenca de México, además de la demanda de recursos, la mancha urbana ha incrementado hacia la periferia, produciendo importantes procesos de transformación hacia zonas aledañas a la ciudad (Merlín et al., 2013).

Por lo anterior, los drásticos cambios de LULC que a través de los años ha sufrido la Cuenca de México, aunado a diversas actividades antropogénicas, contribuyen en gran medida a la dinámica de ciertas variables atmosféricas, como la diferencia de temperatura entre la zona urbana y el área rurales (Jáuregui, 2004).

1.2.1. Proceso de metropolización

El término metropolización² se ha extendido rápidamente con el paso de los años, con ello su semántica aumenta e involucra términos auxiliares en su entendimiento; sin embargo, para tener una definición clara es necesario analizar su relación con cuestiones geográficas (en específico las urbanas). De esa manera, podría ligarse conceptualmente con términos tales como: concentración poblacional, desarrollo económico, límites territoriales, entre otros (Leroy, 2000).

Además, aunque se generalice el término, puede ser entendido como un fenómeno derivado, consecuencia elemental, del proceso de globalización en las ciudades, dando paso a diferencias marcadas entre el centro y la periferia de las mismas. Así, el espacio donde se desarrolla el proceso de metropolización está caracterizado por un alto contenido de interacciones (Pyka, 2013).

Es altamente significativo entender el proceso de metropolización como un mecanismo para la urbanización, pues las áreas rurales y periurbanas terminan siendo parte de las actividades desarrolladas en las ciudades, dando lugar al intercambio social, económico y espacial. Bajo esa perspectiva, el crecimiento de las zonas urbanas afecta, por supuesto, a las rurales y, en términos del LULCC, se tienen implicaciones no solamente por el cambio infraestructural, si no también por cambios en el uso de suelo que surgen a partir de la necesidad de recursos naturales; por ejemplo, la deforestación (Drescher y Iaquinta, 2002).

En lo que respecta a la Cuenca de México, el proceso de metropolización comenzó a tomar lugar entre los años 1930-1950. En este periodo la ciudad tendió a acrecentarse y, en efecto, una de las principales contribuciones fue en parte por la migración poblacional hacia el centro de la Cuenca de México³. En las décadas posteriores, el desarrollo de la mancha urbana fue en aumento (Figura 1.1); generando unidades político-administrativas que con el tiempo conformaron lo que actualmente se denomina como el Área Metropolitana (16 delegaciones de la Cd.Mx. y 29 municipios

¹En un sentido Malthusiano, existe diferencia entre el comportamiento de crecimiento poblacional (razón geométrica) y el de los requerimientos para subsistir (razón aritmética).

²Entendido en sus raíces como: meter=madre, polis=ciudad; *i.e.* ciudad madre.

³Es preciso mencionar que la concentración de la población no es el único causante del proceso de metropolización en México, pero sí uno de los más importantes.

del Edo. Mex.). Asimismo, junto al proceso de expansión de la mancha urbana se añaden también el LULCC y las modificaciones en la estructura poblacional (Ezcu-rra et al., 1999).

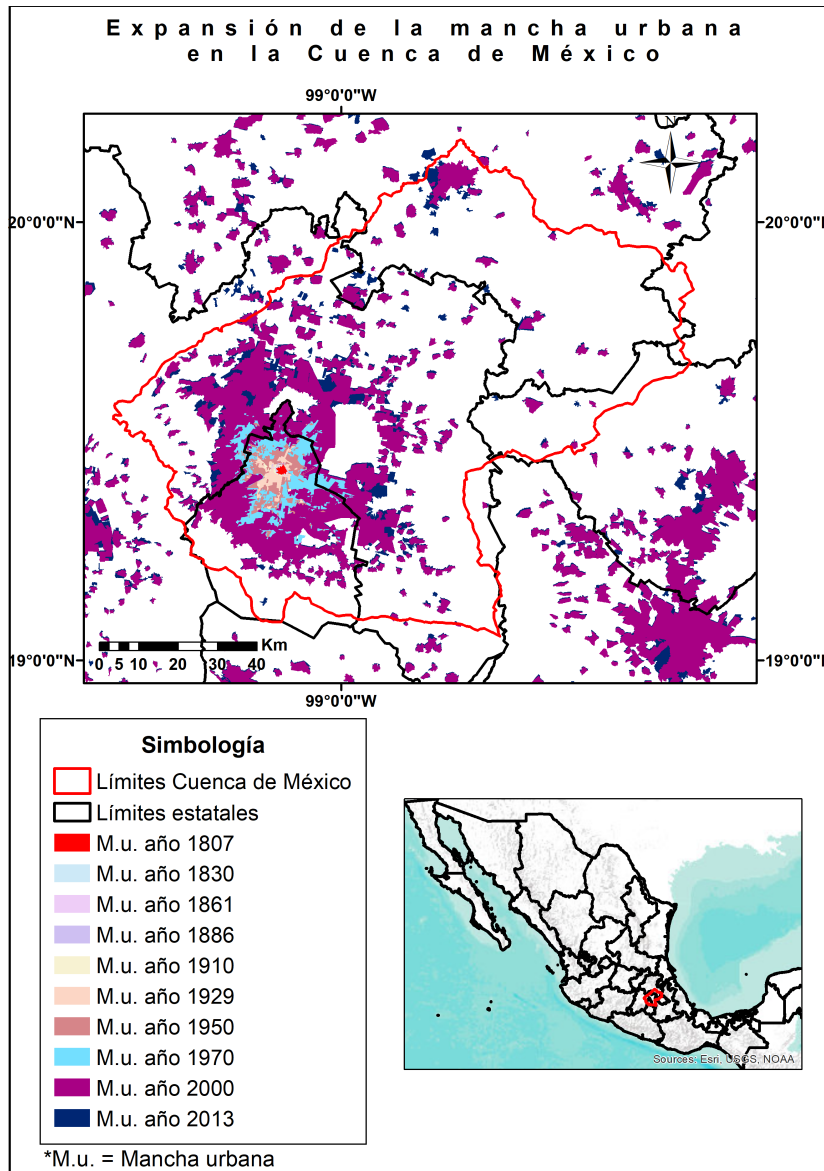


FIGURA 1.1: Expansión de la mancha urbana sobre la Ciudad de México de 1807 a 1950. De 1970 a 2013 se considera Cd.Mx. y entidades a su alrededor

[Tomado de Angel et al. (s.f.)]

1.3. Factores importantes de LULCC y sus implicaciones en la Cuenca de México

Llegando a este punto, se reconocen algunas de las implicaciones que ejercen los procesos de metropolización y urbanización en términos del LULCC en la atmósfera local. Por ello, el presente trabajo se centra en tres factores relacionados a nivel social, ambiental y económico: cobertura vegetal, sistema de lagos y mancha urbana.

La intención de este apartado es dar un panorama general de su relación y de esa manera objetivizar las motivaciones del trabajo de investigación.

Cobertura vegetal

Grosso modo, parte de la historia de México se encuentra permeada por reformas políticas relacionadas con la tenencia del territorio. De esa manera, la época colonial (surgimiento de la propiedad privada) y la post-revolución (reforma agraria) se posicionan como las etapas de mayor influencia⁴, ya que fueron determinantes para establecer el acceso a los recursos, mediante tenencia individual o grupal. El motivo por el cual se enfatiza el tema de tenencia territorial en este párrafo es porque está directamente relacionado con el uso que se le da a los recursos; pues una de las intenciones principales de los regímenes de tenencia es transformar áreas naturales en tierras para producción (Bonilla-Moheno et al., 2013). En relación a ello y en específico al último punto, Ezcurra (2003) menciona la enorme dependencia de la población citadina de la Cuenca de México hacia los recursos de otros ecosistemas, ejemplificando con la tala de selvas al sudeste de México para la producción de carne, que posteriormente se comercializaba en los grandes centros industriales.

Entonces, la dinámica de la cobertura vegetal es en parte dependiente de la demanda de recursos y, en algunos casos, el fin de las áreas naturales. En consecuencia, a medida que existen cambios de cobertura vegetal *ipso facto* existen alteraciones en las propiedades físicas de la superficie y a su vez, en el balance de energía. Un ejemplo relacionado con lo anterior es expuesto por Duveiller et al. (2018), quien menciona la existencia del aumento de la radiación de onda corta reflejada cuando hay transición de bosques a cultivos o pastizales, lo cual genera perturbaciones en el balance de energía.

Sistema de lagos

Al tratarse de la Cuenca de México, una de las peculiaridades, es el asentamiento de la ciudad sobre un sistema de lagos.

En principio, existen diversos factores involucrados en la dinámica del sistema de lagos, desde el hecho del requerimiento hídrico para el cultivo hasta su empleo para el consumo mismo. Tras la llegada de los españoles, se iniciaron una serie de proyectos para el desagüe del sistema de lagos, ya que generaban inundaciones que tenían repercusiones en la población⁵ (Junta Directiva, 1902). Es decir, a medida que crecía la población y se cambiaba el LULC se necesitaban más requerimientos para el manejo del sistema de lagos.

Pues bien, con esos antecedentes y considerando que las obras de desagüe siguieron en ejecución en diferentes etapas de la historia de la Cuenca, la desecación no solamente se vio reflejada en la ruptura del comercio que ocupaba como medio sus canales (e.g. transporte de productos agrícolas en el canal de la Viga), también en el hundimiento que presentaban algunas zonas, producto del déficit de bombeo y recarga del acuífero en la Cuenca de México⁶. Aunado a lo anterior, el acelerado crecimiento de la mancha urbana tiene como consecuencia la sobreexplotación del acuífero y juega un papel importante en términos del LULCC y del hundimiento.

⁴Sí bien las reformas tenían como fin repartir las tierras igualitariamente, sólo han favorecido a personas con mayor cantidad de recursos.

⁵En sus inicios, la evaporación e infiltración eran los únicos medios por los cuales se presentaban salidas del sistema de lagos formado en la parte más baja de la Cuenca de México.

⁶Relacionado igualmente con la composición de arcillas y sedimentos orgánicos del terreno.

Además, el balance hídrico y de energía no están exentos de modificaciones en sus componentes, pues como consecuencia se tienen cambios en las tasas de los flujos entrantes y salientes de la superficie (Ezcurra, 2003).

Expansión urbana

Para exponer el factor mancha urbana, se analizará como *causa causarum* de los otros dos factores; argumento que surge a partir de que la demanda de recursos por parte de la población produce la sobreexplotación de los mismos.

Específicamente, en la Cuenca de México las diferentes leyes en términos de la tenencia de tierra dieron paso a la centralización y con ello la agregación de zonas periurbanas y rurales a la urbanización (Tacubaya, Tacuba, Azcapotzalco, etc.)⁷, así como la posterior migración masiva en el siglo XX⁸ (Ezcurra, 2003).

De acuerdo a Suárez y Delgado (2007), en la actualidad las tendencias de crecimiento poblacional en la Ciudad de México plantean que para el año 2020 habitarán 21 millones de personas y es ahí donde surge la necesidad de priorizar la planeación territorial, pues desde las perspectivas demográficas y económicas se pueden cuantificar las necesidades de la población en relación a los recursos; pues la expansión de la mancha urbana (en un sentido histórico) siempre ha carecido de políticas que planteen un buen ordenamiento territorial⁹.

Podría realizarse un análisis profundo sobre cómo es que la toma de decisiones ha influido en el cambio y uso de suelo en México. Sin embargo, en este trabajo de tesis se busca una comprensión de los impactos que genera el cambio de cobertura y uso de suelo hacia su entorno. Lo anterior con el fin de profundizar y cuantificar los cambios meteorológicos relacionados, por ejemplo, en la temperatura debidos a la pérdida de recursos naturales (como lo fue el sistema de lagos y las coberturas vegetativas), por el crecimiento de la mancha urbana.

1.3.1. Modelación numérica de la Cuenca de México

Particularmente, en la Cuenca de México se han llevado a cabo diversas investigaciones empleando modelos numéricos regionales de distinta índole.

De esta manera, Jazcilevich et al. (2000) realizaron experimentos numéricos con diferentes implementaciones de uso de suelo, pero centrados en las modificaciones del tamaño del sistema de lagos y la urbanización para dos años, 1929 y 1991; con dos mallas, una exterior de 3 km y una interior de 1 km de resolución horizontal. El modelo empleado en dicho estudio es un sistema de pronóstico de mesoescala llamado MEMO (*Mesoescala Model*), el cual emplea un esquema no hidrostático para resolver las ecuaciones de momento, masa, energía, humedad y energía cinética asociada a las turbulencias. A través de las comparaciones entre los experimentos numéricos con mediciones de estaciones meteorológicas, llegan a la conclusión de que; en relación al campo térmico, incluso la desecación del sistema de lagos tiene igual o mayor impacto que el acelerado crecimiento de la mancha urbana.

Dentro del área de la modelación numérica, López-Espinoza et al. (2012) realizaron un estudio en donde analizan el impacto que tiene el crecimiento de la mancha

⁷En este punto comienza la eliminación de zonas forestales para la expansión de la traza urbana.

⁸Comienza la construcción del drenaje profundo, lo cual produjo la desecación del sistema de lagos.

⁹Cabe destacar que, dados los límites morfológicos de la Cuenca de México, la mancha urbana tiende a establecerse en otro tipo de asentamientos (generalmente edificios).

urbana sobre la temperatura superficial, así como la sensibilidad del modelo WRF a los cambios de uso de suelo. Con base en tres dominios anidados (20 km, 6.7 km y aproximadamente 1 km de resolución horizontal) en torno a la República Mexicana y, en específico, a la región central de México; obtuvieron diferencias significativas al analizar dos periodos de tiempo diferentes: 1993 y 2009. En dicho estudio se destaca un aumento de temperatura que oscila entre los 0.5 °C y los 5 °C en zonas que tuvieron transición de vegetación a urbanización. Con lo anterior, se concluye que dado el acelerado incremento de la mancha urbana, es preciso mejorar la caracterización de uso de suelo del modelo para la República Mexicana.

En relación a lo anterior, un aspecto muy importante en la Cuenca de México es el sistema de lagos que se ha ido modificando con el tiempo. Bajo el argumento de que una de las funciones del sistema lacustre es de regulador térmico, Ruiz-Angulo y López-Espinoza (2015) proponen un estudio comparativo respecto a las condiciones actuales de LULC y las condiciones del siglo XVI. Para dicho estudio se generaron dos simulaciones numéricas, una de ellas con las condiciones actuales y otra con las condiciones de LULC modificando únicamente el sistema de lagos. Posteriormente se compararon con datos observacionales de 8 estaciones meteorológicas pertenecientes a la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET). De acuerdo con el análisis, concluyen que los incrementos en temperatura superficial pueden llegar a ser de hasta 5.78 °C.

En un estudio más reciente, López-Bravo et al. (2018), proponen una configuración para el modelo WRF tal que mejore la descripción de los procesos de superficie para analizar los impactos del LULCC en la precipitación y temperatura del Área Metropolitana de la Ciudad de México. Acorde al estudio, existen errores sistemáticos que aumentan la incertidumbre del modelo; sin embargo, algunos patrones son bien representados en relación a las componentes orográficas. Por ello, una de las soluciones que proponen es implementar la asimilación de datos para mejorar las condiciones iniciales del modelado; bajo el argumento de que las mediciones en superficie y los radiosondeos son insuficientes para la descripción de algunos eventos; tales como la entrada de humedad desde el Golfo de México.

En relación a ello, con el fin de analizar el impacto en la temperatura y la precipitación asociado al cambio de cobertura en la superficie (particularmente vegetación y sistema de lagos), Benson-Lira et al. (2016) realizaron estudios numéricos empleando el modelo WRF, considerando cuatro dominios en torno a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) para los meses de abril a julio del año 2008. Mencionan que el incremento de la mancha urbana y el decremento de vegetación y del cuerpo lacustre, propician un aumento en la temperatura de aproximadamente 4 °C durante el día e influyen en el incremento de precipitación durante la noche, pues demuestran que la mancha urbana genera condiciones de inestabilidad atmosférica.

En términos de la variable precipitación, Behzadi et al. (2020) mencionan que el impacto del cambio de cobertura de suelo se ve reflejado en una tendencia al incremento en los últimos años (1950-2013), con una razón de 17.8 mm por década; en relación con las actividades antropogénicas, las proyecciones de modelos de circulación global para los próximos 30 años son inciertas, apuntando a incremento de precipitación. Por otra parte, el estudio realizado por Martínez et al. (2015), indica que dado el impacto de la zona urbana en relación al manejo del recurso hídrico, dentro de los próximos 30 años, la disponibilidad de agua se reducirá en un orden del 10-17%.

Así mismo, López-Espinoza et al. (2019) emplearon el modelo WRF y realizaron cuatro experimentos numéricos en los meses de enero y julio, donde simulaban las

condiciones de la época prehispánica y actuales; para cada una de las condiciones se realizó una simulación donde se acopla el módulo *WRF-Lake* y otra en donde no se emplea dicho módulo. De esa manera, hallaron que las condiciones actuales en el Valle de México se caracterizan por tener menores montos de precipitación acumulada, consecuencia de la ausencia del cuerpo lacustre que existía en la época prehispánica; situación contraria al párrafo anterior. Además, encontraron un aumento en la temperatura de hasta 4 °C para temperatura mínima y 3°C para temperatura máxima, comparando ambos escenarios.

Dado lo anterior, el año 1807 figura como uno de los años con significativa disponibilidad de datos sobre su distribución espacial (Angel et al., s.f.), de esa manera es posible realizar comparaciones de la información sobre la extensión de la mancha urbana en esa época con la extensión de la misma en la actualidad. Por ello, la presente tesis busca realizar un estudio comparativo de ambos años, siendo que no hay alguno que abunde en el tema. Así mismo, la carencia de datos observados en el año 1807 hace difícil su estudio, situación que podría ser complementada con los datos simulados en este trabajo.

1.4. Objetivo general

El tema del cambio de cobertura y uso de suelo es amplio, y con el tiempo ha tenido contribuciones de distintas índoles. Particularmente, en esta tesis se plantea como objetivo general:

Estimar mediante modelación numérica las condiciones meteorológicas del año 1807 en la Cuenca de México y determinar el impacto meteorológico producto de los cambios ocurridos en la cobertura y uso de suelo.

1.4.1. Objetivos específicos

Como objetivos específicos se plantean los siguientes:

- Estimar un escenario de cobertura y uso de suelo para el año 1807 considerando el sistema de lagos, la cubierta vegetal y la mancha urbana reportadas para la época.
- Realizar simulaciones numéricas considerando el escenario estimado de 1807 y la situación actual de LULC.
- Verificar la habilidad de la simulación numérica con condiciones de LULC actuales comparándola contra datos observacionales para las variables de temperatura, precipitación y magnitud de viento.
- Analizar y comparar los resultados de ambas simulaciones numéricas considerando las variables de temperatura, precipitación y magnitud de viento.

1.5. Organización de la tesis

Los capítulos restantes se encuentran organizados de la siguiente manera:

- En el Capítulo 2 se abordan algunas cuestiones teóricas sobre la modelación numérica, tales como su relación con el LULCC y en particular la estructura del modelo WRF, desde su funcionamiento, parametrizaciones, hasta las

herramientas de post-procesamiento. Así mismo, se abunda sobre las manifestaciones del cambio de cobertura y uso de suelo; las cuales no se derivan totalmente del mismo, pero sí tienen una contribución importante. Además, se mencionan los tres parámetros estadísticos empleados en el estudio.

- El Capítulo 3 es la metodología empleada en esta tesis, inicia con la descripción de las condiciones geográficas y climáticas de la zona de estudio. Posteriormente se enfatiza sobre las condiciones de LULC en el año 1807 y 2016; abundando en la descripción de cómo se realizó el escenario para el año 1807, desde la expansión urbana, la homologación de clases de cobertura vegetal al empleado por el WRF, hasta la profundidad y extensión del sistema lacustre. Dicho capítulo finaliza con la presentación de la configuración del modelo WRF y la descripción de los dos casos de estudio realizados en la tesis, así como una breve explicación de las redes de observación y su ubicación.
- En el Capítulo 4 se presentan los resultados, comenzando con el análisis del comportamiento de las variables meteorológicas derivado de la parametrización de cúmulos, y finalizando con el análisis atmosférico del impacto del cambio de LULC entre 1807 y 2016. El primer análisis se realiza considerando los estadísticos RMSE, BIAS y coeficiente de correlación de Pearson, mediante tablas y series temporales; el segundo se discute empleando mapas promedios y diferencias, tablas y series temporales.
- El quinto y último capítulo hace referencia a las conclusiones y recomendaciones. Para las conclusiones se analizan los dos casos por separado y de manera general.

Capítulo 2

Marco Contextual

2.1. Modelación numérica y su relación con LULCC

De acuerdo a Zhao y Wu (2018) una forma de entender el impacto del LULCC es mediante el análisis de diferentes balances, entre ellos los balances hídrico y neto radiativo, los cuales se asocian con procesos de intercambio de energía, materia y momento entre la superficie y la atmósfera. A continuación se presentan dos conceptualizaciones de dichos balances.

2.1.1. Balance neto radiativo

Parte de la dinámica entre la superficie y la atmósfera es determinada por los flujos de calor asociados al intercambio que ocurre entre ellas. A su vez, dichos flujos de calor están ligados con la dinámica de la radiación entrante y saliente. Por ello, una vía para estudiar cómo es que ocurre el intercambio de energía es considerar situaciones idealizadas de la interacción. En este caso, el balance de energía se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$G = R_n - H - LE \quad (2.1)$$

donde R_n representa la radiación neta (ingreso y salida del sistema); H es el flujo turbulento de calor sensible (generado por el contacto directo de ambas capas); LE es el flujo de calor latente (dado por los cambios de fase) y G representa el flujo de calor de la superficie (Xin y Liu, 2010).

La ecuación 2.1 es una manera funcional de ligar las radiaciones de onda corta y onda larga con los flujos de calor que se dan en la interacción entre la superficie y la atmósfera. Por su parte, la radiación neta puede representarse como:

$$R_n = R_s(1 - \alpha) + \epsilon_s \sigma T_s^4 + R_l \quad (2.2)$$

donde α es el albedo; ϵ es la emisividad; R_s representa la longitud de onda corta; R_l es la longitud de onda larga; T_s la temperatura superficial y σ la constante de Stefan-Boltzmann.

Por tanto, para el presente trabajo se considera el término R_n en la ecuación 2.1 como el término análogo en la ecuación 2.2, de esa manera la relación entre ambas ecuaciones deviene principalmente en su interacción con la temperatura. (Bateni y Entekhabi, 2012).

2.1.2. Balance hídrico

Ahora bien, bajo el mismo supuesto del apartado anterior (caso idealizado), se puede cuantificar la dinámica hídrica en un sistema recurriendo a la ecuación de conservación. Considerando una región, ya sea una superficie terrestre o cuerpo de agua, se puede deducir la ecuación de balance hídrico en cualquier periodo temporal (Eq. 2.3)

$$P + G_{in} - (Q + ET + G_{out}) = \Delta S \quad (2.3)$$

donde P se refiere a la precipitación (estado sólido o líquido); G (in, out) es el flujo líquido (subterráneo) entrante y saliente; ET es la evapotranspiración (referida al total de agua que sale del volumen de control a través de la evaporación relativa a los cuerpos superficiales y la relativa al sistema vascular de las plantas); Q es el flujo de corriente (saliente) y ΔS es el cambio en el almacenamiento en un periodo de tiempo determinado (Digman, 2002).

Una vía para el estudio de estos procesos es la modelación¹ numérica, la cual se basa en principios de conservación fundamentales que gobiernan el comportamiento físico de los procesos (en el caso de la atmósfera: conservación de masa, momento y energía) y mediante diversos métodos numéricos, se trata de dar solución a las ecuaciones inmersas en dichos principios (Szeto, 2002).

En muchas ocasiones es difícil o casi imposible realizar mediciones de algunos procesos atmosféricos, lo que lleva a generar conclusiones o teorías demasiado idealizadas. Bajo este panorama, la modelación numérica es una poderosa herramienta para representar procesos físicos que ocurren en algún sistema y de esa manera, realizar estudios considerando un enfoque experimental (Randall, 2017).

2.2. Modelo WRF

El modelo WRF es un sistema diseñado para aplicaciones de investigación de fenómenos atmosféricos y pronóstico operacional (NCARG, s.f.). De acuerdo a UCAR (2020) el modelo fue desarrollado desde finales de la década de 1990 por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), el *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), la *Air Force Weather Agency* (AFWA), entre otros. Cuenta con dos núcleos para realizar experimentos numéricos: *Advanced Research WRF* (ARW) y *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM); el sistema WRF es un modelo de predicción numérica meteorológica (NWP, por sus siglas en inglés) de última generación (NCARG, s.f.).

Actualmente es empleado por varias dependencias gubernamentales y no gubernamentales, en México dependencias como el Centro de Ciencias de la Atmósfera lo usan para realizar investigación y pronóstico meteorológico²; el Servicio Meteorológico Nacional también cuenta con datos de pronóstico del modelo WRF³; Meteored es otra de las dependencias que emplea dicho modelo para realizar pronóstico meteorológico⁴.

¹El concepto de modelación empleado en este apartado se refiere a todas aquellas herramientas que, mediante representaciones simplificadas de determinados fenómenos, tienen el fin de ayudar a comprender diversos sistemas complejos.

²Véase en: <http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia>.

³Más información en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/modelos-de-pronostico-numerico/modelos-de-pronostico-numerico>.

⁴Véase en: <https://www.meteored.mx/modelos/mx-mexico-wrf-83.htm>.

Considerando el núcleo ARW, dicho sistema de modelado contiene etapas esenciales para su funcionamiento: datos externos, sistema de preprocesamiento, sistema de procesamiento y herramientas de post procesamiento (Figura 2.1)⁵.

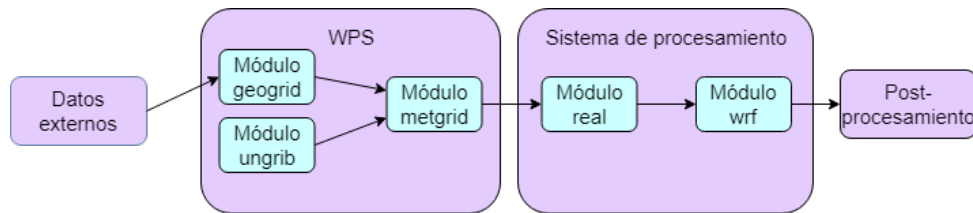


FIGURA 2.1: Diagrama de flujo de los principales procesos de una simulación numérica en el modelo WRF.

2.2.1. Datos externos

Hacen referencia a fuentes de información que se basan en dos tipos de datos: estáticos y dinámicos. Los datos estáticos representan información de la superficie terrestre, como características de LULC, topografía, orografía, tipos de suelo, etc. Dichas características son categorizadas dependiendo de la fuente y disponibilidad de los datos. En términos de los datos dinámicos, se tienen diversas fuentes alrededor del mundo que ponen a disposición datos cuya función en el modelo WRF es la de proporcionar las condiciones iniciales y de frontera (UCAR, s.f.[a]).

2.2.2. Sistema de preprocesamiento

A partir de la versión 2.2 del modelo WRF, se implementó un módulo de preprocesamiento para reemplazar la inicialización estándar que realiza el modelo. Conocido como *WRF Processing System* (WPS), el módulo proporciona algunas condiciones iniciales al modelo, antes de que se realicen las variaciones tridimensionales de los sistemas establecidos. Entre otras cosas, el módulo WPS se encarga del procesamiento estándar de datos en el dominio de estudio, incluyendo los datos estáticos. A su vez, WPS se divide en tres sub-módulos: Geogrid, Ungrib y Metgrid (Figura 2.1) (Deng et al., 2014).

Geogrid

El módulo Geogrid se encarga de definir y generar las características de la superficie, considerando los parámetros establecidos por el usuario, tales como resolución horizontal, categorías de LULC, tamaño y posición de el/los dominio/s, etc. Su función es generar una interpolación a partir de los parámetros ya mencionados, empleando como salida un archivo en formato NetCDF (generalmente) que contiene información del proceso realizado (Deng et al., 2014).

Cabe destacar que la información que proporciona el usuario de cada dominio se especifica en un archivo llamado `namelist.wps`, el cual es empleado por Geogrid para realizar la interpolación ya mencionada (UCAR, s.f.[a]).

⁵Las etapas explicadas se basan en una inicialización para casos reales.

Ungrib

El sistema Ungrib tiene como función principal procesar los datos de entrada en formato GRIB (versión 1 o 2), los cuales contienen información de variaciones de campos meteorológicos en el tiempo, provenientes generalmente de otros modelos regionales o globales. Al leer los archivos GRIB, se genera un archivo en formato intermedio mediante el uso de códigos específicos (Vtable) que extraen los campos de las variables de interés (UCAR, s.f.[a]).

Metgrid

Este módulo es la parte final del sistema de preprocesamiento (WPS); en él se generan archivos en formato NetCDF (generalmente) que contienen una interpolación horizontal de los datos obtenidos por los módulos Ungrib y Geogrid. A su vez, las salidas NetCDF del módulo Metgrid son empleadas por el modelo como condiciones iniciales y de frontera (Deng et al., 2014).

2.2.3. Sistema de procesamiento

Existen dos vías para generar las simulaciones del sistema de procesamiento (WRF), una es una inicialización idealizada y la segunda es la inicialización real. La primera genera sus condiciones iniciales con datos de sondeos en comparación de la inicialización para casos reales, que lo hace por medio de datos provenientes de otros modelos. Dado lo anterior, el sistema para casos reales, cuenta con 4 módulos: real.exe (genera la inicialización del modelo), wrf.exe (programa de integración numérica), ndown.exe (para anidamientos de una vía), tc.exe (esquema “Bogussing” para tormentas tropicales). La parte del sistema de procesamiento tiene como finalidad realizar la integración numérica del proceso (UCAR, s.f.[a]).

2.2.4. Herramientas de post-procesamiento

A manera generalizada, las herramientas de post-procesamiento se basan en softwares capaces de representar visualmente las salidas obtenidas de todo el proceso del modelo WRF. Algunos ejemplos son: NCL, VAPOR, GrADS, Matlab, etc. (UCAR, 2017)

2.2.5. Parametrizaciones

Para generar simulaciones numéricas que se apeguen más a la realidad, es necesario considerar algunos factores físicos. Dichos factores están relacionados con procesos que ocurren a diferentes escalas, tales como la radiación, la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés), convección, microfísica y perturbaciones. Cada uno de esos componentes cuentan con algunos esquemas que resuelven los procesos considerando diferentes soluciones. Cabe destacar que el uso de las parametrizaciones depende de la zona de estudio, así como del proceso y la resolución que se vaya a emplear; ya que algunas parametrizaciones suelen no resolverse de una manera adecuada cuando se trabaja con resoluciones finas, uno de esos casos es la parametrización de cúmulos (Chen y Dudhia, 2000).

2.3. Fenómenos asociados al LULCC

2.3.1. Isla de calor urbana

Por definición, el término isla de calor urbana es empleado para referirse a un microclima que resulta en promedio más cálido que las áreas que se encuentran a su alrededor (ver Figura 2.2). Esto quiere decir que las temperaturas de una región urbanizada serán mayores que las de una región rural (Downing, 2009).

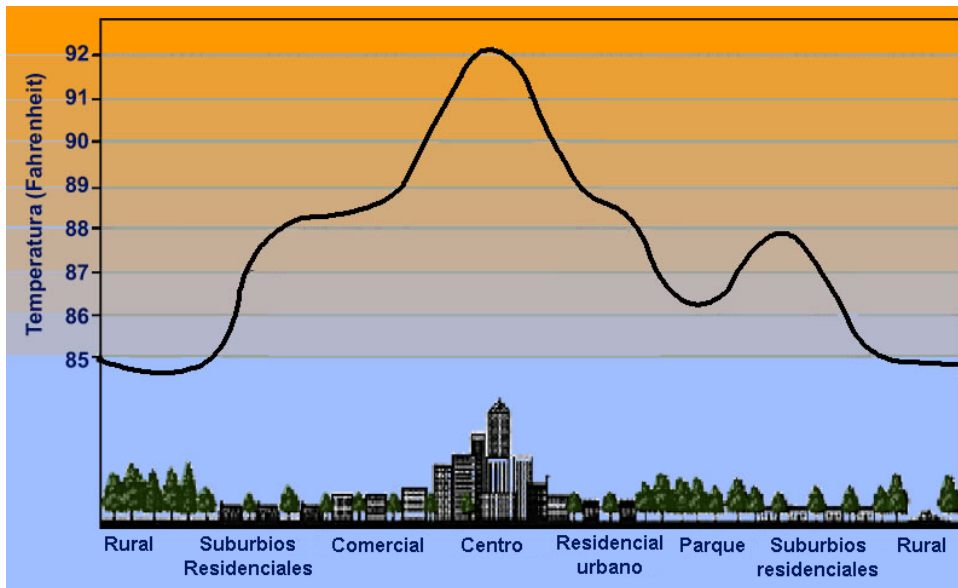


FIGURA 2.2: Representación gráfica del fenómeno de isla de calor urbana.

[Tomado de Barradas (2019)]

Entonces, ya expuesta la definición, las causas y consecuencias son de igual importancia. En principio, una de las contribuciones se da cuando el cambio de cobertura y uso de suelo es hacia la generación de zonas urbanas (en un sentido estructural), se generan modificaciones en la capacidad de absorción y conducción del calor por parte de la superficie⁶. Es decir, las superficies de las construcciones en una ciudad, en general, absorben el calor y lo retienen durante el día, pero durante la noche lo liberan de manera rápida respecto a las superficies naturales (*e.g.* zonas con vegetación). De esta manera, las consecuencias se ven reflejadas en las diferencias de algunas variables meteorológicas respecto a su entorno, un ejemplo inmediato se refleja en las temperaturas (Downing, 2009).

2.3.2. Rugosidad en superficie

El término alude a la interferencia de los elementos superficiales sobre el viento; cuya longitud puede definirse como la altura sobre la superficie a la cual la componente horizontal del viento es muy cercana a cero⁷. Su importancia se centra en el estudio del transporte turbulento de calor, humedad y momento en la capa límite

⁶Ver Ecuación 2.2.

⁷Una definición más escueta es usada por Downing (2009), quien la propone como aquellos objetos que dificultan el paso libre del viento en superficie.

superficial⁸, pues tiene implicaciones en el perfil de viento (Nicholas y Lewis, 1980). En el presente estudio se alude al parámetro de rugosidad dinámica, el cual es tomado por el modelo en términos de la geometría de la superficie (e.g. edificios en zonas urbanas), cuyos efectos se ven reflejados en generación de turbulencias, resistencia mecánica, entre otros (Cao y Lin, 2014).

2.3.3. Ciclo hidrológico

Un aspecto esencial del ciclo hidrológico es que se trata de un proceso que interactúa con varios sistemas, donde intervienen los procesos de precipitación, evapotranspiración, infiltración, escorrentía y almacenamiento (Galicia, 2014).

En cuanto a su relación con el LULCC, los impactos pueden reflejarse en lapsos cortos, con aumentos o decrementos del flujo de agua, o largos, cuando se reduce la vegetación y hay decremento en la evapotranspiración, lo cual puede generar un mecanismo de *feedback* que reduce la precipitación (Li et al., 2007).

En el caso de la Cuenca de México, las actividades humanas han alterado el equilibrio del ciclo hidrológico natural, en específico la extracción del recurso hídrico deriva a cambios del volumen de almacenamiento, pues disminuye debido a la sobreexplotación. Se enfatiza la situación anterior con el fin de agregar una de las repercusiones, además de las implicaciones en el propio balance, caracterizada por la subsidencia dada la compactación del suelo arcilloso que es reportada a 50 cm/año (Birkle et al., 1998).

2.4. Parámetros estadísticos

Para efectos de la comparación de datos modelados con datos observados, se definen los siguientes parámetros estadísticos:

2.4.1. Coeficiente de correlación de Pearson

Nos habla del grado de relación lineal entre dos series de datos, los valores oscilan entre -1 y 1; mientras el valor sea más cercano a 1 se dice que existe una correlación lineal positiva; si es cercano a -1 se tiene una correlación lineal negativa, valores próximos a 0 tienen nula correlación (Zar, 2010). Se obtiene con la siguiente expresión:

$$\left[\frac{1}{(N-1)} \right] \frac{\sum_{i=1}^N (\text{mod}_i - \text{mod}_{\text{avg}})(\text{obs}_i - \text{obs}_{\text{avg}})}{\text{std}_{\text{mod}} \text{std}_{\text{obs}}} \quad (2.4)$$

donde mod_{avg} representa el promedio del modelo, obs_{avg} representa los datos observados promedio, std_{mod} y std_{obs} son la desviación estándar del modelo y las observaciones, respectivamente. Por tanto, esta métrica nos habla de la relación entre los datos, mas no del sesgo que hay entre ellos.

2.4.2. Raíz del error cuadrático medio

La raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) se define como la diferencia entre dos conjuntos de datos; es decir, es un indicador de la cercanía

⁸Definida como una capa próxima a la superficie donde la turbulencia mecánica es mayor que la flotabilidad (American Meteorological Glossary, 2012).

de los mismos (en promedio) (ESRI, 2016). Dado que mide la magnitud el error total del modelo, nos habla del ajuste de los datos del modelo respecto a los datos observados (Willmott y Matsuura, 2005). Puede representarse con la siguiente expresión:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (mod_i - obs_i)^2} \quad (2.5)$$

2.4.3. Bias o sesgo

El bias nos da indicios de la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar los valores, si es igual a cero no siempre significa que no hubo sesgo, pues al ser resultado del promedio de valores positivos y/o negativos, es muy posible la ocurrencia de dicho valor (Jorba Casellas, s.f.).

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (mod_i - obs_i) \quad (2.6)$$

Para las ecuaciones 2.4 a 2.6, N es el número total de datos, mod_i y obs_i representan el i -ésimo dato del modelo o de la observación.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Descripción del área de estudio

La Cuenca de México, de índole endorreica¹, conforma la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano (National Research Council, 1995) y se encuentra rodeada por diferentes sierras (Fig. 3.1).

Sus características geográficas influyen en gran medida la termodinámica en la atmósfera y el campo de vientos (Kozich, 2010); aunado a que en comparación al resto de la República Mexicana, la tasa de crecimiento poblacional ha sido mayor (Ezcurra, 1992). Por lo que se posiciona como un área de estudio elemental para entender la dinámica de los procesos en relación a los cambios que ha tenido a lo largo de los años.

Imaz (1989) realiza una descripción sobre dicha Cuenca, menciona que en total tiene una extensión aproximada a los 9600 km² y pone a juicio la conceptualización que se tiene de la zona como Valle de México, pues a pesar que a lo largo del tiempo se han generado salidas artificiales, “sigue siendo una cuenca, a la que todos conocemos como valle”.

A continuación se enuncia parte del trabajo realizado por la CONAGUA (2010): “Antiguamente, la Cuenca de México contaba con un sistema de lagos que en total se aproximaban a más de 2000 km² de superficie. Con el transcurso de los años y con las diferentes obras hidráulicas con el fin de evitar inundaciones, el sistema abarcaba menos de 20 km² en el año 2010.”

¹Se define a una cuenca endorreica como aquella que no tenía salidas hacia el mar (Dirección General de Divulgación de la Ciencia, s.f.).

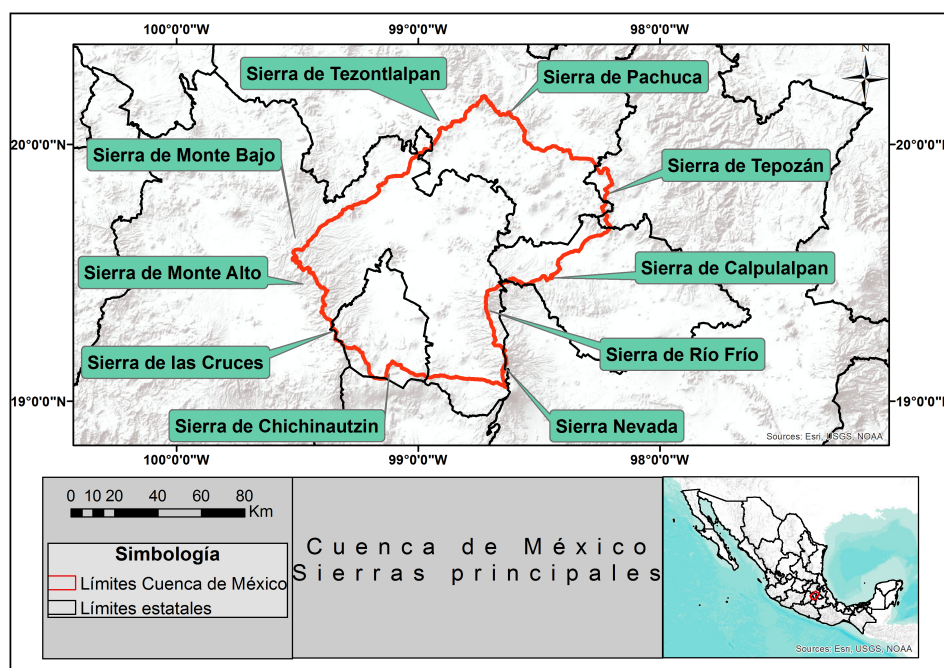


FIGURA 3.1: Mapa de las sierras principales que rodean la Cuenca de México.

Según Jáuregui (2000), el clima de la Cuenca se puede generalizar como tropical considerando su ubicación en la República Mexicana. Es posible diferenciar dos épocas en torno a la dirección del viento: de mayo a octubre dominan los vientos alisios húmedos (noroeste) y de noviembre a abril dominan los vientos secos del oeste.

Las temperaturas medias anuales son de 1°C a 2°C menores en el sur que en el centro de la Cuenca de México; oscilan entre los 15°C y 16°C en la planicie y en las faldas de las sierras; y entre 12°C y 14°C en las sierras.

Las lluvias en la Cuenca de México comprenden el periodo de mayo a octubre, siendo más frecuentes en la región este y suroeste que en la zona norte (Jáuregui, 2000).

Grosso modo, el clima de la zona centro y sur es templado; en la zona norte y este es seco y en la zona centro-este es semiárido (Fig. 3.2).

Cobertura vegetal

En primera instancia, se empleó la vegetación potencial³ realizada por Rzedowski (1990b) (Apéndice A). Para trabajar con ella dentro de las simulaciones numéricas se realizó una homologación con las clases del *United States Geological Survey* (USGS) empleadas en el modelo WRF como datos estáticos (Tabla 3.1).

Una modificación importante que se realizó en este proceso de homologación fue un cambio de la clase “vegetación acuática y subacuática” a “cultivos y parcelas de bosque”, pues revisando en la literatura se encontró que, cuando comenzó el proceso de colonización, una de las actividades desarrolladas por los españoles fue la tala de árboles en torno al sistema de lagos, con el fin de la extracción de madera y la generación de campos para el ganado (Ezcurra, 1992). En este punto podría pensarse que la tala de árboles no justificaría la presencia de parcelas de bosque, como indica la clasificación; sin embargo, la mayoría de las haciendas y ranchos permanecieron hasta el incremento de la mancha urbana en el periodo del porfiriato (Chomel y Hernández, 1988).

Categoría de uso de suelo	Uso de suelo (USGS)	Uso de suelo (Rzedowski,1990)
1	Urbanización	Urbanización
6	Cultivos/parcelas de bosque	Cultivos
7	Pastizal	Pastizal
8	Matorral	Matorral Xerófilo
11	Bosque latifoliado caducifolio	Bosque tropical caducifolio y subcaducifolio
15	Bosque mixto	Bosque de coníferas y encinos
16	Cuerpos de agua	Cuerpos de agua/vegetación acuática y subacuática

TABLA 3.1: Homologación de las clases del mapa de vegetación potencial a las empleadas por el LULC USGS del modelo WRF.

Se incluyen sólo las clases que se encontraron dentro del área de estudio.

El sistema de lagos de la Cuenca de México

Existen algunas propuestas que hacen referencia a la profundidad y extensión del sistema de lagos en la época que abarca los primeros años del siglo XIX. Entre ellas, se rescatan las de Alexander Von Humboldt, quien realizó diversos viajes de exploración, los cuales lo llevaron al continente americano donde, entre otros estudios, generó mapas con temáticas relativas a la República Mexicana.

En términos de la morfología del sistema de lagos, la propuesta de Von Humboldt es certera en cuanto al decremento de la extensión, pero en estructura difiere comparando con años previos. Es decir, comparando, por ejemplo, con el sistema de lagos del siglo XVI (Apéndice D), se observa una rotación marcada en la zona de Xochimilco y Chalco (esquina superior izquierda del mapa en el Apéndice B).

Por su parte, Martínez (1961) detalla la situación de la Ciudad de México a principios del siglo XIX, haciendo énfasis en los aspectos sociales de aquella época. En lo que respecta al sistema de lagos, cita a varios autores que abundan en tal y anexa un mapa del sistema de lagos a principios del siglo XIX (Apéndice C).

En términos de la profundidad del sistema de los lagos, Von Humboldt propone una profundidad de 3 a 5 metros, incluyendo menores a un metro en algunos sitios (Von Humboldt y Arnao, 1827). Sin embargo, dicha afirmación es contrariada

³La vegetación potencial está definida como aquella persistente en largos periodos de tiempo considerando ausencia de perturbaciones humanas (Chiarucci et al., 2010).

por Manuel Orozco y Berra, pues Humboldt propone que los habitantes de “Tetz-coco ó Tescuco” (ahora Texcoco), tenían grandes dificultades para transportarse en los meses de febrero y enero, pues la ausencia de “aguas” impedía el paso de las canoas. Ya que las canoas que se empleaban como medio de transporte, por su material y tamaño, solamente calaban alrededor de cuatro decímetros, si se considera la profundidad propuesta por Von Humboldt, aún quedarían alrededor de tres metros libres para el paso de las canoas. Por tanto, en su estudio, Manuel Orozco y Berra propone una profundidad de 0.495m a 0.925m (Orozco, 1864).

La elección del mapa representativo del sistema de lagos fue en referencia a lo propuesto por Manuel Orozco y Berra, generalizando una profundidad de 1m en toda la extensión y la morfología propuesta en el libro de Martínez (1961).

Expansión urbana

Puntualizando en la expansión urbana, existen años o épocas clave en que se ha hecho evidente el aumento poblacional; justamente uno de esos años es el de 1807 (Fig. 1.1), cercano a la época de independencia. Considerando los datos disponibles de expansión urbana, para esta clase se hizo uso de la disponible para el año 1807 en Angel et al. (s.f.).

De esa manera la propuesta de LULC de la región de estudio para el año 1807 se realiza como la mostrada en la Figura 3.3.

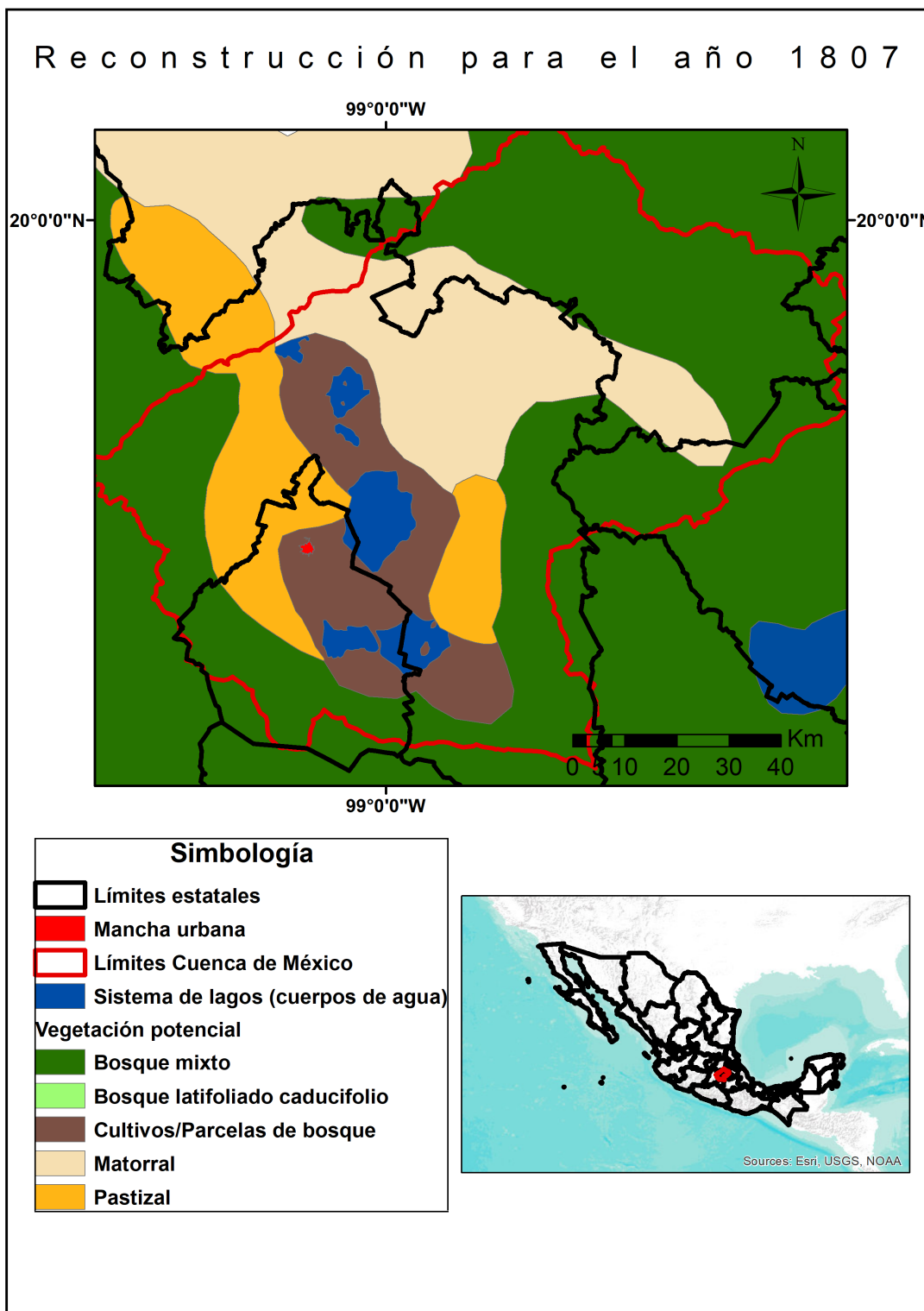


FIGURA 3.3: Estimación de las condiciones de LULC para el año 1807.

3.2.2. Año 2016

Para las simulaciones numéricas que consideran las condiciones actuales de LULC, se optó por emplear los datos estáticos que el modelo WRF tiene disponibles. De

esta manera los datos de cobertura vegetal, cuerpos de agua y mancha urbana provienen del mapa USGS. Dichos datos, y en general el mapa global, fueron obtenidos a partir de imágenes de satélite AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), tomadas entre abril de 1992 y marzo de 1993 (Fig. 3.4) (USGS, s.f.)

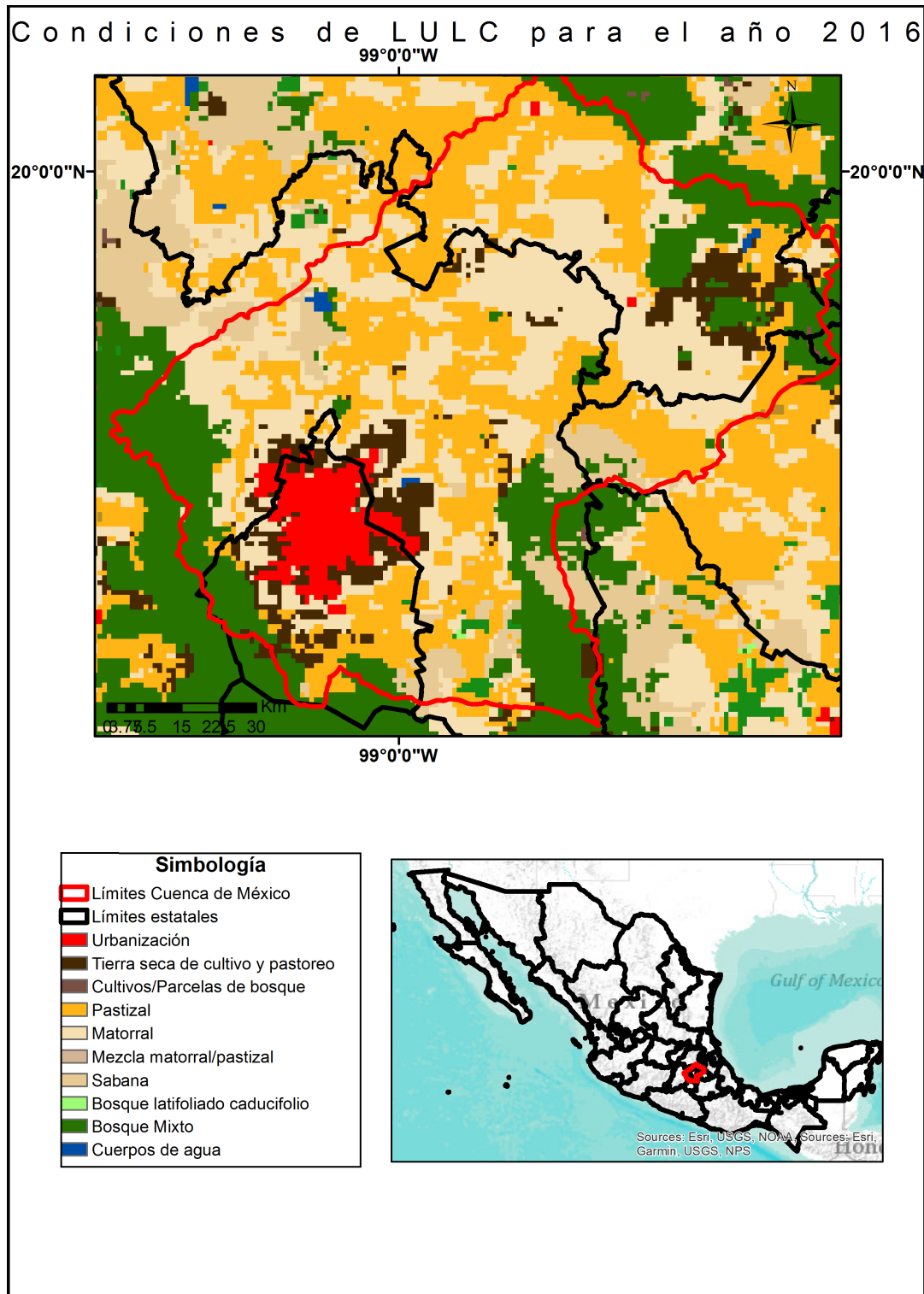


FIGURA 3.4: Condiciones de LULC para el año 2016.

3.3. Configuración del modelo WRF

Primero, se compiló el modelo WRF (versión 3.8.1) en el clúster Ometéotl del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, empleando para ello el compilador comercial PGI en paralelo.

Las simulaciones se realizaron considerando 3 dominios en torno a la zona sur y centro de la Cuenca de México, de 15 km (dominio 1), 5 km (dominio 2) y 1 km (dominio 3) de resolución horizontal (ver Figura 3.5). El periodo temporal simulado corresponde a una semana de la época de lluvias del 11-06-2016 a las 00UTC al 19-06-2016 a las 00UTC; dejando un *spin-up*⁴ de 24 h. Para la elección del periodo temporal, se estudió una serie de datos observados, a la cual se aplicó un algoritmo desarrollado para resaltar los periodos con mayor densidad de datos medidos.

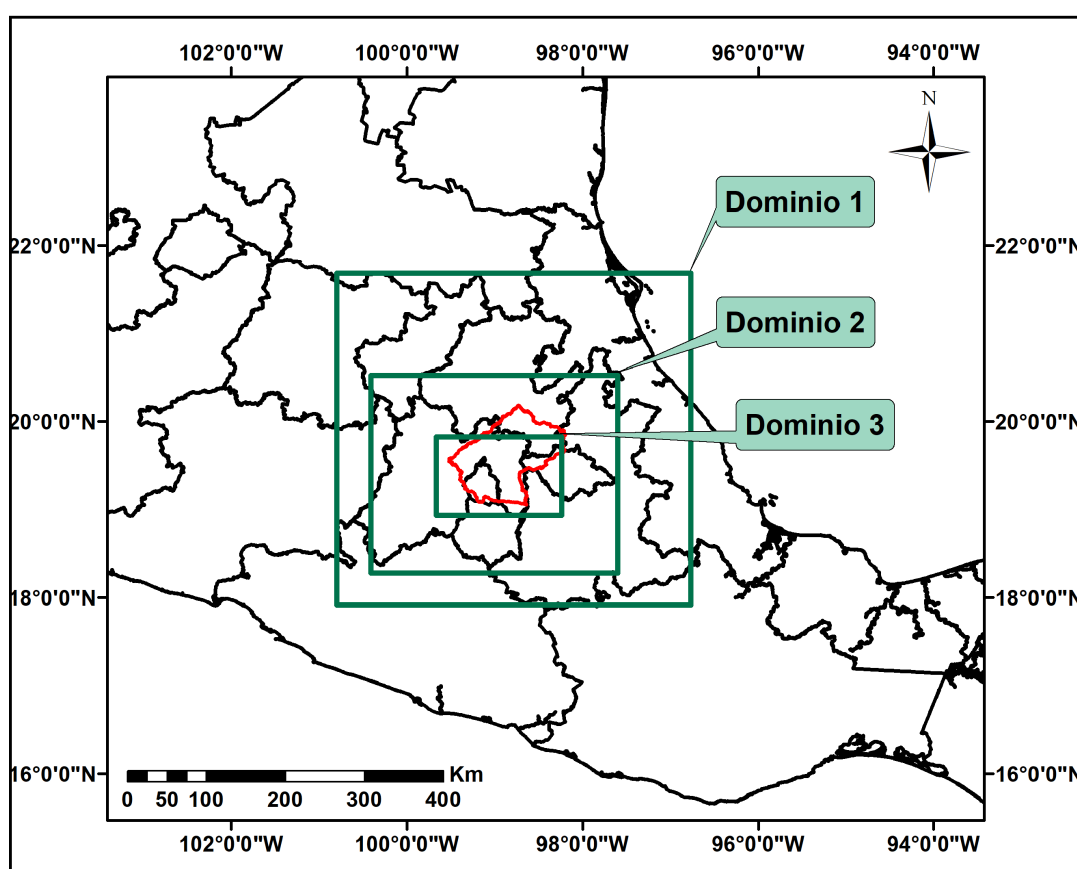


FIGURA 3.5: Configuración de los tres dominios empleados en las simulaciones numéricas.

Los esquemas de las parametrizaciones físicas se consideraron siguiendo lo empleado por el grupo IOA (Tabla 3.2); salvo modificaciones en las parametrizaciones de cúmulos y microfísica, las cuales se expondrán posteriormente (sección 3.3.1).

Considerando la importancia de la interacción lago-atmósfera, en la simulación numérica con la presencia del sistema de lagos del año 1807 se empleó el esquema *Community Land Model* (CLM) versión 4.5; el cual es un esquema unidimensional de balance de energía y agua. La temperatura superficial del lago se estimó a partir

⁴Se trata de un periodo de estabilización en el modelo.

del campo de temperatura superficial promedio diario empleando el procedimiento propio del modelo WRF `avg_tsfc.exe`. La profundidad del sistema de lagos fue configurada a 1 metro en todo el cuerpo de agua.

En referencia a los datos dinámicos, se consideró la versión 2 del modelo *Climate Forecast System* (CFS) cada 6 horas, con resolución espacial de 0.25° .

Configuración general utilizada en el modelo WRF	
Versión y núcleo del modelo WRF	3.8.1, ARW
Niveles verticales	60
Paso de tiempo	60 segundos
Periodo de simulación	11-06-2016 00UTC al 19-06-2016 00UTC
<i>spin-up</i>	24 horas
Condiciones iniciales y de frontera	CFSv2 cada 6 horas (0.25°)
Proyección	Mercator
Resolución horizontal dominio 1	15 km
Resolución horizontal dominio 2	5 km
Resolución horizontal dominio 3	1 km
<i>Parametrizaciones físicas</i>	
Cúmulos	Betts-Miller-Janjic (BMJ)
Microfísica	Millbrant-Yau <i>Double Moment Scheme</i>
Radiación de onda larga	RRTM (<i>Rapid Radiative Transfer Model</i>)
Radiación de onda corta	Dudhia
Capa límite planetaria	Yonsei University (YSU)
Superficie terrestre	NOAH (4 capas de suelo)
Capa superficial	MM5
Física de la superficie lacustre *uselakedepth =1 m	CLM4.5

TABLA 3.2: Configuración general empleada en las simulaciones numéricas con el modelo WRF.

3.3.1. Casos de estudio y configuración final del modelo

Considerando la resolución del dominio 3, Chen y Dudhia (2000) mencionan que algunos esquemas podrían no trabajar adecuadamente en resoluciones de 1-10 km. Establecen que para resoluciones menores a 3 km probablemente no es necesario el uso de la parametrización de cúmulos, pero hay casos en que ayuda para el desarrollo de la convección; por ello se realizaron dos simulaciones para analizar el comportamiento del modelo bajo dicha situación en la Cuenca de México.

De lo anterior, surgen dos casos de estudio:

- Caso 1: simulación numérica en donde se mantiene activado el esquema de cúmulos para todos los dominios.

- Caso 2: simulación numérica en la que no se considera el esquema de cúmulos para el dominio 3 (resolución de 1 km).

Ambos casos se generaron considerando toda la configuración expuesta en la Tabla 3.2, exceptuando el esquema de cúmulos y utilizando las condiciones de LULC actuales.

Estas simulaciones se realizaron con el objetivo de determinar una mejor configuración para la Cuenca de México. Posteriormente, considerando los resultados de evaluación del caso 1 y 2, se realizó una tercera simulación la cual consistió en:

- Caso 3: simulación numérica considerando el mejor resultado del caso 1 ó 2, pero con LULC reconstruido para 1807.

3.4. Datos observacionales

Para generar comparaciones de las simulaciones numéricas con mediciones reales para los casos 1 y 2, se emplearon tres conjuntos de datos pertenecientes a diferentes redes meteorológicas (Figura 3.6 y Tabla 3.3).

Una de ellas involucra a las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), las cuales hacen referencia a un conjunto de sensores que registran información de algunas variables meteorológicas de manera automática⁵, en promedios cada diez minutos, contemplando un área representativa de 5 km de radio en terreno plano (Servicio Meteorológico Nacional, s.f.).

Otra fuente de datos empleada para las comparaciones y disponible para la variable de precipitación, es la proporcionada por los pluviómetros del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), los cuales consideran un sistema automático electrónico que mediante la transmisión de pulsos vía interruptores envían la información colectada (Secretaría de Economía, 2013).

Por último, la base de datos de la Red de Meteorología y Radiación Solar (RED-MET), que pertenece al Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), fue empleada para obtener información de temperatura y viento, la cual se genera de manera horaria (Sistema de Monitoreo Atmosférico, s.f.).

⁵Los datos empleados para el estudio son de precipitación, viento y temperatura.

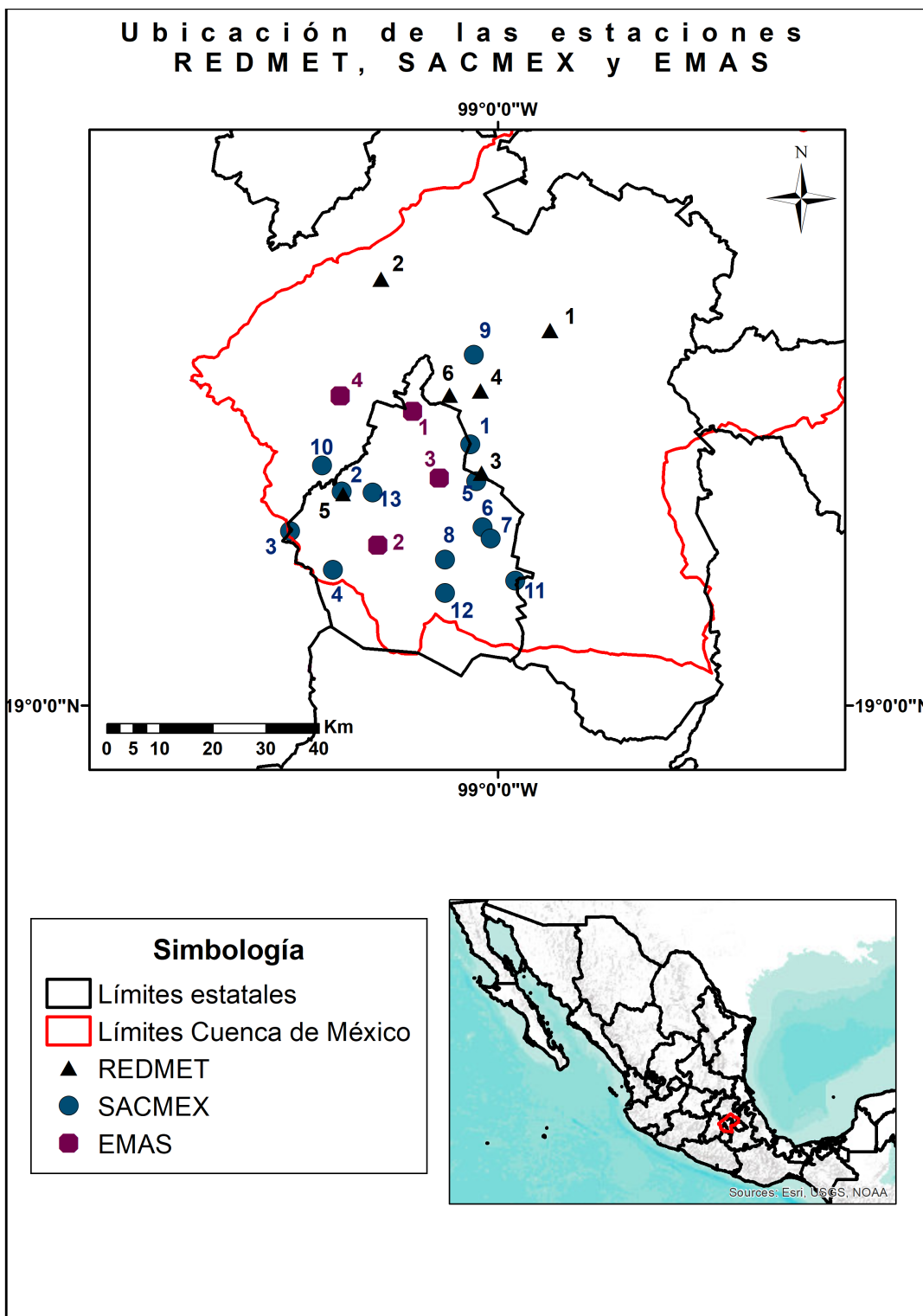


FIGURA 3.6: Ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas en el análisis.

Estaciones SACMEX	
1	Lago Churubusco
2	Santa Fe
3	El Zarco
4	Monte Alegre
5	Unidad Ejército Oriente
6	Santa Catarina
7	Tláhuac
8	Planta Nativitas
9	Chiconahutla-I
10	Caída del borracho
11	Tetelco
12	San Salvador Cuautenco
13	Tarango
Estaciones REDMET	
1	Acolman
2	Cuautitlán
3	Nezahualcóyotl
4	San Agustín
5	Santa Fe
6	Tlalnepantla
Estaciones EMAS	
1	Escuela Nacional de Ciencias Biológicas II
2	Ecoguardas
3	Tezontle
4	Presa Madín

TABLA 3.3: Nombre de las estaciones meteorológicas referentes a la Figura 3.6.

Capítulo 4

Resultados

Con base en Ezcurra et al. (1999), a partir de las transformaciones dadas por el proceso de metropolización en la Cuenca de México, conceptualizado en términos de la urbanización, es posible identificar el impacto en los patrones y valores de las variables atmosféricas. Por ejemplo, se pueden presentar cambios en la temperatura, también asociados con la isla de calor urbana, así también como en la magnitud y dirección de viento y en la intensidad de precipitación. Por ello, los resultados expuestos en este capítulo involucran el análisis de cómo los cambios de cobertura y uso de suelo en la Cuenca de México han impactado en las diferentes variables meteorológicas.

Los resultados se presentan de la siguiente manera:

1. Análisis relacionado al comportamiento de variables meteorológicas derivado de la parametrización de cúmulos.
2. Análisis del impacto del cambio de LULC entre 1807 y 2016 en las principales variables meteorológicas.

4.1. Parametrización de cúmulos

Para este análisis, recordamos lo propuesto por Chen y Dudhia (2000), donde mencionan que algunas parametrizaciones no trabajan adecuadamente en las resoluciones de 1 a 3 km. Particularmente, Dudhia (s.f.) menciona que a pesar de que el esquema de cúmulos podría no resolver adecuadamente los procesos, en ciertas ocasiones resulta de ayuda para el desarrollo de la convección.

Considerando lo anterior se plantean dos casos de estudio:

- Caso 1: parametrizar un esquema de cúmulos en el dominio 3 con resolución fina (1 km).
- Caso 2: desactivar la parametrización de cúmulos en el dominio 3 con el objetivo de que el modelo la resuelva explícitamente.

Para ambos casos de estudio se empleó la configuración mencionada en la Tabla 3.2, a reserva de lo ya mencionado.

Para el análisis de los 2 casos se consideró el periodo del 12 al 19 de junio del año 2016 (época de lluvias) y las estaciones meteorológicas mencionadas en el apartado 3.4. Además, se calcularon tres estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson,

Root Mean Square Error (RMSE) y BIAS. Las tablas 4.1-4.6 presentan las comparaciones entre dichos estadísticos calculados empleando las diferentes redes. Cabe destacar que los valores en negritas presentes en las tablas de esta sección indican los resultados más favorables en cada caso.

Estaciones Meteorológicas Automáticas - EMAS

Para las variables de temperatura y magnitud del viento se obtuvieron valores positivos del coeficiente de correlación de Pearson para ambos casos (ver tablas 4.2 y 4.1). Cabe mencionar que los resultados fueron ligeramente más próximos a 1 en el caso del estudio 1, donde se mantiene activada la parametrización.

Dado lo anterior, se analiza la proximidad de los datos empleando el estadístico RMSE. En todas las estaciones, considerando la temperatura y la magnitud de viento (tablas 4.2 y 4.1), el valor de RMSE resulta ser menor para el caso donde el esquema BMJ es parametrizado. Sin embargo, se observa que los valores no distan de los obtenidos para el caso 2, donde no se hace uso de la parametrización y se deja que el modelo resuelva explícitamente; lo cual implica que ambas simulaciones se acercan mucho a los datos observados, pero el caso 1 muestra mejores resultados. En términos del estadístico BIAS, ambos casos tienden a sobrestimar las mediciones de la magnitud del viento, con valores más altos para el caso 1. Para la temperatura se tienen subestimaciones de hasta 3.51 °C (Escuela Nacional de Ciencias Biológicas II, para el caso 2).

Con lo que respecta a la precipitación, se observa que es la variable que obtiene un mayor error. Considerando el coeficiente de correlación de Pearson, se observa un valor de correlación positiva mayor en los datos de precipitación diaria en 2 de 3 estaciones EMAS analizadas para el caso 2, resultando en un mejor comportamiento cuando la parametrización de cúmulos se mantiene desactivada. Además en el RMSE se obtienen valores más bajos para el caso 2 en precipitación diaria. Para el estadístico BIAS, se tienen sobrestimaciones en casi todas las estaciones.

En cuanto a la precipitación horaria se obtuvieron mejores valores del coeficiente de correlación de Pearson para el caso 2; sin embargo, los valores son muy cercanos a cero en ambos casos. En general, se tienen valores menores en el estadístico RMSE para el caso 2, los cuales no difieren de más de 0.65 mm/h del caso 1. Para el caso del BIAS se tiene un comportamiento análogo a la precipitación diaria; a reserva de que en los valores aportados por el estadístico en la precipitación horaria no llegan a rebasar 1 mm/h. En ese sentido, hay que considerar que en algunos casos la precipitación es pronosticada tiempo antes o después de que el evento ocurre; como ejemplo se puede observar la Figura 4.1, donde existen desfases de una a tres horas entre el pronóstico y lo observado.

Estos estadísticos nos dan una aproximación sobre el comportamiento de emplear o no la parametrización de cúmulos (BMJ) en un mallado fino de 1 km. En específico, los resultados obtenidos al emplear la parametrización de cúmulos en el dominio con resolución de 1 km favorecen a las variables de magnitud de viento y temperatura, respecto a la simulación en donde no se consideró la parametrización, pues se obtuvo mejor correlación y menor error. En términos del bias, se sobrestimaron los valores de magnitud de viento y se subestimaron los de temperatura. Los valores para precipitación diaria y horaria resultaron en mejores pronósticos por parte del caso 2, donde se desactiva la parametrización de cúmulos.

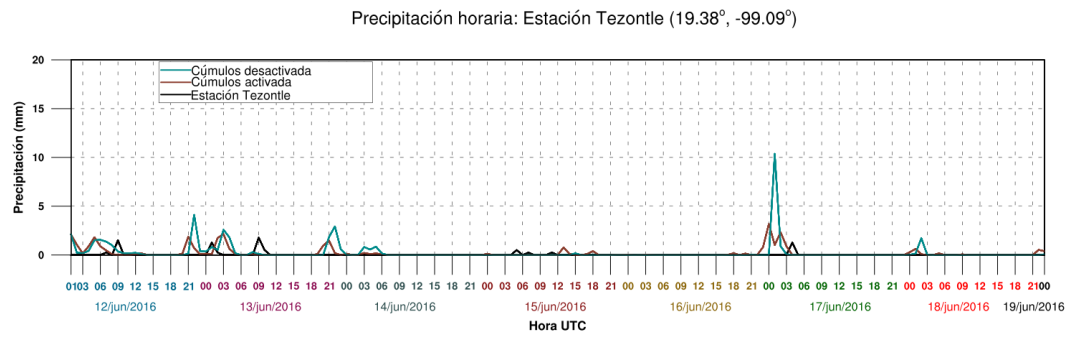


FIGURA 4.1: Serie de tiempo de precipitación horaria de la estación Tezontle. La línea azul representa los resultados donde se mantiene desactivada la parametrización cúmulos para el dominio de mayor resolución; la línea café representa el caso 1, donde se mantiene activada la parametrización y la línea negra representa los datos observados.

Caso 1 (con parametrización)		Ecoguardas	ENCBII	Tezontle	Presa Madín
Precipitación diaria [mm/día]	RMSE	*	14.60	4.34	17.27
	BIAS	*	10.72	3.45	10.72
	C. PEARSON	*	0.20	0.67	0.03
Precipitación horaria [mm/h]	RMSE	*	1.61	0.57	1.76
	BIAS	*	0.45	0.14	0.45
	C. PEARSON	*	0.00	-0.04	0.00
Temperatura horaria [°C]	RMSE	2.60	3.69	1.52	2.13
	BIAS	-1.85	-3.35	-0.83	-1.40
	C. PEARSON	0.91	0.91	0.92	0.92
Magnitud de viento horario [km/h]	RMSE	5.75	9.28	8.64	6.43
	BIAS	2.95	6.51	6.75	3.19
	C. PEARSON	0.67	0.35	0.71	0.47

TABLA 4.1: Estadísticos referentes a las estaciones EMAS para el caso de estudio 1, donde se emplea la parametrización de cúmulos BMJ.

* Estaciones que fueron eliminadas del análisis por inconsistencia en datos observacionales; series de tiempo mostradas en Anexo E.

Caso 2 (sin parametrización)		Ecoguardas	ENCBI	Tezontle	Presa Madín
Precipitación diaria [mm/día]	RMSE	*	9.85	7.27	10.01
	BIAS	*	6.86	5.50	6.22
	C. PEARSON	*	0.39	0.67	0.30
Precipitación horaria [mm/h]	RMSE	*	0.96	1.06	1.32
	BIAS	*	0.29	0.23	0.26
	C. PEARSON	*	0.02	0.00	0.11
Temperatura horaria [°C]	RMSE	2.80	3.81	1.72	2.22
	BIAS	-1.96	-3.51	-1.02	-1.43
	C. PEARSON	0.88	0.92	0.90	0.91
Magnitud de viento horario [km/h]	RMSE	6.36	9.80	8.88	6.62
	BIAS	2.90	6.15	6.53	3.21
	C. PEARSON	0.62	0.18	0.63	0.37

TABLA 4.2: Estadísticos referentes a las estaciones EMAS para el caso de estudio 2, donde el modelo resuelve explícitamente.

* Estaciones que fueron eliminadas del análisis por inconsistencia en datos observacionales; series de tiempo mostradas en Anexo E.

Red de Meteorología y Radiación Solar - REDMET

Para las estaciones de la REDMET, se obtuvieron valores positivos del coeficiente de correlación de Pearson en las seis estaciones para ambos casos en el pronóstico de temperatura horaria, siendo ligeramente más cercanos a 1 en el caso 1, donde se emplea la parametrización de cúmulos (Tabla 4.3). Por su parte, los resultados para el estadístico RMSE muestran que hay menor error en el caso 1. Considerando los valores del BIAS se observan subestimaciones en la mayoría de las estaciones, exceptuando la estación de Cuautitlán (tablas 4.3 y 4.4).

En términos de la magnitud de viento, el coeficiente de correlación de Pearson indica valores positivos y se muestra ligeramente mayor correlación en los datos del caso 1. El estadístico RMSE muestra valores muy grandes para ambos casos, pero resultan ser mejores para el caso 2, donde la parametrización de cúmulos se mantiene desactivada. Por último, el BIAS indica sobrestimaciones en todas las estaciones para ambos casos; pero con mejor comportamiento cuando no se considera la parametrización.

Considerando los resultados obtenidos para la variable dirección de viento, el estadístico RMSE muestra valores altos pero mejores para el caso 2. Por su parte, el BIAS muestra valores más pequeños en el caso donde se desactivó la parametrización de cúmulos. Y análogo a la situación de los resultados obtenidos para las EMAS, se obtuvieron valores muy bajos con el coeficiente de correlación de Pearson que favorecen al caso 1.

En general, los estadísticos muestran un mejor comportamiento en el caso 2 para la magnitud de viento y mejores resultados para temperatura en el caso 1. Es decir, indican que las simulaciones con el esquema de cúmulos activado simulan mejor las condiciones de temperatura y cuando el esquema no se emplea para dominios con resolución de 1km, la variable viento resulta ser mejor simulada.

Caso 1 (con parametrización)		Acolman	Cuautilán	Nezahualcóyotl	San Agustín	Santa Fe	Tlalnepantla
Temperatura horaria [°C]	RMSE	1.67	2.25	1.14	2.65	1.77	1.47
	BIAS	-1.25	1.55	-0.52	-2.38	-1.40	-1.00
	C. PEARSON	0.94	0.89	0.94	0.93	0.93	0.94
Magnitud de viento horario [km/h]	RMSE	9.52	10.41	12.85	13.98	10.29	9.81
	BIAS	7.59	7.91	10.44	11.50	8.39	7.95
	C. PEARSON	0.61	0.55	0.72	0.63	0.45	0.69

TABLA 4.3: Estadísticos referentes a las estaciones REDMET para el caso de estudio 1, donde se emplea la parametrización de cúmulos BMJ.

Caso 2 (sin parametrización)		Acolman	Cuautilán	Nezahualcóyotl	San Agustín	Santa Fe	Tlalnepantla
Temperatura horaria [°C]	RMSE	2.13	2.22	1.25	3.13	1.84	1.80
	BIAS	-1.67	1.16	-0.75	-2.80	-1.36	-1.32
	C. PEARSON	0.92	0.86	0.94	0.90	0.91	0.92
Magnitud de viento horario [km/h]	RMSE	9.13	10.19	13.06	13.21	10.11	9.63
	BIAS	7.16	7.75	10.43	10.42	8.22	7.57
	C. PEARSON	0.56	0.52	0.67	0.56	0.56	0.58

TABLA 4.4: Estadísticos referentes a las estaciones REDMET para el caso de estudio 2, donde el modelo resuelve explícitamente.

Sistema de Aguas de la Ciudad de México - SACMEX

Para las estaciones SACMEX se obtuvieron valores de correlación positiva para 12 de 13 estaciones en el caso 1, y 11 de 13 estaciones para el caso 2, con valores más favorables en el caso 2. Considerando el RMSE se observan valores menores para el caso 2, los cuales llegan a distar bastante de los obtenidos para el caso 1 (*e.g.* estación Santa Fe). Por su parte, el BIAS indica valores en su mayoría positivos para el caso 1, lo cual se traduce en sobrestimaciones en relación a los datos observados; sin embargo, esto contrasta a los presentados en el caso 2, que en su mayoría son subestimados y son valores más pequeños (*e.g.* la estación Santa Fe tiene un valor de 7.23 mm/día en el caso 1, mientras que en el caso 2 un valor de -0.12 mm/día)

Ahora bien, considerando las tablas 4.5 y 4.6, se observa un mejor comportamiento en el caso 2; sin embargo, los resultados favorecen al caso 1 en las estaciones Lago Churubusco, Planta Nativitas, Caída del Borracho, Tetelco y San Salvador Cuatenco. Por lo anterior, los resultados indican que mantener el esquema de cúmulos desactivado para el dominio con 1 km de resolución genera mejores aproximaciones a los valores observados de precipitación acumulada diaria.

Caso 1 (con parametrización)	Precipitación diaria [mm/día]		
	RMSE	BIAS	C. PEARSON
Lago Churubusco	4.65	2.56	0.75
Santa Fe	12.88	7.23	0.59
El Zarco	9.71	5.95	0.83
Monte Alegre	10.34	0.77	-0.14
Unidad E. Oriente	6.81	5.35	0.48
Sta. Catarina	6.38	1.84	0.08
Tláhuac	5.82	2.89	0.46
Planta Nativitas	4.27	2.94	0.56
Chiconahutla-I	15.31	10.00	0.25
Caída del borracho	15.38	4.20	0.33
Tetelco	5.89	-1.22	0.69
San Salvador Cuatenco	7.68	5.10	0.04
Tarango	15.61	10.95	0.27

TABLA 4.5: Estadísticos referentes a las estaciones SACMEX para el caso de estudio 1, donde se emplea la parametrización de cúmulos BMJ.

Caso 2 (sin parametrización)	Precipitación diaria [mm/día]		
	RMSE	BIAS	C. PEARSON
Lago Churubusco	7.24	0.21	0.02
Santa Fe	5.89	-0.12	0.83
El Zarco	3.92	-1.18	0.89
Monte Alegre	8.76	-1.32	-0.24
Unidad E. Oriente	7.08	4.57	0.86
Sta. Catarina	5.20	-0.20	0.23
Tláhuac	3.90	0.14	0.24
Planta Nativitas	8.60	5.08	0.48
Chiconahutla-I	8.66	4.75	0.36
Caída del borracho	12.58	-5.21	0.31
Tetelco	15.86	1.44	-0.13
San Salvador Cuatenco	10.69	6.35	0.20
Tarango	11.42	7.55	0.69

TABLA 4.6: Estadísticos referentes a las estaciones SACMEX para el caso de estudio 2, donde el modelo resuelve explícitamente.

En resumen y tras el análisis de los resultados en las tres redes meteorológicas, se observa lo siguiente: por un lado, el pronóstico de la temperatura obtiene menor error, correlación positiva alta y menor sesgo empleando la parametrización de cúmulos BMJ- caso 1. Para la magnitud del viento se obtuvieron resultados opuestos: por un lado se obtiene un mejor pronóstico al emplear la parametrización BMJ- caso 1 cuando se compara el pronóstico contra la red EMAS; y por otro lado cuando se emplea la red REDMET resulta en un mejor pronóstico cuando el esquema de cúmulos no es parametrizado y el modelo resuelve explícitamente estos procesos (caso 2).

Este resultado se debe a que dicha variable está modulada por otros esquemas. Mohan y Bhati (2011) mencionan en su trabajo que los esquemas de superficie, capa límite planetaria y capa superficial tienen mayor impacto en las simulaciones de variables como magnitud y dirección de viento, temperatura y humedad relativa que los esquemas de cúmulos y microfísica.

Con respecto a la precipitación el caso 2, cuando el modelo resuelve explícitamente los procesos referentes a la parametrización de cúmulos, obtiene mejores pronósticos reduciendo el sesgo, el error y obteniendo mejores correlaciones con los datos observados para las redes EMAS y SACMEX. Sin embargo, vale la pena recordar que los estadísticos calculados (RMSE y BIAS) siguen siendo de magnitud mayor y de menor correlación (coeficiente de Pearson) en comparación con las variables de temperatura y magnitud de viento, siendo así una de las variables más difíciles de pronosticar. En el estudio realizado por Kan et al. (2015) enfatizan que la habilidad del modelo WRF de pronosticar los patrones de precipitación es mejor que la de pronosticar la intensidad de dichos eventos, siendo el esquema cúmulos uno de los más sensibles a cambios por lo menos respecto al esquema de microfísica (también relacionados con desarrollo de precipitación). De esa manera, en el presente trabajo se observa que el modelo no representa de manera correcta la distribución temporal de la precipitación, esto es que presenta un desfase respecto a la hora e intensidad en que ocurren los eventos de la misma.

Para los resultados obtenidos en la siguiente sección se consideró emplear la

configuración del caso 2, siguiendo lo recomendado por Chen y Dudhia (2000) y considerando además que la precipitación es una de las variables que nos interesó analizar con un menor error y sesgo (Tabla 4.7).

Red de medición		EMAS	REDMET	SACMEX
Variables meteorológicas analizadas	Temperatura horaria [°C]	Caso 1	Caso 1	N/A
	Magnitud de viento horaria [km/h]	Caso 1	Caso 2	N/A
	Precipitación diaria [mm/día]	Caso 2	N/A	Caso 2
	Precipitación horaria [mm/h]	sim*	N/A	N/A

TABLA 4.7: Resumen de qué simulación generó mejor pronóstico para las variables meteorológicas.

Celdas marcadas con “Caso 1” obtuvieron mejores resultados con la simulación donde se mantiene activada la parametrización cúmulos; celdas “Caso 2” obtuvieron mejores resultados cuando se mantiene la parametrización cúmulos desactivada; N/A no aplican para la variable por ausencia de datos observados; sim* se refiere a datos similares pero un poco mejores para el Caso 2.

4.2. Estimación de condiciones meteorológicas del año 1807

4.2.1. Transiciones de LULC de 1807 a 2016

Recordando que para reconstruir las condiciones de LULC de 1807 se tomó en cuenta la vegetación potencial propuesta por Rzedowski (1990b), debido a que no se encontró un mapa digitalizable de LULC que representara con certeza las condiciones de esa época; a continuación se presenta un análisis de las posibles transiciones o cambios de LULC que pudieron darse entre 1807 y 2016. Análisis que también tiene el objetivo de explicar el comportamiento entre las simulaciones numéricas obtenidas en la siguiente sección.

La Figura 4.2 muestra el diagrama de transiciones de LULC obtenido para cada estación analizada previamente (ver Figura 3.6).

El identificador que presenta el diagrama describe una estación en particular y fue obtenido considerando el número de estación y la letra inicial de la red; *e.g.* la estación Lago Churubusco se identifica como 1S y la estación Cuautitlán como 2R. A estos puntos se agregaron dos puntos virtuales (ver Figura 4.3) sobre el sistema de lagos de 1807 con el objetivo de analizar el LULCC de cuerpo de agua (1807) a mancha urbana (2016). Cabe mencionar que se discriminaron algunas ubicaciones para sintetizar el estudio.

A partir del diagrama de cambios de LULC se identificó que existen transiciones que van de sitios con mayor cobertura vegetativa (bosque mixto, bosque latifoliado caducifolio) a sitios con menor o nula cobertura vegetativa (matorral, pastizal, tierra de cultivo). De esa manera, también se identificaron transiciones entre tierra de cultivo a urbanización y cuerpos de agua a urbanización, como posiblemente ocurrió al establecerse la población en el centro del país.

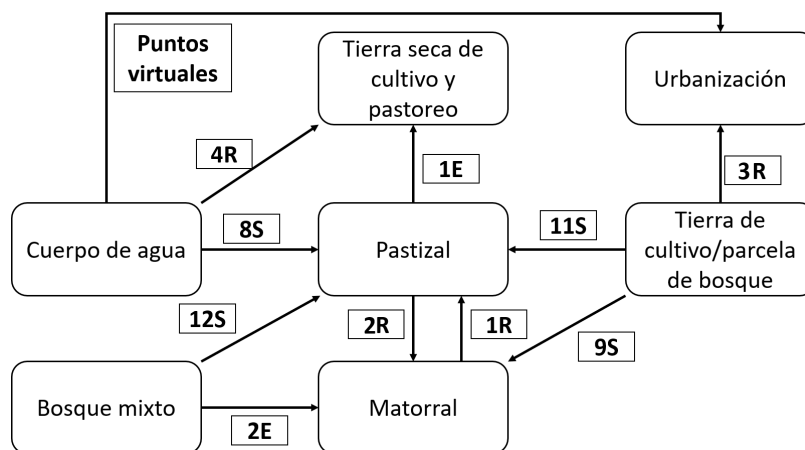


FIGURA 4.2: Diagrama de las transiciones de uso de suelo identificadas del año 1807 al 2016.

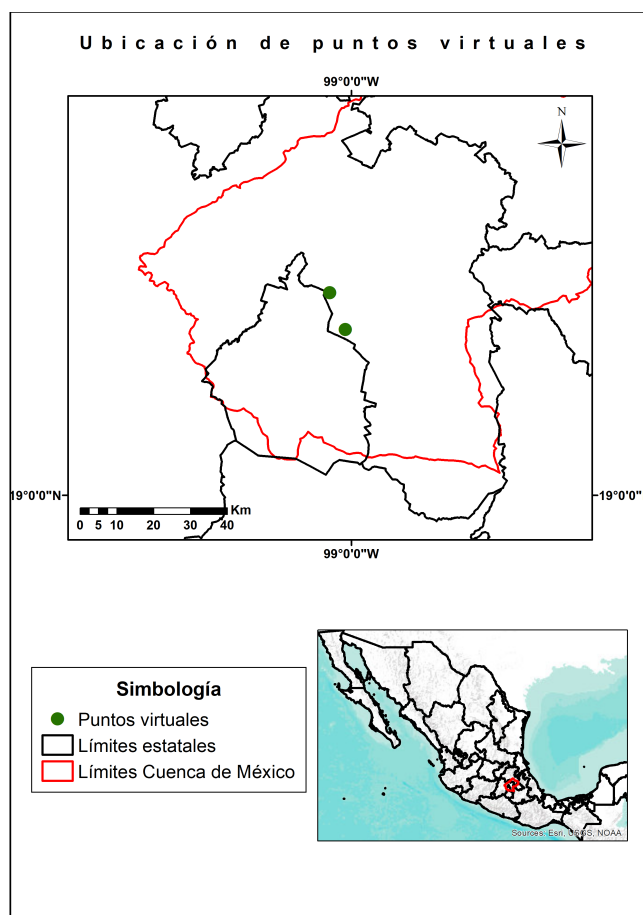


FIGURA 4.3: Puntos virtuales con transición de cuerpo de agua a urbanización.

La Tabla 4.11 muestra la diferencia de los promedios en temperatura superficial, precipitación y magnitud de viento pronosticada para el año 2016 y el año 1807. Cuando los valores son positivos, las magnitudes de las variables en 2016 son mayores con respecto a 1807. Valores negativos representan lo contrario. En esta tabla también se puede observar la transición de LULC experimentado de 1807 a 2016.

Temperatura

Uno de los principales efectos del LULCC en zonas con pérdida de vegetación y aumento de mancha urbana, son los cambios en el albedo relacionados con los flujos de calor latente y sensible; los cuales devienen en incrementos de temperatura en superficie (Dong et al., 2019).

El comportamiento de la temperatura en superficie destaca valores más altos de la variable para el año 2016, solamente 1 de los 12 puntos analizados indica lo contrario; en dicho punto la diferencia es de $-0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ y su transición va de matorral a pastizal, lo cual podría deberse a que la temperatura media del matorral es más alta que la del pastizal (CONABIO, 2019a). Además, la Figura 4.4 muestra marcados descensos de temperatura en el año 2016, los cuales concuerdan con los máximos de precipitación del mismo año observados en la Figura 4.5, por lo que es probable que los altos montos de precipitación moderen también la temperatura en superficie.

De igual manera, en la Tabla 4.11 se observa que las diferencias positivas más altas pertenecen a las ubicaciones de las estaciones Planta Nativitas (transición de cuerpo de agua a pastizal), Nezahualcóyotl (tierra de cultivo/parcela de bosque a urbanización), Punto virtual 1 (cuerpo de agua a urbanización) y ENCBII (pastizal a tierra seca de cultivo y pastoreo), con valores de 0.36 °C, 0.55 °C, 0.61 °C y 0.69 °C, respectivamente.

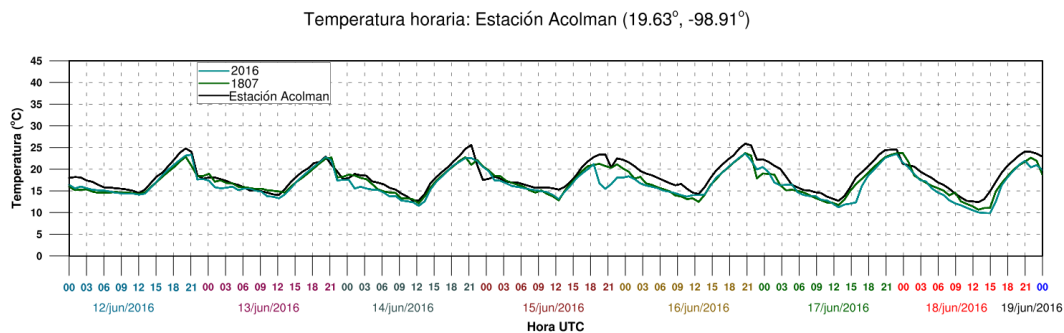


FIGURA 4.4: Serie de tiempo de temperatura horaria referente a la ubicación de la estación Acolman. La línea azul representa los resultados del año 2016, la línea café representa los resultados del año 1807 y la línea negra representa los datos observados en el año 2016.

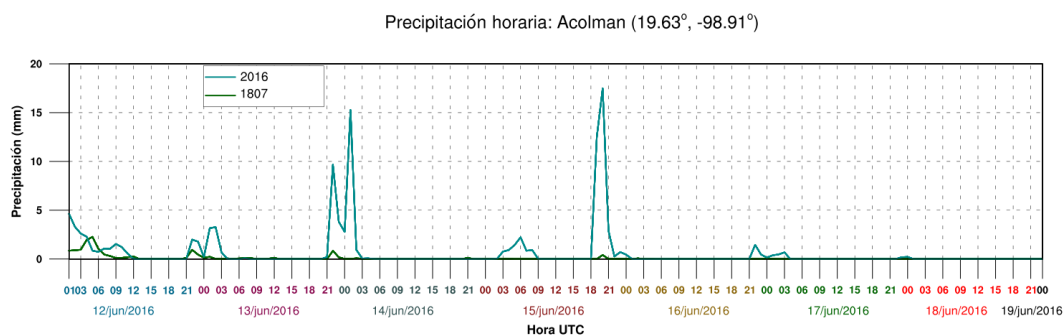


FIGURA 4.5: Serie de tiempo de precipitación horaria referente a la ubicación de la estación Acolman. La línea azul representa los resultados del año 2016 y la línea café representa los resultados del año 1807.

Con el objetivo de resaltar y generalizar el impacto del sistema de lagos y la urbanización en la variable temperatura, se realizó el análisis del ciclo diurno y nocturno (ver figuras 4.6 y 4.7) considerando periodos de 08:00-20:00 (Figura 4.6) y 20:00-08:00 (Figura 4.7) de la hora local; los valores negativos representados en color azul indican temperaturas más altas en el año 1807 y de manera contraria los colores en tonalidades rojas representan temperaturas más altas en el año 2016. El análisis diario deviene en la existencia de patrones marcados en torno al sistema de lagos y la mancha urbana.

Tomando como referencia la Figura 4.6, durante el periodo nocturno predominan y son más grandes las diferencias positivas en la zona centro y norte de la Ciudad de México, lugar en donde se encuentra la urbanización en el año 2016. Otras zonas en donde también predominan los valores positivos (menores a la zona urbanizada) son al sur, oeste, noroeste y noreste del dominio, áreas que en el año 2016 presentan vegetación tal como pastizales y matorrales, lo que en el año 1807 contrasta con bosque mixto. En términos de las diferencias negativas (Figura 4.6), estas son mayores en áreas donde en el año 1807 se encontraba el sistema de lagos propuesto por Martínez (1961); es decir, estas regiones presentaban temperaturas más altas durante la noche en comparación con el año 2016. Otras zonas en las que de igual manera las diferencias son negativas pero más cercanas a cero, se encuentran al norte, este, sureste, sur y suroeste de la zona de estudio; en su mayoría cuentan con vegetación perteneciente a bosque mixto en el año 1807 y zonas heterogéneas en el año 2016; a excepción del norte, donde el LULCC va de tierra de cultivo/parcela de bosque a pastizal.

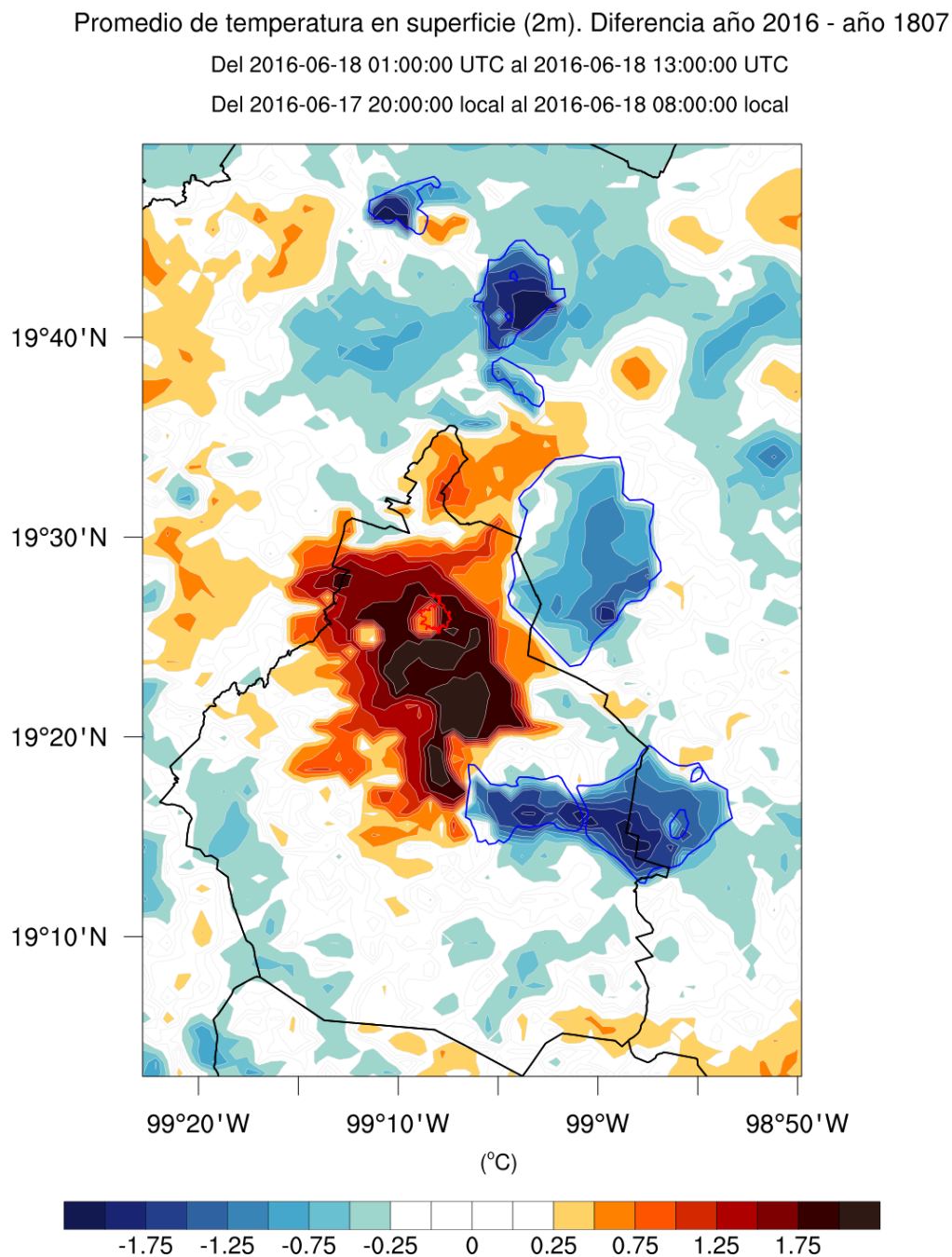


FIGURA 4.6: Promedio de temperatura en superficie, referencia al período nocturno. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Respecto a la Figura 4.7, se precisa que durante el día las diferencias positivas más grandes se presentan en el área donde en el año 1807 se encontraba el sistema de lagos y en el año 2016 parte de la mancha urbana; lo cual quiere decir que la temperatura es mayor para el año 2016 y se acentúa por la presencia de la urbanización y la ausencia de los lagos. Por otra parte, las regiones circundantes muestran valores negativos, traducido a temperaturas más altas en el año 1807, un probable resultado de la repercusión del sistema de lagos y su dinámica con el entorno.

Promedio de temperatura en superficie (2m). Diferencia año 2016 - año 1807

Del 2016-06-17 13:00:00 UTC al 2016-06-18 01:00:00 UTC

Del 2016-06-17 08:00:00 local al 2016-06-17 20:00:00 local

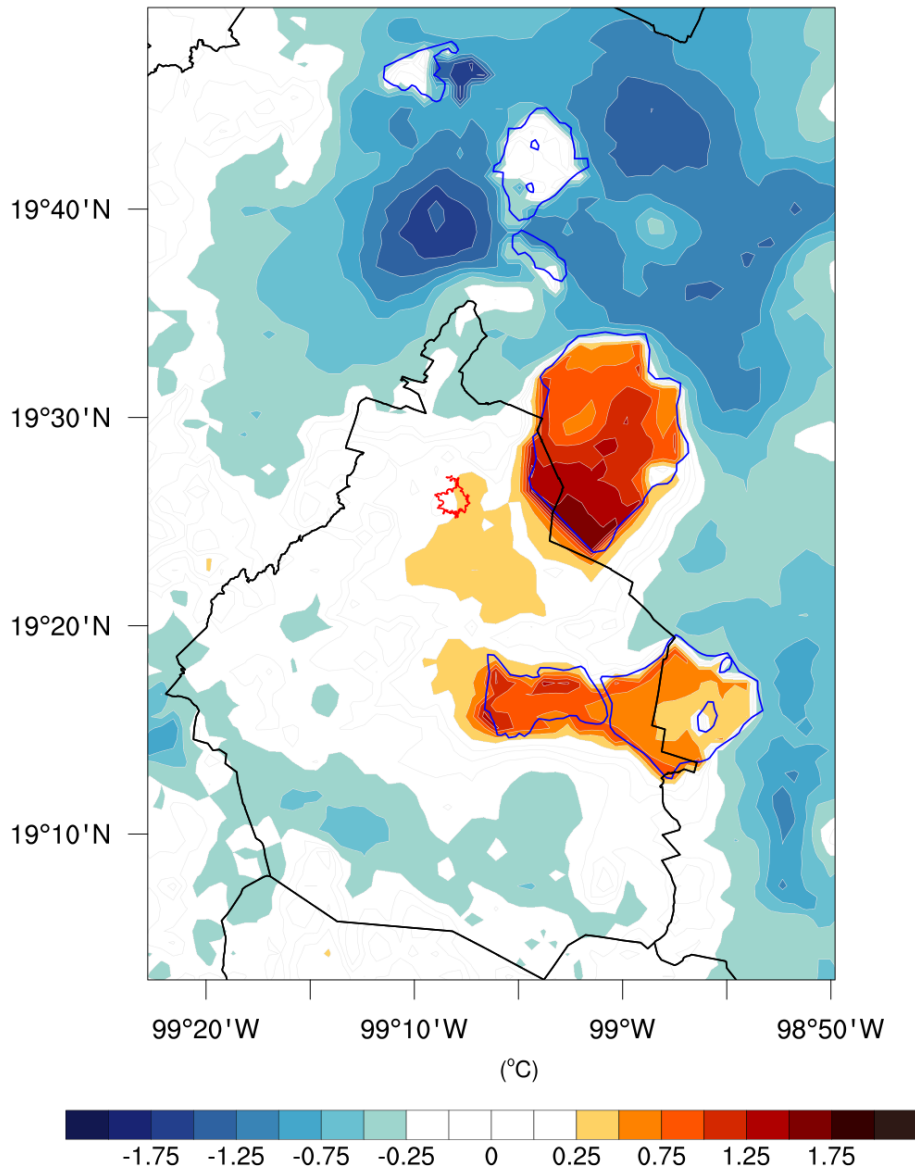


FIGURA 4.7: Promedio de temperatura en superficie, referencia al periodo diurno. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Rango diurno de temperatura

Con el fin de realizar un análisis introductorio a esta sección, se obtuvieron los mapas promedios de temperaturas máximas y mínimas diarias durante todo el periodo, para ambos años, así como las diferencias entre ellos.

La temperatura máxima muestra patrones muy similares en las figuras 4.8 y 4.9, salvo la región del sistema de lagos donde la temperatura es más baja así como las zonas circundantes, y estas últimas muestran temperaturas más altas en el año 2016. La Figura 4.10 muestra el resultado de la diferencia entre las temperaturas máximas de ambos años (1807-2016), constando que la temperatura en el año 2016 es mayor, pues las diferencias son negativas en gran parte de la zona de estudio y se incrementan en la región del sistema de lagos. Por su parte, las diferencias positivas, como se mencionó en los párrafos anteriores, están relacionadas con el tipo de vegetación.

Promedio de temperatura máxima en superficie (2m) para el año 2016
Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

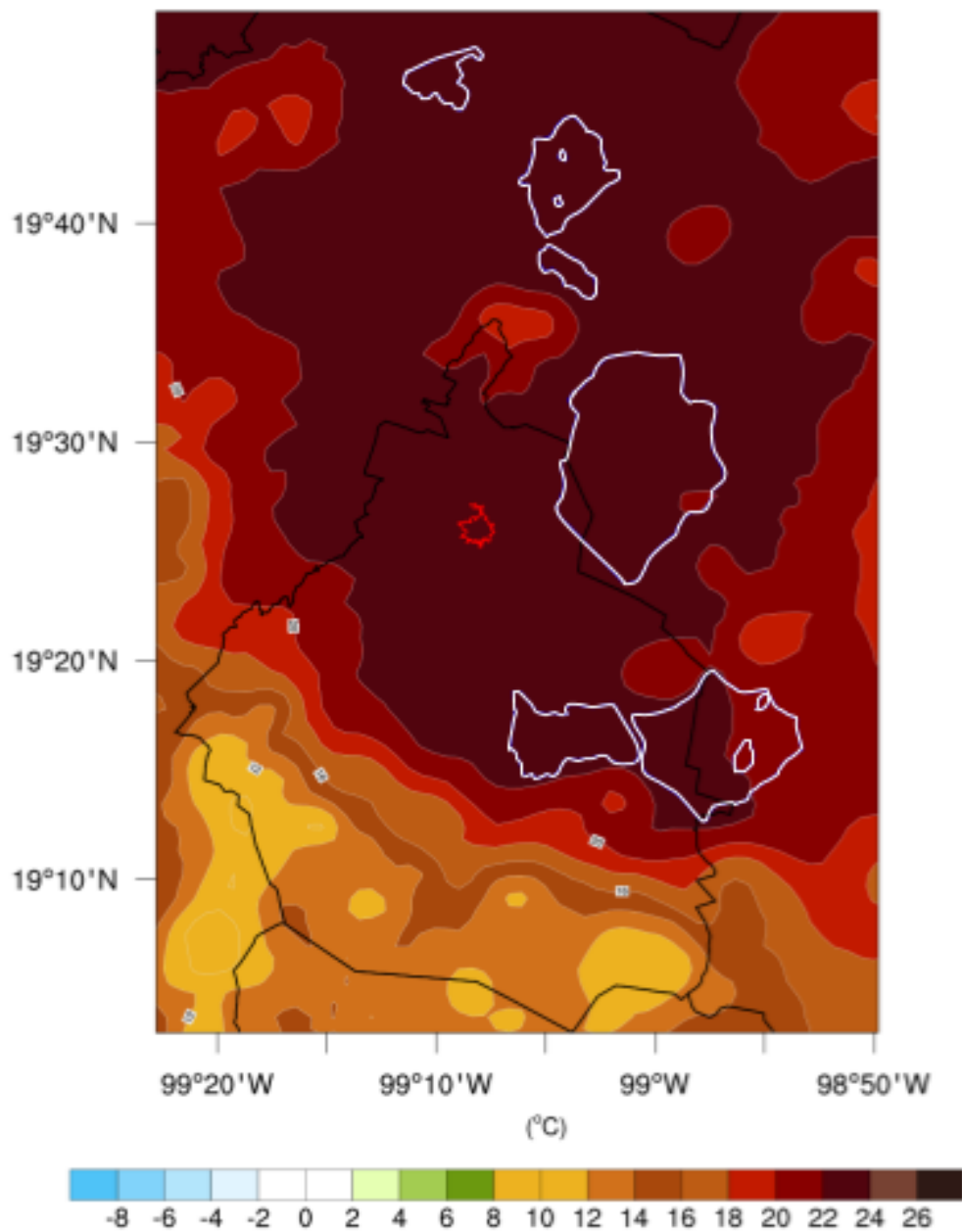


FIGURA 4.8: Promedio de temperatura máxima para el año 2016. En la figura se remarca con contorno blanco la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Promedio de temperatura máxima en superficie (2m) para el año 1807
Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

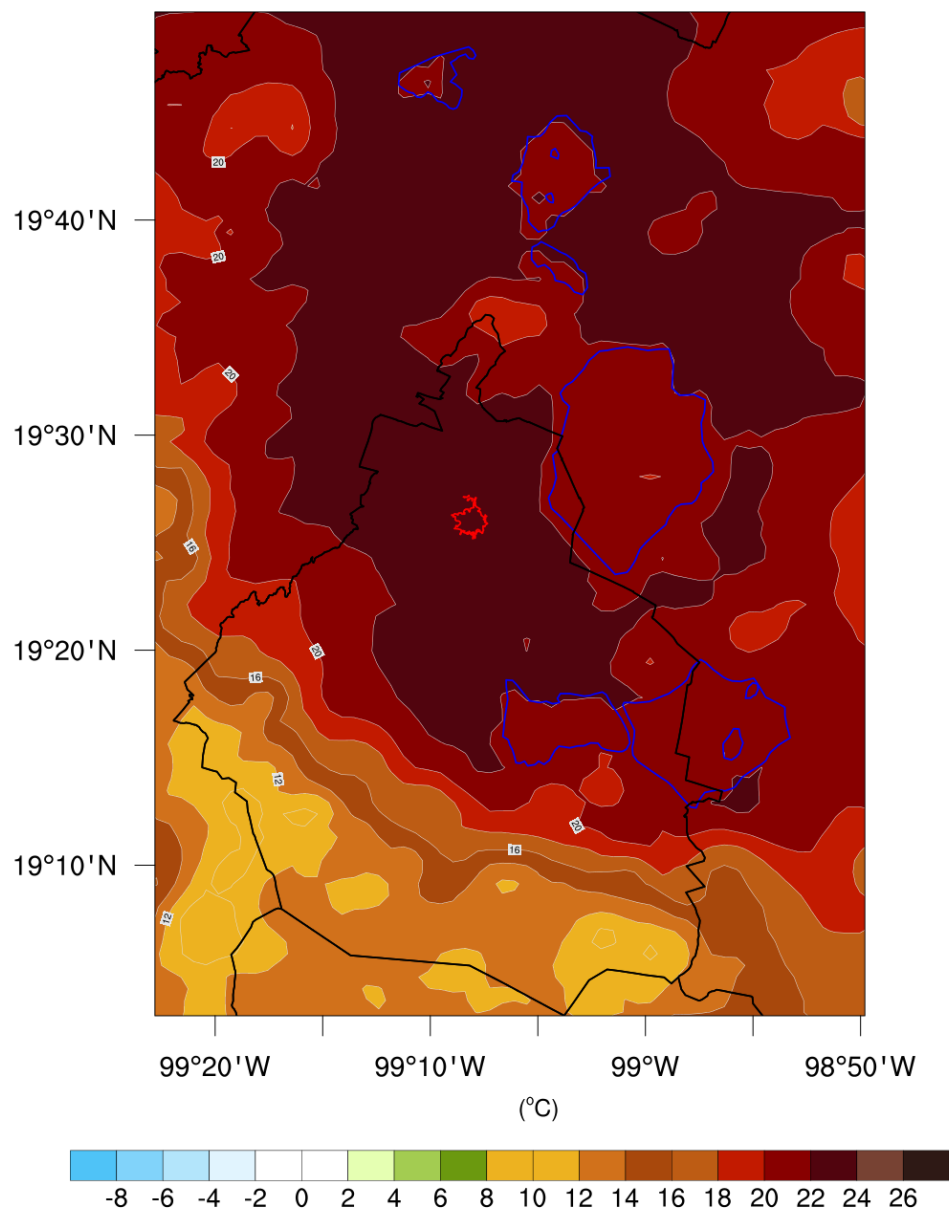


FIGURA 4.9: Promedio de temperatura máxima para el año 1807. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Diferencia del promedio de temperatura máxima en superficie (2m). Año 1807-2016
Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

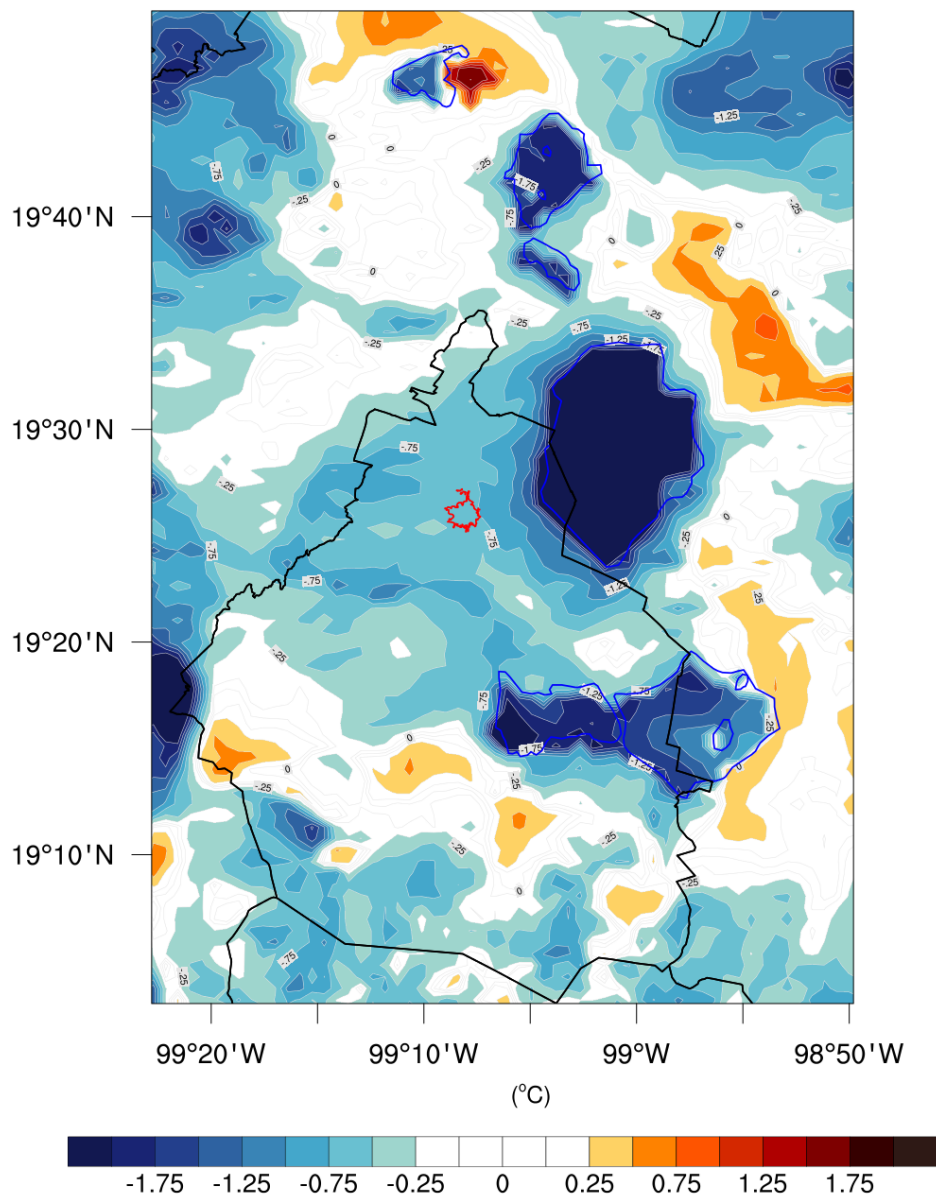


FIGURA 4.10: Diferencia del promedio de temperatura máxima. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Con respecto a la temperatura mínima se observan valores más altos en la región del sistema de lagos (Figura 4.12) y en la zona que delimita la extensión de la urbanización (Figura 4.11). La diferencia de la temperatura mínima de ambos periodos (Fig. 4.13), resalta las dos zonas mencionadas, valores negativos en la zona urbanizada y positivos en el sistema de lagos.

Promedio de temperatura mínima en superficie (2m) para el año 2016
Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

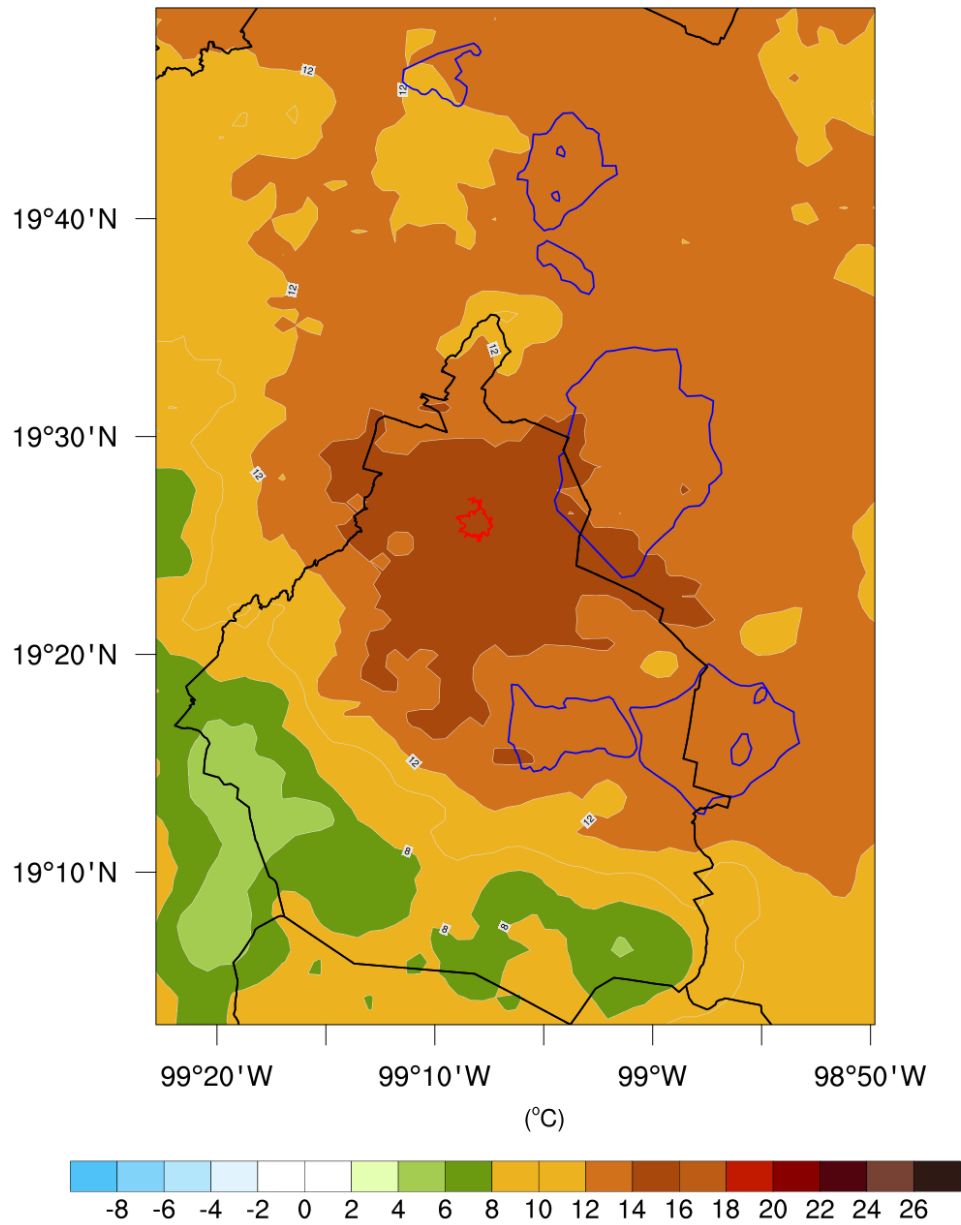


FIGURA 4.11: Promedio de temperatura mínima para el año 2016. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Promedio de temperatura mínima en superficie (2m) para el año 1807
Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

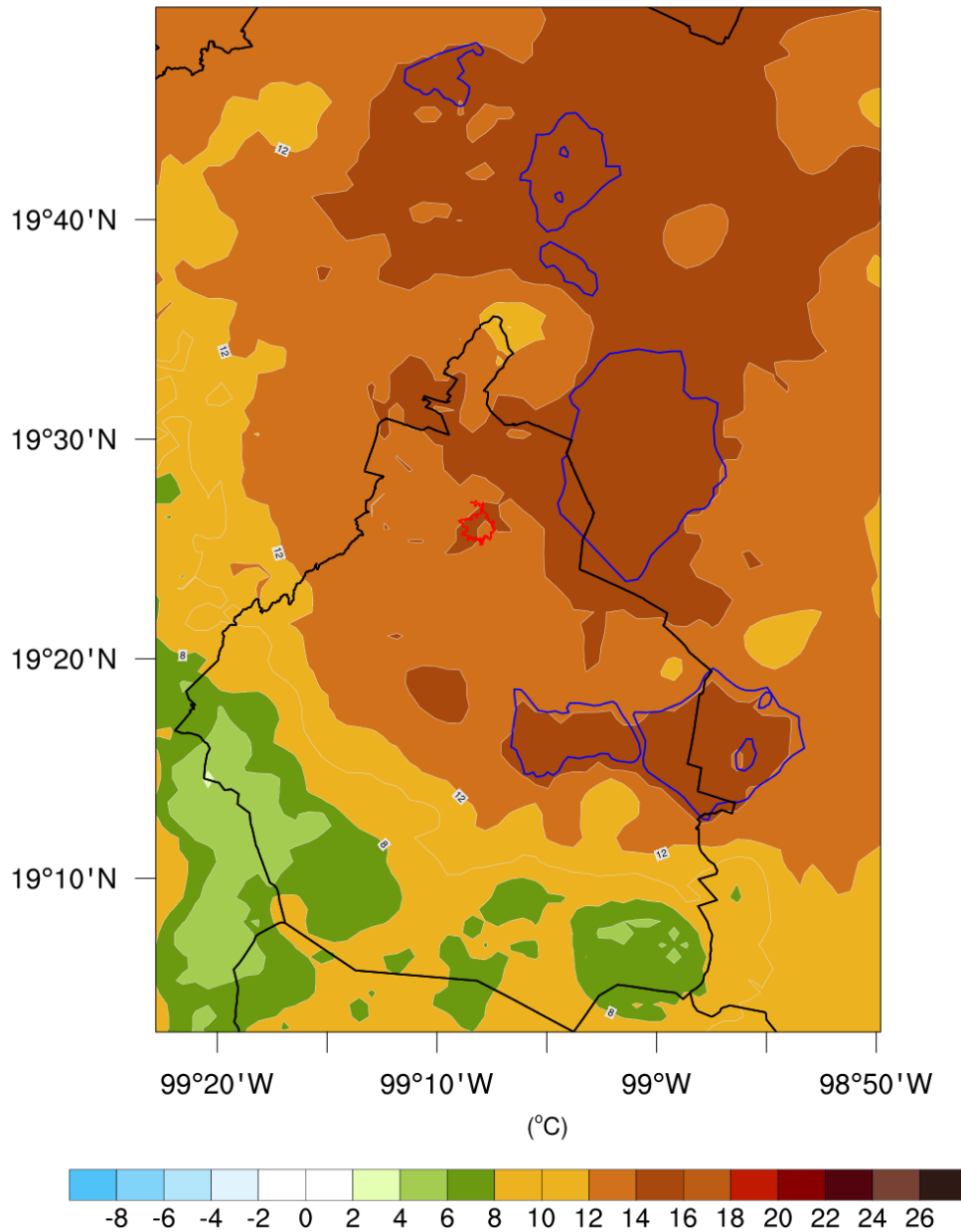


FIGURA 4.12: Promedio de temperatura mínima para el año 1807. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Diferencia del promedio de temperatura mínima en superficie (2m). Año 1807-2016
Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

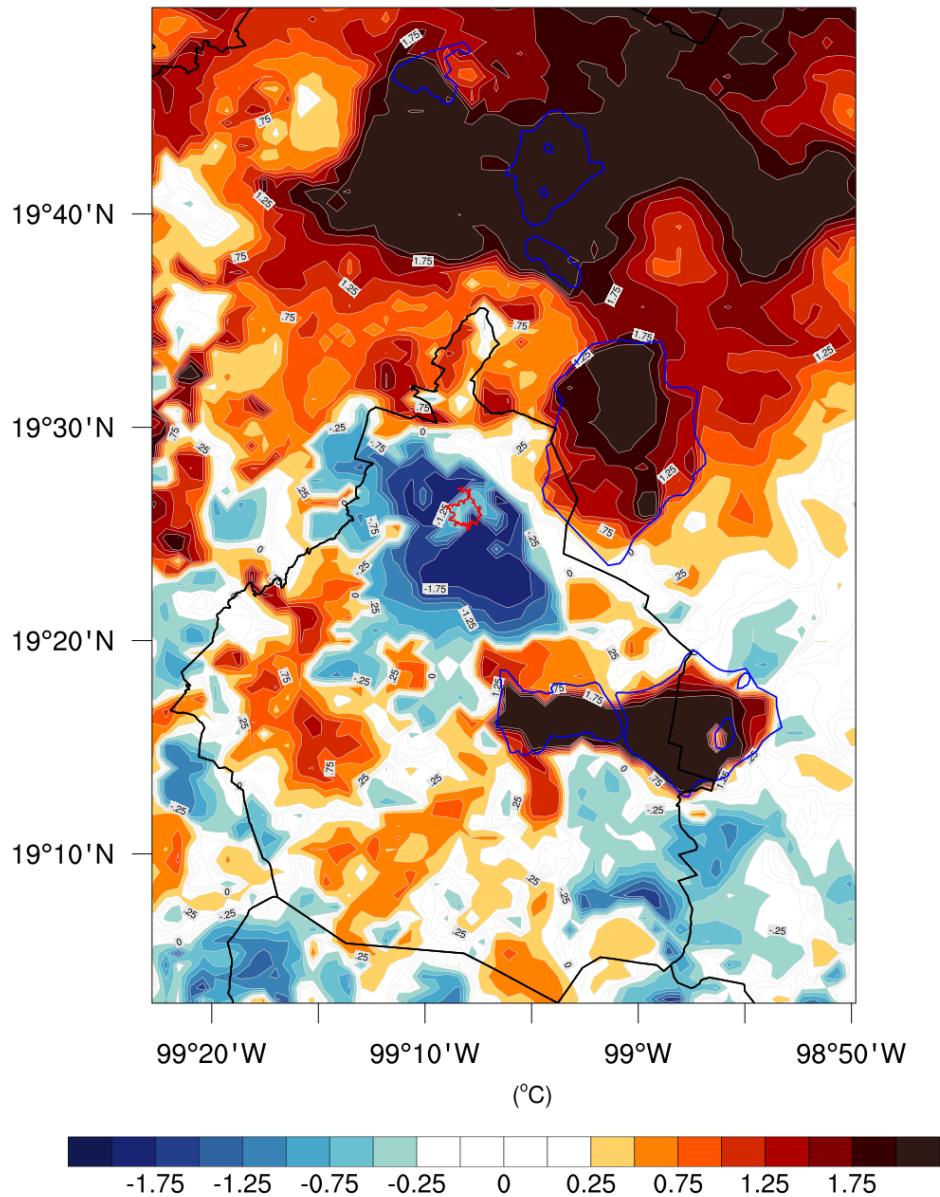


FIGURA 4.13: Diferencia del promedio de temperatura mínima. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

En ese aspecto, se observa que el impacto del sistema de lagos y la urbanización en las variaciones de la temperatura en superficie es mayor en comparación con otros cambios de cobertura y uso de suelo. Precisión que lleva a aludir el concepto de isla de calor urbana¹ planteado en la sección 2.3.1, ya que particularmente se destaca un patrón de temperatura más alta durante la noche y el día en todo el periodo

¹Recordando: Es un cambio que prevalece en las temperaturas, acrecentándolas cuando existe espacio urbanizado en comparación a sitios rurales.

simulado sobre la región urbanizada, destacando menores temperaturas en zonas aledañas.

Para el siguiente análisis, se obtuvieron los máximos y mínimos de temperatura en los puntos virtuales referidos en la Figura 4.3 considerando periodos diarios de 00UTC a 00UTC, así como el rango diurno de temperatura y las diferencias de cada uno.

El rango diurno de temperatura es mejor conocido como DTR (por sus siglas en inglés: *Diurnal Temperature Range*), hace referencia a la diferencia entre los máximos y mínimos de temperatura que ocurren a lo largo del día; los cuales pueden llegar a aportar más información que la media de temperatura (Braganza et al., 2004).

Considerando las tablas 4.8 y 4.9, dado que el cuerpo lacustre libera su energía durante el periodo nocturno, los valores de la diferencia de temperatura mínima son negativos y se encuentran en un rango de $-3.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto virtual 2) a $-0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto virtual 1). En cambio, las diferencias de temperatura máxima muestran valores positivos, indicando que dicha variable es mayor en el año 2016 en comparación al año 1807, con valores dentro del rango de $1.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto virtual 1) a $2.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto virtual 2), atribuidos principalmente al contraste de la zona urbanizada.

Los valores de DTR se encuentran en rangos de $4.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el año 1807 y de $6.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $11.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el año 2016, así como diferencias de hasta $4.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (punto virtual 2); indicando que las variaciones de temperatura son notablemente mayores en ausencia del cuerpo lacustre, producto del impacto de la regulación del mismo en la temperatura.

Día de simulación (local)	Año 1807			Año 2016			Diferencias (2016-1807)		
	Tmín	Tmáx	DTR	Tmín	Tmáx	DTR	Tmín	Tmáx	DTR
12-06-2016	14.94	20.87	5.93	14.92	23.23	8.31	-0.02	2.36	2.38
13-06-2016	14.86	20.43	5.57	14.38	22.81	8.43	-0.47	2.38	2.86
14-06-2016	14.60	21.56	6.96	14.07	23.02	8.95	-0.53	1.45	1.99
15-06-2016	15.91	20.69	4.78	15.62	22.43	6.81	-0.29	1.74	2.03
16-06-2016	15.14	21.11	5.97	15.04	23.20	8.16	-0.09	2.09	2.19
17-06-2016	14.52	21.66	7.14	13.19	23.82	10.63	-1.33	2.15	3.49
18-06-2016	14.18	21.19	7.01	13.34	22.84	9.5	-0.84	1.65	2.49

TABLA 4.8: Temperaturas [$^{\circ}\text{C}$] máximas, mínimas y DTR para el punto virtual 1 (19.40N, 99.01O) en el periodo de simulación.

Día de simulación (local)	Año 1807			Año 2016			Diferencias (2016-1807)		
	Tmín	Tmáx	DTR	Tmín	Tmáx	DTR	Tmín	Tmáx	DTR
12-06-2016	15.23	20.36	5.13	14.86	22.92	8.06	-0.36	2.55	2.93
13-06-2016	15.62	20.93	5.31	14.79	23.00	8.21	-0.82	2.06	2.9
14-06-2016	15.60	21.35	5.75	14.16	23.36	9.2	-1.44	2.00	3.45
15-06-2016	15.87	20.28	4.41	15.49	22.83	7.34	-0.38	2.54	2.93
16-06-2016	15.96	21.17	5.21	14.92	23.32	8.4	-1.03	2.15	3.19
17-06-2016	14.87	22.27	7.4	12.73	24.44	11.71	-2.13	2.16	4.31
18-06-2016	14.79	21.58	6.79	11.53	23.07	11.54	-3.25	1.49	4.75

TABLA 4.9: Temperaturas [$^{\circ}\text{C}$] máximas, mínimas y DTR para el punto virtual 2 (19.49N, 99.05O) en el periodo de simulación.

Precipitación

De acuerdo a la Tabla 4.11, los valores de precipitación acumulada diaria y horaria indican diferencias negativas en 2 de los 12 puntos analizados, las cuales se encuentran en rangos de -0.40 mm a -7.03 mm para precipitación diaria y -0.27 mm a -2.8 6mm para precipitación horaria, indicando que los valores de precipitación acumulada en el año 1807 son mayores a los del año 2016; dichos puntos pertenecen a las ubicaciones de las estaciones Tetelco y San Salvador Cuatenco, ambos ubicados al sur de la zona de estudio. Por otra parte, las diferencias positivas, indicadoras de mayores acumulados de precipitación en el año 2016, se encuentran en un rango de 0.4 mm a 13.64 mm diarios y 0.018 mm a 0.56 mm en los acumulados por hora. Lo anterior sugiere que, espacialmente hablando, la precipitación acumulada en todo el periodo analizado resultó mayor al sur en el año 1807 y al norte en el año 2016 de la región de estudio.

En las figuras 4.14 y 4.15 es posible observar los patrones de precipitación formados por forzamiento orográfico; esto es al este, sur y oeste de la región de estudio, lo cual concuerda con Jáuregui (2000), quien propone que la precipitación es más intensa al sur y oeste de la Cuenca de México, pues son zonas que se encuentran delimitadas por las sierras referidas en la Figura 3.1. Se observa también que la distribución de precipitación es similar para ambos años, pero que los valores son mayores en el año 2016 para el este, oeste y centro del dominio, en comparación al año 1807.

Precipitación acumulada durante toda la simulación del año 1807

Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

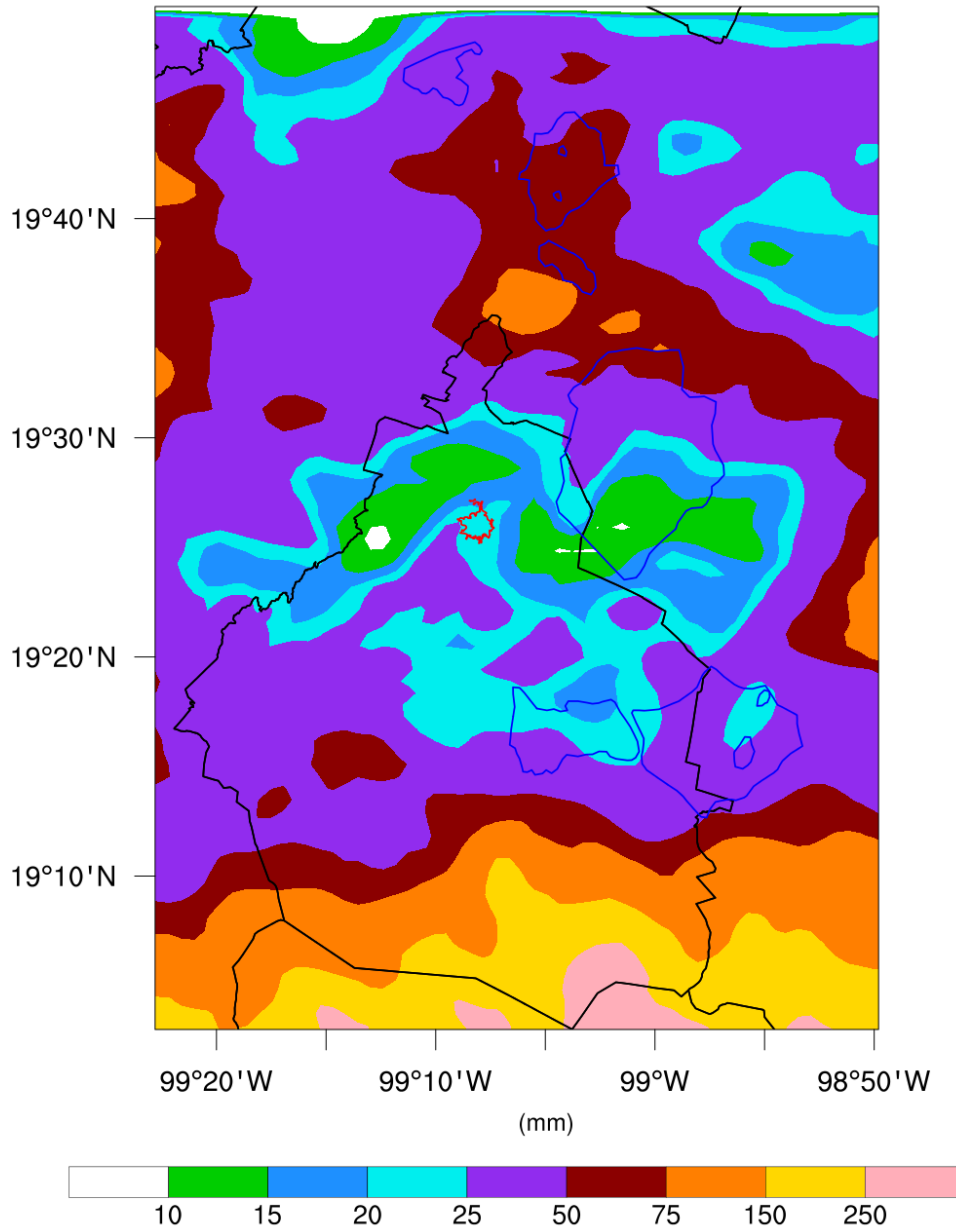


FIGURA 4.14: Precipitación total acumulada en todo el periodo de estudio para el año 1807. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

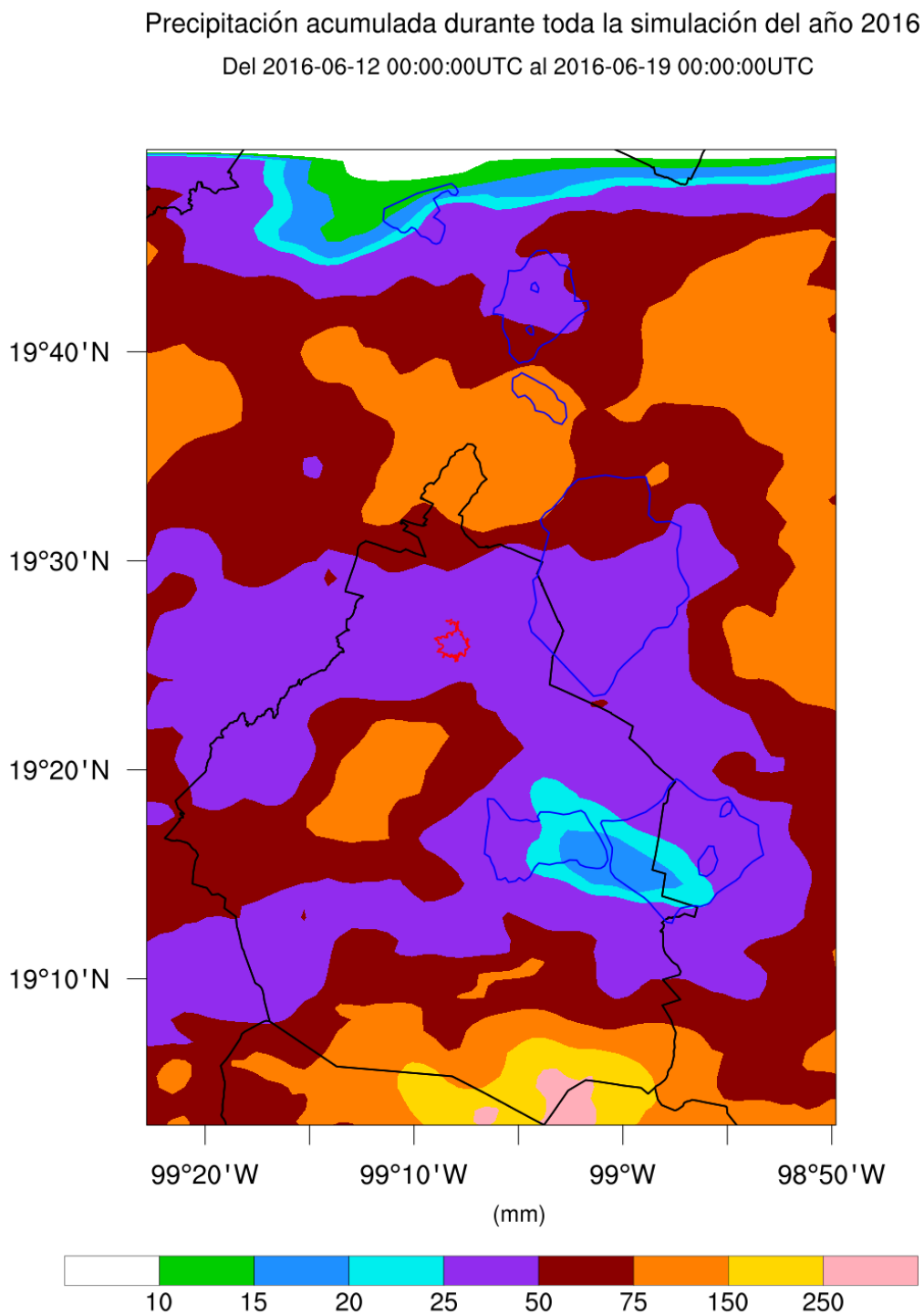


FIGURA 4.15: Precipitación total acumulada en todo el periodo de estudio para el año 2016. En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Así mismo, considerando el párrafo anterior, el análisis de las diferencias de precipitación acumulada (Fig. 4.16) lleva a la premisa de que la precipitación acumulada es mayor en el año 1807 al sur de la Ciudad de México pues los valores positivos abundan en dicha zona. Por otro lado, son predominantes las diferencias negativas

en el resto del dominio, dando coherencia a los resultados obtenidos en la Tabla 4.11.

Diferencia de precipitación acumulada. Año 1807-2016

Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

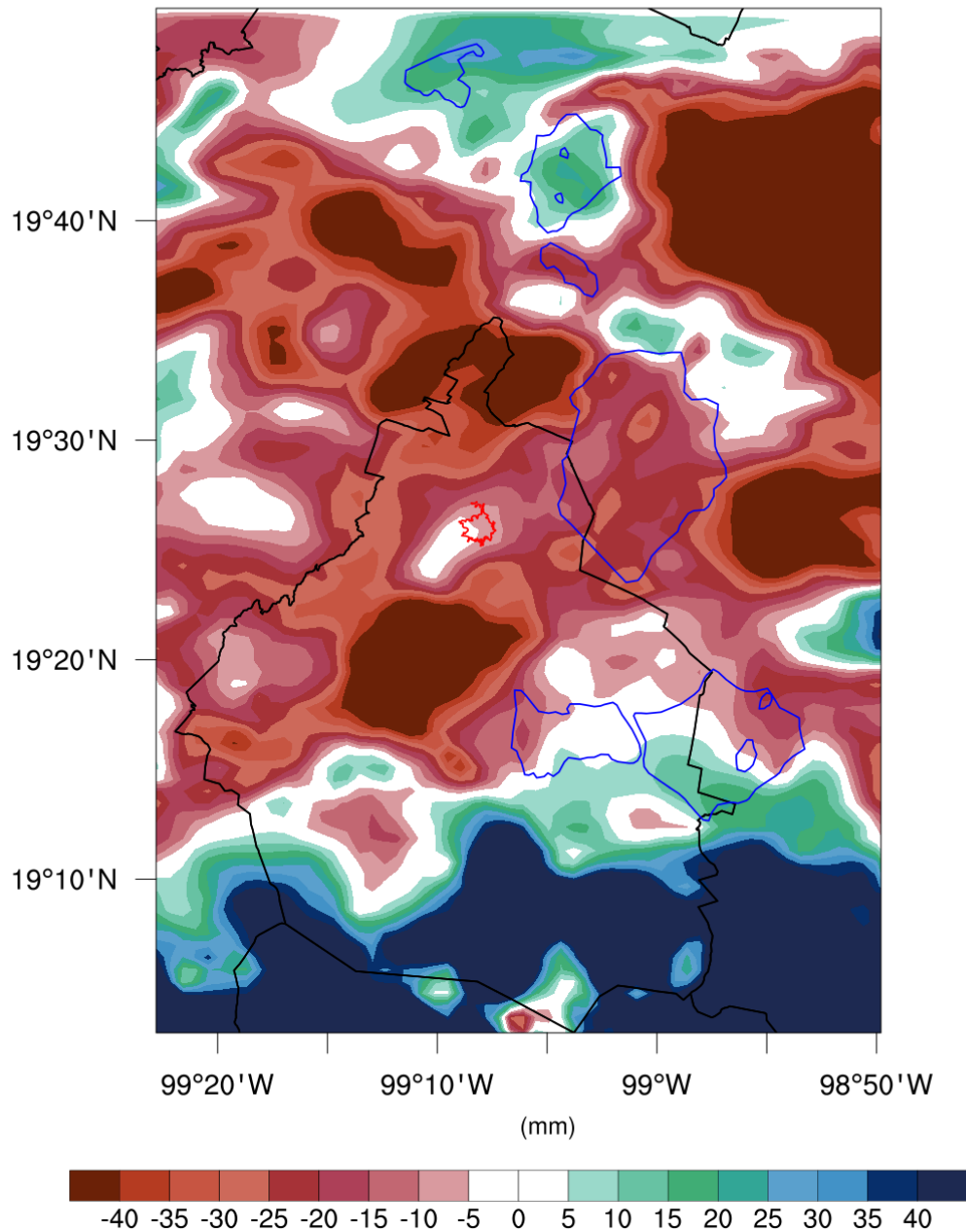


FIGURA 4.16: Mapa de las diferencias de precipitación en todo el período (año 1807-2016). En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Magaña et al. (2003) mencionan que los cambios en características físicas de la superficie en la Cuenca de México, resultan en incrementos de temperatura e inestabilidad atmosférica, lo cual propicia el desarrollo de tormentas más intensas. Aluden

a la relación que existe entre el cambio de uso de suelo con la intensidad de las lluvias a lo largo de los años y en particular enfatizan que el acelerado crecimiento poblacional tiene impacto en la convección; de esa manera, su propuesta radica en que la isla de calor urbano incrementa la precipitación convectiva. En ese sentido, existe la posibilidad de que el uso de suelo caracterizado en el presente estudio para ambos años de simulación favorezca en gran medida aquellas zonas que tienen mayores temperaturas superficiales a lo largo del periodo, contribuyendo a la formación de procesos convectivos que devienen en lluvias intensas. Es decir, retomando la sección 4.2.1, la regulación de temperatura por parte del sistema de lagos propuestos para el año 1807 podría contribuir también en la modulación de la precipitación convectiva.

Magnitud de viento

Una parte esencial para entender el LULC en relación a los efectos que tiene en la dinámica con la superficie, es abundar en su impacto en la velocidad del viento. Son Dong et al. (2019) quienes plantean la ausencia de estudios centrados en el estudio de dicha variable y su comportamiento en altura (perfil vertical) en relación a la rugosidad. Además mencionan que sus implicaciones van desde efectos de la contaminación atmosférica, los procesos de evapotranspiración, la ecología urbana, entre otros. El área de estudio en su investigación está ligada a la transición de un área suburbana a un área urbana, donde realizan el análisis de la magnitud de viento en diferentes niveles en altura para el periodo de 1991 a 2011, concluyendo que existe una tendencia negativa (decremento) en la misma. Los resultados muestran la estrecha relación con los cambios de la rugosidad en superficie, referente a la creación de construcciones de diversas alturas, y las variaciones en la velocidad de viento.

Con lo expuesto en el párrafo anterior, para realizar el análisis de la magnitud de viento, se considera el concepto de rugosidad planteada en la sección 2.3.2 y los valores empleados en la versión 3.8.1 del modelo WRF disponibles en Chen (2007) y sintetizados para el estudio en la Tabla 4.10.

Uso de suelo	Valor de rugosidad en metros (Z0)
Cuerpo de agua	0.001
Matorral	0.03
Tierra seca de cultivo y pastoreo	0.07
Pastizal	0.08
Tierra de cultivo/parcela de bosque	0.15
Bosque mixto	0.80
Bosque tropical caducifolio	0.80
Sabana	0.86
Urbanización	1

TABLA 4.10: Valores de rugosidad para las cobeturas de suelo presentes en la zona de estudio.

Analizando la Tabla 4.11 se puntualiza que los resultados esperados, siguiendo la lógica respecto a los valores de la rugosidad, devienen en una disminución de la magnitud del viento cuando la transición es de menor Z0 a mayor Z0 y viceversa; premisa que es cumplida en la mayoría de las ubicaciones salvo la referente a Chiconahutla-I, Nezahualcóyotl y planta Nativitas, de las cuales se abunda en el siguiente párrafo. Los valores de las diferencias entre el año 2016 y 1807 se encuentran

en un rango de -2.72 km/h a 3.9 km/h y de acuerdo a los valores de rugosidad, muestran tener una dependencia entre sí; esto es que a mayor discrepancia entre valores de Z0, mayor diferencia de magnitud de viento.

Para las ubicaciones de la estaciones que muestran resultados opuestos a la premisa de las rugosidades se hace referencia al mapa de la Figura 4.17. En términos de la estación Chiconahutla-I, se enfatiza su ubicación pues está en cercanías al lago de Texcoco, el cual es uno de los más extensos del sistema de lagos y en ese sentido, las diferencias positivas que indican magnitud de viento mayor en el año 1807 se encuentran en zonas donde la diferencia de Z0 es muy abrupta. Por otro lado, para la Planta Nativitas a pesar de que la transición es de cuerpo de agua a pastizal, se observa que el cuerpo de agua (parte del lago de Xochimilco) en el que se encontraba en el año 1807 no es tan grande como, por ejemplo, el lago de Texcoco; dando como resultado valores de magnitud de viento menores en el año 1807 en comparación al 2016. Por último, Nezahualcóyotl presenta transición de tierra de cultivo/parcela de bosque a urbanización, por lo que el valor de la diferencia debería de ser negativo; sin embargo se tiene un valor de 1.44 km/h.

Relativo a lo anterior, de manera general se observa que, salvo las discrepancias ya comentadas, la magnitud de viento es mayor en el año 2016 en comparación al año 1807, excepto por las zonas con cuerpos de agua de gran extensión; tales como el lago de Texcoco, Chalco y Xochimilco pues presentan un marcado contraste de rugosidad de la superficie de un año a otro. Particularmente la mancha urbana no presenta un impacto marcado en todo el periodo, pues a pesar de que la rugosidad es la más alta de la Tabla 4.10, la entrada de viento alrededor de la cuenca en el año 1807 se encuentra permeada de la existencia de bosque mixto (rugosidad de 0.80 m), lo que probablemente ocasiona que antes de llegar a la zona sur de la cuenca disminuya considerablemente su velocidad. Situación contraria ocurre en el año 2016, que presenta heterogeneidad de vegetación y con ello, menor porcentaje de bosque mixto, manteniendo valores generalizados de 0.08 m (pastizal) y 0.03 m (matorral) en torno al centro de la Ciudad de México.

Diferencia de magnitud de viento promedio en superficie (10m). Año 1807-2016

Del 2016-06-12 00:00:00UTC al 2016-06-19 00:00:00UTC

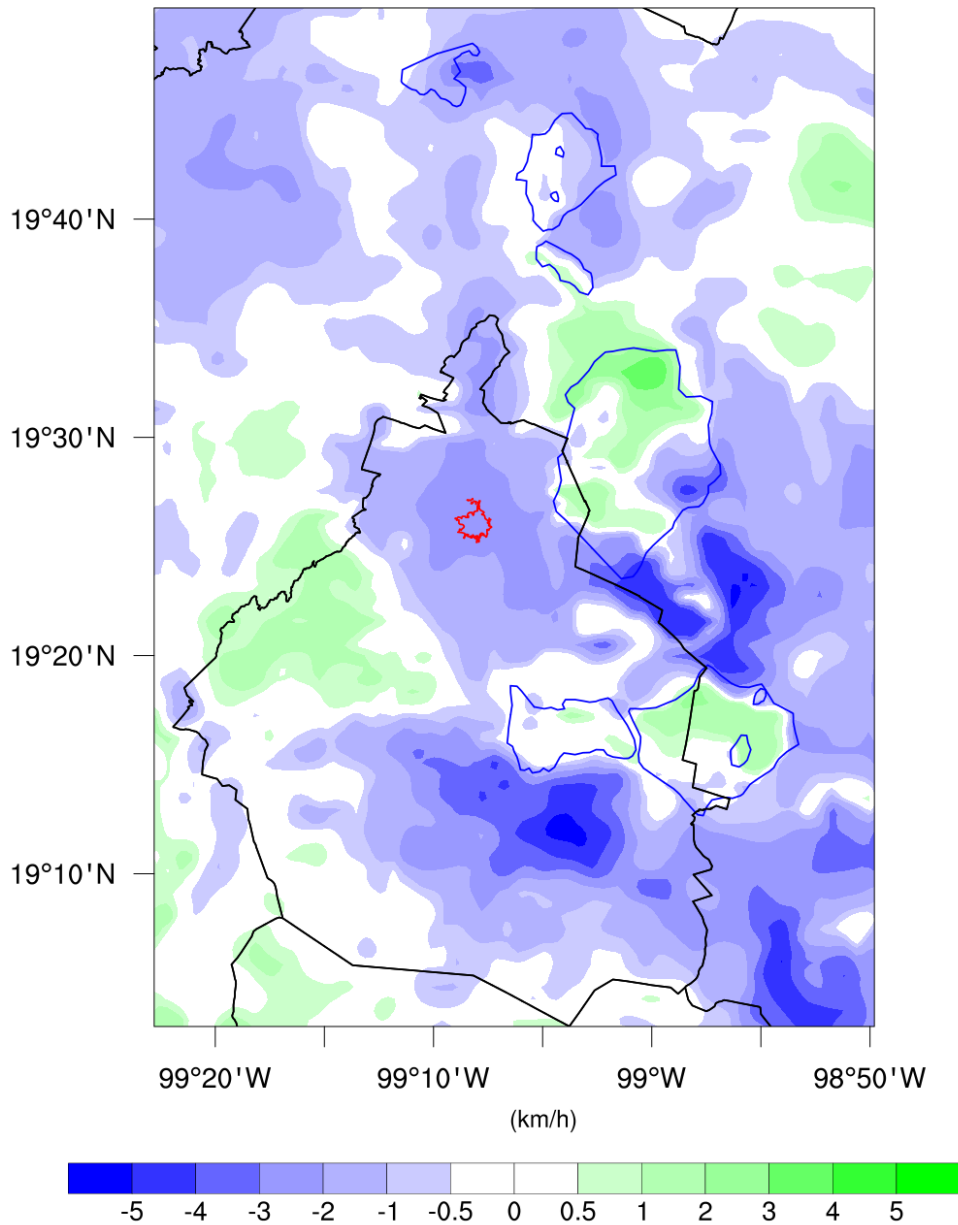


FIGURA 4.17: Mapa de diferencia de viento promedio en superficie (año 1807-año 2016). En la figura se remarca con contorno azul la ubicación del sistema de lagos de 1807, en contorno rojo la urbanización de ese mismo año.

Transición del año 1807 a 2016	Referencia de ubicación (estación)	Precipitación diaria [mm/día]	Precipitación horaria [mm/h]	Temperatura horaria [°C]	Magnitud de viento horaria [km/h]
Pastizal ->Tierra seca de cultivo y pastoreo	ENCBII	5.03	0.20	0.69	0.91
Bosque mixto ->Matorral	Ecoguardas	2.31	0.09	0.06	2.09
Tierra cultivo/ parcela bosque -> Urbanización	Nezahualcóyotl	3.61	0.15	0.55	-1.44
Pastizal->Matorral	Cuautitlán I	0.44	0.018	0.34	1.63
Tierra cultivo/ parcela bosque-> Pastizal	Tetelco	-0.40	-2.86	0.08	1.26
Cuerpo de agua->Tierra seca de cultivo y pastoreo	San Agustín	2.78	0.11	0.24	-2.72
Tierra cultivo/parcela de bosque-> Matorral	Chiconahutla-I	2.57	0.03	0.08	-0.92
Cuerpo de agua ->Pastizal	Planta Nativitas	0.53	0.030	0.36	-1.25
Bosque mixto->Pastizal	San Salvador Cuatenco	-7.03	-0.27	0.04	3.99
Matorral->Pastizal	Acolman	13.64	0.56	-0.45	-1.07
Cuerpo de agua->Urbanización	Punto virtual 1	3.5	0.14	0.61	-2.9
Cuerpo de agua->Urbanización	Punto virtual 2	1.64	0.068	0.30	-1.80

TABLA 4.11: Promedio de las diferencias de los valores obtenidos del año 2016 menos los obtenidos en el año 1807.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo puede dividirse en dos análisis: el realizado en referencia a la parametrización de cúmulos y el que se reconstruyen las condiciones para el año 1807. Ambos se encuentran asociados al comportamiento de las variables atmosféricas en el mismo periodo temporal referente a la época de lluvias. Las simulaciones numéricas fueron realizadas centrándose en la región sur de la Cuenca de México, zona que, de acuerdo con INEGI (2015) concentra a las dos entidades con mayor número de habitantes a nivel nacional, Estado de México en primer lugar seguido por la Ciudad de México.

Se logró concretar la estimación de las condiciones de cobertura y uso de suelo para el año 1807. Además, con la obtención de las simulaciones numéricas hechas en esta tesis se desarrollaron diferentes análisis respecto a tres variables atmosféricas (temperatura, precipitación y viento), logrando tener un panorama de la dependencia de su comportamiento en relación al cambio de LULC, así como a modificaciones en los parámetros dentro del modelo WRF y la habilidad del mismo para representar las variables observadas. Con lo anterior, se cumplieron los objetivos presentados en la sección 1.4 del presente trabajo. Por tanto, las conclusiones son las siguientes:

5.1. Casos de estudio - parametrización de cúmulos

- Considerando el análisis realizado en la parametrización de cúmulos, parametrizando BMJ (caso de estudio 1) o sin parametrizar algún esquema (caso de estudio 2), la precipitación horaria resulta ser la variable que tiene correlaciones más cercanas a cero para ambos casos, lo cual es indicador de que el pronóstico se apega muy poco a lo representado por los datos observados. Además, se observó que existe un desfase temporal horario entre lo pronosticado y lo observado. Sin embargo, la correlación es relativamente mejor en la precipitación diaria (para las redes EMAS y SACMEX), pero se obtiene un RMSE con valores de hasta 17.27 mm/día (EMAS) y por otro lado, el estadístico BIAS sobrestima la precipitación con valores de hasta 10.95 mm/día. En ese sentido para ambas redes se obtuvieron resultados más favorables para el caso 2, donde la parametrización se mantiene desactivada.
- Desactivar el esquema cúmulos para el dominio con resolución más fina no tiene mayor impacto para las variables de temperatura y magnitud del viento, en comparación al caso donde se mantiene activado para todos los dominios. Además, la habilidad del modelo para pronóstico de precipitación es mejor en

acumulados diarios que en horarios, pues se presentan constantes desfases en la ocurrencia de los eventos.

- La temperatura es la variable mejor pronosticada y correlacionada para ambos casos de estudio, con un promedio de 0.91 para ambos casos, pero los resultados favorecen más al caso en donde la parametrización de cúmulos se encuentra activada con un valor promedio de 0.92 en comparación del caso 2 con 0.90. Ambos casos de estudio muestran correctamente el comportamiento diario; sin embargo, en la mayoría de las estaciones analizadas se presentan subestimaciones que llegan hasta los 3.35 °C (EMAS). Este resultado es atribuido en gran medida a las condiciones de LULC expuesto en el USGS, uso de suelo empleado en las simulaciones numéricas de ambos casos.
- Por otra parte, los valores del BIAS de la magnitud del viento muestran sobrestimaciones en todas las estaciones con un valor promedio de 3.16 km/h para las estaciones EMAS y 8.96 km/h para las REDMET, siendo 1.53 km/h (EMAS) y 0.37 km/h (REDMET) mayores en promedio para el caso 2 donde se desactiva la parametrización, en comparación con el caso 1. La correlación es en general buena, pero favorece más al caso 1 de estudio con valores promedio de 0.55 para las estaciones EMAS y 0.60 para REDMET, en comparación con el caso 2 que cuenta con valores de 0.53 y 0.57, respectivamente. Sin embargo, se obtuvieron resultados opuestos en el caso del RMSE, por parte de las EMAS pronostica mejor con el caso 1 y para las estaciones REDMET se obtienen mejores resultados con el caso 2.
- De manera general, para las estaciones REDMET y EMAS con el caso 1 se obtienen mejores correlaciones y mayor proximidad de los datos observados, pero el caso 2 sin parametrización mantiene menor valor de sobrestimaciones o subestimaciones. En las estaciones de SACMEX, se obtienen mejores resultados de los tres estadísticos observados para el caso 2.

5.2. Condiciones meteorológicas entre los años 1807 y 2016

- Sobre cuerpos de agua de mayor tamaño como el lago de Texcoco, Chalco y Xochimilco, la magnitud de viento es mayor en el año 1807 como resultado del contraste de rugosidad de la superficie (1807: agua, 2016: cultivos, matorrales y pastizales).

En el área central de la región urbanizada se observa una magnitud de viento mayor en la actualidad, consecuencia de que la rugosidad de la superficie no es el único parámetro modulador.

- En términos de la precipitación, el periodo simulado resulta tener patrones más dispersos en el año 1807 y eventos “explosivos” en el año 2016. En promedio, las diferencias de precipitación horaria no son muy grandes, pero los acumulados diarios llegan a tomar valores de hasta 13.64 mm/día y justamente concuerdan con dichos eventos de mayor precipitación en el periodo.
- Retomando el punto anterior, sí bien es difícil asumir las causas de los mayores montos actuales de precipitación, se pensaría que la vegetación y la presencia del lago marcarían mayores valores de evapotranspiración local y en consecuencia promoverían la lluvia; sin embargo, pueden existir muchos factores,

tales como los núcleos de condensación predominantes en las ciudades. Por ejemplo, Magaña et al. (2003) enuncian que en áreas urbanas como la Ciudad de México la presencia de partículas que actúan como núcleos de condensación podrían ser precursoras de actividad convectiva más intensa. Aunado a ello, Ochoa et al. (2015) mencionan que el aumento del área urbana deviene en el incremento de la concentración de aerosoles, que a su vez favorecen la precipitación.

De manera general, los acumulados de precipitación diaria y horaria son menores en el periodo estudiado para el año 1807, mostrándose con más eventos locales extremos en el año 2016. Respecto a ello, aquí hay que resaltar la dificultad de conseguir datos del año 1807 para tener comparación con los resultados obtenidos por el modelo WRF. Sin embargo, Jáuregui (2000) menciona que los rangos de precipitación (en un sentido climático) fueron menores en el siglo XIX; además, hace referencia a los acumulados locales en torno a sitios específicos dentro de la Cuenca, enfatizando el hecho de que los acumulados podrían depender de su ubicación geográfica. Por lo anterior, se concluye que, respecto a la precipitación se tendría que hacer un estudio más detallado (geográficamente y temporalmente) para realizar un análisis sinóptico que ayude a identificar los patrones asociados a las lluvias en los días de simulación. De acuerdo a lo anterior, es preciso enfatizar que la vegetación potencial presenta patrones espaciales homogéneos, que en gran medida se encuentran favorecidos por el matorral y el pastizal.

- La zona de baja presión causada por el calor ciudadano podría favorecer la convección en la zona urbana y así, la probabilidad de precipitación.
- El análisis horario de temperatura indica como generalidad valores más altos en el año 2016 en comparación con el año 1807, con discrepancias de hasta 0.69 °C.
- Los promedios de temperatura en los periodos diurnos y nocturnos hacen evidentes los contrastes entre la zona urbana y el sistema de lagos. Los valores de temperatura en superficie para la región de la mancha urbana, considerando periodo nocturno y diurno, son siempre mayores en el año 2016 (exaltándose durante la noche); en comparación, el sistema de lagos mantiene diferencias muy marcadas durante ambos periodos, siendo mayores durante la noche y menores durante el día, producto de la capacidad calorífica del cuerpo de agua.
- Los valores promedio del DTR no son indicadores de una gran diferencia respecto a un año del otro (1807 y 2016), posiblemente debido a que en el dominio se presentan zonas con bastante altitud que naturalmente presentan mínimos de temperatura que en relación al resto del dominio, podrían estar suavizando estas diferencias. Así que, particularmente, con el análisis de los puntos virtuales se puede llegar a conclusiones más específicas.

Los puntos virtuales destacan la diferencia entre el sistema de lagos en el año 1807 y la mancha urbana en el año 2016. En relación, el valor máximo del DTR indica un aumento de 4.75 °C del año 1807 (DTR=6.79 °C) al 2016 (DTR=11.54 °C).

5.3. Conclusiones generales

- Respecto a la casi nula disponibilidad de datos históricos observados para la Cuenca de México y con mayor énfasis en el resto del país, es importante validar estudios numéricos que hagan referencia a los diversos escenarios a través de los años. Con ello, podría pensarse en dar una solución parcial a la ausencia de observaciones meteorológicas al emplearse los resultados de los modelos numéricos.
- Los estudios realizados no solamente abren un panorama del cambio en las condiciones meteorológicas, también de las situaciones sociales vinculadas al cambio de cobertura en la superficie. En este contexto, los resultados hacen evidente la presencia de la isla de calor urbano en la Ciudad de México, producto del cambio de cobertura y uso de suelo (*i.e.* aumento de los patrones de temperatura). Es por ello que es en parte inadmisibles no generar políticas lo suficientemente funcionales para la mitigación de ciertos fenómenos; pues, teniendo en mente que no solamente se trata de hechos meramente ambientales, también la urbe debería de tornar sus perspectivas a dar soluciones que propongan, en un sentido multidisciplinario, mejoras a lo ya establecido.

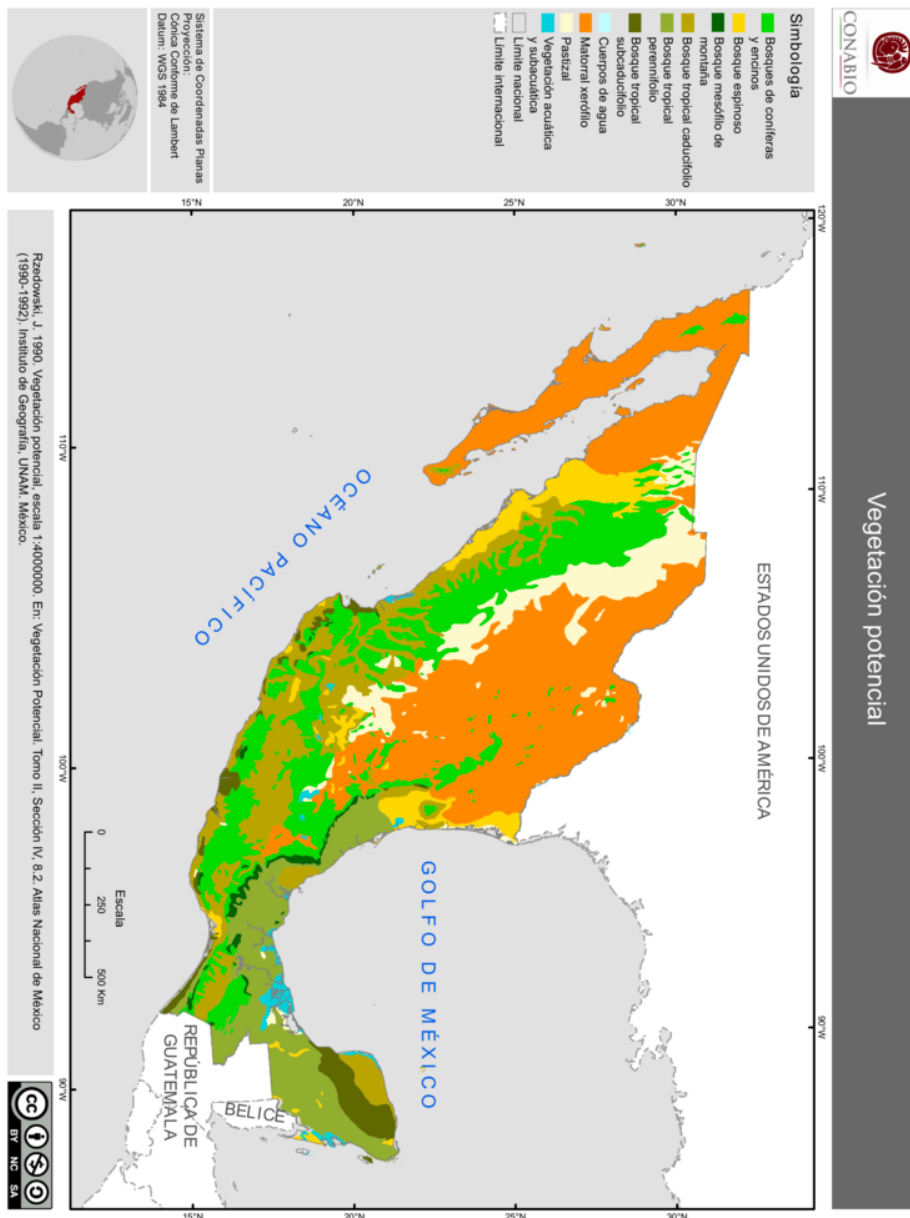
5.4. Recomendaciones

A partir de esta investigación se pueden visualizar diversas mejoras:

- Realizar un estudio más profundo y robusto para un periodo más largo de simulación para determinar cuál de los dos casos (mantener la parametrización de cúmulos activada o no) pronostica mejor el caso de la precipitación.
- Actualizar el uso de suelo de la simulación del año 2016 a condiciones más representativas de la República Mexicana y considerar la posibilidad de que dicha actualización sea constante en términos temporales.
- Bajo la idea de que la homogeneidad del uso de suelo en el caso del año 1807 promueve que los resultados no oscilen en gran medida para algunos sitios, en algunos casos de estudio lo recomendable sería la estructuración de las condiciones estáticas diferentes a lo propuesto por la vegetación potencial.

Apéndice A

Mapa de vegetación potencial propuesto por Rzedowski



Apéndice B

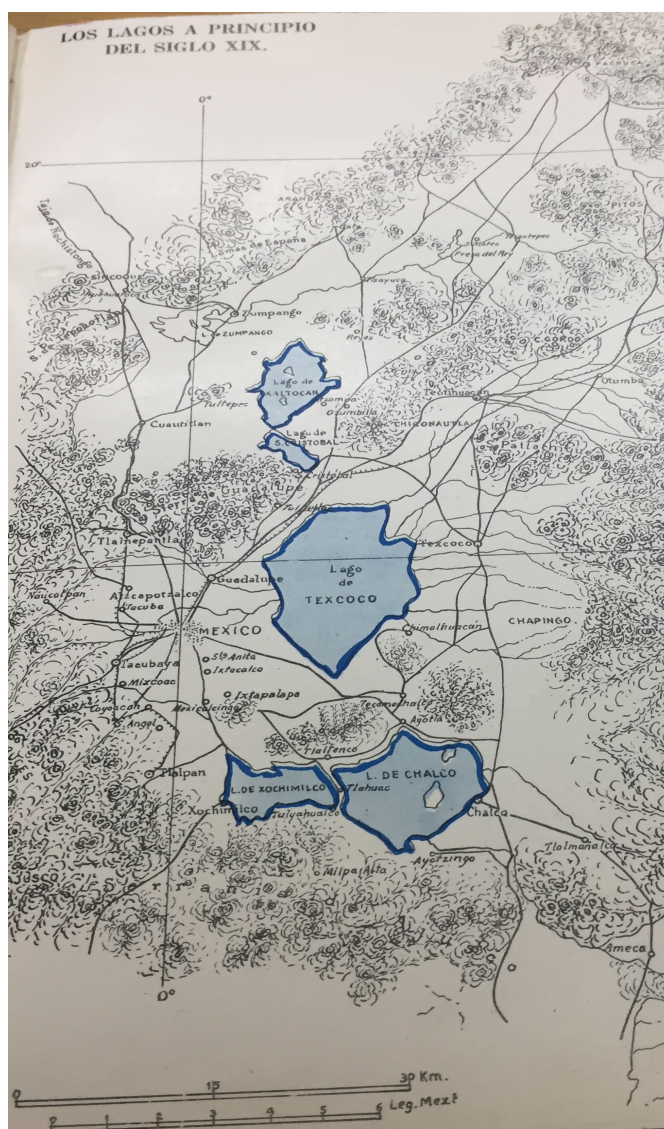
Propuesta de Alexander Von Humboldt de las condiciones de la Nueva España en el año 1804



Tomado de Von Humboldt (1810)

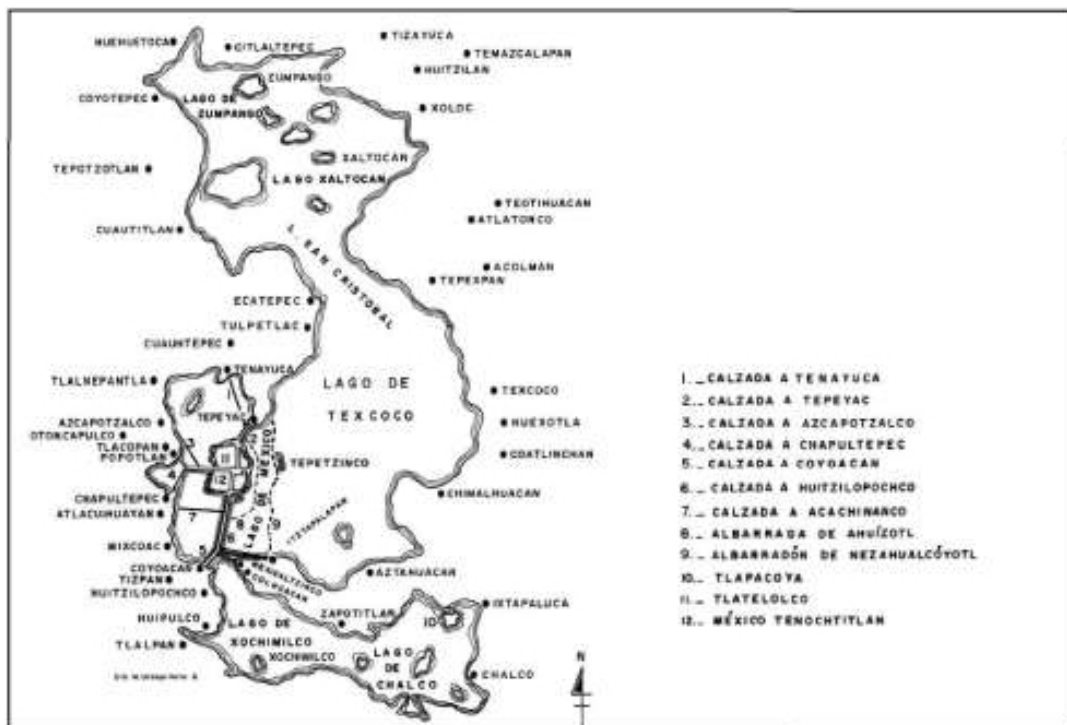
Apéndice C

Extracto del mapa propuesto por Ubaldo Vargas respecto a las condiciones del sistema de lagos a principios del siglo XIX



Apéndice D

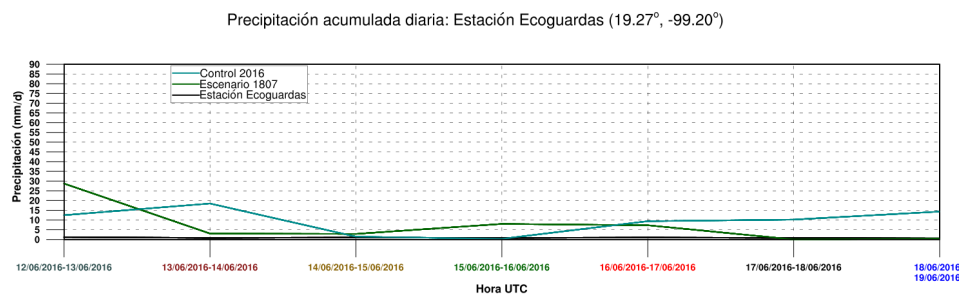
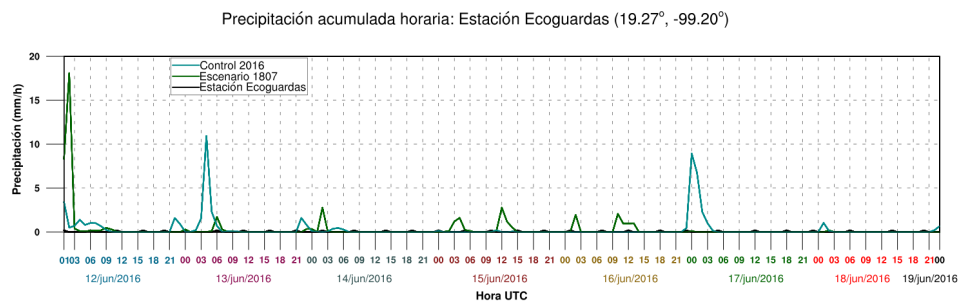
El sistema de lagos en el siglo XVI



Tomado de Ahuatzin (2007)

Apéndice E

Estaciones con datos inconsistentes



Bibliografía

- Ahuatzin, B. (2007). *Dioses, reyes, hombres y agua en el México antiguo*.
- American Meteorological Glossary (2012). *Surface Boundary Layer*. Recuperado el 2018/12/21 de: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Surface_boundary_layer.
- Angel, S. J., D. L. Parent y A. M. Blei (s.f.). *Atlas of Urban Expansion*. Recuperado el 2018/12/21 de: <http://www.lincolnst.edu/subcenters/atlas-urban-expansion/>.
- Arnfield, A. J. (2003). "Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island". *International journal of climatology*.
- Barradas, V. (2019). *La isla de calor urbana y la vegetación arbórea*. Recuperado el 2020/04/15 de: <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/todos-los-numeros/numeros-antteriores/47-la-isla-de-calor-urbana-y-la-vegetacion-arborea>.
- Batani, S.M. y D Entekhabi (2012). "Relative efficiency of land surface energy balance components". *Water Resources Research* 48.4.
- Behzadi, Faranak, Asphota Wasti, Saiful Haque Rahat, Jacob N Tracy y Patrick A Ray (2020). "Analysis of the climate change signal in Mexico City given disagreeing data sources and scattered projections". *Journal of Hydrology: Regional Studies* 27, pág. 100662.
- Benson-Lira, V., M. Georgescu, S. Kaplan y E.R. Vivoni (2016). "Loss of a lake system in a megacity: The impact of urban expansion on seasonal meteorology in Mexico City". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121.7, págs. 3079-3099.
- Birkle, P., V. Torres y E. González-Partida (dic. de 1998). "The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption". *Hydrogeology Journal* 6, págs. 500-517. DOI: 10.1007/s100400050171.
- Bonilla-Moheno, M., D. J. Redo, T. M. Aide, M. L. Clark y H. R. Grau (2013). "Vegetation change and land tenure in Mexico: A country-wide analysis". 30(1), págs. 355-364.
- Braganza, K., D. J. Karoly y J. M. Arblaster (2004). "Diurnal temperature range as an index of global climate change during the twentieth century", 31(13).
- Cao, Meichun y Zhaohui Lin (2014). "Impact of urban surface roughness length parameterization scheme on urban atmospheric environment simulation". *Journal of Applied Mathematics*.
- Chen, F. (2007). *The Noah Land Surface Model in WRF*. Recuperado el 2018/12/21 de: <https://www.atmos.illinois.edu/~snesbitt/ATMS597R/notes/noahLSM-tutorial.pdf>. NCAR.
- Chen, S. y J. Dudhia (2000). "WRF PHYSICS".

- Chiarucci, A., M. Araújo, G. Decocq, C. Beierkuhnlein y J. M. Fernández-Palacios (2010). "The concept of potential natural vegetation: an epitaph?" *Journal of Vegetation Science* 21.6, págs. 1172-1178.
- Chomel, H. y V. Hernández (1988). *La Ciudad de México y su Valle*.
- CONABIO (2019a). *Matorrales*. Recuperado el 2019/02/20 de: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/Matorral>.
- (2019b). *Pastizales*. Recuperado el 2019/02/20 de: <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/pastizales>.
- CONAGUA (2010). *Compendio del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII*. México, CONAGUA, pág. 91.
- Cárcar Irujo, A. I. (2013). "Las reformas agrarias en México y los proyectos de desarrollo rural en un municipio del Estado de Veracruz", pág. 38.
- Davie, Tim y Nevil Wyndham Quinn (2019). *Fundamentals of hydrology*. Routledge.
- Deng, X., B. Güneralp, J. Zhan y H. Su (2014). *Land Use Impacts on Climate*. Springer Geography. Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 9783642548765.
- Digman, SL (2002). *Physical Hydrology*.
- Dirección General de Divulgación de la Ciencia (s.f.). *La UNAM te explica: La historia hidrológica de la Cuenca de México*. Recuperado el 2020/04/15 de: <https://www.fundacionunam.org.mx/ecopuma/la-unam-te-explica-la-historia-hidrologica-de-la-cuenca-de-mexico/>.
- Dong, Na, Zhen Liu, Ming Luo, Chaoyang Fang y Hui Lin (2019). "The effects of anthropogenic land-use changes on climate in China driven by global socioeconomic and emission scenarios". *Earth's Future*.
- Downing, M. (2009). *The climate of Cities*. California Polytechnic State University.
- Drescher, A. y D. Iaquina (2002). "Urbanization-linking development across the changing landscape".
- Dudhia, J. (s.f.). *Overview of WRF Physics*. Recuperado el 2019/02/07 de: http://homepages.see.leeds.ac.uk/~lecag/wiser/sample_wiser_files.dir/Physics_Dudhia.ppt.pdf.
- Duveiller, G., J. Hooker y A. Cescatti (2018). "The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance". 9(1), pág. 679.
- Elissalde, B. (2004). *Metropolización*. Recuperado el 2018/05/16 de: <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article170>.
- Ellis, Erle y Robert Pontius (2007). *Land-use and land-cover change*. Encyclopedia of Earth. Eds. Cutler J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). Primera publicación en Encyclopedia of Earth 17 de Julio, 2006; Última revisión 10 de agosto, 2007. Recuperado el 2019/01/20 de: http://www.eoearth.org/article/Land-use_and_land-cover_change.
- ESRI (2016). *Cross Validation*. Recuperado el 2019/02/19 de: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/geostatistical-analyst-toolbox/cross-validation.htm>.
- Ezcurra, E. (2003). "De las chinampas a la megalópolis: El medio ambiente en la cuenca de México", pág. 120.
- Ezcurra, E., M. Mazari-Hiriart, I. Pisanty y A. G. Aguilar (1999). "The Basin of Mexico: critical environmental issues and sustainability".
- Ezcurra, Exequiel (1992). "Crecimiento y colapso en la cuenca del Valle de México". Recuperado el 2019/02/12 de: <http://www.revistaciencias.unam.mx/pt/173-revistas/revista-ciencias-25/1592-crecimiento-y-colapso-en-la-cuenca-de-m0C3A9xico.html>, págs. 12-27.

- Galicia, L. (2014). "El cambio de uso de suelo: consecuencias en el ciclo hidrológico y la disponibilidad de agua". 82, págs. 15-18.
- Grupo Interacción Océano-Atmósfera (2017). *Meteorología*. Recuperado el 2020/05/05 de:
<http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/meteorologia>.
- Hurt, G. C., L. P. Chini, S. Frolking, R. A. Betts, J. Feddema, G. Fischer y C. D. Jones (2011). "Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands". *Climatic change*, pág. 109.
- Imaz, Mireya (1989). "Historia natural del Valle de México". *Ciencias* 015.
- INEGI (2015). *Encuesta intercensal 2015*. Recuperado el 2020/01/20 de: <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/default.html#Documentacion>.
- Jazcilevich, A., V. Fuentes, E. Jauregui y E. Luna (2000). *Climatic Change*, págs. 515-536.
- Jorba Casellas, O. (s.f.). *Metodología para la evaluación del modelo de pronóstico meteorológico*. Recuperado el 2019/02/19 de: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6836/110jc11de12.pdf?sequence=11&isAllowed=y>.
- Junta Directiva (1902). *Memoria Histórica, Técnica y Administrativa de las Obras del Desagüe del Valle de México: 1449-1900. Vol. II*.
- Jáuregui, E. (2000). "El clima de la ciudad de México".
— (2004). "Impact of land-use changes on the climate of the Mexico City Region". *Investigaciones Geográficas*.
- Kan, Yu, Chaoshun Liu, Yanan Liu y Cong Zhou (2015). "Evaluation of WRF microphysics and cumulus parameterization schemes in simulating a heavy rainfall event over Yangtze River delta". *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XII*. Vol. 9610. International Society for Optics y Photonics, 96100R.
- Kozich, Peter J (2010). "Overview of Mexico City meteorological conditions using observations and numerical simulations". Tesis doct. Saint Louis University.
- Leroy, S. (2000). "Sémantiques de la métropolisation". *L'Espace géographique* 29.1, págs. 78-86.
- Li, K, Michael Coe, Navin Ramankutty y R De Jong (abr. de 2007). "Modeling the Hydrological Impact of Land-use Change in West Africa". *Journal of Hydrology* 337, 258–268. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2007.01.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.038).
- López-Espinoza, Erika, Angel Ruiz-Angulo, Jorge Zavala-Hidalgo, Rosario Romero-Centeno y Josefina Escamilla-Salazar (2019). "Impacts of the Desiccated Lake System on Precipitation in the Basin of Mexico City". *Atmosphere* 10.10, pág. 628.
- López-Bravo, C., E. Caetano, y V. Magaña (2018). "Forecasting Summertime Surface Temperature and Precipitation in the Mexico City Metropolitan Area: Sensitivity of the WRF Model to Land Cover Changes". *Front. Earth Sci.*
- López-Espinoza, E. D., J. Zavala-Hidalgo y O. Gómez-Ramos (2012). "Weather forecast sensitivity to changes in urban land covers using the WRF model for central Mexico". *Atmósfera*, págs. 127-154.
- Magaña, Víctor, Joel Pérez y Matías Méndez (2003). "Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin". *Geofísica Internacional* 42.2, págs. 247-259.
- Mahmood, R., R. A. Pielke, K. G. Hubbard, D. Niyogi, P. A. Dirmeyer, C. McAlpine y B. Baker (2014). "Land cover changes and their biogeophysical effects on climate". *International Journal of Climatology*.
- Malthus, T.R. (1798). *An Essay on the Principle of Population as It*, pág. 6.

- Martinez, Sandra, Stefanie Kralisch, Oscar Escolero y Maria Perevochtchikova (2015). "Vulnerability of Mexico City's water supply sources in the context of climate change". *Journal of Water and Climate Change* 6.3, págs. 518-533.
- Martínez, U. V. (1961). *La ciudad de México, 1325-1960*. Departamento del Distrito Federal.
- Mas, J. F., A. Velázquez, J. R. Díaz-Gallegos, R. Mayorga-Saucedo, C. Alcántara, G. Bocco y A. Pérez-Vega (2004). "Assessing land use/cover changes: a nationwide multivariate spatial database for Mexico". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, págs. 249-261.
- Merlín, Y., A. Contreras-Hernández, M. Astier-Calderón, O. P. Jensen, R. Zaragoza y L. Zambrano (2013). "Urban expansion into a protected natural area in Mexico City: alternative management scenarios". *Journal of environmental planning and management*, págs. 398-411.
- Meteored (s.f.). *Modelos de predicción numérica*. Recuperado el 2020/05/05 de: <https://www.meteored.mx/modelos/mx-mexico-wrf-83.htm>.
- Mohan, Manju y Shweta Bhati (2011). "Analysis of WRF model performance over subtropical region of Delhi, India". *Advances in Meteorology* 2011.
- National Research Council (1995). *Mexico City's Water Supply; Improving the Outlook for Sustainability*. <https://doi.org/10.17226/4937>. Washington, DC: The National Academies Press.
- NCARG (s.f.). *Weather Research and Forecasting Model*. Recuperado el 2018/01/15 de: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>.
- Nicholas, Francis W. y John E Lewis (1980). *Relationships between aerodynamic roughness and land use and land cover in Baltimore, Maryland*. USGPO.
- NOAA (2014). *Climate Models*. Recuperado el 2018/01/05 de <https://www.climate.gov/maps-data/primer/climate-models>.
- Ochoa, Carlos A, Arturo I Quintanar, Graciela B Raga y Darrel Baumgardner (2015). "Changes in intense precipitation events in Mexico City". *Journal of Hydrometeorology* 16.4, págs. 1804-1820.
- Orozco, M. (1864). "Memoria para la carta hidrográfica del Valle de México: Formada por acuerdo de la Soc. mexicana de geografía y estadística por Manuel Orozco y Berra.", págs. 134-135.
- Pyka, R. (2013). "Minimizing the side effects of the metropolization as a condition for maintenance of transition and resilience in Post-industrial Agglomerations". *Journal of Economics and Management*, págs. 121-136.
- Qu, R., X. Cui, H. Yan, E. Ma y J. Zhan (2013). "Impacts of land cover change on the near-surface temperature in the North China Plain". *Advances in Meteorology*.
- Randall, D. (2017). *An Introduction to Numerical Modeling of the Atmosphere*.
- Ruiz-Angulo, A. y E. D. López-Espinoza (2015). "Estimación de la respuesta térmica de la cuenca lacustre del Valle de México en el siglo XVI: un experimento numérico". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, págs. 215-225.
- Rzedowski, J. (1990a). *Vegetación potencial*. Recuperado el 2018/12/21 de: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/vpr4mgw.xml?httpcache=yes&xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&indent=no.
- (1990b). *Vegetación Potencial IV.8.2*. Instituto de Geografía, UNAM. México. Escala 1:4000000.
- Secretaría de Economía (2013). *NMX-AA-166/1-SCFI-2013. Estaciones meteorológicas, climatológicas e hidrológicas. Parte 1: especificaciones técnicas que deben cumplir los materiales e instrumentos de medición de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales, México*.

- Sellers, P. J., R. E. Dickinson, D. A. Randall, A. K. Betts, F. G. Hall, J. A. Berry y N. Sato (1997). "Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere". 275(5299), págs. 502-509.
- Servicio Meteorológico Nacional (s.f.). *Modelos de pronóstico numérico*. Recuperado el 2020/05/05 de: <https://smn.conagua.gob.mx/es/modelos-de-pronostico-numerico/modelos-de-pronostico-numerico>.
- Sistema de Monitoreo Atmosférico (s.f.). *Bases de datos- Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)*. Recuperado el 2019/01/13 de: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=27aKBi27>.
- Suárez, M. y J. Delgado (2007). "La expansión urbana probable de la Ciudad de México. Un escenario pesimista y dos alternativos para el año 2020", págs. 101-142.
- Szeto, K. (2002). "An Overview of Atmospheric Models".
- UCAR (s.f.[a]). *ARWUsersGuideV3.9*. Recuperado el 2018/01/15 de: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3.9/ARWUsersGuideV3.9.pdf.
- (s.f.[b]). *User's Guide for Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 2*. Recuperado el 2018/01/15 de: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide/users_guide_chap3.html.
- UCAR (2020). *Weather Research and Forecasting Model (WRF)*. Recuperado el 2020/04/15 de: <https://ral.ucar.edu/solutions/products/weather-research-and-forecasting-model-wrf>.
- UCAR (s.f.[c]). *WRF-ARW Online tutorial*. Recuperado el 2019/01/07 de: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/>.
- (2017). *WRF Model GRAPHIC TOOLS*. Recuperado el 2018/01/01 de: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/graphics/WRF-post-processing.htm>.
- USGS (s.f.). *USGS EROS Archive- Land Cover Products- Global Land Cover Characterization*. Recuperado el 2019/01/07 de: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-land-cover-products-global-land-cover-characterization-glcc?qt-science_center_objects=0qt-science_center_objects.
- Velázquez, A., J. F. Mas, J. R. Díaz Gallegos, R. Mayorga Saucedo, Castro R. Alcántara P. C. y J. L. Palacio (2002). "Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México". *Gaceta ecológica*.
- Von Humboldt, A. (1810). *Plateau de la Ville de Mexico jusqu'au Port de la Veracruz*. Mapa recuperado el 2018/01/01 de: David Rumsey Historical Map Collection (http://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~1874~170012:Plateau-de-la-Ville-de-Mexico-jusqu?sort=Pub_Date2CPub_List_No_InitialSortqvq=q:List_No3D270328.00927222B;sort:Pub_Date2CPub_List_No_InitialSort;lc:RUMSEY~8~1mi=0trs=1).
- Von Humboldt, A. y V. G. Arnao (1827). *Ensayo político sobre la Nueva España*. Vol. 3. Renouard.
- Ward, D. S., N. M. Mahowald y S. Kloster (2014). "Potential climate forcing of land use and land cover change."
- Willmott, Cort J y Kenji Matsuura (2005). "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance". *Climate research* 30.1, págs. 79-82.
- Xin, X. y Q. Liu (2010). "The Two-layer Surface Energy Balance Parameterization Scheme (TSEBPS) for estimation of land surface heat fluxes". *Hydrology and Earth System Sciences*, pág. 491.
- Zar, Jerrold H (2010). *Biostatistical analysis*. Pearson Education India.

Zhao, D.M. y J. Wu (2018). "Evaluating the impacts of land use and land cover changes on surface air temperature using the WRF-mosaic approach", págs. 1-31.