



UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MEXICO

Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua

Maestría en Ciencias del Agua

Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

Tesis

**Efecto del cambio de uso del suelo y la isla de calor urbana en la
dinámica espacio-temporal de las lluvias en el Curso Alto de la
Cuenca Alta del Río Lerma**

Presenta:

Ana Gabriela Godinez Tovar

Director de tesis:

Dr. Carlos Alberto Mastachi Loza

Codirectores:

Dr. Ricardo Arévalo Mejía

Dra. Rocío Becerril Piña

Toluca de Lerdo, Septiembre de 2022

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
3. HIPÓTESIS	13
4. OBJETIVOS	13
4.1. Objetivo general.....	13
4.2. Objetivos específicos	13
5. ANTECEDENTES	14
5.1. La UHI en el contexto internacional.....	14
5.1.1. UHI atmosférica.....	14
5.1.2. UHI de superficie.....	15
5.2. Estudios de la UHI en México	16
5.2.1. UHI atmosférica.....	16
5.2.2. UHI de superficie	17
5.3. Casos de estudio de UHI en Toluca	18
5.3.1. UHI atmosférica.....	18
5.3.2. UHI de superficie	18
5.4. Estudios de la UHI y su impacto en la precipitación.....	18
5.5. Estudios del cambio de uso de suelo y su impacto en la precipitación	20
6. MARCO TEORICO Y CONCEPTOS OPERATIVOS	22
6.1. Cambio de uso de suelo	22
6.1.1. Descripción.....	22
6.1.2. Impactos del cambio de uso de suelo	22
6.2. Precipitación	23
6.2.1. Tipos de lluvia.....	24
6.2.2. Características de la lluvia convectiva	24
6.2.3. Caracterización de patrones de lluvia	25
6.3. Isla de Calor Urbana como consecuencia de la urbanización.....	26
6.3.1. Como se forma la UHI.....	27
6.3.2. Diferencias entre UHI Atmosférica y UHI de Superficie	28
6.4. Métodos para estudiar el comportamiento de la UHI.....	29
6.5. Tendencias	31
6.5.1. Theil-Sen	31
6.5.2. Mann-Kendall.....	31
6.6. Análisis de serie de tiempo	33
6.7. Políticas públicas sobre cambio climático	36

6.7.1.	Políticas públicas en el marco internacional	36
6.7.2.	Políticas públicas en el marco nacional-estatal	37
6.8.	Adaptación y mitigación ante la UHI.....	38
6.8.1.	Propuestas internacionales	38
6.8.2.	Propuestas nacionales	39
7.	MATERIALES Y MÉTODO.....	40
7.1.	Descripción del área de estudio.....	40
7.2.	Método	46
7.2.1.	Fase de pre-procesamiento de datos	46
7.2.2.	Fase de procesamiento de datos	50
7.2.3.	Fase de análisis de datos	55
7.2.4.	Integración de resultados	62
8.	RESULTADOS	63
8.1.	Análisis de temperatura de superficie y de temperatura atmosférica máxima	63
8.2.	Análisis de Serie de Tiempo.....	66
8.2.1.	Temperatura de superficie	69
8.2.2.	Temperatura atmosférica máxima.....	70
8.2.3.	Temperatura atmosférica mínima	70
8.2.4.	Componentes de lluvia	71
8.3.	Análisis de cambio de uso de suelo	72
8.4.	Efecto de la UHI sobre la lluvia en la CACARL	74
8.4.1.	Puntos cálidos emergentes con cambio de uso de suelo.....	74
8.4.2.	Correlación de UHI y lluvia.....	78
8.4.3.	Efecto del cambio de uso de suelo en la temperatura y la lluvia	84
9.	DISCUSIONES.....	94
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	95
11.	BIBLIOGRAFÍA	97

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ELEMENTOS QUE COMPONEN UNA SERIE DE TIEMPO: TENDENCIA, ESTACIONALIDAD Y COMPONENTE DE DEPENDENCIA ESTOCÁSTICA.....	33
FIGURA 2. EJEMPLO DE VARIACIÓN ESTACIONAL (LÍNEA NARANJA).....	34
FIGURA 3. EJEMPLO DE VARIACIONES CON PICOS EXTRAORDINARIOS (LÍNEA VERDE).....	34
FIGURA 4. EJEMPLO DE RESIDUAL INDEPENDIENTE (LÍNEA AZUL)	35
FIGURA 5. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	40
FIGURA 6. ÁREA URBANA EN LA CACARL DEL AÑO 2016 CON INFORMACIÓN DE INEGI, TOMADA DEL GEOPORTAL DE CONABIO	41
FIGURA 7. POBLACIÓN POR LOCALIDAD EN LA CACARL PARA 1995 Y 2010	42
FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÉTODO APLICADO	46
FIGURA 9. UNIÓN DE LOS MOSAICOS QUE CONFORMAN LA REPÚBLICA MEXICANA	47
FIGURA 10. TRANSFORMACIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA A CÓNICA CONFORME DE LAMBERT	47
FIGURA 11. SELECCIÓN DE IMÁGENES DE TEMPERATURA. A) ES UNA IMAGEN SELECCIONADA, MIENTRAS QUE LA IMAGEN B) MUESTRA ALGUNAS PARTES CON AUSENCIA DE DATOS LO QUE LA DESCARTA	48
FIGURA 12. RECORTE Y RE-PROYECCIÓN DE LAS IMÁGENES DE TEMPERATURA MÁXIMA	48
FIGURA 13. CORTE DE LA IMAGEN DE TEMPERATURA MÁXIMA AL ÁREA DEL ESTADO DE MÉXICO	49
FIGURA 14. CAMBIO DE SISTEMA DE COORDENADAS Y CORTE AL ÁREA DEL ESTADO DE MÉXICO, RESPECTIVAMENTE	49
FIGURA 15. CONJUNTO DE DATOS VECTORIALES DE USO DE SUELO. INEGI.....	50
FIGURA 16. DIAGRAMA DEL ALGORITMO DE DIRECCIÓN DE FLUJO	51
FIGURA 17. DIAGRAMA DEL ALGORITMO DE DIRECCIÓN DE FLUJO INVERSO	51
FIGURA 18. SELECCIÓN DE CELDAS QUE CUBREN LA CACARL	52
FIGURA 19. LOS PUNTOS MÁS CÁLIDOS EN LA CUENCA DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE SE PUEDEN APRECIAR EN COLOR NARANJA	52
FIGURA 20. IMAGEN RESULTANTE DE LA SUMA DE PRECIPITACIÓN DIARIA PARA EL MES DE MAYO DEL 2000... 53	53
FIGURA 21. EJEMPLO DE LA SUMA DE RECLASIFICACIÓN DE DÍAS CON LLUVIA PARA EL MES DE MAYO DEL 2000	54
FIGURA 22. EJEMPLO DE UN CUBO DE PUNTOS CALIENTES EMERGENTES	56
FIGURA 23. DIAGRAMA DE ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO	59
FIGURA 24. ANÁLISIS DE CAMBIO DE USO DE SUELO DE 1993 A 2014 EN LA CACARL.....	61
FIGURA 25. PUNTOS CÁLIDOS EMERGENTES DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE Y TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA, RESPECTIVAMENTE	63
FIGURA 26. GRAFICA CON EL MÍNIMO, MÁXIMO, MEDIANA Y MEDIA DEL COMPORTAMIENTO DEL NÚMERO DE UHI DE SUPERFICIE PARA CADA MES, DEL 2000 AL 2019.....	65
FIGURA 27. GRÁFICA CON EL MÍNIMO, MÁXIMO, MEDIANA Y MEDIA DEL COMPORTAMIENTO DEL NÚMERO DE UHI ATMOSFÉRICA MÁXIMA PARA CADA MES DEL 2000 AL 2019	65
FIGURA 28. MODULO PARA INGRESAR LAS IMÁGENES DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE Y CONVERTIRLAS EN FORMATO *.MAT PARA SU POSTERIOR ANÁLISIS	66
FIGURA 29. MODULO PARA INGRESAR IMÁGENES DAYMET Y EXPORTARLAS EN FORMATO *.MAT PARA SU POSTERIOR ANÁLISIS	67
FIGURA 30. MODULO PARA ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE, ATMOSFÉRICA MÁXIMA Y COMPONENTES DE LLUVIA	67
FIGURA 31. EJEMPLO DE SELECCIÓN DE PÍXEL EN UN ANÁLISIS DE SERIE DE TIEMPO PARA EL MES DE OCTUBRE 68	68
FIGURA 32. LA SECCIÓN DE ANÁLISIS POR IMAGEN PERMITE EXPORTAR LAS IMÁGENES RESULTANTES DEL ANÁLISIS.....	69
FIGURA 33. MAPA DE AMPLITUD SIGNIFICATIVA PARA LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE	69
FIGURA 34. MAPA DE AMPLITUD SIGNIFICATIVA PARA LA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA.	70
FIGURA 35. MAPA DE AMPLITUD SIGNIFICATIVA PARA LA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÍNIMA.....	70

FIGURA 36. MAPA DE AMPLITUD DE LA SERIE DE FOURIER DE LA LLUVIA TOTAL ACUMULADA.....	71
FIGURA 37. MAPA DE AMPLITUD DE LA SERIE DE FOURIER DEL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA	72
FIGURA 38. GANANCIAS Y PÉRDIDAS EN KM ² ENTRE 1993 Y 2014 EN LA CACARL	72
FIGURA 39. MAPA DE PUNTOS CÁLDIDOS EMERGENTES DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE CON USOS DE SUELO QUE CAMBIARON DE 1993 A 2014.....	74
FIGURA 40. MAPA DE PUNTOS CÁLDIDOS EMERGENTES DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE CON USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON DE 1993 A 2014.....	75
FIGURA 41. MAPA DE PUNTOS CÁLDIDOS EMERGENTES DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA CON USOS DE SUELO QUE CAMBIARON DE 1993 A 2014	75
FIGURA 42. MAPA DE PUNTOS CÁLDIDOS EMERGENTES DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA CON USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON DE 1993 A 2014.....	76
FIGURA 43. MAPA DE PUNTOS CÁLDIDOS EMERGENTES DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÍNIMA CON LOS USOS DE SUELO QUE CAMBIARON DE 1993 A 2014	77
FIGURA 44. MAPA DE PUNTOS CÁLDIDOS EMERGENTES DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÍNIMA CON LOS USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON DE 1993 A 2014	77
FIGURA 45. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL A ASENTAMIENTO HUMANO.....	79
FIGURA 46. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA BOSQUE A BOSQUE SECUNDARIO	79
FIGURA 47. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA PASTIZAL A AGRICULTURA DE TEMPORAL.....	80
FIGURA 48. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA AGRICULTURA DE RIEGO A ASENTAMIENTO HUMANO	80
FIGURA 49. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA AGRICULTURA DE RIEGO	81
FIGURA 50. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL.....	81
FIGURA 51. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA ASENTAMIENTO HUMANO.....	82
FIGURA 52. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA BOSQUE.....	82
FIGURA 53. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA BOSQUE SECUNDARIO	83
FIGURA 54. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA CUERPO DE AGUA.....	83
FIGURA 55. MATRIZ DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA DE SUPERFICIE (LST), TEMPERATURA ATMOSFÉRICA MÁXIMA (TMAX), LLUVIA TOTAL ACUMULADA (LLTOT) Y NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA (NDLL) PARA USO DE SUELO QUE CAMBIÓ DE 1993 A 2014, PARA PASTIZAL.....	84

FIGURA 56. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LA LLTOT POR USO DE SUELO QUE CAMBIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	85
FIGURA 57. VARIACIÓN DE AMPLITUD DEL NDLL POR USO DE SUELO QUE CAMBIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	85
FIGURA 58. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LST POR USO DE SUELO QUE CAMBIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	86
FIGURA 59. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE TMAX POR USO DE SUELO QUE CAMBIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	87
FIGURA 60. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE TMIN POR USO DE SUELO QUE CAMBIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	87
FIGURA 61. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LLTOT POR USO DE SUELO QUE PERMANECIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	88
FIGURA 62. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE NDLL POR USO DE SUELO QUE PERMANECIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	89
FIGURA 63. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE LST POR USO DE SUELO QUE PERMANECIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	89
FIGURA 64. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE TMAX POR USO DE SUELO QUE PERMANECIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	90
FIGURA 65. VARIACIÓN DE AMPLITUD DE TMIN POR USO DE SUELO QUE PERMANECIÓ EN UN PERIODO DE 1993 A 2014.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LA UHI DE SUPERFICIE Y LA UHI ATMOSFÉRICA (EPA, 2015).....	28
TABLA 2. RECATEGORIZACIÓN DE USO DE SUELO DE LAS SERIE II Y SERIE VI DE INEGI.....	54
TABLA 3. CLASIFICACIÓN ESTADÍSTICA SIGNIFICATIVA DE LOS PUNTOS EMERGENTES Y CLASIFICACION DE ENDENCIA ESTADISTICA CON GRADO DE CONFIANZA	56
TABLA 4. CLASIFICACIÓN DE LAS 16 CATEGORÍAS DE PUNTOS EMERGENTES FRÍOS Y CÁLIDOS DE LA HERRAMIENTA DE ARCGIS	57
TABLA 5. TABLA CRUZADA DE 9 CATEGORÍAS DE USO DE SUELO EN LA CUENCA ALTA DEL CARL DE 1993 A 2014 EN KM ² (EN NEGRITAS ÁREAS MAYORES A 100 KM ² CON CAMBIO).....	73
TABLA 6. PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE USO DE SUELO DE 1993 A 2014 CON DATOS TOMADOS DE LA SERIE II Y VI DE INEGI	73
TABLA 7. CORRELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIE, TEMPERATURA ATMOSFÉRICA, LLUVIA TOTAL ACUMULADA Y EL NÚMERO DE DÍAS CON LLUVIA EN LOS DIFERENTES USOS DE SUELO PARA LA CACARL	78
TABLA 8. PRUEBA DE MANN-WHITNEY A AMPLITUD DE LLTOT PARA USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON (CONTROL) CON LOS USOS DE SUELO QUE CAMBIARON (TRATAMIENTO), CON UN PERIODO DE 1993 A 2014.	91
TABLA 9. PRUEBA DE MANN-WHITNEY A AMPLITUD DE NDLL PARA USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON (CONTROL) CON LOS USOS DE SUELO QUE CAMBIARON (TRATAMIENTO), CON UN PERIODO DE 1993 A 2014	92
TABLA 10. PRUEBA DE MANN-WHITNEY A AMPLITUD DE LST PARA USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON (CONTROL) CON LOS USOS DE SUELO QUE CAMBIARON (TRATAMIENTO), CON UN PERIODO DE 1993 A 2014	92
TABLA 11. PRUEBA DE MANN-WHITNEY A AMPLITUD DE TMAX PARA USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON (CONTROL) CON LOS USOS DE SUELO QUE CAMBIARON (TRATAMIENTO), CON UN PERIODO DE 1993 A 2014.	93
TABLA 12. PRUEBA DE MANN-WHITNEY A AMPLITUD DE TMIN PARA USOS DE SUELO QUE PERMANECIERON (CONTROL) CON LOS USOS DE SUELO QUE CAMBIARON (TRATAMIENTO), CON UN PERIODO DE 1993 A 2014.	93

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- AH.** Asentamiento Humano
- AR.** Agricultura de Riego
- AT.** Agricultura de Temporal
- AUHI.** Isla de calor atmosférica
- B.** Bosque
- BS.** Bosque Secundario
- CA.** Cuerpo de Agua
- CACARL.** Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma
- CDMX.** Ciudad de México
- CMNUCC.** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- ENCC.** Estrategia Nacional de Cambio Climático
- IPCC.** Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
- LLTOT.** Lluvia Total Acumulada
- LST.** Land Surface Temperature
- NDLL.** Número de Días con Lluvia
- ONU.** Organización de las Naciones Unidas
- P.** Pastizal
- SUHI.** Isla de calor de superficie
- UHI.** Isla de Calor Urbana
- ZMVT.** Zona Metropolitana del Valle de Toluca, Zona Metropolitana del Valle de Toluca

1. INTRODUCCIÓN

La densificación y expansión de las manchas urbanas a nivel mundial ha traído como consecuencia la modificación de las características físicas del medio natural (cambio de uso de suelo, infiltración y reducción del tamaño de cuerpos de agua) y variables climáticas (Landsberg, 1981; Shepherd et al., 2002; Ochoa et al., 2015; Baumgardner & Raga, 2016). La temperatura, la dirección y velocidad del viento, la humedad relativa y el régimen de precipitación han modificado su dinámica local en sitios urbanos (Esparza & Sosa, 2017). En particular, el régimen de precipitación se ve afectado tanto en su intensidad como en su frecuencia (Guo et al., 2006; Chen et al., 2018; Tovar et al., 2019), e influye en la intensidad de la Isla de Calor Urbana (UHI, por sus siglas en inglés) (Gu & Li, 2018).

Lo anterior se debe principalmente al uso de materiales de construcción artificiales e impermeables que absorben y retienen la radiación solar (Devanathan, P. & Devanathan, K., 2011). Al mismo tiempo, la reducción de cubiertas vegetales propician el incremento de la temperatura de superficie (Mohajerani et al., 2017). Adicionalmente, las emisiones de gases de efecto invernadero elevan la temperatura de la atmosfera (Henaio et al., 2019).

Actualmente, las investigaciones sobre los efectos de la UHI han aumentado. Sin embargo, pocos estudios se han enfocado a la evolución de la UHI y el cambio de uso de suelo que tienen efecto en los patrones de precipitación. El propósito de esta investigación es analizar la evolución de la UHI en el Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma (CACARL), debido a que desde los años ochenta la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) experimentó un crecimiento económico y como consecuencia una expansión de su urbanización (Orozco Hernández, 2006). Paralelo a esto, se detectó un incremento en la temperatura promedio anual debido, probablemente, a las actividades antropogénicas (Pérez et al., 2010). Por lo cual, en este estudio se pretende analizar el efecto de la UHI de la ZMVT y el efecto del cambio de uso de suelo sobre la dinámica espacio-temporal de la lluvia en el Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma. Esto a partir de datos satelitales, registros meteorológicos y aplicando técnicas de teledetección y geoestadística.

La importancia de conocer el comportamiento del fenómeno de la isla de calor urbana radica en que la mayoría de los efectos que genera son negativos tanto para el ambiente como para la salud humana. Y es por ello por lo que es necesario elaborar propuestas de planes de desarrollo urbano o propuestas de medidas de adaptación y mitigación ante este fenómeno. Esta investigación pretende describir el comportamiento de la UHI de superficie y atmosférica y su influencia en los patrones de lluvia, para que sirva de apoyo en encaminar propuestas para la mitigación y adaptación ante este fenómeno, mismas que promuevan la gestión del uso de suelo y de los recursos hídricos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un contexto global se ha percibido una tendencia de aumento de la temperatura y cambios estacionales, lo que se conoce como cambio climático (Chen et al., 2018). En un contexto local, hablando específicamente de los microclimas que se desarrollan sobre las ciudades podría tratarse de isla de calor urbana. Alrededor del mundo se ha observado este fenómeno, sin importar la latitud en la que se encuentre, definiéndose por un patrón concéntrico de temperatura artificial que lo contrasta con el medio natural.

El fenómeno de la isla de calor urbana había sido un tema poco conocido hasta hace unas décadas, en las que más ciudades describían el mismo comportamiento. Posteriormente se le vinculó la alteración de la lluvia convectiva, encontrándose alteraciones que van desde aumentos o decrementos de ésta en ciertas porciones de la ciudad o próximas a ellas.

Actualmente varios estudios se han enfocado en observar los incrementos de la temperatura sobre las ciudades, además de su posible influencia sobre las lluvias convectivas. Sin embargo, pocos estudios se enfocan al estudio del comportamiento en espacio-tiempo de la UHI y del efecto del cambio del uso de suelo, además de la modelación y de sus implicaciones en gestión integrada del agua. Esta investigación pretende dar una aproximación al comportamiento de la UHI y del efecto del cambio de uso del suelo en espacio-tiempo y su posible influencia en los patrones de lluvia convectiva, específicamente en el Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma, ya que desde hace más de veinte años el proceso de metropolización se ha acelerado debido a la industrialización, propiciando un desarrollo desordenado en la zona (Botello, 2005; A. V. Flores & Cenecorta, 2015).

El monitoreo del comportamiento de este fenómeno puede tener diferentes aportaciones para el entendimiento de los efectos que causa, por ejemplo, ayudar a generar propuestas de estrategias en la gestión integrada de los recursos hídricos, que lo mitiguen y/o adapten. De esta forma, se reduciría el impacto generado por las propias características físicas de la ciudad. La gestión pública de las ciudades ante la adaptación al cambio climático y la prevención del riesgo es complicada debido a la articulación de asentamientos ilegales o irregulares, ya que en muchos países latinoamericanos el crecimiento urbano se da fuera de cualquier regulación oficial (Delgado et al., 2010).

3. HIPÓTESIS

El comportamiento espacio-temporal de la Isla de Calor Urbana y el cambio de uso de suelo influye en la frecuencia y magnitud de las lluvias en el Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Analizar la dinámica espacio temporal de la Isla de Calor y el cambio de uso de suelo, a partir de la integración de bases de datos satelitales y aplicación de métodos de análisis de series de tiempo, para determinar su influencia en el comportamiento de las lluvias, en el Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma.

4.2. Objetivos específicos

- Delimitar la isla de calor urbana de superficie y atmosférica con relación al área de estudio, para establecer su comportamiento en el tiempo, a partir del algoritmo de dirección de flujo D8 inverso e identificar los puntos más cálidos para analizar los puntos cálidos emergentes.
- Definir el comportamiento en espacio-tiempo a partir del análisis de serie de tiempo de la temperatura de superficie, atmosférica, y de la lluvia en el Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma, esta última será con la caracterización de dos componentes de la lluvia: Lluvia Total Acumulada (LLTOT) y Número de Días con Lluvia (NDLL).
- Homogeneizar usos de suelo de la Serie II (1993) y Serie VI (2014) para realizar un análisis del cambio de uso de suelo para la CACARL.
- Identificar el impacto del efecto de la UHI sobre la lluvia a partir del análisis de cambio de uso de suelo con el análisis de puntos cálidos emergentes y la correlación de temperatura de superficie y atmosférica para la CACARL y los diferentes usos de suelo dominantes.

5. ANTECEDENTES

5.1. La UHI en el contexto internacional

En diversas ciudades alrededor del mundo se han detectado alteraciones térmicas, debido al fenómeno de la isla de calor urbana (UHI por sus siglas en inglés), se caracteriza por el aumento de temperatura en las zonas urbanas con respecto a las áreas suburbanas circundantes (Deilami et al., 2018). Dentro de sus causas principales se encuentran el cambio de uso de suelo y el uso de materiales de construcción que absorben y retienen la radiación solar (Senanayake et al., 2013; Radhi et al., 2015), y de las altas emisiones de dióxido de carbono ocasionadas por las industrias y el uso de los automóviles (Fang et al., 2015). Impactando no solo el comportamiento de la temperatura (Voogt, 2014), sino que también altera el comportamiento del régimen de la lluvia sobre y alrededor de las ciudades (Bornstein & Lin, 2000).

5.1.1. UHI atmosférica

El primer registro de isla de calor urbana se realizó en la ciudad de Londres, con el estudio que realizó Luke Howard (1818), donde encontró “un exceso de calor artificial” a partir de registros meteorológicos. Pero es a mediados de 1900 cuando empezó a aumentar el registro de este fenómeno. M. Parry (1956), encontró con datos de 20 estaciones meteorológicas en el área de Reading en Inglaterra una diferencia de temperatura cercana a los 4 °C entre el área urbana y la rural, aunque describió que la zona rural no estaba muy urbanizada ni muy contaminada.

Posteriormente, Mitchell Jr, (1961) llevo a cabo un estudio en diez ciudades de Estados Unidos (Cleveland, Boston, Washington, Tampa, Baltimore, Charlotte, Rochester, Nashville, Lincoln y Marquette), durante periodos distintos. En su estudio se demostró que siete de las ciudades presentaban temperaturas mayores con respecto a sus alrededores durante el verano. Las ciudades de Cleveland y Boston registraron las temperaturas más altas en comparación a su periferia durante todo el año, alcanzando una tasa de calentamiento por 100 años de 2.1 a 2.8 °C y 1.2 a 2.6 °C, respectivamente.

En la ciudad de Utrecht de Países Bajos, estimaron la diferencia de temperatura entre el área urbana y campo abierto, a partir de una estación transversal móvil, encontrando una diferencia máxima de casi 6 °C en el invierno de 1969-1970 (Conrads & Van Der Hage, 1971).

En Madrid un estudio entre 1901 y 1987, analizó la temperatura para tres áreas rurales y un área urbana, revelando que las áreas rurales no mostraron cambios significativos, mientras que en la zona

urbana la temperatura incrementó 0.024 °C por año, lo que significó un incremento de 2.06 °C en 86 años (Yagüe et al., 1991).

Campoverde (2018), realizó un estudio en la ciudad de Cuenca en Ecuador para el periodo de 2015 a 2017, con información de la red de estaciones del cantón Cuenca. En este establecieron tres categorías de isla de calor urbano, basándose en su intensidad y la diferencia de altitud entre las estaciones meteorológicas. La primera (UHI fuerte) se generó en el centro de la ciudad, con incrementos de entre 2 y 3 °C, con una altitud de 2,400 a 2,600 msnm. En la segunda (UHI desplazada) se notó un incremento de 1 a 2 °C, con una elevación entre 2,600 a 2,700 msnm. En la última (UHI débil o inexistente) se registró un incremento térmico que no superaba 1 °C, además de encontrarse a una altitud superior a 2,700 msnm.

En la ciudad de Sao Paulo en Brasil, se estudió la temperatura del aire durante 10 años (2004 a 2013), en este se encontró que la intensidad de la UHI oscilaba entre 1.5 a 2.5 °C. Además que se observó una mayor intensidad y amplitud en días con brisa marina, mientras que los días con frentes fríos la amplitud era menor (Umezaki et al., 2020).

5.1.2. UHI de superficie

Un estudio se realizó de junio de 2001 a mayo de 2002, utilizando imágenes satelitales MODIS del producto LST (Land Surface Temperature), en las principales metrópolis de países del este y sudeste asiático. Concluyeron que todas las ciudades con clima templado en verano experimentaron incrementos significativos en la temperatura de superficie. Tokio tuvo el incremento más severo con 12 °C y la ciudad de Pyongyang registró el más bajo con 4 °C. Finalmente las ciudades con clima tropical en la estación seca mostraron incrementos significativos de temperatura de 5 - 8 °C (X. Jiang et al., 2006).

En la ciudad de Budapest, Hungría: se llevó a cabo un estudio desde enero de 2001 a octubre de 2016, en el que se usó la serie temporal de MODIS (LST) del satélite Terra y Aqua. Con ello, determinaron que las intensidades de la UHI son de alrededor de 5 °C en el centro de la ciudad, y a medida que disminuye la densidad de la mancha urbana, también disminuye la intensidad de la UHI. Además, también se encontró que la intensidad de la UHI de superficie cubre intervalos más amplios en los meses de verano, en comparación a invierno que son más pequeños (Dian et al., 2020).

Otro estudio realizado en la ciudad de Bangalore en la India, en el cual utilizaron imágenes satelitales MODIS en su producto LST, de un periodo de 2003 a 2018, se encontró que la intensidad media de la UHI tuvo un mayor alcance en la estación seca (diciembre-febrero) durante la noche con 1.43 °C, mientras que la UHI en estación húmeda (agosto-octubre) persistía durante el día. Concluyeron que

el efecto de la UHI incrementó al aumentar la mancha urbana dentro del periodo estudiado (Sussman et al., 2019).

También se ha estudiado el comportamiento de la intensidad de la UHI nocturna a una escala local para dos distritos ubicados en Londres y París, en el cual se encontró que la intensidad de la UHI era de aproximadamente 1.16 y 1.74 °C (Sun et al., 2020).

5.2. Estudios de la UHI en México

De acuerdo con Garza (2002), la tasa de urbanización en México se puede dividir en tres etapas: un crecimiento urbano moderado (tasa anual de 1.5% de 1900 a 1940); un crecimiento urbano acelerado (2.7% de tasa anual de 1940 a 1970); y un crecimiento urbano bajo (tasa anual de 1.2% de 1970 a 2000). También menciona un desarrollo urbano acelerado-medio que se dio entre 1940 y 1980 con el famoso *milagro económico mexicano*, en donde el PIB creció de 5.8%, cifra que aumentó a 6.3% anual. Esto dio paso al acelerado crecimiento económico y por ende el desarrollo urbano, conformando metrópolis industriales de alto crecimiento, en las que se encuentran Guadalajara, Monterrey, Puebla, Cuernavaca, Querétaro y Toluca (Chávez & Guadarrama, 2000). Las últimas cuatro se integraron al subsistema urbano de la Ciudad de México (CDMX).

5.2.1. UHI atmosférica

Los primeros registros de UHI en México comienzan aproximadamente en 1975 con el estudio que realizó Jáuregui Ostos (1975), en el que zonificó el clima de la ciudad de México a partir de diferentes variables. Entre ellas zonificó el clima a partir de la temperatura, y menciona que la temperatura se ve inducida por la capacidad térmica de los materiales de la ciudad, la nube de impurezas que emite y las fuentes de calor del área urbana. Adicionalmente, detectó que el área de mayor captación de radiación solar es sobre la superficie urbana con respecto a la superficie rural, mientras que la temperatura mínima fue muy marcada en el centro de la ciudad. A tal grado que ya no se registraban heladas (temperaturas inferiores a 0 °C), en comparación a las zonas rurales que mantenían una frecuencia de 40 a 60 días al año.

Barradas (1987), realizó un estudio sobre la UHI de Jalapa en Veracruz en el que encontró las temperaturas más elevadas en el centro de la ciudad, con una temperatura de 34.8 °C y en los alrededores una temperatura de aproximadamente 31 °C, teniendo diferencias térmicas aproximadas cercanas a 4 °C. En la ciudad de Mexicali en Baja California se llevó a cabo un estudio durante el periodo 2000 a 2005, con apoyo de estaciones meteorológicas. En este se encontró una intensidad máxima de 5.3 °C en la porción suroeste de la ciudad (Casillas-Higuera et al., 2014).

En la ciudad de Tampico, se midió la temperatura con sensores instalados en una camioneta, la cual realizó un transecto en distintos puntos de la ciudad. En los datos obtenidos se observó una oscilación de temperatura de 18 a 26 °C para enero, con variaciones térmicas de -0.6 a +9.4 °C, y temperaturas de 26 a 34 °C en agosto, con variaciones de -0.1 a +4.9 °C. Mostrando una relación espacial evidente con las superficies con vegetación pobre, humedad y baja reflectividad, lo que explica las altas temperaturas que le caracterizan (Fuentes Pérez, 2015).

Otro caso se registró en la ciudad de Querétaro (Colunga et al., 2015), donde se comparó la temperatura para el periodo de 1982 a 2011 para seis estaciones climáticas ubicadas dentro de la ciudad. En este se encontraron diferencias significativas entre la temperatura máxima y mínima para la estación cálida. Se detectó una UHI promedio de 2.64 °C, con un máximo de 5 °C y un mínimo de 0.82 °C. Mientras que en la estación fría la UHI tenía un promedio de 2.46 °C con un máximo de 4.88 °C y un mínimo de 0.14 °C. Sin embargo, concluyeron que el efecto de la UHI fue similar independientemente de la estación, presentando una oscilación de entre 0.14 y 5 °C.

En la ciudad de Torreón se realizó una campaña de monitoreo en el cual se analizó la de temperatura del aire por transectos, obteniendo 8 registros desde las 9:00 am hasta las 5:00 pm, obteniendo temperaturas más elevadas en la zona urbana con respecto a las áreas verdes, alcanzando una máxima diferencia cercana a los 2 °C y una mínima menor a 1 °C (L. Flores et al., 2018).

5.2.2. UHI de superficie

En dos de las ciudades más importantes de Querétaro (Santiago de Querétaro y San Juan del Río), se detectó una relación entre el comportamiento de la dinámica de la UHI y la precipitación. Este estudio se realizó a partir de una base de datos de precipitación diaria con un periodo de 1980 a 2016. En el cual se reportó una disminución de la lluvia mensual para los meses de enero a abril y de agosto, octubre y diciembre en ambas ciudades, excepto el mes de agosto en esta última. Identificando una disminución en la lluvia de -0.65 mm al mes/año, lo que significó una reducción de -23.4 mm al mes en 36 años. Por otro lado, en los meses de mayo a julio y noviembre registraron un incremento de 0.43 a 1.51 mm al mes/año para ambas ciudades, dicho de otro modo, la lluvia aumentó 15.48 a 54.36 mm al mes en 36 años (Godinez-Tovar et al., 2019).

Otro estudio realizado en 2020 en la Ciudad de México reportó que durante la segunda mitad del siglo XX debido la urbanización y el rápido crecimiento demográfico que sustituyó a la vegetación natural, elevó la temperatura por encima de los 30 °C, mientras que en la zona de transición de rural a urbano se registró una temperatura que oscilaba en 26 °C (Vargas & Magaña, 2020).

5.3. Casos de estudio de UHI en Toluca

5.3.1. UHI atmosférica

En la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, específicamente en la ciudad se han realizado estudios sobre la UHI. Por ejemplo, en 1977, un estudio realizado por Jáuregui (1979), en la ciudad de Toluca, con el apoyo de un psicrómetro móvil se registraron datos cada kilómetro para 47 puntos para dos días de febrero en un horario de 10:30 a 12:30 pm y de 4:00 a 6:00 am. En los registros nocturnos de la UHI se encontró que la temperatura más alta fue de 8.5 °C en el centro de la ciudad y en la periferia fue de 3 °C, esto es una diferencia de 5.5 °C. Mientras que la UHI diurna registró una temperatura de 3 °C y una mínima en la periferia de -2 y -3 °C, teniendo una diferencia aproximada de 5 a 6 °C.

Posteriormente, Dávila et al. (2011), a partir de datos de nueve estaciones meteorológicas, encontraron diferencias térmicas entre el centro de la ciudad y la periferia, que oscilaban entre 21 a 16 °C y 17 y 12 °C para el verano de 2009 y el invierno de 2010 respectivamente. Otro estudio realizado recientemente, con datos registrados en 12 estaciones meteorológicas ubicadas en la zona urbana y rural, encontraron que el área Metropolitana de Toluca alcanzó su pico máximo en otoño durante la noche con una temperatura de 6 °C, mientras que la UHI diurna se alcanzó en verano y otoño con una temperatura máxima de 4 °C (Rivera et al., 2017).

5.3.2. UHI de superficie

La isla de calor urbana de superficie del área Metropolitana de Toluca se estudió con el procesamiento digital de cuatro imágenes satelitales Landsat 8, donde se obtuvo que la UHI persisten durante primavera, verano y otoño, con una intensidad máxima de 19 °C. A su vez, mencionan que la humedad del suelo influye directamente en la intensidad de la UHI, además que las áreas verdes y los vientos afectan su configuración espacial (Rivera et al., 2017).

5.4. Estudios de la UHI y su impacto en la precipitación

Hace ya algunas décadas se empezaba a observar un comportamiento inusual en la intensidad, distribución y frecuencia de la lluvia, y con el paso del tiempo se empezaron a incrementar el número de estudios que vincula el comportamiento de lluvia con la UHI. En uno de los primeros casos de estudio se empezó a observar que el comportamiento de la lluvia convectiva era mayor en la ciudad. Horton (1921) encontró una tendencia a la formación de tormentas sobre grandes ciudades con respecto a sitios del medio rural.

En otro estudio Changnon Jr. (1980), reportó un incremento de tormentas eléctricas y granizo de un 30 a 40%, y lo vinculó a los efectos urbanos e industriales en la atmósfera. Landsberg (1981), detectó un incremento en la lluvia de aproximadamente 10% mayor que en las zonas rurales aledañas.

Shepherd et al. (2002), realizaron un estudio con datos obtenidos del satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), entre 1998 y 2000, en este identificaron que en la estación cálida los patrones de lluvia se modificaron. Lo anterior ocasionó un aumento en las tasas de precipitación mensual del 28 % dentro de los 30 a 60 km a favor del viento de la metrópoli y un incremento de 5.6% sobre la metrópoli. Este estudio se realizó en los alrededores de Atlanta (Georgia), Montgomery (Alabama), Nashville (Tennessee), San Antonio (Waco) y Dallas (Texas).

Un estudio a la variabilidad climática de la cuenca alta del Río Lerma, para un periodo de 51 años a partir de 1960 concluyó que la temperatura incrementó un 0.8 y 0.74 °C, mientras que la precipitación mostró un incremento anual acumulativo de 131 mm. Modificando no solo la intensidad de la lluvia, sino también el patrón de comportamiento y el aumento en la frecuencia de las lluvias con granizo (Mastachi-Loza et al., 2016).

En otro estudio en 2007 se detectó un incremento en las precipitaciones en la ciudad de Toluca, a partir de la década de 1990 pasando de una media anual de 760 mm a 805 mm, además se identificó un aumento de temperatura de 3 °C durante el día y 1.5 °C durante la noche (Méndez et al., 2007).

Se sabe que la UHI ha alterado y ha impactado en el medio ambiente, y a su vez modifica el comportamiento de muchas variables como el viento, la infiltración, la temperatura, la precipitación y demás. Pero esta última ha captado la atención de muchos investigadores, en los que reportan sus cambios espaciales y temporales en diferentes ciudades del mundo (R. Jiang et al., 2017; Vargas & Magaña, 2020).

En la ciudad de Atlanta en Estados Unidos, se realizó un estudio (Dixon & Mote, 2003) en el que encontraron que del año 1996 al 2000 las precipitaciones ocurrían mayormente a menos de 5 km de la mancha urbana (56%), mientras que un 27% ocurrió cerca de los 10 km de la mancha urbana. Otro estudio realizado recientemente en Beijing, China (Zhu et al., 2019), con un periodo de estudio de 2011 a 2015 encontró que los cambios en la intensidad, la cantidad y la duración de la precipitación se ven influenciadas por el tipo de urbanización, dicho de otra manera, el área urbana con mayor densidad de población tuvo precipitaciones ligeramente más largas, así como su intensidad y cantidad de precipitación. Sin embargo, los días secos también fueron más prolongados. En la Ciudad de México se detectó un desplazamiento en las precipitaciones, donde en la región occidental y sureste disminuyó un aproximado de 14%, mientras que en la región noreste aumento aproximadamente 15% en un periodo de 1993 a 2008 (Ochoa et al., 2015).

En el área metropolitana de Indianápolis en E.U. se llevó a cabo un estudio de 2000 a 2014, en el que encontraron que las precipitaciones aumentaron cerca de un 16% con respecto a las áreas rurales

circundantes (J. Liu & Niyogi, 2020). Años antes en Houston en Texas, se encontró que la tasa de precipitación ha aumentado al este de zona urbana 29% más que en sus cercanías, esto se le atribuye a las interacciones del uso de suelo urbano con los procesos atmosféricos (Shepherd & Burian, 2003). En varias ciudades de la India se encontró que en un periodo de 53 años (1951 al 2003) las lluvias intensas han aumentado aproximadamente 18% por década ($p=0.023$), por otro lado, las zonas rurales no mostraron alguna tendencia de cambio. También mencionan que antes de la década de 1960 era dos veces más probable que las lluvias intensas ocurrieran en las áreas rurales, pero con el creciente aumento de las áreas urbanas estas se han igualado con las áreas rurales (Kishtawal et al., 2010).

5.5. Estudios del cambio de uso de suelo y su impacto en la precipitación

Las modificaciones en el uso de suelo impactan en el comportamiento de la temperatura y la precipitación en concomitancia con la UHI. Pues de manera general, el cambio de uso de suelo es el segundo factor antropogénico que tiene influencia sobre el comportamiento del clima, después de la emisión de gases de efecto invernadero (Shepherd, 2009; Arsiso et al., 2018). Un estudio realizado en China, específicamente en las áreas metropolitanas que se encuentran en el tramo medio e inferior del río Yangtze, se analizó el impacto del cambio de uso de suelo junto con la urbanización en la temperatura y precipitación, en un periodo de 1988 a 2008, encontrando que la temperatura regional incrementó en áreas que cambiaron su cobertura a uso urbano, aumentando ligeramente de 0.28 °C de 1988 a 1995 a 0.3 °C en 1995 a 2000. Mientras que en áreas cultivadas como en cuerpos de agua la temperatura disminuyó constantemente 0.05 °C de 2005 a 2008. Sin embargo, la precipitación no mostró un cambio significativo en su comportamiento (Yao et al., 2015).

Otro estudio realizado en la meseta de Loess ubicado al norte de China, se encontró que en las zonas donde se aumentó la cobertura vegetal con intervención humana, impactó en el comportamiento de la precipitación, tanto en intensidad como en frecuencia, donde la precipitación anual permanece relativamente estable con una tendencia creciente débil con una pendiente de 7.6 mm/década (Z. Liu & Liu, 2018).

En la cuenca del Amazonas, se analizó el comportamiento de la precipitación en relación a la humedad atmosférica en un periodo de 2003 a 2014, hallando que la pérdida de vegetación impactó en la precipitación, disminuyendo en promedio 1159 mm/año, es decir, la precipitación total se redujo en un 55% durante los 12 años de estudio (Baudena et al., 2021).

En la microcuenca del río Escudillas ubicado en Ecuador, se observó un incremento en las áreas destinadas a pastos y cultivos, mientras que las áreas boscosas disminuyeron aproximadamente 2.04% del área total de la cuenca, en un periodo de 20 años, a la par se detectó un decremento en la

precipitación de 284 mm aproximadamente dentro del mismo periodo de estudio (Alvear Puertas, 2018).

Otro estudio realizado en el Amazonas se encontró que el 20% de área boscosa original se ha convertido en pastizales, áreas de cultivo principalmente. Además de que la deforestación impacta en la reducción de la precipitación del 5%, y siguiendo este escenario para el 2050 la deforestación disminuirá las precipitaciones hasta un 12% en estación húmeda y un 21% en estación seca (Spracklen et al., 2018).

En la cuenca del Río Actopan en Xalapa, Veracruz, se encontró que las áreas que cambiaron de bosque y selva a agricultura, mostraron cambios significativos en el comportamiento de la temperatura, disminuyendo aproximadamente 2 °C y la precipitación se incrementó entre 50 y 150mm en un periodo de 22 años correspondientes a 1988 a 2010 (González Viveros, 2012).

Un estudio realizado en el estado de Rajasthan en la India, examinó el efecto a largo plazo de los cambios de uso de suelo en el flujo de tierra-atmosfera y posiblemente en la precipitación. Encontrando que de 1972 a 2006 las tierras de cultivo y áreas con vegetación aumentaron 57% en el este y 68% en el oeste, y también se encontró una variación en el número total de días lluviosos significativamente mayor al este (64.03 ± 11.27) en comparación al oeste (39.83 ± 10.24) (Kharol et al., 2013).

Otro estudio realizado en 1984, se encontró que la precipitación se incrementó un 25% en la región de Texas Panhandle de las Grandes Llanuras, donde a principios de 1940 comenzó el cultivo con irrigación en un área de 7,500 km², alcanzando 60,000 km² en 1980, asociando directamente la superficie irrigada con el aumento de la precipitación, además de que se observó una reducción aproximada de 2 °C en las temperaturas máximas (Barnston & Schickedanz, 1984).

Spracklen y colaboradores, mencionan que la modelación de los impactos del cambio de uso de suelo en la lluvia con una alta resolución puede mostrar una mayor heterogeneidad y ser más aproximado a la realidad, aunque estas se pueden ver limitadas por la extensión geográfica y la disposición de periodos de tiempo. Obteniendo que la conversión de bosque tropical a suelo desnudo puede generar reducciones en la precipitación regional de 460 ± 100 mm al año, lo que es considerablemente comparado con la conversión de bosque tropical a pastizal, mostrando reducciones de 220 ± 260 mm al año (Spracklen et al., 2018).

6. MARCO TEORICO Y CONCEPTOS OPERATIVOS

6.1. Cambio de uso de suelo

El aumento de la población ha cambiado drásticamente el medio ambiente, sin embargo, el aumento en las áreas urbanas ha generado una pérdida en áreas de uso agrícola (Acheampong et al., 2018), además de otras coberturas propias del medio ambiente. Es por ello, que es importante el análisis de cambio de uso de suelo para una mayor comprensión de la interacción del hombre con su medio ambiente.

6.1.1. Descripción

El análisis de uso de suelo y su cobertura proporciona información de su manejo integral, es decir, describe en qué se ocupa principalmente la superficie territorial del medio ambiente. Además brinda pautas a la formulación de políticas con fines comerciales y administrativos lo que genera interacciones geográficas, medio ambientales y socioeconómicas (Rwanga & Ndambuki, 2017). Ahora bien, al cambiar el uso de suelo y las coberturas vegetales, principalmente por el hombre, se generan impactos negativos tanto en la biodiversidad como en los ecosistemas, alterando a la par el clima regional y local (Sahagún-Sánchez & Reyes-Hernández, 2018).

Actualmente, el uso de la teledetección como herramienta para la clasificación de uso de suelo es más frecuente ya que facilita la evaluación de la distribución de uso de suelo y actualiza los cambios en las características geospaciales. En contra parte, la precisión y calidad de la información generada depende del proceso de validación de datos que tiene que resultar lo más cercano a la realidad (Rwanga & Ndambuki, 2017).

6.1.2. Impactos del cambio de uso de suelo

El impacto del desarrollo humano sobre el medio ambiente y los recursos naturales es negativo, debido a que el crecimiento de las ciudades no posee un ordenamiento urbano sostenible, y tampoco posee un análisis de los efectos climáticos, así como análisis de las posibles consecuencias de las actividades humanas (Villarreal & Candanedo, 2020). Y la expansión de las manchas urbanas absorben comunidades, cuerpos de agua, cubiertas vegetales, zonas agrícolas y demás, con el paso del tiempo, llega a abarcar varios municipios circundantes (Méndez-Lemus, 2015).

La cobertura del suelo interviene en el intercambio de masa y energía entre la superficie y la atmósfera (H. Li et al., 2018). Por lo tanto, los componentes biofísicos a nivel local como el relieve, la vegetación y el clima, están fuertemente relacionados con el uso de suelo. La meteorología local e incluso la regional, podrían verse afectadas si las características del uso de suelo se ven modificadas

a gran escala, lo que pudiera generar posteriormente inundaciones, sequías, disminución de los cuerpos de agua, afectar la calidad del aire entre otras consecuencias (Zavaleta-Palacios et al., 2020). Es por ello que es importante el estudio de uso de suelo en series cronológicas que asistan a la planeación territorial y la gestión de los recursos naturales (Banchero et al., 2020).

6.2. Precipitación

La precipitación, forma parte del ciclo hidrológico, siendo muy variable ya que ocurre por diferentes causas, pues depende de la latitud, por sistemas climáticos de baja y alta presión, la época del año, la temperatura, las elevaciones orográficas y por el movimiento de las masas de aire (Gliessman, 2002). Entonces, una tormenta se definiría como toda perturbación potencial que crea un movimiento ascendente en la atmósfera, formando tormentas eléctricas, ciclones tropicales, tormentas de lluvia o nieve. Sin embargo, la distribución de estos eventos varía con el clima, ya que los mecanismos involucrados en el proceso de condensación son realmente importantes, como cuando se forma una nube y las gotas crecen lo suficiente ($>4\mu\text{m}$ de diámetro) o si el aire se enfría lo suficiente para que las gotas de las nubes se congelen, se puede formar lluvia y nieve respectivamente (Trenberth et al., 2003).

Por otro lado, la influencia humana altera no solo el comportamiento de este fenómeno al liberar distintos tipos de contaminantes a la atmósfera, sino también genera diferencias importantes en la cantidad y el tamaño de las gotas de las nubes. Modificando la formación de precipitaciones, el calentamiento dentro de las nubes y la vida útil de estas. Es importante aclarar que el carácter de la precipitación no depende solo de la naturaleza de la tormenta, sino también de la cantidad de humedad disponible (Antonio, 2018), generando lluvias moderadas y constantes que benefician a las plantas, pero si esa misma cantidad de lluvia cae en un corto periodo de tiempo puede causar inundaciones, dicho con otras palabras, las características de la precipitación son tan importantes como la cantidad (Trenberth et al., 2003).

6.2.1. Tipos de lluvia

La lluvia, de manera general puede ser clasificada en tres tipos, de acuerdo con los mecanismos en que se produce el enfriamiento adiabático de las masas de aire húmedos (Gliessman, 2002; Antonio, 2018).

1) Lluvia convectiva

Esta ocurre cuando por la inestabilidad de una masa de aire caliente, generada por la energía solar que calienta a altos niveles el aire cercano a la superficie, elevándolo rápidamente, haciendo que se enfríe y posteriormente condense para luego precipitar.

2) Lluvia orográfica

La lluvia orográfica sucede cuando una masa de aire que está cargada de humedad se dirige hacia una cadena montañosa que la obliga a ascender a niveles más fríos de la atmosfera, generando eventos lluviosos en barlovento, para que después, el aire descienda seco en sotavento. Este tipo de lluvia es un importante abastecedor de corrientes y acuíferos.

3) Lluvia ciclónica o convergente no frontal

Esta, por lo general, es de larga duración, baja intensidad y se presenta en grandes extensiones de terreno. Se encuentra asociada a áreas de baja presión atmosférica que se forman sobre el océano, donde el aire cargado de humedad se calienta, elevándose, y conforme asciende, se enfría y precipita, cayendo de nuevo hacia la superficie del océano.

6.2.2. Características de la lluvia convectiva

De acuerdo con Villalobos Puma et al. (2019), las precipitaciones tropicales se pueden clasificar en convectivas y estratiformes, aunque puede haber una combinación entre ambas. Las lluvias estratiformes tienden a tener una intensidad baja, aunque abarcan una extensión mayor y una duración prolongada, mientras que las nubes convectivas poseen altas velocidades verticales en las corrientes ascendentes. Formando células convectivas de tipo cumulus o cumulonimbus, dando como resultado celdas aisladas o multiceldas.

El tiempo de vida de estos sistemas depende del grado de desarrollo y de la extensión que alcancen. Estas suelen estar acompañadas de ráfagas de viento, actividad eléctrica y granizo.

6.2.3. Caracterización de patrones de lluvia

Gliessman, (2002), menciona que los patrones de precipitación en cada región del planeta tienen sus propias características que las diferencian de otras regiones, tales como la cantidad total de lluvia precipitada en un año, su distribución, intensidad y duración. A continuación, se describen algunos componentes de los patrones de lluvia:

1) Precipitación total anual promedio

Este indica la cantidad de precipitación que cae en un área determinada, siendo un buen indicador sobre la humedad de esa área. Sin embargo, si existen variabilidades extremas, estas podrían causar impactos negativos en el medio.

2) Distribución y periodicidad

A lo largo de un año, la distribución de la lluvia tiende a tener un punto máximo y uno mínimo, y su oscilación dependerá de aspectos climáticos y geográficos principalmente. Otorgándole un patrón regular de distribución en el año.

3) Intensidad y duración

Esta se mide en milímetros por hora, y cuando se trata de una precipitación muy intensa su duración tiende a ser corta, mientras que el tiempo es mayor con una intensidad media. La importancia de conocer la cantidad de lluvia en un tiempo determinado radica en el posible impacto ecológico que pudiera tener. Ya que no tiene el mismo impacto la misma cantidad de lluvia en un periodo de tiempo prolongado que en un periodo de tiempo muy corto.

4) Disponibilidad

Otro aspecto relevante es la disponibilidad, debido a que cierto porcentaje es absorbido por la vegetación, por los mantos freáticos, otro tanto escurre y entre otros procesos.

5) Predictibilidad

Como se mencionó anteriormente, se sabe que la lluvia tiene un patrón en el tiempo y este depende de la región. Sin embargo, cuando la variabilidad del patrón de la lluvia es muy amplia, se amplía la predictibilidad, y viceversa.

6.3. Isla de Calor Urbana como consecuencia de la urbanización

Actualmente el fenómeno de la UHI ha tomado importancia tanto ambiental como social y políticamente. Pues los procesos migratorios, las concentraciones de población y los diferentes usos de suelo hacen que se vea modificado drásticamente el ambiente junto con las condiciones microclimáticas (Garzón & Jimenez-Cleves, 2020).

Como se acaba de mencionar, el cambio de uso de suelo ha aumentado en las últimas décadas, siendo la urbanización uno de los cambios más importantes, y una consecuencia de este es la llamada isla de calor urbana que altera la temperatura, generando diferencias térmicas entre las áreas urbanas y rurales (D. Li et al., 2019). La intensidad de la UHI varía con el tamaño de la población y la precipitación media anual; sin embargo, no existen modelos geográficos específicos para la mitigación del calor. Esto es debido a que la temperatura de superficie no es lineal, y la precipitación está controlada por las limitaciones de disponibilidad de agua o la energía de evapotranspiración (Manoli et al., 2019).

La isla de calor urbana puede definirse como la diferencia de temperatura entre el área urbana y su periferia, generando un aumento en la temperatura (Villarreal & Candanedo, 2020). Y su intensidad se reafirma con la diferencia de temperatura en un momento dado, con respecto al punto más caluroso de la ciudad y el espacio no urbano circundante. Uno de los elementos que acentúan el incremento de la temperatura en las ciudades además del cambio de uso de suelo son los contaminantes que son arrojados al aire, que elevan el gradiente térmico (Senciales-González et al., 2020).

Las propiedades térmicas de los materiales de construcción que posee una reflectancia baja pero un absorbe más energía, la geometría del área urbana, tanto su extensión como los cañones urbanos, la cubierta vegetal alterada lo que puede conducir a la pérdida de biodiversidad, los diferentes actores antropogénicos, contribuyen a la formación de la UHI. Pudiéndose deducir que el desarrollo urbano posee más impactos negativos al ambiente de los que el hombre pudiera contemplar, de ahí que no existan suficientes modelos de ciudades sustentables (Angeles Suazo et al., 2019).

6.3.1. Como se forma la UHI

La isla de calor urbano tiene un origen complejo, ya que este responde a un conjunto de las características urbanas, tales como el uso de suelo que absorbe y retiene el calor solar, la emisión de gases contaminantes, las altas concentraciones de partículas en suspensión, entre otros más (Porrás Vásquez, 2018).

Porrás Vásquez (2018) también menciona que durante el día la radiación solar que llega a la ciudad se almacena debido a sus propias características intrínsecas de construcción. Posteriormente, y durante la noche este es liberado a la atmosfera. Otro factor importante es la disminución de la evaporación y evapotranspiración por la reducción de cubiertas vegetales y cuerpos de agua que favorecen significativamente la intensidad de la UHI. Los componentes que influyen en la aparición de la UHI son:

1) Su morfología, ya que esta está relacionada con la configuración espacial de la UHI, incluyendo los materiales de construcción que tienen propiedades térmicas y radiactivas que determinan el comportamiento de la reflectividad, emisión y absorción del calor solar. El tamaño de la ciudad y la cantidad de habitantes en ella, pues esta se ve intensificada a mayor número de población (Villarreal & Candanedo, 2020). El incremento de la superficie rugosa, donde los edificios alteran el comportamiento del flujo natural del viento, disminuyendo su velocidad y por ende impide la pérdida del calor.

2) Parámetros meteorológicos, esta puede influir en la intensidad de la UHI, como la humedad atmosférica que puede tener la capacidad de regular la temperatura, esto si contiene la suficiente humedad. Otro parámetro son las corrientes de viento, que tiene la capacidad de alterar la UHI y disminuir su intensidad si la velocidad del viento aumenta.

3) La contaminación atmosférica puede alentar la formación de la UHI, siendo la emisión de contaminantes y emisiones de gases de efecto invernadero que contienen partículas con la capacidad de absorber y reirradiar la radiación que contribuyen al aumento de la temperatura. Por otro lado, el calor antropogénico eleva la temperatura del aire como son los sistemas de refrigeración, incendios provocados y calefacción, además de otro tipo de actividades realizadas por el hombre.

6.3.2. Diferencias entre UHI Atmosférica y UHI de Superficie

El estudio de la UHI puede dividirse en dos tipos principales: isla de calor de superficie (SUHI), que es la diferencia térmica entre superficies artificiales y naturales, además esta se produce tanto en el día como en la noche; sin embargo, es más fuerte durante el día y se ve favorecida con un cielo despejado. Esta se puede estudiar con modelos numéricos o de estimación empírica, también puede ser estudiada a través de imágenes satelitales. Por su parte, la isla de calor atmosférica (AUHI) es la diferencia térmica en el aire con respecto a las zonas urbanas y las zonas rurales. Se divide en dos con respecto a la cercanía del suelo, la primera es a nivel del suelo al nivel superior de los techos y arboles; la segunda comienza por encima de los techos y arboles a no más de un kilómetro y medio de altitud. Esta puede ser medida a través de estaciones meteorológica fijas (Tumini, 2010; Uribe, 2014).

Como puede notarse, ambas difieren en la manera en que se generan, así como las técnicas utilizadas para estudiarlas, medir sus impactos y mitigar sus efectos. Se sabe que la temperatura de superficie influye indirectamente en la temperatura del aire, específicamente en la capa de dosel, debido a que está más cerca de la superficie. Es decir, las áreas con vegetación contribuyen a temperaturas más frías en el aire, por otro lado, las áreas urbanizadas conducen a temperaturas más cálidas en el aire. Sin embargo, la relación entre la temperatura del aire y la superficie no es constante que el aire se mezcla en la atmosfera, volviéndola más constante con respecto a la temperatura de superficie (EPA, 2015). A continuación, se muestra en la Tabla 1 con las características básicas de ambas islas de calor (superficie y atmosférica).

Tabla 1. Características de la UHI de superficie y la UHI atmosférica (EPA, 2015).

Característica	UHI de superficie	UHI atmosférica
Desarrollo temporal	<ul style="list-style-type: none"> - Presente en todo momento del día y la noche - Más intenso durante el día y el verano 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede ser pequeño o inexistente durante el día - Mas intensa durante la noche o antes del amanecer y en invierno
Intensidad máxima (condiciones más intensas de la UHI)	<ul style="list-style-type: none"> - Mas variación espacial y temporal: <ul style="list-style-type: none"> • Día: 10 a 15 °C • Noche: 5 a 10 °C 	<ul style="list-style-type: none"> - Menos variación: <ul style="list-style-type: none"> • Día: -1 a 3 °C • Noche: 7 a 12 °C
Método de identificación típico	<ul style="list-style-type: none"> - Medición indirecta: <ul style="list-style-type: none"> • Sensor remoto 	<ul style="list-style-type: none"> - Medición directa: <ul style="list-style-type: none"> • Estaciones meteorológicas fijas • Transversales móviles
Representación típica	<ul style="list-style-type: none"> - Imagen térmica 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa de isoterma - Gráfico de temperatura

6.4. Métodos para estudiar el comportamiento de la UHI

El estudio de la UHI ha aumentado en las últimas décadas, gracias a los avances tecnológicos que brindan herramientas que ayudan al monitoreo del comportamiento de este fenómeno tanto espacial como temporalmente. Debido a los impactos que genera este fenómeno, que a su vez contribuye al calentamiento global. De ahí, la necesidad de estudiar e identificar la UHI, para así desarrollar una comprensión profunda del comportamiento de dicho fenómeno (Deilami et al., 2018).

Actualmente, la mayoría de los estudios se apoya de imágenes satelitales como Landsat (Kaplan et al., 2018; Sheng et al., 2017) y MODIS (Ma & Liu, 2017; Das et al., 2020), o con índices de cobertura de tierra (Rani et al., 2018; Guha et al., 2019), clasificación supervisada (MASAPANTA SÁNCHEZ, 2018), otros tantos como la regresión de mínimos cuadrados (Luo & Peng, 2016) y otras estadísticas (Grigoraş & Urişescu, 2018). A continuación, se describe más a fondo las técnicas y métodos más usados en estudios de investigación:

1) Estaciones meteorológicas

Este puede considerarse un método tradicional para la recolección de datos, sin embargo, debe considerarse que tiene que contar con cierto número de estaciones para que tenga una validez estadística, además de que el registro de datos debe estar lo más completo posible. Para que ayude a pronosticar las posibles adversidades climáticas y con ello estar alerta ante fenómenos que pudieran afectar nuestra vida cotidiana. Ahora bien, los datos de las variables que se registran son la presión atmosférica, la velocidad del viento, humedad, temperatura, precipitación. Actualmente existen estaciones meteorológicas automáticas que mejora la calidad de obtención de datos (Arteaga-Ramírez et al., 2017).

2) Transversales móviles

Esta técnica de medición transversal móvil genera mapas espaciales de temperatura a lo largo de rutas móviles dentro y fuera de la ciudad. Estos datos se recopilan mediante encuestas móviles realizadas durante un día con cielo despejado, siguiendo transectos horizontales y verticales en un horario específico. El tiempo de recorrido debe ser relativamente corto, para registrar datos homogéneos, que posteriormente se plasman en un mapa de interpolación, el cual tiene que estar validado con datos de estaciones meteorológicas del lugar (Yadav & Sharma, 2018).

3) Sensores verticales

El análisis de la estructura vertical de la atmósfera es importante para realizar predicciones. Para ello se realizan mediciones sobre la superficie, estos datos se obtienen dentro de la atmósfera (mediciones in situ), a partir de sensores transportados en aviones o plataformas de globos. Este último suele usarse a nivel internacional, lanzados diariamente en cientos de lugares para obtener datos que puedan dar pronósticos. Estas sondas transportadas por globos, pueden proporcionar un muestreo fiable del lugar in situ, esta es mejor conocida como radiosonda (Harrison, 2015).

4) Balance de energía

Mutani & Todeschi (2019), realizaron un modelo de balance de energía urbana, el cual se basa en ecuaciones de transferencia de calor simplificada que considera las variables urbanas además de la variabilidad de las condiciones climáticas extremas. Representando un sistema termodinámico, y flujos de calor y de masa entre el sistema urbano y el sistema exterior (medio ambiente). Considerando las Normas oficiales, se muestra a continuación la ecuación del balance energético:

$$Q_{H,nd} = \sum Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot \sum Q_{gn} = \left(\sum Q_{H,tr} + \sum Q_{H,ve} \right) - \eta_{H,gn} \cdot \left(\sum Q_{int} + \sum Q_{sol} \right)$$

Donde, la transferencia de calor total ($Q_{H,ht}$) se compone de la suma de la transferencia de calor por transmisión ($Q_{H,tr}$) y ventilación ($Q_{H,ve}$); las ganancias totales de calor (Q_{gn}) se debe a las fuentes de calor internas (Q_{int}) y del sol (Q_{sol}).

5) Teledetección

La teledetección es una técnica en la cual permite la obtención de datos sin estar en contacto directo con el objeto físico a estudiar, debido a que estos son sensores instalados en plataformas especiales que perciben la radiación electromagnética de un cuerpo y es reflejada por este. Aportando imágenes de superficie terrestre, marino y atmosférico (Zerrate Díaz & Triana Díaz, 2018). Actualmente el uso de imágenes satelitales ha aumentado, volviéndose una herramienta esencial en el monitoreo de distintos procesos, gracias a la continuidad con la que se generan datos (Arellano et al., 2019) como datos meteorológicos, geológicos, uso de suelo, vegetación, calidad de agua, entre otros (Martínez-Barbáchano & Martínez-Barbáchano, 2020).

La teledetección se ha vuelto una de las herramientas más usadas para el análisis de la UHI a diferentes escalas (Paulo Gomes & Trindade, 2016; Saryshev et al., 2019; Shirani-Bidabadi et al., 2019; Zhou et al., 2019), la cual permite modelar el comportamiento de la UHI así como sus posibles tendencias (L. Li & Zha, 2019; Lee et al., 2020; X. Liu et al., 2020).

6.5. Tendencias

Existen varios métodos estadísticos para detectar los diferentes tipos de cambio en las series temporales. Estos se pueden dividir en distribuciones independientes y dependientes. Si son dependientes estos se ajustan a una cierta distribución de probabilidad. Para ello existen distintas pruebas paramétricas o no paramétricas, para detectar el cambio dependiendo del tipo de distribución de los datos. Siendo la regresión lineal una prueba paramétrica, mientras que las pruebas basadas en el orden pueden considerarse como no paramétricas, pues solo detectan el cambio sin cuantificar el tamaño del cambio (Muñoz Marín, 2008).

6.5.1. Theil-Sen

El estimador de Theil-Sen es fácil de calcular, pues tiene una función de influencia acotada, siendo constante y asintóticamente normal bajo un amplio rango de distribuciones. Este puede ser definido como la mediana de las pendientes por pares. Ahora bien, en la regresión de Theil-Sen una muestra de n par de observaciones $(X_i, Y_i), i=1, 2, \dots, n$ son tomadas. Una línea recta dada se usa como modelo de mejor ajuste a un conjunto de datos dados.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n$$

Donde Y_i es la variable respuesta para cada punto de datos (i), X_i es la variable predictora para cada punto de datos (i), ε_i es el residual en la predicción de Y para cada punto de datos (i), β_1 es el coeficiente de regresión estimado, β_0 es la intersección Y estimada, y n es el número de XY puntos dados en la muestra (Farooqi & Thomas, 2019).

6.5.2. Mann-Kendall

Alhaji et al. (2018), mencionan que la prueba de Mann-Kendal es una prueba no paramétrica, e identifica las tendencias de cambio en datos de series de tiempo. Esta compara las magnitudes relativas de datos muestra, en lugar de los propios valores de los datos. Un beneficio es que los datos no necesitan ajustarse a ninguna distribución en particular, y los datos considerados como no detectados se pueden incluir en la prueba, asignándoles un valor común que sea más pequeño que el valor medio más pequeño del conjunto de datos. El procedimiento asume que existe solo un valor de datos por periodo de tiempo. Y, cuando existen múltiples puntos de datos para un periodo de tiempo, se usa el valor mediano.

Las ventajas de usar esta prueba no paramétrica, es que no requiere que los datos estén distribuidos normalmente, además de que posee una baja sensibilidad a rupturas abruptas por series de tiempo no homogéneas. Los datos se evalúan como una serie de tiempo ordenada, donde cada dato es comparado con todos los demás datos.

Siendo $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ el cual representa n puntos de datos, donde x_j es el punto de datos en el tiempo:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

Donde:

$$\text{sing}(x_j - x_k) = 1 \text{ si } x_j - x_k > 0$$

$$\text{sing}(x_j - x_k) = 0 \text{ si } x_j - x_k = 0$$

$$\text{sing}(x_j - x_k) = -1 \text{ si } x_j - x_k < 0$$

Si el valor de S es positivo y alto, puede decirse que es una tendencia creciente, por otro lado, si es negativa y baja la tendencia será decreciente. Cabe resalta que es necesario calcular la probabilidad asociada con S y el tamaño de muestra n para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia (Cabral Júnior et al., 2020).

Para obtener el cálculo de la probabilidad asociado a las estadísticas de Mann-Kendall, se puede utilizar conjuntos de datos con más de 10 valores, para ello se usa la siguiente ecuación:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right]$$

Donde n es el número de puntos con datos, g es el nmero de grupos vinculados (este es un conjunto de datos de muestra que tienen el mismo valor) y t_p es el número de puntos con datos en el grupo p_{th} el cálculo estadístico de la prueba normalizada Z es de la siguiente manera:

$$Z_S = \frac{S - 1}{[VAR(S)]^{1/2}} \text{ Si } S > 0$$

$$Z_S = 0 \text{ Si } S = 0$$

$$Z_S = \frac{S + 1}{[VAR(S)]^{1/2}} \text{ Si } S < 0$$

Para calcular la probabilidad asociada con la estadística de prueba normalizada. La función de densidad en una distribución normal con una media de 0 y una desviación estándar de 1 se expresa en la siguiente ecuación:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

La tendencia es decreciente si Z es negativa y su probabilidad es mayor que el nivel de significancia. Por el contrario, si la tendencia aumenta, entonces Z es positivo y la probabilidad es menor que el nivel de significancia (Alhaji et al., 2018).

6.6. Análisis de serie de tiempo

Una serie de tiempo puede ser descrita como una función de cuatro componentes: tendencia (T_t), estacionalidad (S_t), componente de dependencia estocástica (η_t), y componente residual independiente (ε_t). De manera general puede expresarse matemáticamente de la siguiente manera:

$$x_t = T_t + S_t + \varepsilon_t + \eta_t$$

En el análisis de serie de tiempo los datos consisten en un patrón sistemático y ruido aleatorio. Este último, dificulta la identificación patrón del sistemático, el cual es representado por la tendencia y estacionalidad (siendo la naturaleza determinista), mientras que el componente estocástico explica el error aleatorio (Machiwal & Jha, 2012). La Figura 1 muestra gráficamente los primeros tres elementos de una serie de tiempo.

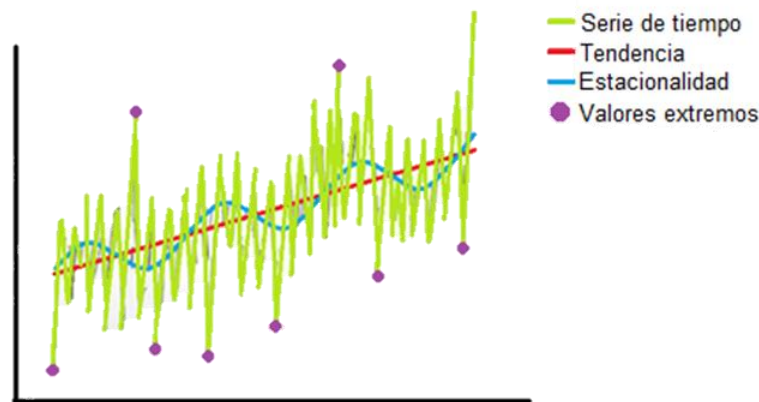


Figura 1. Elementos que componen una serie de tiempo: tendencia, estacionalidad y componente de dependencia estocástica

A continuación, se describen a mayor detalle los cuatro componentes que componen una serie de tiempo:

→ Tendencia

Es un cambio a largo plazo, en el cual la media cambia, permitiendo describir un patrón histórico o predecir el futuro. Es decir, se caracteriza por tener un patrón gradual y consistente en el cual las variaciones persistentes que afectan su comportamiento tanto a aumentar como a disminuir o incluso pueden tender a permanecer estables durante un cierto periodo de tiempo (Línea roja en Figura 1).

Cuando una línea de tendencia es lineal a lo largo del tiempo, ya sea positiva o negativa se mantiene constante, aproximándose a una línea recta se puede calcular a partir del método de mínimos cuadrados. Sin embargo, cuando la línea de tendencia no tiene un comportamiento lineal, ósea un comportamiento curvilíneo, puede ajustarse a funciones polinomiales, logarítmicas o exponencial.

→ Estacionalidad

Es la variabilidad que puede presentarse en función de influencia estacional (Figura 2). Este tipo de fluctuaciones se repiten cada cierto intervalo de tiempo, el cual puede presentar cierta periodicidad, el cual puede tener diferentes escalas de tiempo (diaria, semanal, mensual, trimestral o anual).

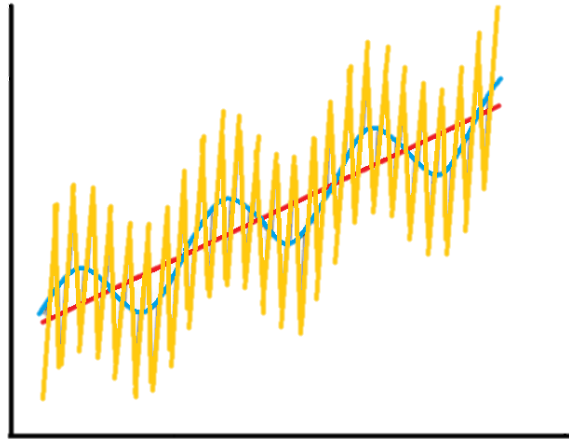


Figura 2. Ejemplo de variación estacional (línea naranja)

→ Dependencia estocástica

Este no responde a ningún patrón de comportamiento, siendo resultado de eventos fortuitos y aleatorios que ocurren de manera aislada en la serie de tiempo. Este es impredecible y no se puede predecir su impacto en la serie de tiempo. Se puede clasificar en dos: variación causada por eventos especiales, como las lluvias extraordinarias que puede generar un huracán, y variaciones por aleatorias a las cuales no se les puede atribuir una causa exacta (Figura 3).

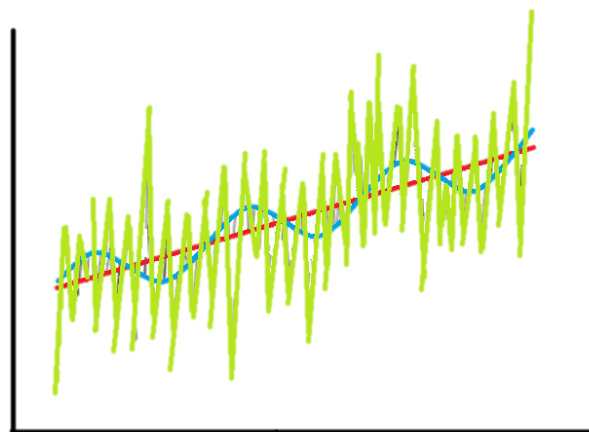


Figura 3. Ejemplo de variaciones con picos extraordinarios (línea verde)

→ Residuales independientes (ciclos)

Son secuencias alternas con movimientos por encima y por debajo de la línea de tendencia que pueden tener duraciones más largas que un año. Esta se puede obtener al eliminar variaciones estacionales y la tendencia (Figura 4).

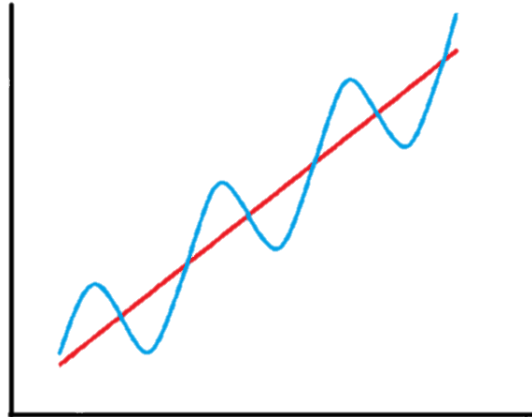


Figura 4. Ejemplo de residual independiente (línea azul)

Las series de tiempo pueden ser clasificadas en dos; estacionarias y no estacionarias. La primera se mantiene constante y estable a lo largo del tiempo, con una media y una varianza regular. Esto es que los datos de la serie oscilan próximos a la media. Mientras que en la serie no estacionaria, la media se mueve a lo largo del tiempo, pudiendo generar una tendencia a aumentar o decrecer y genera conflictos estadísticos al analizar diferentes periodos de tiempo de la serie (Villavicencio, 2010).

6.7. Políticas públicas sobre cambio climático

El proceso de la urbanización es alentado por distintos actores sociales, los cuales desarrollan diferentes actividades y posturas en un espacio dado. Por lo cual debe existir reglamentos y leyes que regulen y mantengan un orden. Sin embargo, al estar en contacto los actores sociales unos con otros, los dota de cierta capacidad para modificar la estructura y actividad social. Esto a través de la disponibilidad de recursos que se cuente, el nivel de conocimiento e información que disponga cada actor social para satisfacer necesidades e intereses políticos, económicos y culturales (Miranda Piedra, 2018).

6.7.1. Políticas públicas en el *marco internacional*

De acuerdo a las *Naciones Unidas Cambio Climático* (recuperado julio de 2020) al menos 2% de la superficie terrestre está ocupada por ciudades. Sin embargo, estas consumen cerca del 80% de la energía mundial y generan más del 60% de las emisiones de gases efecto invernadero. Volviendo a la población urbana altamente vulnerable a los efectos del cambio climático. Según la Organización de las Naciones Unidas, cada semana 1.4 millones de personas se trasladan a ciudades (ONU, 2018).

En América Latina, pocas ciudades han comenzado a desarrollar estrategias y medidas de adaptación ante el cambio climático. Como son: Santiago, Ciudad de México, Montevideo, Bogotá y Quito. Por otro lado, las ciudades pequeñas que crecen con rapidez tienen la oportunidad de estructurar su crecimiento bajo el diseño de estrategias y planes de desarrollo que contemplen el cambio climático. Desafortunadamente, a pesar del énfasis que se hace a los impactos del cambio climático, y las medidas tomadas en los países de América Latina que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), es carente la atención que se da a estrategias en las áreas urbanas o ciudades industrializadas (Sánchez Rodríguez & CEPAL, 2013).

El Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, tiene como objetivo lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, impidiendo interferencias antropogénicas peligrosas al sistema climático, y así asegurar la producción de alimentos y el desarrollo económico sostenible (De La Convención, 1998). El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), busca reducir las emisiones de partículas en suspensión que puedan alterar el balance de radiación, y aplicar medidas de control de las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, entre otros que alteren la concentración de ozono troposférico, ya que este tiene un efecto directo sobre el clima (Change, 2014).

6.7.2. Políticas públicas en el marco nacional-estatal

México es un país altamente vulnerable ante los efectos del cambio climático, y es por ello que es importante implementar estrategias de prevención, mitigación y adaptación, encaminadas a reducir la vulnerabilidad (Delgado et al., 2010). Este desafío conlleva problemas sociales, económicos y ambientales que la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) contempla para volverla una nación equitativa, con una economía verde, con ecosistemas y poblaciones resilientes y ciudades sustentables ante el cambio climático (DOF, 2013).

La participación de México en convenios, conferencias, protocolos, entre otros en el contexto internacional en materia de Cambio Climático ha sido constante, pues ha firmado la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, ratificada ante la ONU en 1993 y que entró en vigor en 1994. También participó en el Protocolo de Kioto en 1995 basado en los principios de la CMNUCC, en el Acuerdo de París que entró en vigor en 2016. Todas estas encaminadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, generando compromisos con medidas de mitigación y adaptación que disminuyan el incremento de la temperatura promedio a nivel mundial (INECC, recuperado en julio de 2020).

La Ley General de Cambio Climático busca instrumentar políticas y acciones para frenar el cambio climático de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo, la Estrategia Nacional, el Programa estatal y leyes aplicables que contemplen las materias en ordenamiento ecológico local y desarrollo urbano. Así como también menciona que la federación deberá elaborar una Política Nacional de Adaptación en el marco del Sistema Nacional de Cambio Climático, además de programas como asentamientos humanos y desarrollo urbano (LGCC, 2014). La Cámara de Diputados, propuso en 2015, prevenir y regular los efectos de la isla de calor, así como modificar diversos ordenamientos ambientales que proporcionen herramientas a la población para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de los riesgos que conlleva la contaminación térmica. La reforma planteada busca incorporar el término de isla de calor en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, y a la Ley General de Asentamientos Humanos. Con la intención de fortalecer la salud pública, la habitabilidad y la sociabilidad de las comunidades (Boletín N°5693, Cámara de Diputados, 2015).

6.8. Adaptación y mitigación ante la UHI

Actualmente nos hemos inmerso en el desarrollo económico, político y social, sin percibir que al facilitar la vida cotidiana volvemos más complejo el sistema, el cual deteriora el medio ambiente, altera los ecosistemas, afecta la salud y la calidad de vida (Manoli et al., 2019; Marando et al., 2019; Rodrigues et al., 2020; Vargas & Magaña, 2020). Creando escenarios en los que corremos más riesgo, en los que nos hacemos más vulnerables, excediendo los límites permisibles para la adaptabilidad, para la mitigación ante el cambio climático (Álvarez & Julián, 2014). Es por ello por lo que han surgido propuestas y medidas de adaptación y mitigación, no solo ante el cambio climático sino también ante el fenómeno de la UHI en varios países del mundo.

Manoli et al, (2019) mencionan que, como estrategia de mitigación en las regiones secas, sería más eficiente aumentar la cobertura verde, en contraparte, en las ciudades tropicales se requieren soluciones más innovadoras. Esto debido a que el aumento en la temperatura no es lineal y que cada ciudad tiene características físicas diferentes.

6.8.1. Propuestas internacionales

En Medellín Colombia, se realizó una prueba piloto en varios barrios. Estos se clasificaron de acuerdo con los que requerían más atención y los que no generan tanto impacto. Las medidas propuestas para mitigar la isla de calor fueron encaminadas a la plantación de árboles en áreas estratégicas, planteamiento de incentivos para la implementación de techos fríos, además del uso de las nuevas tecnologías que ayudan a mantener el pavimento frío. Todo esto se realizó con el fin de lograr minimizar el impacto de la UHI a una escala local. Aunado a esto, la prueba piloto permitió un mejor conocimiento de los costos de implementación para un área determinada (Chaverra & Estrada, 2019).

Otra propuesta como medida de mitigación y adaptación ante el fenómeno de la UHI se planteó en la ciudad de Huston. En el cual consideraron la geometría urbana, dónde detallaban la importancia de considerar ciudades geométricas, proponiendo específicamente el de una estrella, debido a que esta por sus ejes que son usados como vías de transporte, a su vez permiten la circulación del aire. En él también proponen ubicar estratégicamente áreas verdes de fácil accesibilidad y que reducen el efecto de la UHI. Aunque no solo contemplaron efectividad ambiental sino también los costes del desarrollo urbano, así como la factibilidad del transporte, lo cual se vuelve un factor dominante en la configuración urbana (Pierer & Creutzig, 2019).

El uso de infraestructura verde estratégica tiene el potencial de reducir el impacto de la isla de calor urbana, esto fue demostrado en una de las áreas metropolitanas de Sri Lanka, donde implementaron ese tipo de estructuras y además se elevó la cantidad de árboles en las banquetas. Debido a lo anterior

lograron tener resultados positivos, pues lograron reducir la temperatura hasta casi 2 °C. Logrando así mejorar la calidad de vida (Herath et al., 2018).

En la ciudad de Roma Italia se implementó una regulación climática a partir de la implementación de infraestructura verde, la cual implica aumentar la densidad de bosque periurbano, urbano y árboles en las calles, el cual tuvo como resultado que la infraestructura verde disminuye significativamente la temperatura durante el verano. Sin embargo, mencionan que esta regulación tiene diferentes efectos dependiendo de la infraestructura verde que se realice, además de los limitantes ambientales a los que puede estar expuesto, haciendo hincapié en que el método de regulación de la temperatura depende del contexto espacial de la ciudad (Marando et al., 2019).

6.8.2. Propuestas nacionales

En la ciudad de Torreón en Coahuila se ha experimentado un crecimiento demográfico exponencial en las últimas dos décadas debido al crecimiento industrial manufacturero. Contando con aproximadamente 4.8 m² de área verde por habitante. Sin embargo, los espacios urbanos poseen temperaturas muy altas, ya que los espacios con temperaturas más bajas representan un bajo porcentaje de superficie, y por lo tanto no amortiguan la diferencia de temperatura. Cabe resaltar que esta ciudad se encuentra en una región árida, por lo que proponen evaluar la capacidad de la vegetación en este tipo de clima, si se considera llevar a cabo una reforestación, para que la distribución de áreas verdes produzca un efecto más atenuante y eficiente (L. Flores et al., 2018).

Otro caso donde se construyeron escenarios de mitigación-adaptación fue la ciudad de Mexicali en Baja California. Para ello contemplaron varios aspectos urbanos y determinaron la aplicación de estrategias de una manera gradual hasta finalizar su aplicación en el 2030, es decir, que en el proceso de desarrollo urbano se incluirán las obras de urbanización y edificaciones actuales y futuras (Villanueva-Solis, 2018).

En la Ciudad de México, se encontró que la temperatura y las precipitaciones se han visto alteradas, debido a la pérdida de vegetación natural, que es remplazada por manchas urbanas. Se ha propuesto anteriormente pintar las superficies de blanco, sin embargo, esta medida no contempla el cambio de estaciones. Por lo que la propuesta más viable es colocar puntos estratégicos con vegetación de tipo arbórea. Lugares donde se amortiguaría la temperatura, gracias las áreas fóliales, ayudando también a la disminución de la contaminación atmosférica (V. Barradas, 2013).

La configuración socioespacial se ha visto influenciada por las acciones del Estado Mexicano. Históricamente se identifican tres etapas: 1) el Estado benefactor (1910-1980), en donde se excluyó buena parte de la población rural y priorizó a la urbana, lo que provocó una creciente migración del campo a la ciudad; 2) el Estado neoliberal (1980-2000) que se caracteriza por impulsar el mercado, privatizar el patrimonio público y reducir el papel del gobierno en el desarrollo nacional; esto generó, 3) una crisis del Estado (2000-2012) por las acciones fragmentadas y descoordinadas de los actores metropolitanos (A. V. Flores & Cenecorta, 2015).

La ciudad de Toluca surgió como un asentamiento fundamentalmente agrícola, que en las últimas décadas ha migrado hacia un modelo metropolitano. La urbanización comenzó en 1979 y para 1993 se identificó como zona metropolitana, basada en la industria, diversificación de servicios y la generación de empleos. En términos urbanísticos, su crecimiento se ha caracterizado por cuatro procesos: 1) la ocupación urbana a lo largo de vialidades e infraestructuras importantes, 2) el crecimiento de los asentamientos humanos en las cabeceras municipales, 3) la construcción de conjuntos urbanos de vivienda y asentamientos irregulares y 4) la construcción hormiga de edificaciones e instalaciones entorno de la zona metropolitana (Venancio, 2016).

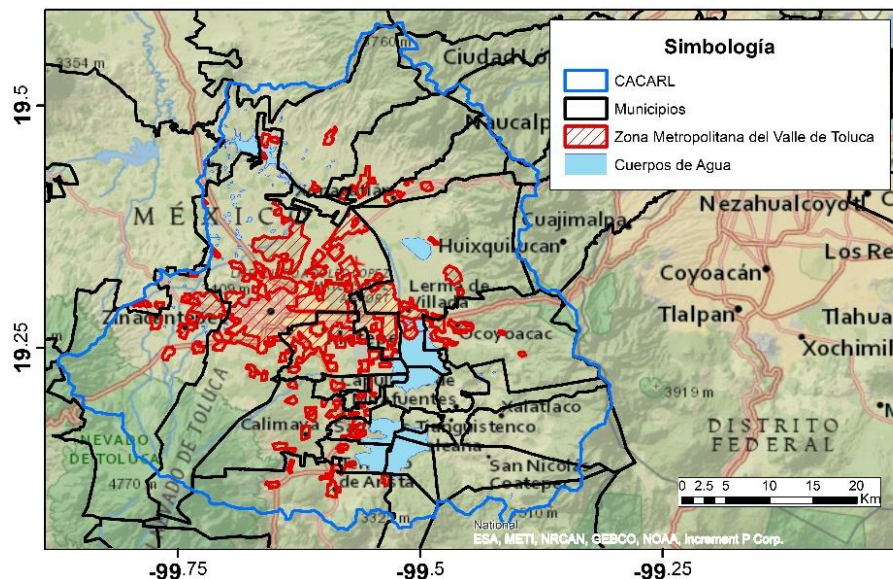


Figura 6. Área urbana en la CACARL del año 2016 con información de INEGI, tomada del geoportal de CONABIO

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) se conformó a principios de la década de los setenta, cuando inicia la construcción del corredor industrial Toluca-Lerma (1973). Esto propició el desarrollo desordenado de un modelo metropolitano basado en la industrialización, que actualmente abarca 16 (Figura 6) Siendo: Toluca, Xonacatlán, Zinacantepec, Lerma, Metepec, San Mateo Atenco, Chapultepec, San Antonio la Isla, Calimaya, Almoloya de Juárez, Temoaya, Tenango del Valle, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Rayón y Oztolotepec (COESPO, 2020). De acuerdo con datos de INEGI,

(1910), la población de las localidades ubicadas en el CACARL en 1995 era de aproximadamente 1,382,389 y para el 2010 alcanzó una población de 1 millón 997 mil 492 (Figura 7), teniendo una diferencia aproximada de 1 millón 615 mil 103 habitantes en la cuenca.

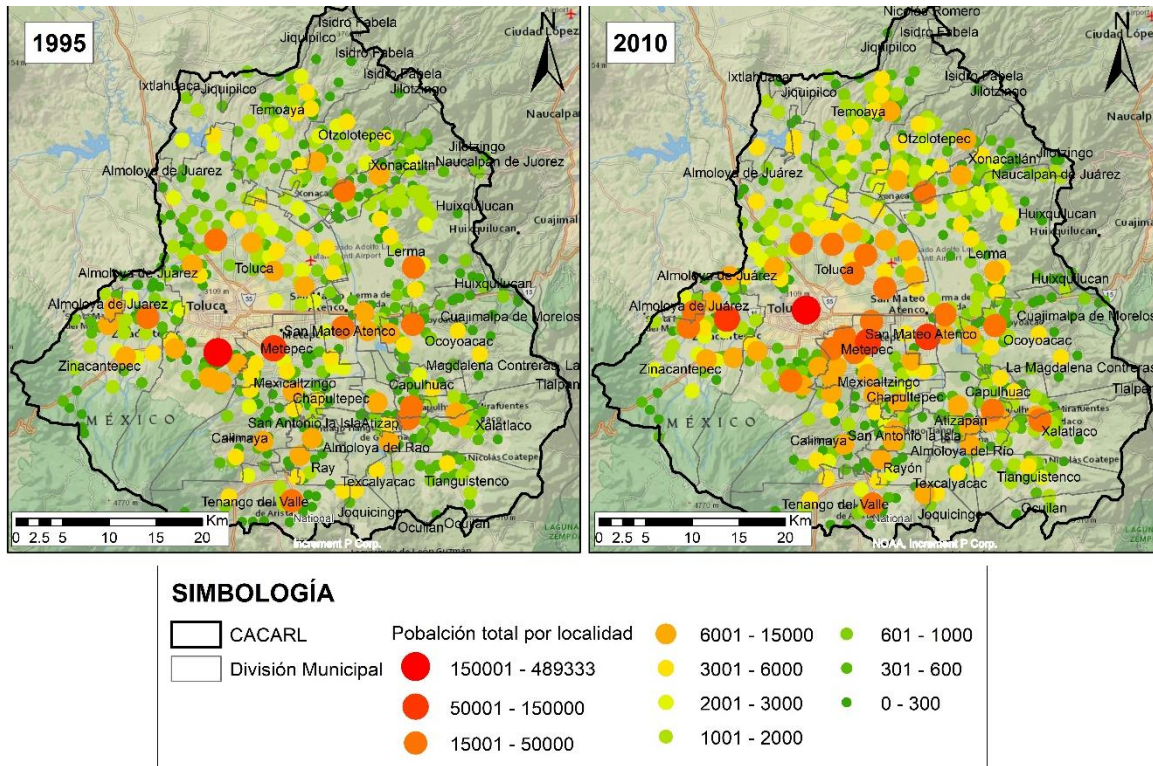


Figura 7. Población por localidad en la CACARL para 1995 y 2010

c) Clima

En la parte más alta del CACARL, ubicado en el Nevado de Toluca (Xinantécatl), presenta un clima frío de altura (E(T)H), con una temperatura media anual de entre -2 y 5 °C. En la porción que comprende los complejos montañosos de la Sierra de las Cruces y Monte Alto se percibe un clima semifrío (C(E)(w₂)(w)). En general, el clima que predomina en el CACARL es templado subhúmedo (C(w₂)(w)) (INEGI, 2016).

De acuerdo con la CONAGUA (2015), la precipitación media anual del Valle de Toluca está entre 800 y 1,000 mm, mientras que en las laderas del Nevado de Toluca se presentan precipitaciones mayores a 1,200 y 1,400 mm. La temporada de lluvias abarca de mayo a octubre, siendo las más intensas en los meses de junio a septiembre, con valores cercanos de 140 mm mensuales. En tanto que, la temporada de estiaje comprende los meses de entre noviembre y abril.

d) Hidrografía

El área de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 12 Lerma-Santiago. Algunos de los escurrimientos provienen del Nevado de Toluca con dirección oriente hacia San Antonio la Isla. Aunque existen escurrimientos de forma radial, siendo: el río Verdiguél (que atraviesa Toluca y descarga en el río Lerma, poco antes del embalse de la presa José Antonio Alzate), el río San Luis, y otros pequeños que forman el río Tejalpa (principal aportador de la presa Alzate). Otros escurrimientos provienen de la Sierra de las Cruces y de las sierras de Monte Alto y su prolongación hacia el norte descienden los ríos Mayorazgo, Oztolotepec y el arroyo Zarco que aportan al río Lerma.

Anteriormente el nacimiento del río Lerma se originaba en los manantiales que alimentaban la laguna de Almoloya del Río. Sin embargo, con el paso de los años la explotación intensiva de los cuerpos de agua, han desaparecido manantiales y han reducido de tamaño las lagunas. Actualmente las aportaciones que recibe el río Lerma son de aguas residuales provenientes de Toluca y poblaciones aledañas, además del corredor industrial Toluca-Lerma, siendo una de las cuencas más contaminadas del país (CONAGUA, 2015).

e) Vegetación

De acuerdo con el Atlas de la cuenca del Río Lerma (Nava, 2011), la superficie forestal se encuentra en las zonas montañosas de mayor pendiente, donde predominan los bosques templados (oyamel, pino y encino). Por su parte, en el valle, la vegetación natural ha desaparecido casi por completo, debido a que la mayor parte de las tierras del Alto Lerma se usan para agricultura de temporal, y en menor proporción, agricultura de riego.

En las partes amplias de las ciénegas se encuentra vegetación helofítica que llaga a extenderse hasta el interior de la laguna, además de algunas especies que tienden a proliferar en las orillas de las ciénegas, como son: las gramíneas y ciperáceas.

De acuerdo con la Guía para la interpretación de cartografía de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI, el sistema de clases se organiza de acuerdo con las características propias de los diferentes tipos de vegetación con compatibilidad ecológica y fisonómica. En seguida se describen con más detalle las cubiertas vegetales y los diferentes manejos de uso de suelo en el área de estudio:

Tipos de vegetación

Bosque de coníferas, tales como bosque de oyamel, pino y pino encino. Estas son comunidades arbóreas, subarbóreas o arbustivas, característicos de regiones templadas y semifrías con diferentes grados de humedad.

Bosque de encino, y encino-pino. Igualmente, estas son comunidades arbóreas, subarbóreas o arbustivas. Estos se encuentran muy relacionados con bosques de pino, formando bosques mixtos.

Pastizal y pradera de alta montaña, es una comunidad herbácea, en las cuales predominan las especies de gramíneas y gramíneas. Además, estas se ven influenciadas por el clima y el tipo de suelo.

Vegetación hidrófila halófila, y tulares, son una comunidad arbórea, arbustiva o herbácea que se encuentran en zonas pantanosas o inundables, aunque también se les conoce como humedales.

Vegetación inducida, la cual se ve favorecida por interrupciones de las sucesiones vegetales naturales, debido mayormente a las actividades humanas o por otras circunstancias particulares que favorecen su aparición.

Ahora bien, el desarrollo de vegetación de las diferentes comunidades, pueden tener distintos estados sucesionales de la vegetación natural es: la vegetación primaria, esta es vegetación que no presenta alguna alteración, y la vegetación secundaria, que reemplaza la vegetación primaria por factores humanos o naturales. Esta comunidad vegetal es significativamente diferente a la vegetación natural anterior.

Las alteraciones o modificaciones que favorecen el desarrollo de vegetación secundaria son, por ejemplo: incendios, erupciones, huracanes, heladas, nevadas, sequías, inundaciones, deslaves, plagas, variación climática, entre otros. Sin embargo, en la actualidad las actividades humanas han vuelto más complejas su delimitación y localización, y muchas veces se somete a una presión muy alta que no permite su desarrollo y surge una vegetación inducida. Debido a la complejidad para definir las fases sucesionales, a causa de su heterogeneidad florística y ecológica se consideran tres fases: vegetación secundaria herbácea, arbustiva y arbórea.

Tipos de agroecosistemas

Agrícola, el cual agrupa los distintos tipos de agricultura, como: agricultura de temporal, de riego, de humedad y bosque cultivado. Siendo áreas de producción para consumo humano, ya sea como alimento, forraje, ornamental o industrial.

Otro rasgo

De acuerdo con INEGI existen otras categorías de uso de suelo que son agrupadas en este apartado, describiéndose enseguida:

Cuerpo de agua, es una extensión de cubierta de agua

Urbano construido, es un conglomerado demográfico dentro de elementos naturales y obras materiales que lo componen

Área desprovista de vegetación, es una zona en la cual se ha removido la vegetación natural o inducida por diferentes actividades humanas.

Sin vegetación aparente, son aquellas zonas en las que no es visible o detectable algún tipo de vegetación, debido a la presencia de eriales, depósitos litorales, bancos de ríos, o donde algún factor ecológico no permite el desarrollo vegetal, pudiendo ser por salinidad o sodicidad, pérdida de suelo y por climas extremos.

7.2. Método

Se planteó la metodología de la Figura 8 la cual se dividió en 4 fases en función del procesamiento de las bases de datos y su análisis. Estas fases son acordes al objetivo general y los objetivos particulares planteados en la investigación y serán descritas a continuación.

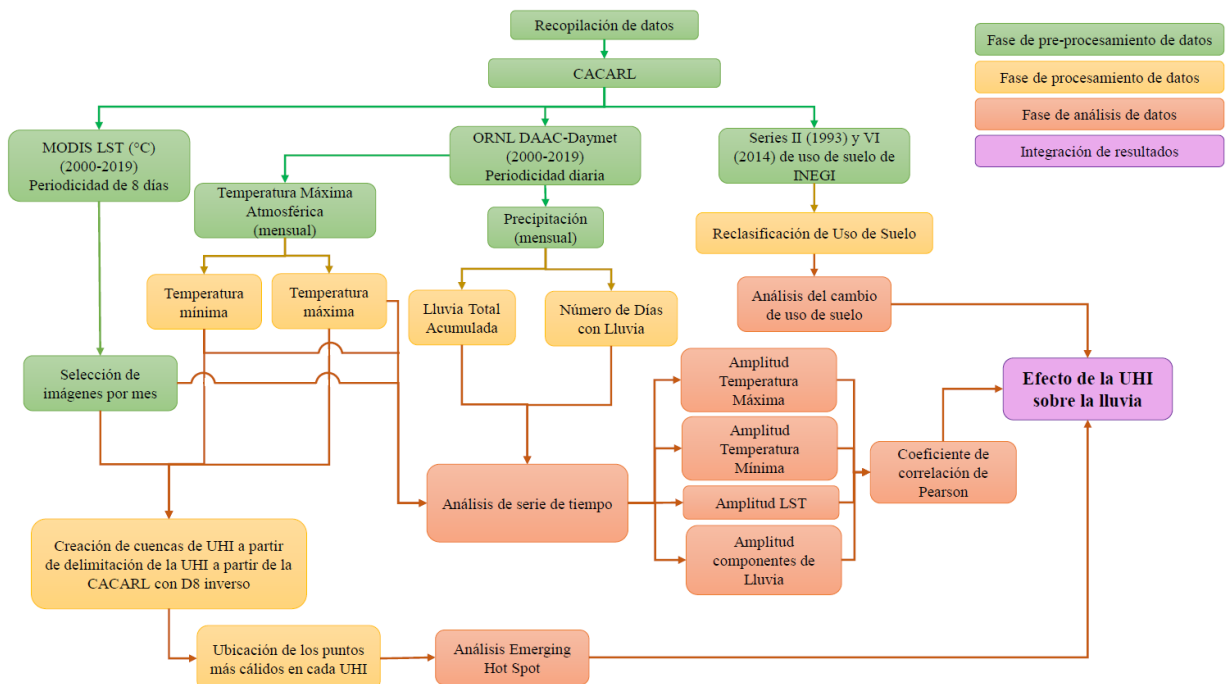


Figura 8. Diagrama de flujo del método aplicado

7.2.1. Fase de pre-procesamiento de datos

Se recopiló la información y los datos necesarios que sustentan la investigación. Para ello se recurrió a diferentes fuentes de información; MODIS producto LST (Land Surface Temperature), la base de datos de Daymet (temperatura máxima y precipitación) y las capas de uso de suelo de INEGI.

a) Temperatura de Superficie (MODIS)

La temperatura de superficie se obtuvo del satélite MODIS del producto LST (Z. Wan, 2015). Este producto (MOD11A2 Versión 6) proporciona información de la temperatura de la superficie terrestre, con una resolución espacial de un kilómetro cuadrado con un sistema de referencia y proyección en coordenadas geográficas, ESFEROIDE y DATUM WGS84. Estas imágenes se recopilan cada 8 días, debido a que el doble de este periodo es el periodo de repetición de la trayectoria terrestre exacta en las plataformas Terra y Aqua en una cuadrícula de 1,200 por 1,200 kilómetros. Además, se realizó una selección de imagen mensual, con el objetivo de eliminar aquellas que tengan ruido o error radiométrico (presencia de nubes que generan ausencia de datos) sobre o alrededor de la CACARL.

Se recabaron imágenes de febrero de 2000 a diciembre de 2019, para toda la República Mexicana sumando un total de 6,684 imágenes, las cuales formaron un mosaico del país obteniendo 1,114 (Figura 9).

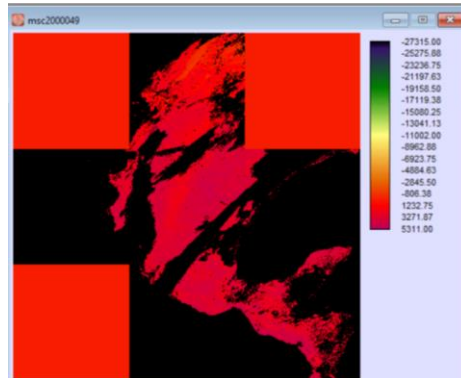


Figura 9. Unión de los mosaicos que conforman la República Mexicana

Posteriormente se cambió el sistema de referencia a Cónica Conforme de Lambert a una resolución de 1000 metros (Figura 10).



Figura 10. Transformación de sistema de referencia a Cónica Conforme de Lambert

Las imágenes de temperatura se ingresaron al software para poder realizar la conversión de temperatura de grados Kelvin a grados Celsius. Una vez convertida la temperatura se multiplicó por el factor 100, con la intención de conservar decimales y dar resultados más exactos.

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{K} * 0.02 - 273.15) * 100$$

Después se realizó un corte al tamaño del Estado de México, y posteriormente se seleccionaron aquellas imágenes que conservan la mayor cantidad de información, en esta selección se contempló dejar periodos similares entre cada imagen (Figura 11), con el fin de conservar una imagen por mes, resultando en 239 imágenes.

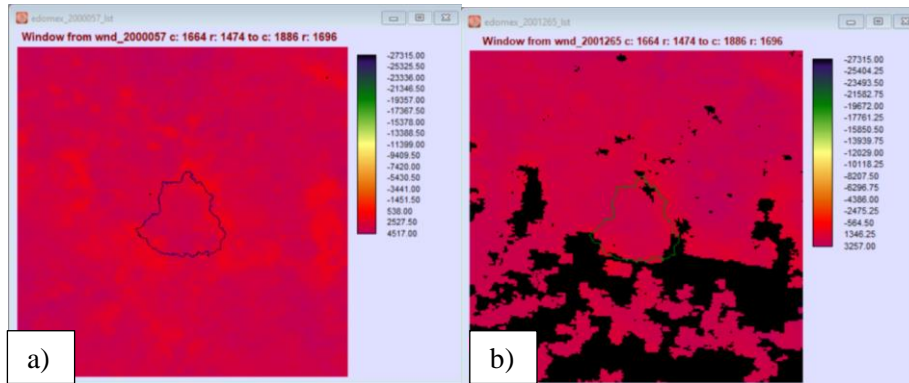


Figura 11. Selección de imágenes de temperatura. a) Es una imagen seleccionada, mientras que la imagen b) Muestra algunas partes con ausencia de datos lo que la descarta

b) Temperatura máxima (DAYMET)

Daymet proporciona estimaciones cuadráticas, continuas y a largo plazo de variables meteorológicas y climatológicas diarias, obtenidas mediante interpolación y extrapolación de observaciones terrestres mediante técnicas de modelado estadístico. Las variables meteorológicas incluyen temperatura máxima, precipitación, radiación de onda corta, equivalente en nieve, estos datos se producen en una cuadrícula de 1 kilómetro por 1 kilómetro sobre América de Norte continental y Hawái desde 1980, y sobre Puerto Rico desde 1950 hasta el final año calendario completo más reciente (Thornton et al., 2016).

El pre-procesamiento de las imágenes de temperatura máxima consistió en importar las imágenes mensuales a *TerrSet* y se ajustaron al tamaño de la república y se cambió el sistema de referencia a Cónica Conforme de Lambert (Figura 12), y posteriormente se realizó un corte al área del Estado de México (Figura 13).

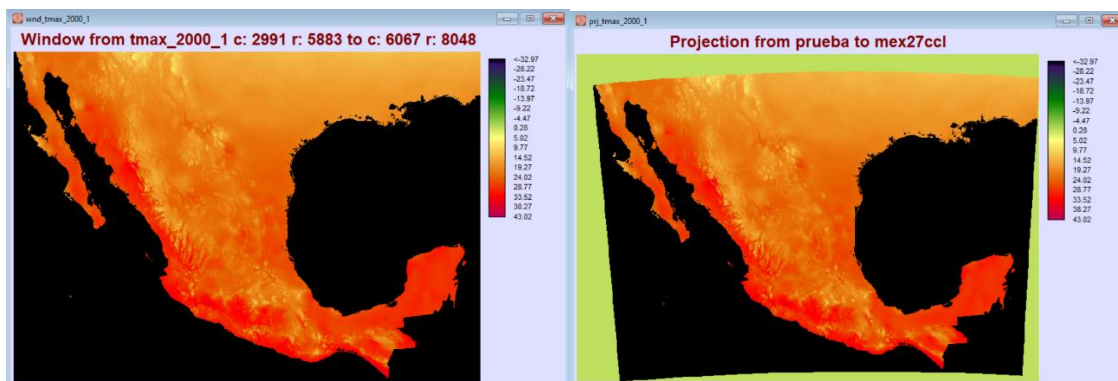


Figura 12. Recorte y re-proyección de las imágenes de temperatura máxima

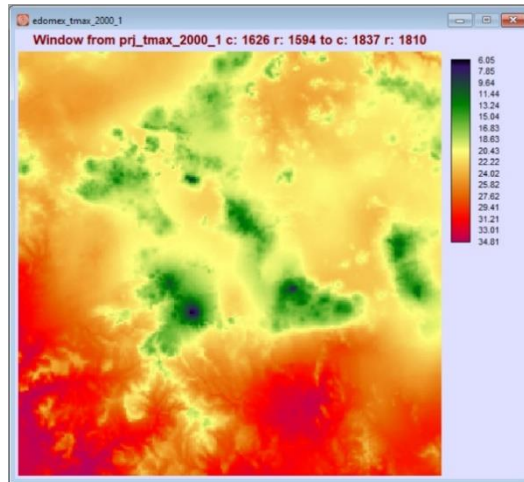


Figura 13. Corte de la imagen de temperatura máxima al área del Estado de México

d) Componentes de lluvia (DAYMET)

El sistema de proyección de las imágenes de precipitación, también se cambió el sistema de referencia a Cónica Conforme de Lambert, y se cortó al tamaño del Estado de México (Figura 14).

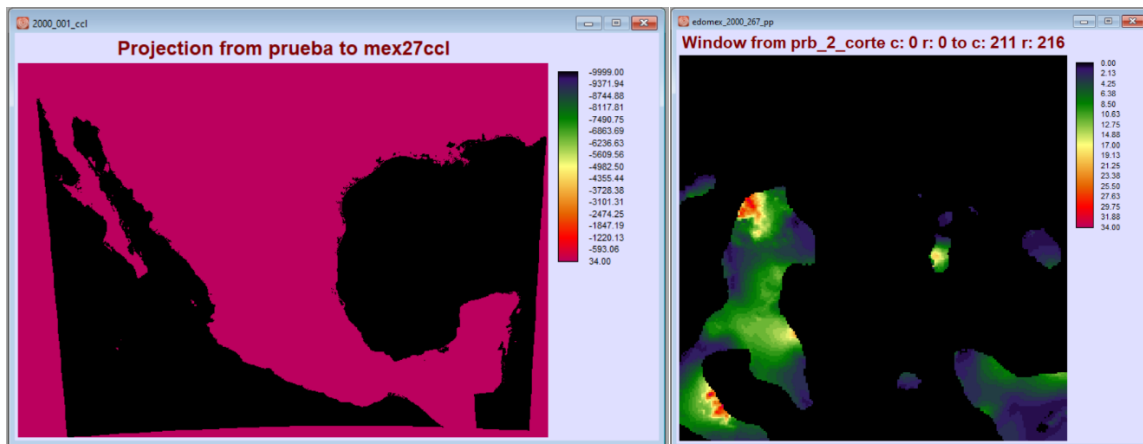


Figura 14. Cambio de sistema de coordenadas y corte al área del Estado de México, respectivamente

Posteriormente la precipitación diaria se sumó para obtener la precipitación mensual y se realizaron otras operaciones para generar tres componentes de precipitación que se describirán más adelante.

e) Uso de suelo

Las capas de información de uso de suelo y vegetación fueron tomadas del portal de CONABIO, y estas están elaboradas por INEGI, el cual ha generado seis series hasta la fecha: Serie I (1980), Serie II (1990), Serie III (2002-2005), Serie IV (2007-2010), Serie V (2011-2013) y la Serie VI (2014-2017) (Conabio, 2021). Aunque las fechas de referencia en cada serie son: Serie I (1980), Serie II (1993), Serie III (2002), Serie IV (2007), Serie V (2011) y Serie VI (2014). Este conjunto de datos

vectoriales se encuentra en una escala 1:250,000, la cual abarca todo el país (Figura 15). Estas muestran la distribución de uso de suelo agrícola, vegetación natural e inducida, al igual que el uso pecuario y forestal, entre otros (Geografía (INEGI), s. f.).

La información de los conjuntos de datos vectoriales de la Serie VI se obtuvieron a partir de la interpretación de imágenes LANDSAT TM8 del año 2014, estos datos fueron verificados con trabajo de campo. Los datos de la Serie II se obtuvieron a partir de imágenes satelitales de LANDSAT TM del año 1993, los cuales fueron validados con datos de campo (Geografía (INEGI), s. f.).

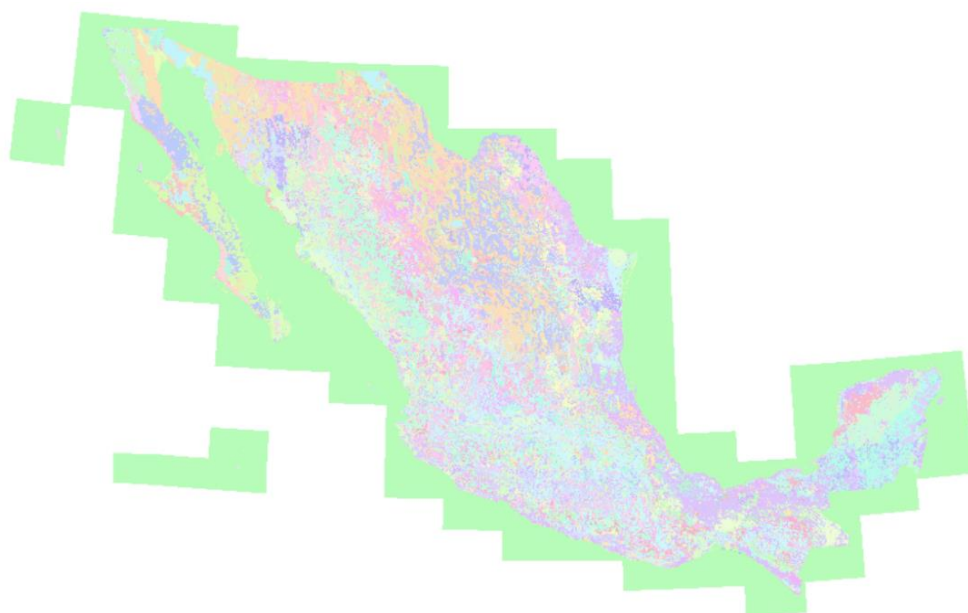


Figura 15. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo. INEGI

En este estudio se usaron las Series II (1993) y VI (2014) para un análisis de cambio de uso de suelo, esto debido a su concomitancia con la temporalidad de las bases de datos de DAYMET y MODIS. El pre-procesamiento de estas consistió en homologar los usos de suelo para su análisis de cambio.

7.2.2. Fase de procesamiento de datos

a) Delimitación de la UHI de superficie y de temperatura atmosférica máxima

A las imágenes de temperatura de superficie y temperatura atmosférica máxima se multiplicaron por el factor -1 para detectar el área de influencia de la UHI. Para ello se utilizó el módulo de *Dirección de flujo* del software ArcGis, basado en el modelo de dirección de flujo D8 (Figura 16).

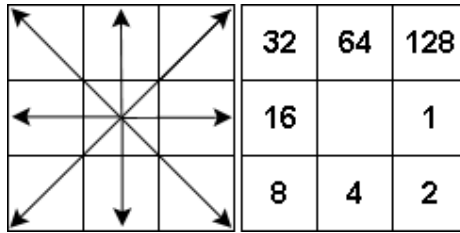


Figura 16. Diagrama del algoritmo de Dirección de flujo

La lógica de este módulo está basada en el principio básico en la que el flujo se dirige hacia la celda de menor potencial, dicho de otro modo, el flujo va de mayor a menor. En el caso de la detección de la isla de calor se hace la analogía de que la temperatura fluye hacia la dirección con mayor temperatura (gradiente térmico) esto al ser multiplicada por -1, y se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$pendiente = \arctan\left(\frac{\Delta T}{d}\right)$$

Donde:

ΔT =Diferencia de temperatura entre dos puntos

d = distancia

mostrando direcciones horizontales, verticales y diagonales, lo que representaría el norte, este, sur, oeste, noreste, sueste, suroeste y noroeste. Para lograr que la temperatura siguiera la lógica de dirección de flujo se multiplico por el factor -1 (Figura 17). Esta lógica ha sido utilizado para detectar islas frías en la capital de China, Beijing (Lin et al., 2015) y para detectar islas de calor en Querétaro, México (Godinez-Tovar & Lopez-Gutierrez, 2018).

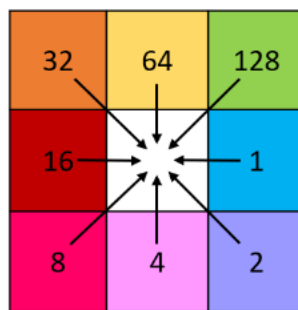


Figura 17. Diagrama del algoritmo de Dirección de flujo inverso

Después de obtener la dirección de flujo se ingresó al módulo *Basin* para hacer las cuencas de temperatura y seleccionar aquellas que cubran la CACARL (Figura 18) y hacer un conteo de estas para luego graficarlas y ver su comportamiento en el tiempo.

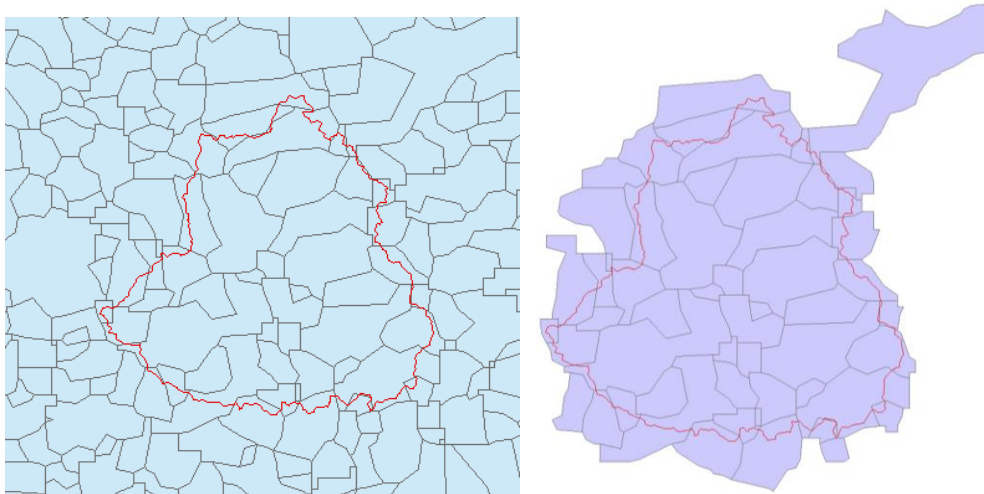


Figura 18. Selección de celdas que cubren la CACARL

b) Ubicación de los puntos más cálidos

Identificadas las cuencas térmicas, se identificaron los puntos más cálidos en las cuencas de temperatura, a partir del módulo *Sink* de ArcGis que muestra el píxel más bajo en una red de flujo, es decir, cuando las celdas vecinas son mayores y no se puede designar una dirección de flujo hacia alguno de los ocho valores validos en la dirección de flujo. Teniendo así lo equivalente a un exutorio endorréico (Figura 19). Siendo así y siguiendo la analogía del gradiente de temperatura, este módulo permitió detectar los puntos más cálidos y que dan origen a las islas de calor. Posteriormente estos se observaron conjuntamente para conocer su comportamiento.

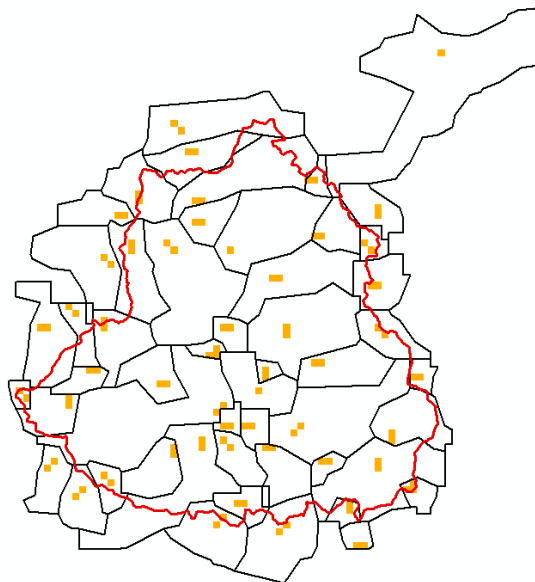


Figura 19. Los puntos más cálidos en la cuenca de temperatura de superficie se pueden apreciar en color naranja

c) Componentes de lluvia

Se calcularon dos componentes de precipitación, Lluvia Total Acumulada (LLTOT) y Número de Días con Lluvia (NDLL).

La LLTOT se calculó sumando la precipitación diaria correspondientes a cada mes desde enero de 2000 hasta diciembre de 2019, respetando el número de días correspondientes a cada mes (Figura 20). Obteniendo 240 imágenes.

$$LLTOT_i = \sum_{j=1}^n LL_j$$

Donde:

$LLTOT_i$ = Lluvia total acumulada del mes i

LL_j = Lámina de lluvia del día j en milímetros

n = número total de días del mes i

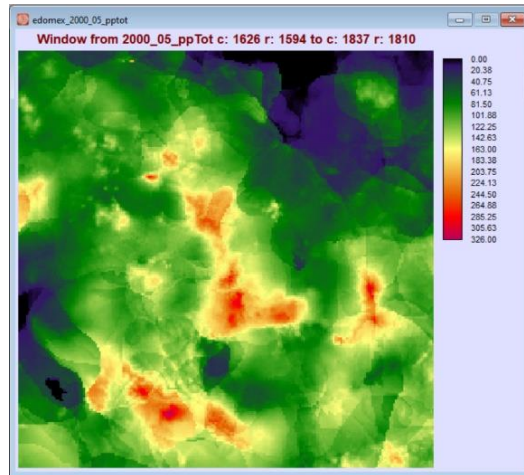


Figura 20. Imagen resultante de la suma de precipitación diaria para el mes de mayo del 2000

El NDLL se calculó a partir de la suma de días con precipitación mayor a cero, correspondientes a cada mes, para ello se realizó una reclasificación para obtener el conteo de días con lluvia (Figura 21).

$$DLL_j = \begin{cases} 0 & \forall LL_j = 0 \\ 1 & \forall LL_j > 0 \end{cases}$$

$$NDLL_i = \sum_{n=j}^n DLL_j$$

$NDLL_i$ = Número de días con lluvia

DLL_j = Valoración booleana de lluvia en el día

n = número total de días del mes i

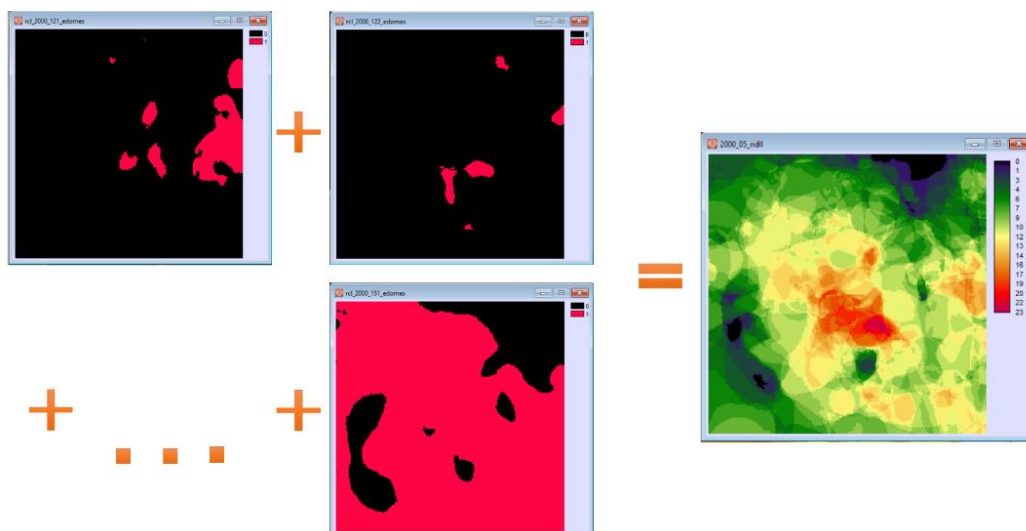


Figura 21. Ejemplo de la suma de reclasificación de días con lluvia para el mes de mayo del 2000

d) Uso de suelo

Para el análisis de cambio de uso de suelo se usaron las Series II (1993) y VI (2014) de INEGI en el módulo *Land Change Modeler*, y previo a ingresarse al módulo, se cortaron las capas al tamaño de la cuenca CACARL y se recategorizaron algunos usos de suelo hasta quedar solo 9 categorías generales (Tabla 2).

Tabla 2. Recategorización de uso de suelo de las Serie II y Serie VI de INEGI

Categoría original	Recategorización
Área desprovista de vegetación (Serie VI)	Suelo desnudo
Sin vegetación aparente (Serie II y Serie VI)	
Tular (Serie VI)	Vegetación halófila hidrófila
Vegetación halófila hidrófila (Serie II)	
Zona urbana (Serie II)	Asentamiento Humano
Urbano construido (Serie VI)	
Cuerpo de agua (Serie II)	Cuerpo de agua
Agua (Serie VI)	
Agricultura de humedad anual (Serie II y Serie VI)	Agricultura de riego
Agricultura de riego anual (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de oyamel (Serie II y Serie VI)	Bosque secundario
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de pino-encino (Serie II y Serie VI)	

Pastizal inducido (Serie II y Serie VI)	Pastizal
Pradera de alta montaña (Serie II y Serie VI)	
Bosque cultivado plantación forestal permanente (Serie II)	Bosque
Bosque de encino (Serie II y Serie VI)	
Bosque de encino-pino (Serie II y Serie VI)	
Bosque de oyamel (Serie II y Serie VI)	
Bosque de pino (Serie II y Serie VI)	
Bosque de pino-encino (Serie II y Serie VI)	
Bosque cultivado (Serie VI)	Agricultura de temporal
Agricultura de temporal anual (Serie II y Serie VI)	
Agricultura de temporal anual y permanente (Serie II y Serie VI)	

El módulo *Land Change Modeler* de TerrSet es una herramienta para la evaluación y predicción de cambio de uso de suelo, en el cual se ingresan dos imágenes, siendo la cobertura anterior y la cobertura posterior, para este estudio 1993 y 2014. Y posteriormente se organizan las categorías de uso de suelo en ambas imágenes para analizarlas entre ellas mismas, y así identificar el uso de suelo anterior y si persistió o cambió.

7.2.3. Fase de análisis de datos

a) Análisis Puntos Cálidos Emergentes de superficie y de Temperatura Atmosférica Máxima

A partir de los puntos más cálidos de las cuencas de temperatura se usaron las herramientas de ARCGIS PRO (Create Space Time Cube By Aggregation y Emerging Hot Spot Analysis) que analizan las distribuciones de datos y patrones tanto en espacio como tiempo (Putrenko et al., 2018), y puede ser usada en diferentes áreas de la ciencia para analizar el comportamiento de eventos o fenómenos que ocurren en un lugar dado y un tiempo determinado (Hosseini et al., 2017; Putrenko et al., 2018; Nielsen et al., 2020; Moanga et al., 2021).

Esta herramienta identifica tendencias a partir de una agrupación de puntos con diferentes densidades, las cuales se distribuyen en espacio-tiempo. Formando un cubo en tres dimensiones (Figura 22), este cubo contiene celdas, las cuales representan una ubicación geográfica con diferencias temporales, y cada celda contiene un conjunto de puntos. Es necesario hacer énfasis en que el módulo permite ajustar el intervalo de distancia, el cual generará más celdas si el intervalo de distancia es pequeño, y celdas grandes si el intervalo es mayor, además también se define la escala temporal diaria, mensual o anual.

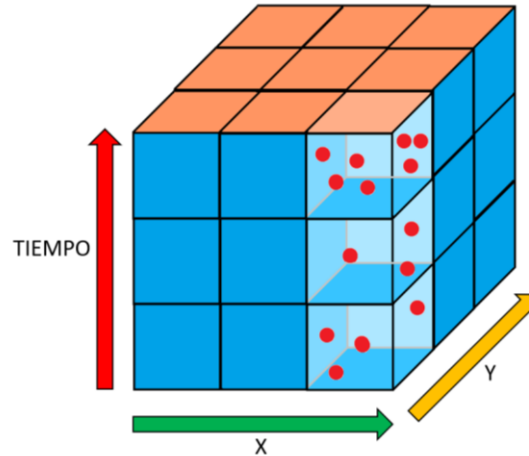


Figura 22. Ejemplo de un cubo de puntos calientes emergentes

Una vez definido la escala temporal y el intervalo de distancia, el módulo hace un recuento de los puntos por celda y aplica la prueba Mann-Kendall, y con ello definir si muestra una tendencia positiva o negativa y finalmente determinar si el resultado obtenido es significativo estadísticamente a partir del valor z y el valor p en cada celda (Tabla 3). Posteriormente, en el cubo creado se considera el valor de recuento para cada celda en espacio-tiempo, dentro del contexto de los valores. Siendo clasificadas 16 categorías: 8 para puntos de calor, 8 para puntos fríos (nuevo punto, consecutivos, intensificados, persistentes, decrecientes, esporádicos, oscilantes e históricos) y sin tendencia o patrón aparente.

Tabla 3. Clasificación estadística significativa de los puntos emergentes y clasificación de tendencia estadística con grado de confianza

Clasificación estadísticamente significativa (p)		Clasificación de tendencia estadística (z)	
-3 → punto frío	99% de confianza	-3 → tendencia negativa	99% de confianza
-2 → punto frío	95% de confianza	-2 → tendencia negativa	95% de confianza
-1 → punto frío	90% de confianza	-1 → tendencia negativa	90% de confianza
0	No significativo	0	Sin tendencia significativa
1 → punto cálido	90% de confianza	1 → tendencia positiva	90% de confianza
2 → punto cálido	95% de confianza	2 → tendencia positiva	95% de confianza
3 → punto cálido	99% de confianza	3 → tendencia positiva	99% de confianza

Obteniendo una tabla compuesta entre ambos análisis estadísticos con 16 categorías (Tabla 4). En donde se describe las características de cada punto emergente significativo.

Tabla 4. Clasificación de las 16 categorías de puntos emergentes fríos y cálidos de la herramienta de ArcGis

Categoría (Patrón)	Definición
Sin patrón detectado	No se detecta un patrón frío o cálido
Punto cálido nuevo	Punto estadísticamente significativo en el último paso del tiempo, y nunca había sido un punto cálido estadísticamente significativo
Punto cálido consecutivo	Punto estadísticamente significativo en los últimos intervalos de tiempo de manera ininterrumpida. Este nunca había sido un punto cálido estadísticamente significativo antes de la ejecución final y menos del 90% de todas las celdas son puntos cálidos estadísticamente significativos
Punto cálido intensificado	Punto estadísticamente significativo durante el 90% de los intervalos de tiempo incluido los últimos intervalos de tiempo. Además, la intensidad aumenta en cada intervalo de tiempo significativamente.
Punto cálido persistente	Punto estadísticamente significativo en el 90% de los intervalos de tiempo sin una tendencia apreciable de aumento o disminución en la intensidad del punto cálido
Punto cálido decreciente	Punto estadísticamente significativo durante el 90% de los intervalos de tiempo, incluido los últimos intervalos de tiempo. La intensidad del punto ha ido disminuyendo significativamente de forma general
Punto cálido esporádico	Punto intermitente, con menos del 90% de los intervalos de tiempo ha sido un punto cálido estadísticamente significativo
Punto cálido oscilante	Punto estadísticamente significativo en los últimos intervalos de tiempo, que tiene un historial de ser un punto frío durante un intervalo de tiempo anterior. Menos del 90% del intervalo de tiempo han sido puntos cálidos estadísticamente significativos
Punto cálido histórico	En los últimos intervalos de tiempo no es un punto cálido, pero en al menos un 90% de los intervalos ha sido un punto cálido estadísticamente significativo
Punto frío nuevo	Punto estadísticamente significativo en los últimos intervalos de tiempo y nunca había sido un punto frío estadísticamente significativo
Punto frío consecutivo	Punto estadísticamente significativo en los últimos intervalos de tiempo de forma ininterrumpida. Este no había sido un punto frío antes de la ejecución final del punto frío y menos del 90% de las celdas son estadísticamente significativas
Punto frío intensificado	Punto estadísticamente significativo durante el 90% de los intervalos de tiempo. Además, la intensidad del punto ha aumentado significativamente de manera general

Punto frío persistente	Punto estadísticamente significativo durante el 90% de los intervalos de tiempo, sin una tendencia apreciable de aumento o decremento a lo largo del intervalo del tiempo
Punto frío decreciente	Punto estadísticamente significativo durante el 90% de los intervalos de tiempo. Además, la intensidad disminuye significativamente
Punto frío esporádico	Punto intermitente donde menos del 90% de los intervalos de tiempo han sido puntos fríos estadísticamente significativos
Punto frío oscilante	Punto estadísticamente significativo en los últimos intervalos de tiempo que tienen un historial de ser un punto cálido estadísticamente significativo en un intervalo de tiempo anterior. Donde menos del 90% de los intervalos de tiempo ha sido punto frío estadísticamente significativo
Punto frío histórico	En los últimos intervalos de tiempo no es frío, pero al menos un 90% de los intervalos de tiempo ha sido un punto frío estadísticamente significativo

Esta herramienta determina la variabilidad en el cubo de tiempo a partir de la estadística G_i^* de Getis y Ord (Ord & Getis, 1995), el cual calcula para cada celda de análisis con respecto a las vecinas. Los valores finales de estimaciones de la probabilidad y la desviación estándar (p y z respectivamente), indicando zonas en las que se agrupan eventos con valores más altos o bajos.

El método que utiliza la herramienta de puntos cálidos emergentes (Emerging Hot Spot) funciona analizando cada celda en el contexto geográfico, en función de los datos vecinos. Dicho de otro modo, para que pueda considerarse un punto cálido emergente este debe poseer un valor alto y también debe estar rodeado por otros que igual estén altos. Obteniendo que, si la cantidad local es diferente de la esperada, puede generar una discrepancia demasiado grande para ser resultado de un proceso aleatorio, lo que daría un valor z estadísticamente significativo. Obteniéndose a partir de la siguiente ecuación:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{s \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{n-1}}}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} - (\bar{x})^2}$$

Donde:

x_j = valor atribuido para el evento j, w_i

j = peso espacial entre los eventos i y j

n = número total de eventos

X = media de los valores aritméticos

S = dispersión

El valor estadístico de G_i^* , le proporciona a cada celda del cubo su propia puntuación z . Si de este último se obtiene un valor positivo, entonces eleva la probabilidad de que la intensidad del grupo de celdas para puntos cálidos. En contra parte, si se obtiene una z negativa, los valores son proporcionales a la intensidad de la agrupación de puntos fríos.

b) Análisis de series de tiempo

Para realizar el análisis de serie de tiempo, se desarrolló una herramienta en MatLab, en la cual se ingresaron los datos de temperatura de superficie, temperatura atmosférica y los componentes de lluvia, el cuál siguió el siguiente del diagrama de la Figura 23.

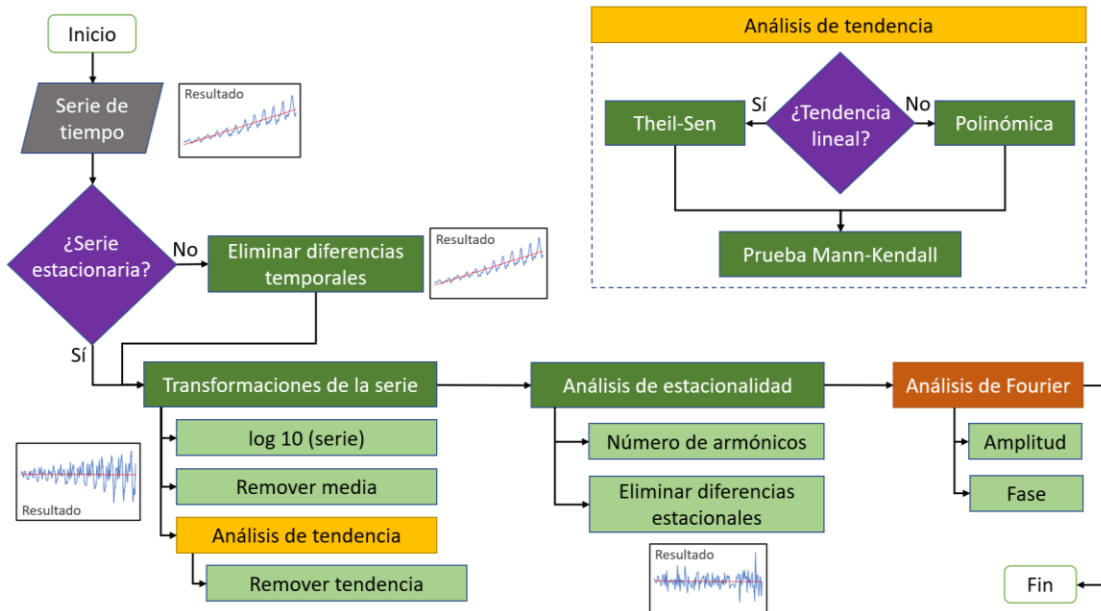


Figura 23. Diagrama de análisis de serie de tiempo

Primero se identificó si la serie era estacionaria o no estacionaria a partir de la prueba de Dickey-Fuller aumentada (Machiwal & Jha, 2012), en la cual, para probar si es una hipótesis nula de un proceso con raíz unitaria y constante:

$$H_0: Y_t = \delta + Y_{t-1} + \varepsilon_t$$

O si es un proceso estacionario alrededor de la tendencia puede decirse que es la hipótesis alterna:

$$H_A: Y_t = \delta + \beta t + \phi Y_{t-1} + \varepsilon_t$$

y se puede calcular de la siguiente manera:

$$\Delta Y_t = \delta + \gamma Y_{t-1} + \beta_1 t + \sum_{i=2}^p \beta_i \Delta Y_{t-i+1} + \varepsilon_t$$

Si la prueba $H_0: Y_t = 0$ contra $H_A: Y_t \neq 0$. Y si no puede rechazarse la hipótesis nula ($p\text{-valor} > 0.05$) entonces la serie es no estacionaria y posee una raíz de 1, por el contrario, si se rechaza la hipótesis nula ($p\text{-valor} < 0.05$) la serie es estacionaria y posee una raíz de 0.

Si se identificó que es una serie no estacionaria, entonces se remueve las diferencias temporales restando la media promedio de la serie a cada dato, desestacionalizando la serie de tiempo homologando la amplitud de los ciclos. Y la amplitud se calculó a partir del análisis de Fourier (Machiwal & Jha, 2012):

$$\cos_{i,j} = \sum_{k=1}^n \cos \left[\frac{2\pi(k-1)}{T} \right] v_{i,j,k}$$

Donde:

$\cos_{i,j}$ = coseno en el pixel del renglón i, columna j.

k = instante de tiempo en el que se evalúa el coseno (rebanada)

n = número total de instantes de tiempo (no. rebanadas)

$v_{i,j,k}$ = valor de la variable v en el pixel i,j en el instante k.

T = número total de imágenes de la serie de tiempo

$$\text{sen}_{i,j} = \sum_{k=1}^n \text{sen} \left[\frac{2\pi(k-1)}{T} \right] v_{i,j,k}$$

Donde:

$\text{sen}_{i,j}$ = seno en el pixel del renglón i, columna j.

k = instante de tiempo en el que se evalúa el coseno (rebanada)

n = número total de instantes de tiempo (no. rebanadas)

$v_{i,j,k}$ = valor de la variable v en el pixel i,j en el instante k.

T = número total de imágenes de la serie de tiempo

$$Amp_{i,j} = \alpha_{i,j} = \sqrt{\cos^2_{i,j} + \sin^2_{i,j}}$$

Donde:

$Amp_{i,j}$ = amplitud

$\cos_{i,j}$ = coseno en el pixel del renglón i, columna j.

$\sin_{i,j}$ = seno en el pixel del renglón i, columna j.

$$Desfase_{i,j} = \delta_{i,j} = \tan^{-1}\left(\frac{\sin_{i,j}}{\cos_{i,j}}\right)$$

Finalmente, a las amplitudes generadas de cada imagen para todo el periodo se sumaron obteniendo una amplitud general en la que se obtuvo si hubo incremento o decremento en el comportamiento en la temperatura de superficie, temperatura atmosférica máxima y en los componentes de lluvia.

Análisis de cambio de uso de suelo

En el análisis de cambio de uso de suelo que se llevó a cabo en el módulo “*Land Change Modeler*” de TerrSet a partir de datos obtenidos de las Series II y VI de INEGI que corresponden al año 1993 y 2014 respectivamente (Figura 24).

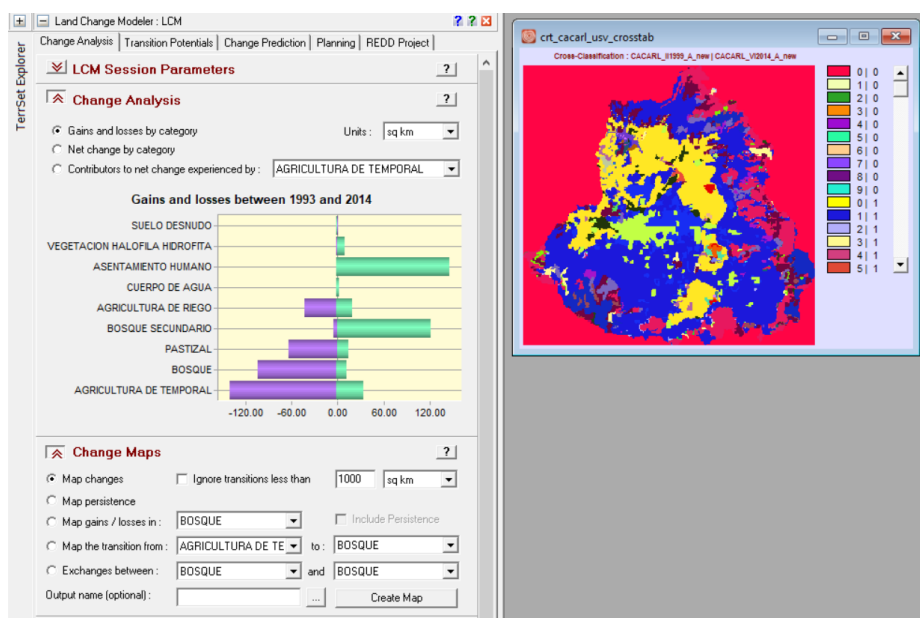


Figura 24. Análisis de cambio de uso de suelo de 1993 a 2014 en la CACARL

Con estos dos años que tiene una diferencia de 21 años, se identificaron las transiciones de un tipo de cobertura hacia otro. Al reclasificar los usos de suelo en grupos homogéneos pudo ser más fácil identificar las transiciones dominantes a lo largo del periodo de estudio.

El proceso de análisis de cambio de uso de suelo en el *software* de TerrSet identificó los píxeles que cambiaron de categoría y se obtuvo una imagen con todos los cambios que ocurrieron y hacía que categoría se le atribuyó.

7.2.4. Integración de resultados

Una vez obtenidos los análisis de temperatura de superficie, temperatura atmosférica máxima y mínima, los componentes de lluvia (Lluvia Total Acumulada y Numero de Días con Lluvia) y el análisis de cambio de uso de suelo, se procedió a hacer un análisis entre los puntos cálidos de temperatura de superficie, temperatura atmosférica máxima y temperatura mínima con el cambio de uso de suelo y los usos de suelo que permanecieron e identificar los usos de suelo que coinciden con puntos emergentes dentro de la cuenca.

Otro resultado fueron el análisis de serie de tiempo para temperatura de superficie, temperatura atmosférica máxima y los componentes de lluvia en los que se obtuvo su amplitud con el análisis de Fourier y las zonas con significancia. Y finalmente se realizó una correlación entre la temperatura de superficie, temperatura máxima y los componentes de lluvia para cada uso de suelo que permaneció y cambio, considerando aquellos más dominantes en la CACARL.

Con la intención de comprobar si existe una relación entre el uso de suelo con el comportamiento de la lluvia y de la temperatura, se compararon los usos de suelo que cambiaron de un uso de suelo a otro, al igual que con los suelos que permanecieron. Para ello, primero se identifica si los datos no poseen una distribución normal, para entonces aplicar la prueba de Kruskal-Wallis, que es una prueba no paramétrica y evalúa diferencias entre tres a más grupos de manera independiente y de esta forma conocer si existen diferencias entre los grupos (McKight & Najab, 2010). Posteriormente, se aplicó la prueba de Tukey o también conocida como prueba de comparaciones múltiples, la cual compara más de dos grupos e identifica si existen diferencias entre ellos (Mercado et al., 2019).

Por último, se hicieron comparaciones entre dos pruebas independientes, es decir, entre el uso de suelo que permaneció (control) contra el uso de suelo que cambió (tratamiento) con la prueba de Mann-Whitney, y al igual que las dos pruebas antes mencionadas, es una prueba no paramétrica. Esta compara las medianas de dos grupos independientes, permitiendo encontrar evidencia a favor en contra de las medianas, dicho de otro modo, muestra si existe igualdad en el sesgo, curtosis o dispersión (Turcios, 2015).

8. RESULTADOS

8.1. Análisis de temperatura de superficie y de temperatura atmosférica máxima

En el análisis de Puntos Cálidos Emergentes que se generó en *ArcGis* para temperatura de superficie su obtuvo que en la porción sur de la cuenca existen puntos cálidos mayormente persistentes, es decir, estos puntos no han tendido ni a incrementar ni a disminuir, pero se han mantenido constantes a lo largo del periodo de estudio.

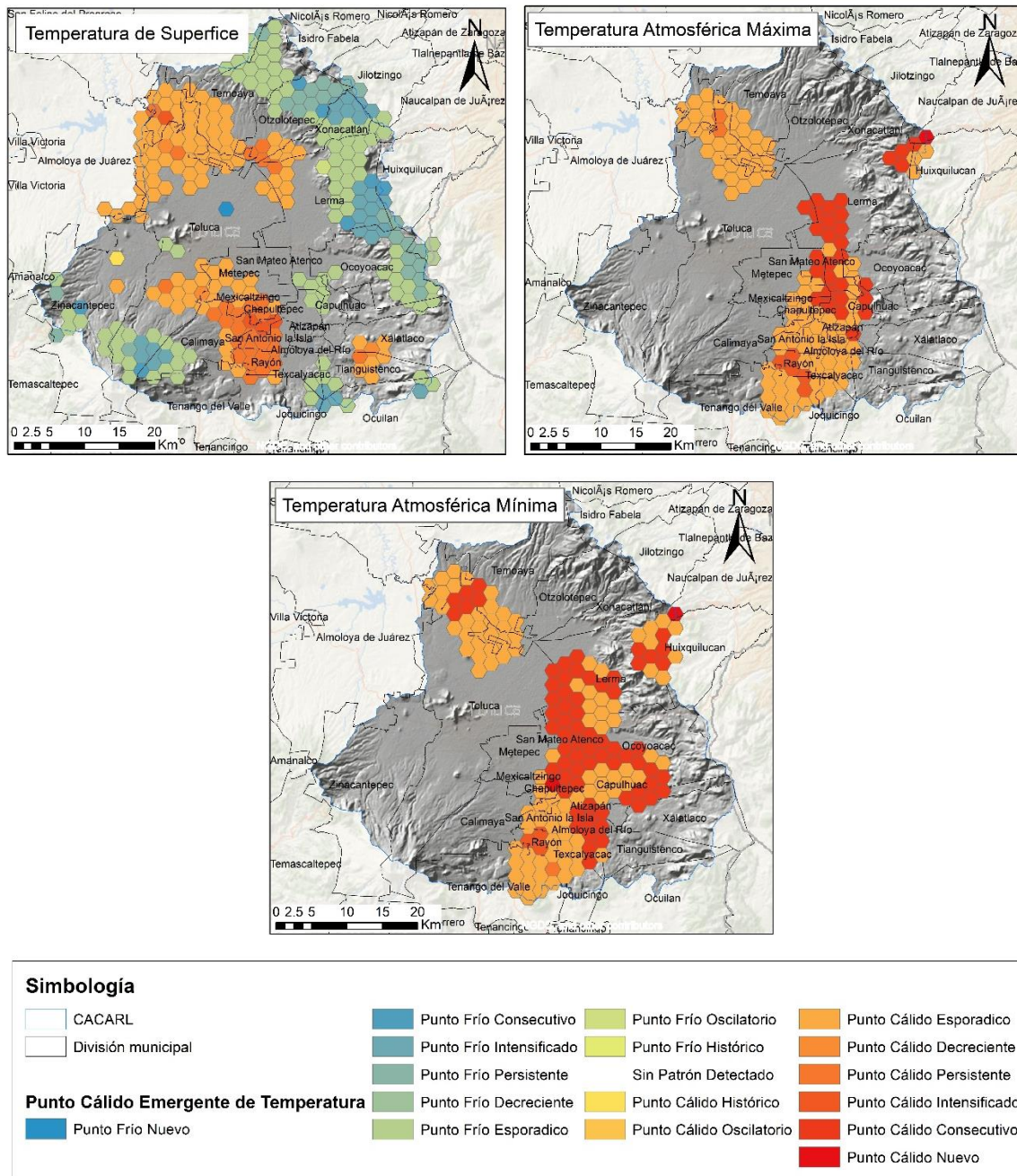


Figura 25. Puntos cálidos emergentes de temperatura de superficie y temperatura atmosférica máxima, respectivamente

En la porción noroeste de la cuenca los puntos cálidos han tendido a ser esporádicos, esto es que menos del 90% del intervalo de tiempo (2000 a 2019) han sido un punto cálido significativo en la cuenca. En contra parte, también se registran puntos que han tendido a disminuir la temperatura, en zonas tales como la Sierra de las Cruces y en la ladera del volcán Nevado de Toluca, de los cuales se presentan puntos fríos esporádicos, estos son significativos en menos del 90% del intervalo de tiempo. Otra parte ha presentado temperatura que ha tendido a intensificarse, es decir que más del 90% del periodo de estudio se ha registrado que la temperatura mínima se ha intensificado en esas zonas (Figura 25).

Por otro lado, el análisis de Puntos Cálidos Emergentes en la temperatura atmosférica máxima se aprecia que tanto en la porción sur como noroeste los puntos cálidos han tendido a ser esporádicos, esto es que menos del 90% del periodo de estudio han sido puntos cálidos significativos. Se aprecia de igual manera que existen puntos cálidos consecutivos en la porción este del centro, estos han aparecido en los últimos intervalos de tiempo y se ha mantenido constante hasta el último año del periodo de estudio.

Además del análisis de puntos cálidos emergentes se graficaron de manera mensual el número de islas de calor tanto para temperatura de superficie como para temperatura atmosférica máxima, los cuales parecen tener un comportamiento estacional, es decir, la media tiene un comportamiento oscilatorio que responde a los cambios estacionales.

Sin embargo, el número de islas generadas en temperatura de superficie son considerablemente mayores con respecto a las de temperatura atmosférica máxima, aunque poseen mayor área esta última.

En la Figura 26 se muestra una gráfica con el número de cuencas de temperatura de superficie para cada mes del 2000 al 2019, donde el mes con mayor número de cuencas para todo el periodo de estudio es el mes de julio con 84 cuencas de temperatura, y el mes con menor número de cuencas es el mes de diciembre con 45 cuencas de temperatura. Cabe mencionar que las medias se distribuyen de manera estacional, respondiendo con medias más altas durante el verano y las más bajas durante el invierno.

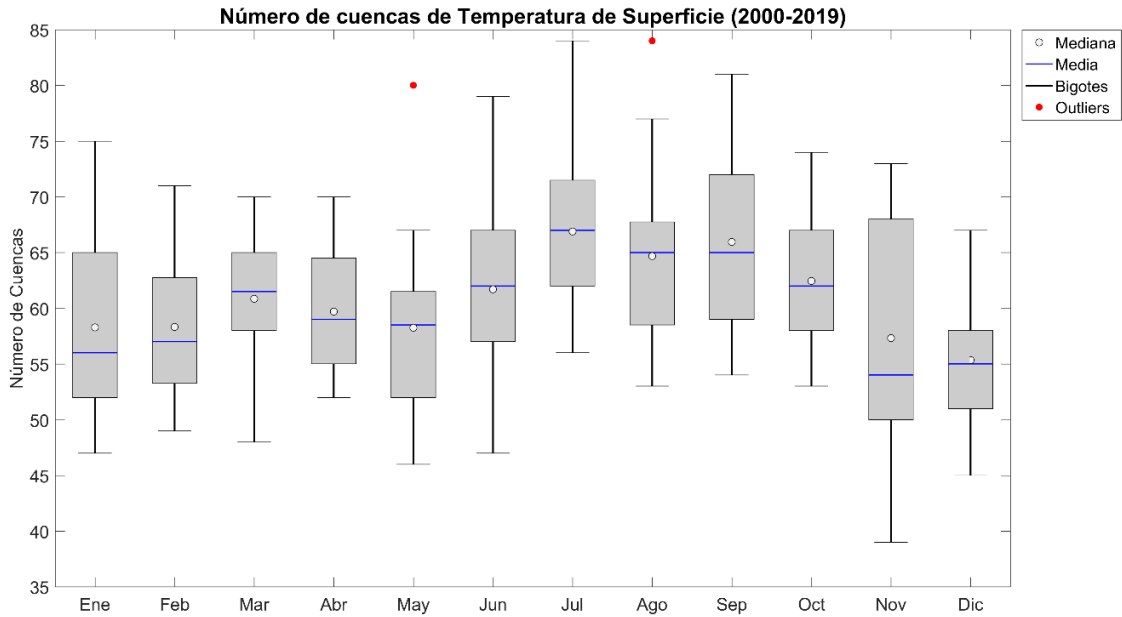


Figura 26. Gráfica con el mínimo, máximo, mediana y media del comportamiento del número de UHI de superficie para cada mes, del 2000 al 2019

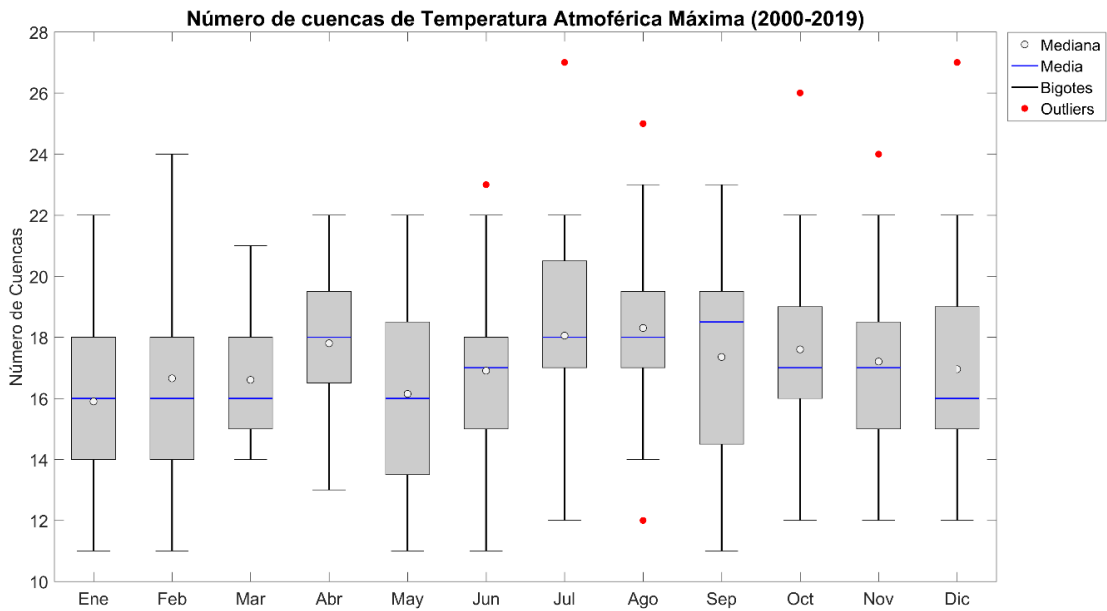


Figura 27. Gráfica con el mínimo, máximo, mediana y media del comportamiento del número de UHI atmosférica máxima para cada mes del 2000 al 2019

El comportamiento del número de cuencas de temperatura atmosférica máxima (Figura 27) parece tener una menor variación con una máxima de 24 cuencas de temperatura en el mes de febrero y una mínima de 11 en casi la mitad de los meses (enero, febrero, mayo, junio y septiembre). Sin embargo, a pesar de mostrarse más constante con respecto a las cuencas de temperatura de superficie, también parece que responde de manera estacional, con la media más baja en mayo y junio, y la más alta en el mes de febrero (Figura 27).

8.2. Análisis de Serie de Tiempo

Para la obtención de los resultados del análisis de serie de tiempo se elaboró una interfaz gráfica en el software de MatLab, en el cual se dividió en tres módulos, y a continuación se describe la función de cada uno:

Importación de imágenes LST

En el primer módulo se ingresaron las imágenes satelitales MODIS LST en formato *.tif para exportarlas a formato *.mat, y para ello se necesitó definir el periodo de análisis (2000 a 2019), la escala temporal que fue mensual, y así mes a mes se obtuvieron doce archivos (Figura 28).

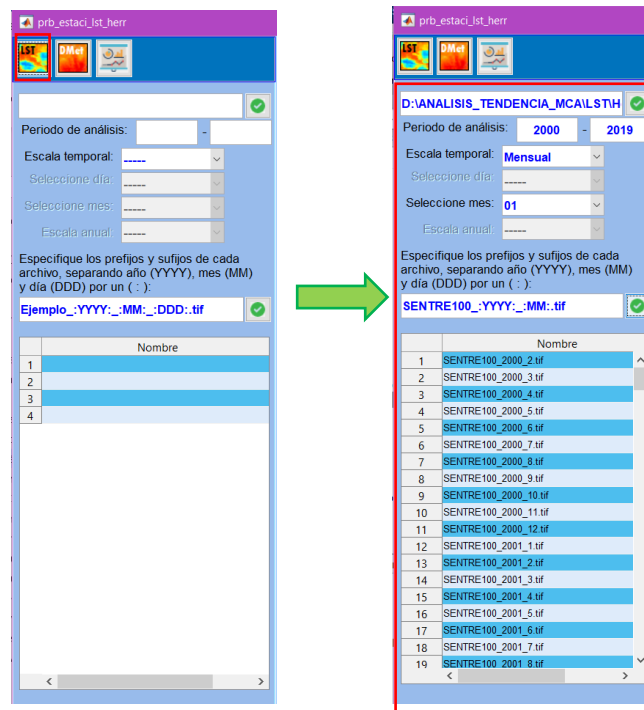


Figura 28. Módulo para ingresar las imágenes de temperatura de superficie y convertirlas en formato *.mat para su posterior análisis

Importación de imágenes Daymet

El segundo módulo importa imágenes Daymet desde su formato original (NETcdf4) y se seleccionó la escala temporal mensual, se definió la variable que fue de temperatura máxima de superficie, posteriormente se definió el periodo de análisis (2000 a 2019) y finalmente se guarda en formato *.tif. Una vez obtenidas estas imágenes se volvieron a ingresar para generar un solo archivo en formato *.mat.

Para el caso de las imágenes de precipitación al igual que la temperatura atmosférica máxima se importaron en su formato original (NETcdf4) y se definió su escala temporal y el período de análisis, después se volvieron a ingresar para transformar a formato *.mat. Y posteriormente en la sección de

componentes de lluvia se calcularon la Lluvia Total Acumulada y Numero de Días con Lluvia. Sin embargo, estos procesos se dividieron en dos grupos (2000 a 2009 y 2010 a 2019), ya que no fue soportado por la interfaz hasta que todas las imágenes se transformaran a formato *.mat (Figura 29).



Figura 29. Modulo para ingresar imágenes Daymet y exportarlas en formato *.mat para su posterior análisis

Análisis de series de tiempo

Una vez que se transformaron a formato *.mat se unieron los periodos de tiempo. Y finalmente se pasaron estos al tercer módulo de análisis de serie de tiempo, en el cual se ingresaron uno a uno las variables de temperatura y los componentes de lluvia (Figura 30).

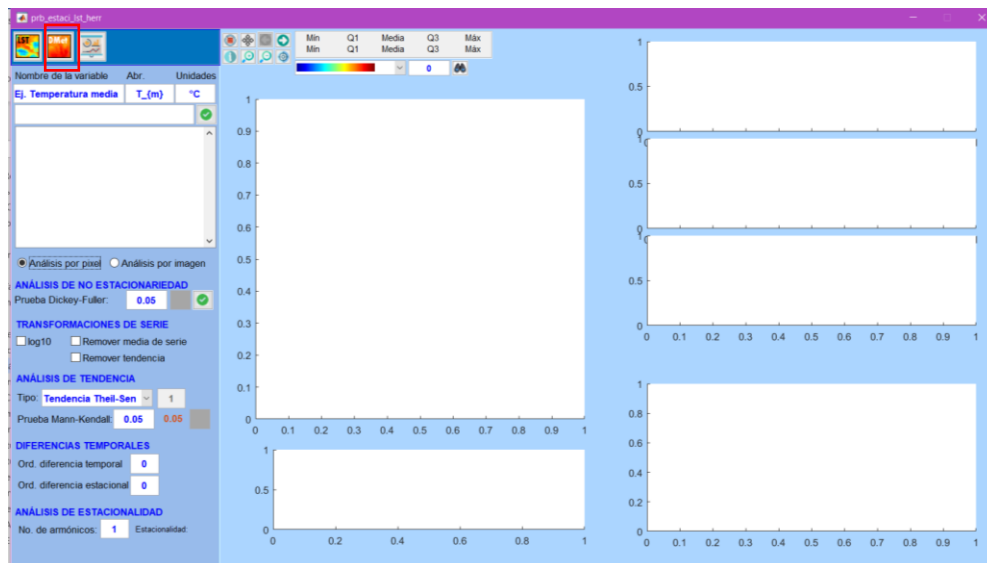


Figura 30. Modulo para análisis de serie de tiempo de la temperatura de superficie, atmosférica máxima y componentes de lluvia

En el botón de análisis por píxel, en el cual, si una serie de tiempo muestra una tendencia, es decir, si esta muestra un cambio negativo o positivo en la serie la media estará variando en el tiempo, definiéndose una serie no-estacionaria a partir de la prueba de Dickey-Fuller. Ahora bien, cuando se identifica que es una serie no-estacionaria, para diferenciar la serie y volverla a una serie estacionaria se remueven las diferencias temporales, desestacionalizando la serie de tiempo, y de esta manera se homogeniza la amplitud de los ciclos.

Una vez que la serie de tiempo es estacionaria, la amplitud, la frecuencia y la tendencia se mantienen constantes (sin cambios), manteniendo los valores de la serie en una oscilación cercana a la media. Por último, para obtener los residuales se eliminan las diferencias estacionales de esta última serie estacionaria, en la cual se identifican componentes periódicos de la firma espectral o residual (Figura 31).

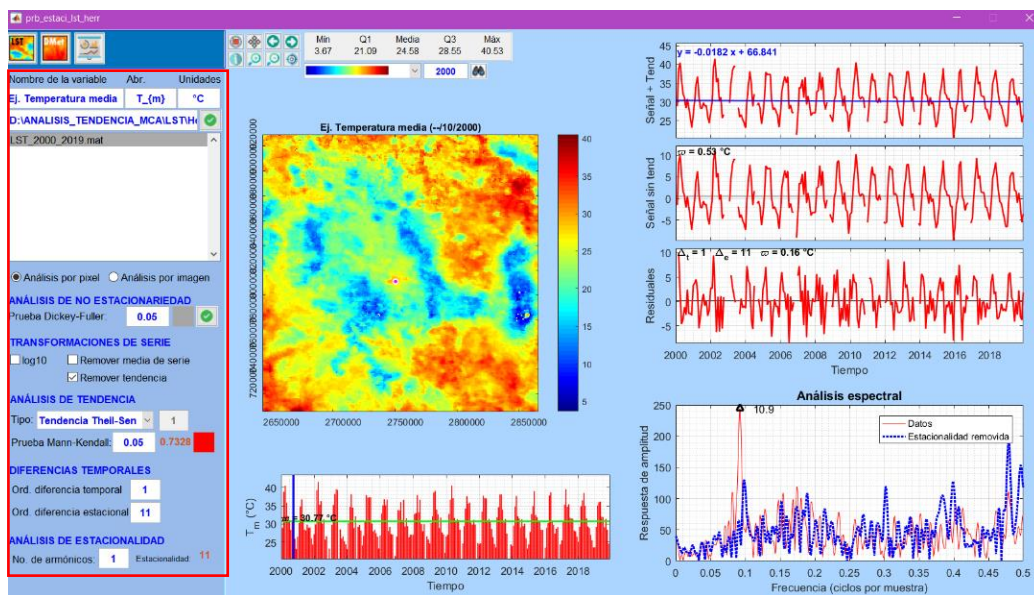


Figura 31. Ejemplo de selección de píxel en un análisis de serie de tiempo para el mes de octubre

En el análisis por imagen se exportaron las imágenes resultantes de amplitud y significancia Mann-Kendall para su posterior análisis (Figura 32).

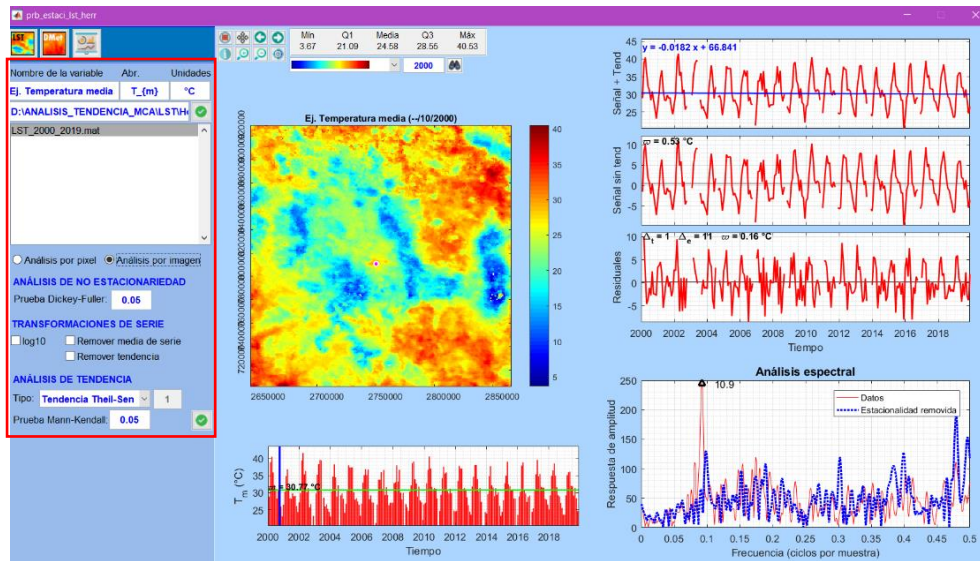


Figura 32. La sección de análisis por imagen permite exportar las imágenes resultantes del análisis

8.2.1. Temperatura de superficie

Con la herramienta generada en el *software* de MatLab se logró identificar las zonas con mayor significancia de cambio en la ladera del volcán y las laderas de la Sierra de las Cruces, en la que se detectó un decremento de la temperatura de hasta -1 °C. sin embargo, en el área de asentamiento humano no parece haber un cambio significativo en el comportamiento de la temperatura a lo largo del periodo de estudio (Figura 33).

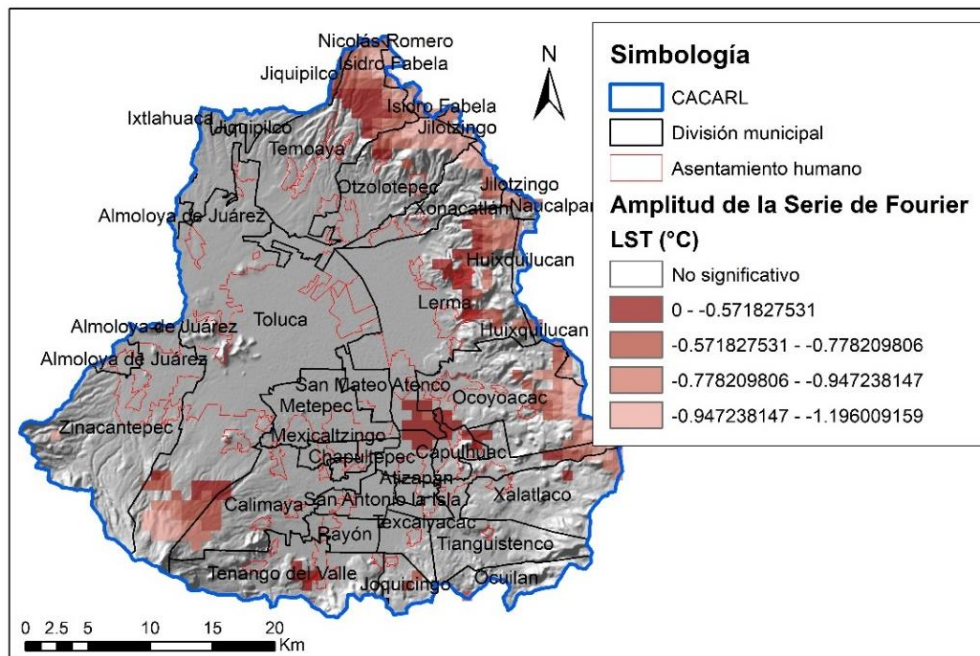


Figura 33. Mapa de amplitud significativa para la temperatura de superficie

8.2.2. Temperatura atmosférica máxima

Se obtuvo para temperatura atmosférica máxima que en toda la cuenca fue un cambio significativo con incrementos máximos en las zonas montañosas de la cuenca, oscilando entre 1.6 y 2.3 °C, mientras que, en la zona del valle, donde se encuentra el asentamiento humano, se incrementó la temperatura entre 0.3 y 0.6 °C. Se puede apreciar que estos incrementos en la temperatura son directamente proporcionales al incremento en la altitud (Figura 34).

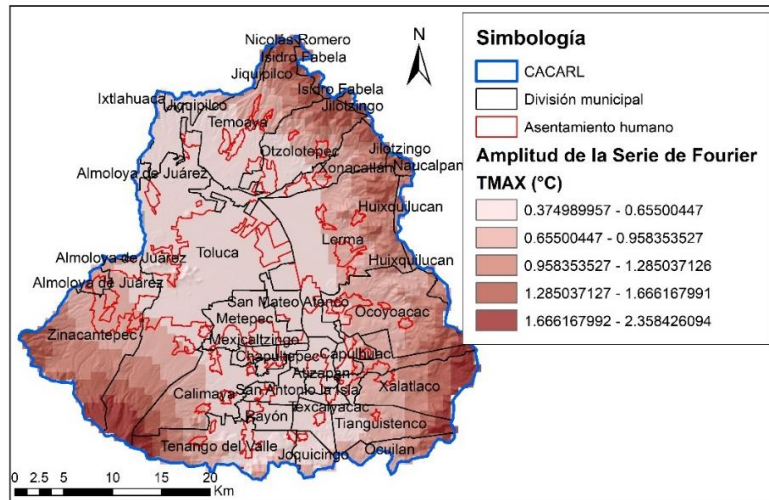


Figura 34. Mapa de amplitud significativa para la temperatura atmosférica máxima.

8.2.3. Temperatura atmosférica mínima

Para temperatura atmosférica mínima, se obtuvo que en la porción noroeste de la cuenca fue un cambio significativo con incrementos máximos en las zonas montañosas de la cuenca, con una oscilación de entre 0.8 y 1.4 °C. por otro lado, en la zona del valle, donde se encuentra el asentamiento humano, se incrementó la temperatura entre 0.6 y 0.8 °C (Figura 35).

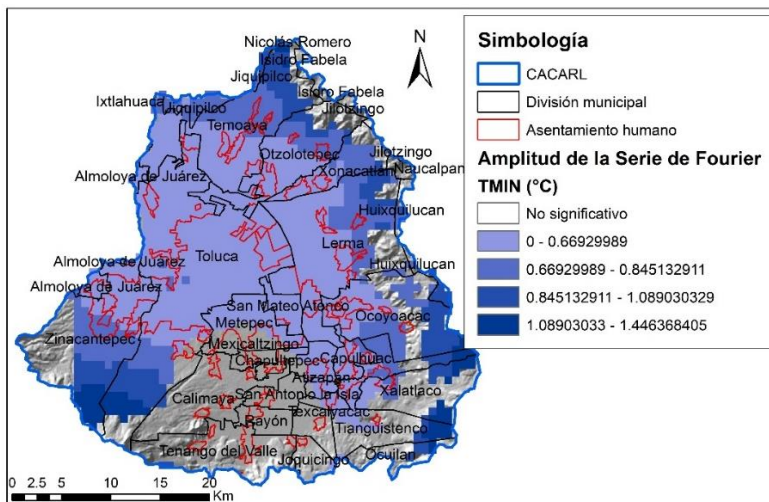


Figura 35. Mapa de amplitud significativa para la temperatura atmosférica mínima.

8.2.4. Componentes de lluvia

El componente de Lluvia Total Acumulada mostró tener lluvias significativas en la Sierra de las Cruces y la porción oeste del asentamiento humano. Sin embargo, en la porción este de la cuenca presento incrementos de aproximadamente 0.68 con un máximo de 20.04 mm en las zonas más altas. Por otro, en la porción oeste del asentamiento humano se observa un incremento de 0.1 a 0.34 mm (Figura 36).

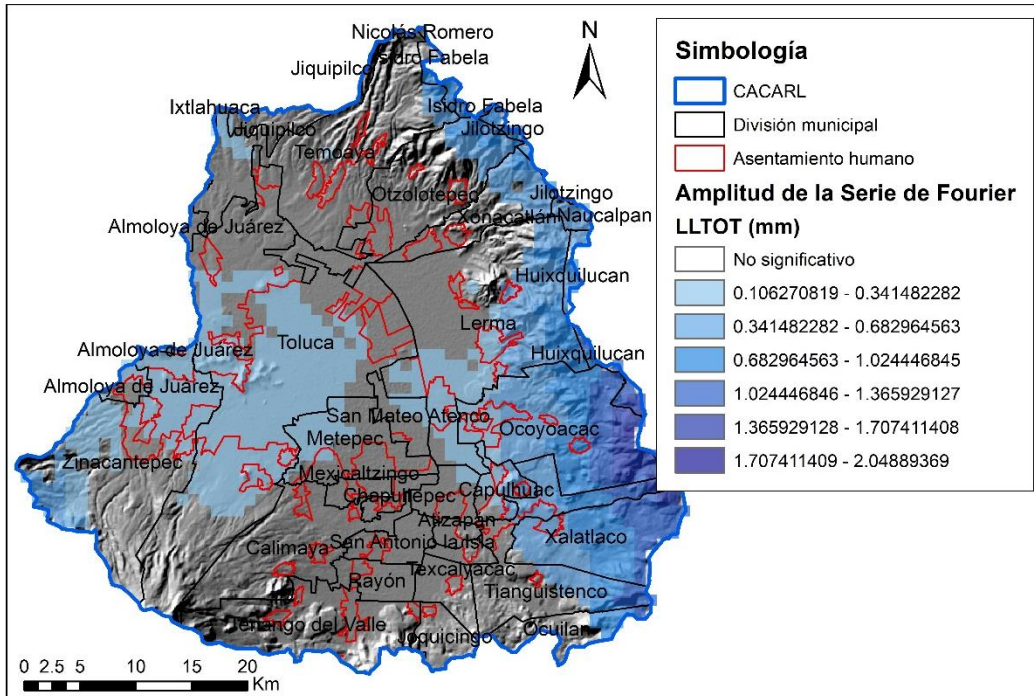


Figura 36. Mapa de amplitud de la Serie de Fourier de la Lluvia Total Acumulada

El Número de Días con Lluvia ha tenido un cambio significativo en gran parte de la cuenca, donde se notan incrementos en los días lluviosos en parte de la Sierra de las Cruces de aproximadamente un día. Otra zona en la que detecta incrementos en los días de lluvia es en casi todo el asentamiento humano, principalmente en las laderas del volcán y centro de la ciudad de Toluca con un incremento cercano a un día (Figura 37).

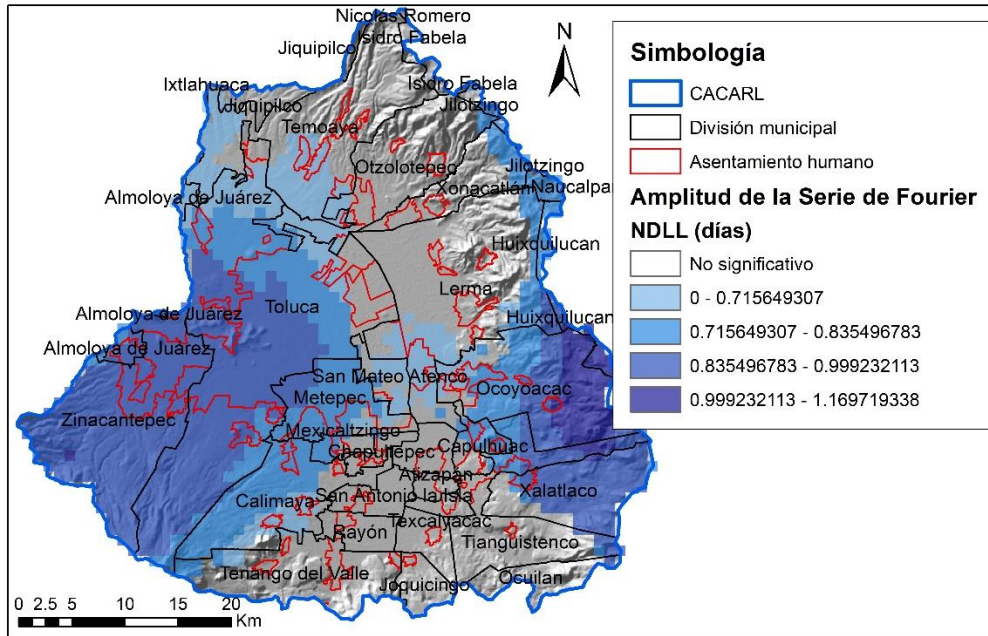


Figura 37. Mapa de amplitud de la Serie de Fourier del Número de Días con Lluvia

8.3. Análisis de cambio de uso de suelo

La tabla muestra las ganancias y pérdidas, en la cual se puede interpretar que aumento en área los asentamientos humanos con más de 120 km², al igual que el área de bosques secundarios con cerca de 120 km². En contra parte el área de pastizal, bosque, agricultura de riego y agricultura de temporal han disminuido considerablemente (Figura 38).

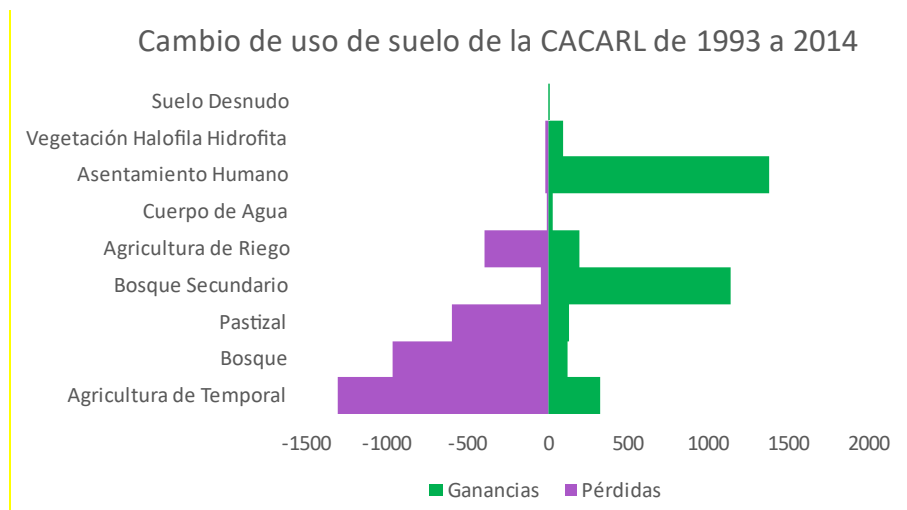


Figura 38. Ganancias y pérdidas en Km² entre 1993 y 2014 en la CACARL

Otro resultado fue una tabla cruzada entre las 9 categorías que se generaron, en la cual se muestra que categoría cambio, cuánto y a que otra categoría cambio (Tabla 5). Entre los resultados que arrojó el módulo fue el índice de concordancia Kappa entre las dos imágenes de manera general y por categoría, obteniendo así un índice de 0.86, es decir, casi perfecta.

Tabla 5. Tabla cruzada de 9 categorías de uso de suelo en la Cuenca Alta del CARL de 1993 a 2014 en Km² (En negritas áreas mayores a 100 Km² con cambio)

Categoría	Agricultura de temporal	Bosque	Pastizal	Bosque secundario	Agricultura de riego	Cuerpo de agua	Asentamiento humano	Vegetación halófila	Suelo desnudo
Agricultura de temporal	15261*	114	426	39	34	1	34	0	0
Bosque	52	4524*	161	29	0	0	0	0	0
Pastizal	62	79	2474*	30	65	1	0	22	0
Bosque secundario	279	1752	235	846*	0	0	0	0	0
Agricultura de riego	141	2	192	0	6805*	18	6	15	0
Cuerpo de agua	3	0	16	0	30	197*	0	0	0
Asentamiento humano	2091	4	74	0	580	0	1794*	0	0
Vegetación halófila hidrófila	3	0	84	0	94	0	0	101*	0
Suelo desnudo	0	0	11	0	0	0	0	0	11*

*Áreas sin cambio de uso de suelo

Por otro lado, los resultados con mayor impacto fueron agricultura de temporal, bosque, pastizal y agricultura de riego, viéndose mayormente afectada la agricultura de temporal con una pérdida total aproximada de 2511 Km², seguido por el bosque con una pérdida total de 1866 Km² y pastizal perdió 1014 Km² aproximadamente. En seguida se muestra la Tabla 6 de las pérdidas significativas y que uso de suelo las ganó.

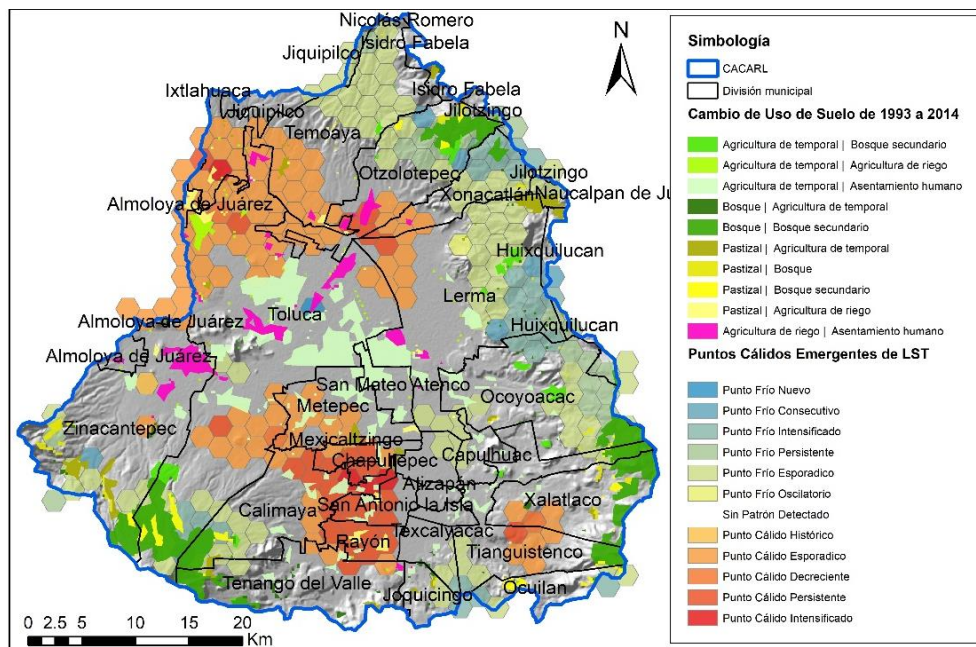
Tabla 6. Pérdidas y ganancias de uso de suelo de 1993 a 2014 con datos tomados de la serie II y VI de INEGI

Serie II (1993)	Serie VI (2014)	Área en Km ²
Agricultura de temporal	Bosque secundario	279
	Agricultura de riego	141
	Asentamiento humano	2091
Bosque	Agricultura de temporal	114
	Bosque secundario	1752
Pastizal	Agricultura de temporal	426
	Bosque	161
	Bosque secundario	235
	Agricultura de riego	195
Agricultura de riego	Asentamiento humano	580

8.4. Efecto de la UHI sobre la lluvia en la CACARL

8.4.1. Puntos cálidos emergentes con cambio de uso de suelo

El cambio de uso de suelo en la CACARL superpuesto con los puntos cálidos emergentes de la temperatura de superficie (Figura 39), muestran que en las zonas montañosas correspondientes al Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces donde ocurrió un cambio de uso de suelo de bosque a bosque secundario, están presentes puntos nuevos fríos o puntos fríos intensificados. En contra parte, la presencia de puntos cálidos persistentes e intensificados, se encuentran en la zona del valle, coincidiendo con cambios a asentamiento humano (Chapultepec, San Antonio la Isla y Rayón), por otro lado, en la salida de la cuenca también se aprecia la presencia de puntos cálidos emergentes, en áreas donde también se incrementó el cambio de uso de suelo a asentamiento humano.



En los usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014 coinciden en mayor área con los puntos cálidos que se han mantenido en el valle, como son los puntos cálidos decrecientes, es decir, que se la intensidad ha estado disminuyendo y puntos cálidos esporádicos, estos aparecen y desaparecen, pero se han mantenido constantes (Figura 40). Principalmente en los usos de suelo de agricultura de temporal en la porción sur (Calimaya, Toluca, Rayón, San Antonio la Isla, Tianguistenco y Xalatlaco), mientras que en la porción norte de la cuenca coincide con agricultura de riego (Temoaya, Otzolotepec, Almoloya de Juárez e Ixtlahuaca).

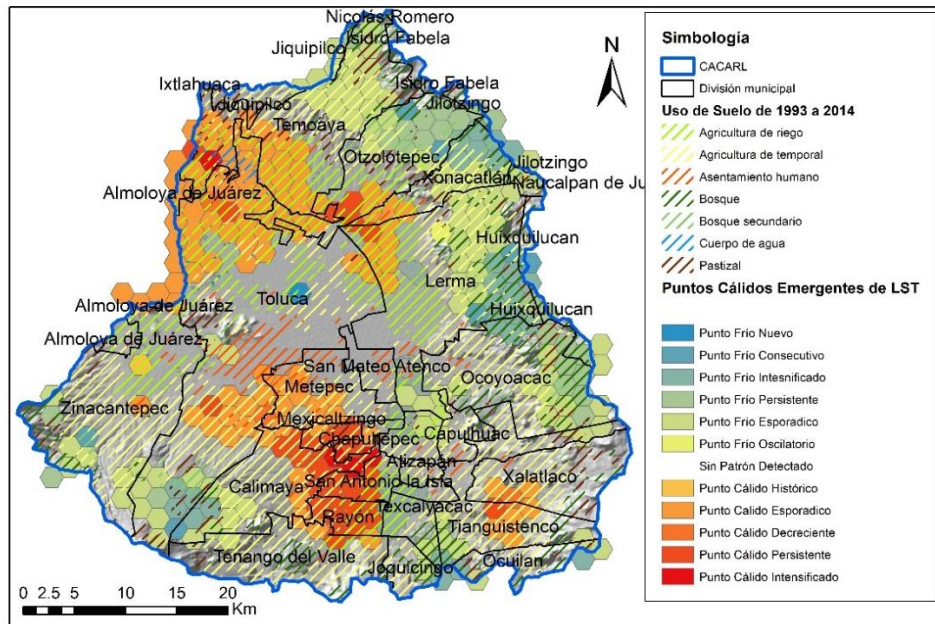


Figura 40. Mapa de puntos cálidos emergentes de temperatura de superficie con usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014

Para los puntos cálidos emergentes de temperatura atmosférica máxima, se observó que en los usos de suelo que cambiaron a asentamiento humano (principalmente Lerma, San Mateo Atenco, Metepec, Toluca y Almoloya de Juárez), hubo presencia de puntos cálidos esporádicos, siendo puntos intermitentes con intervalos de tiempo estadísticamente significativo. Sin embargo, también existen puntos cálidos consecutivos, los cuales han estado manteniéndose en los últimos años del periodo de estudio, estos se encuentran en Lerma, San Mateo, Atizapán y Capulhuac (Figura 41).

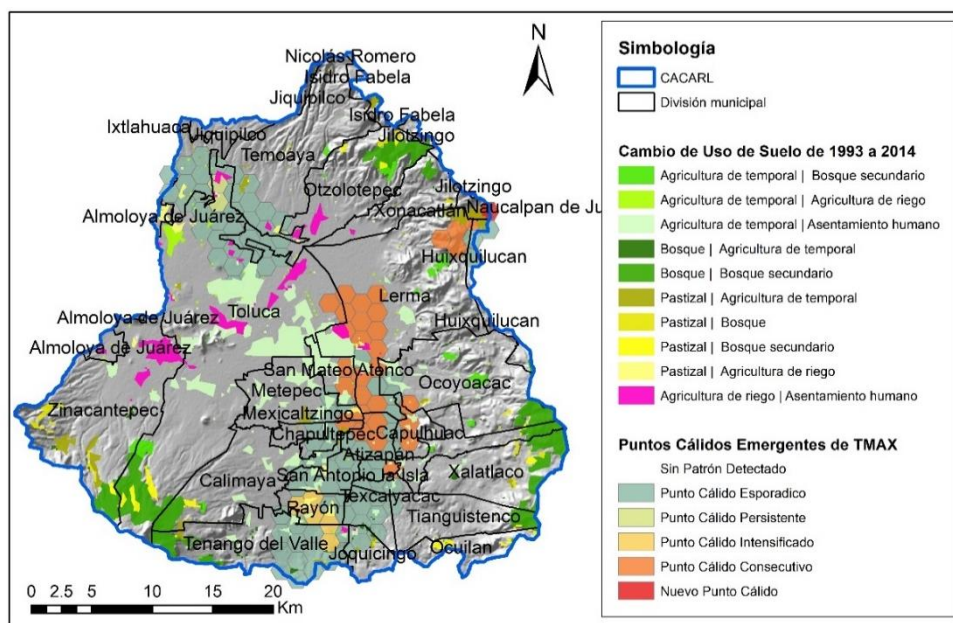


Figura 41. Mapa de puntos cálidos emergentes de temperatura atmosférica máxima con usos de suelo que cambiaron de 1993 a 2014

Para el caso de los usos de suelo que permanecieron contrapuestos con los puntos cálidos de temperatura atmosférica máxima (Figura 42), se notó que en el valle donde los usos de suelo de agricultura de riego (Temoaya, Oztolotepec, Almoloya de Juárez, Toluca e Ixtlahuaca) y agricultura de temporal (Calimaya, Tenango del Valle, Texcalyacac, Atizapán, Capulhuac y Lerma), son puntos cálidos esporádicos y puntos cálidos consecutivos.

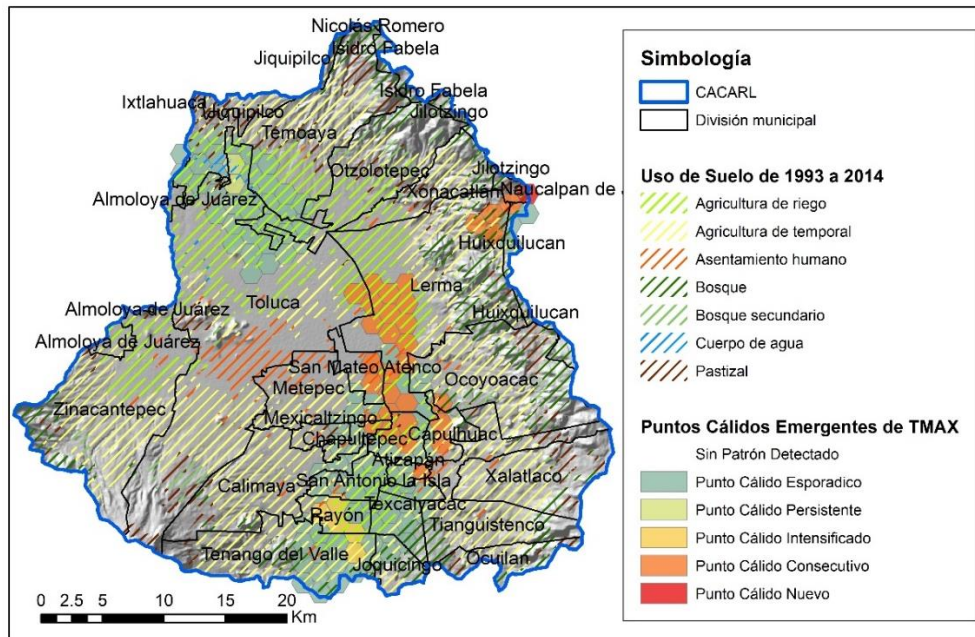


Figura 42. Mapa de puntos cálidos emergentes de temperatura atmosférica máxima con usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014

En los usos de suelo que cambiaron con los puntos cálidos emergentes de temperatura atmosférica mínima los puntos cálidos emergentes se concentraron en la porción sureste de la cuenca, donde el cambio de uso de suelo fue principalmente a asentamiento humano, abarcando varios municipios (Lema, Huixquilucan, Ocoyoacac, San Mateo Atenco, Chapultepec, Capulhuac, Atizapán, Texcalyacac y Joquicingo). En donde los puntos cálidos fueron esporádicos y consecutivos. Sin embargo, no mostró cambios significativos en las zonas montañosas de la cuenca.

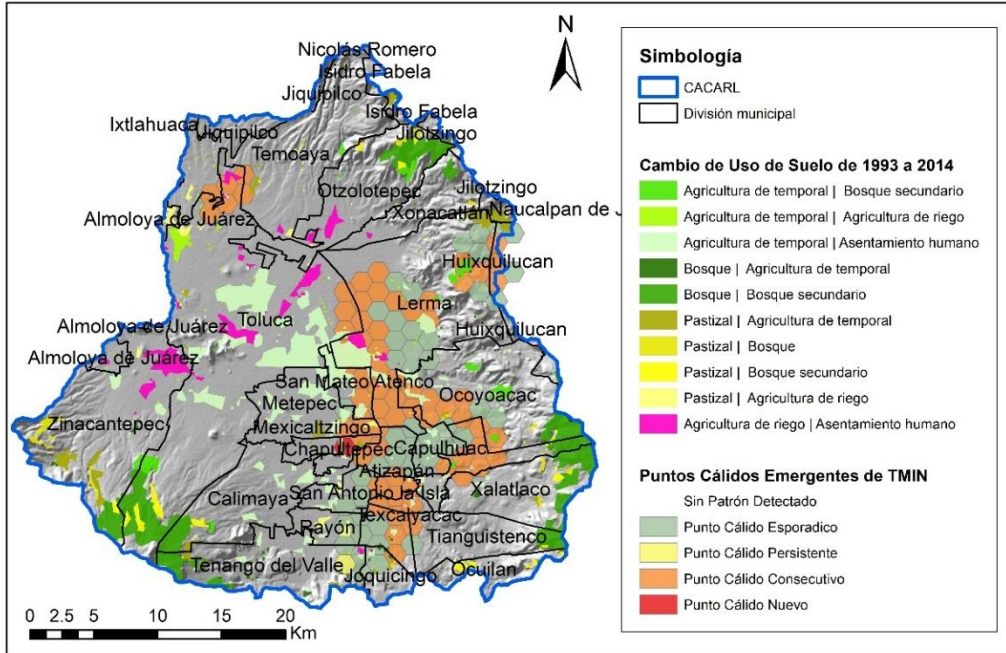


Figura 43. Mapa de puntos cálidos emergentes de temperatura atmosférica mínima con los usos de suelo que cambiaron de 1993 a 2014

Y, por último, los usos de suelo que permanecieron que coinciden con los puntos cálidos esporádicos y consecutivos son agricultura de riego y agricultura de temporal, tanto en Almoloya de Juárez como en Lerma, Ocoyoacac, Capulhuac, Mexicaltzingo, Texcalyacac, San Antonio la Isla y Rayón (Figura 44).

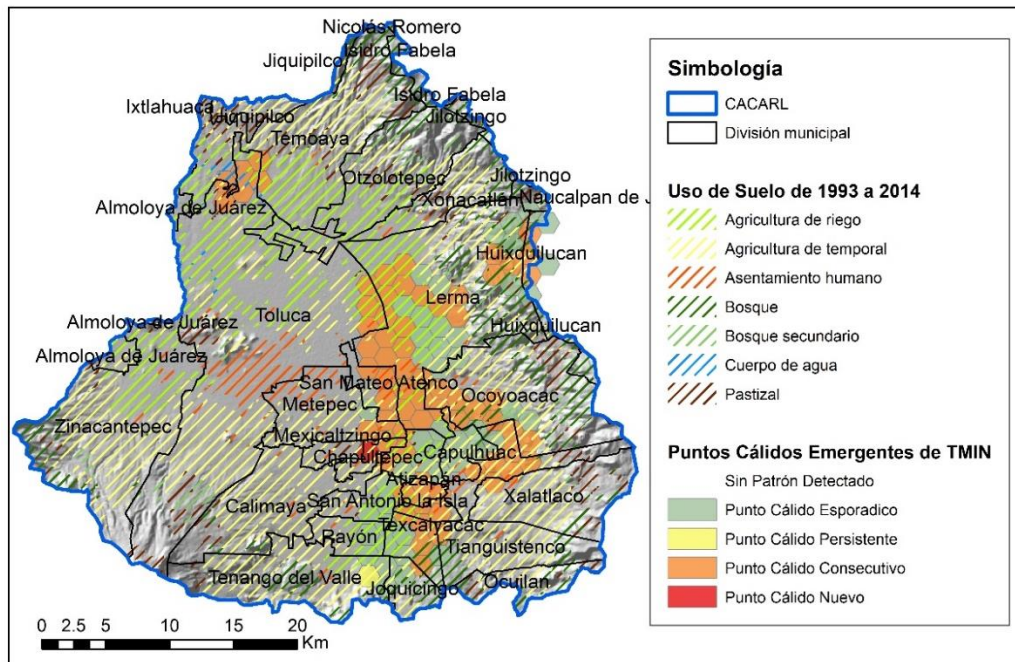


Figura 44. Mapa de puntos cálidos emergentes de temperatura atmosférica mínima con los usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014

8.4.2. Correlación de UHI y lluvia

La correlación del comportamiento de la lluvia (LLTOT y NDLL) con respecto a la temperatura (LST, TMAX y TMIN) en los diferentes usos de suelo, tanto los que permanecieron como los que cambiaron (Tabla 7). En los usos de suelo que cambiaron el comportamiento de la lluvia con una tendencia a disminuir cuando la temperatura de superficie aumentó fueron en los usos de suelo que cambiaron de AT a AH y de P a AT. Por otro lado, cuando la temperatura atmosférica máxima se incrementó en el uso de suelo que cambió de AT a AH y de P a AT, la lluvia tendió a disminuir. De igual manera el número de días con lluvia disminuyó cuando la TMAX se incrementó en el uso de suelo que cambió de pastizal a agricultura de temporal.

En los usos de suelo que permanecieron, se observó que cuando la temperatura de superficie aumentaba en AT, CA y P la lluvia total mensual tendió a disminuir. Cuando la temperatura atmosférica máxima incrementó en AH, CA y P la lluvia disminuyó. Y cuando la temperatura atmosférica mínima incremento en el CA la lluvia total mensual tuvo un decremento.

Tabla 7. Correlación entre la temperatura de superficie, temperatura atmosférica, lluvia total acumulada y el número de días con lluvia en los diferentes usos de suelo para la CACARL

Uso de Suelo	LST/ LLTOT	LST/ NDLL	TMAX/ LLTOT	TMAX/ NDLL	TMIN/ LLTOT	TMIN/ NDLL
Cambió						
Agricultura de Temporal/Asentamiento Humano (AT/AH)	-0.63*	0.05	-0.66*	-0.18*	-0.22*	-0.43*
Bosque/Bosque Secundario (B/BS)	-0.23*	-0.27*	-0.21*	-0.31*	0.01	-0.24*
Pastizal/Agricultura de Temporal (P/AT)	-0.73*	-0.50*	-0.77*	-0.62*	-0.58*	-0.52*
Agricultura de Riego/Asentamiento Humano (AR/AH)	-0.22	-0.21	-0.29*	-0.49*	0.45*	-0.29*
Permaneció						
Agricultura de Riego (AR)	-0.59*	-0.02	-0.29*	-0.23*	0.36*	-0.13*
Agricultura de Temporal (AT)	-0.61*	-0.03	-0.57*	-0.29*	-0.39*	-0.20*
Asentamiento Humano (AH)	-0.49*	0.27*	-0.67*	-0.13	-0.27*	-0.39*
Bosque (B)	-0.56*	-0.29*	-0.46*	-0.17*	-0.43*	-0.16*
Bosque Secundario (BS)	-0.41*	-0.37*	-0.19	-0.35*	-0.02	-0.34*
Cuerpo de Agua (CA)	-0.89*	-0.04	-0.92*	-0.50*	-0.64*	0.13
Pastizal (P)	-0.70*	-0.43*	-0.60*	-0.40*	-0.49*	-0.33*

*estadísticamente significativo

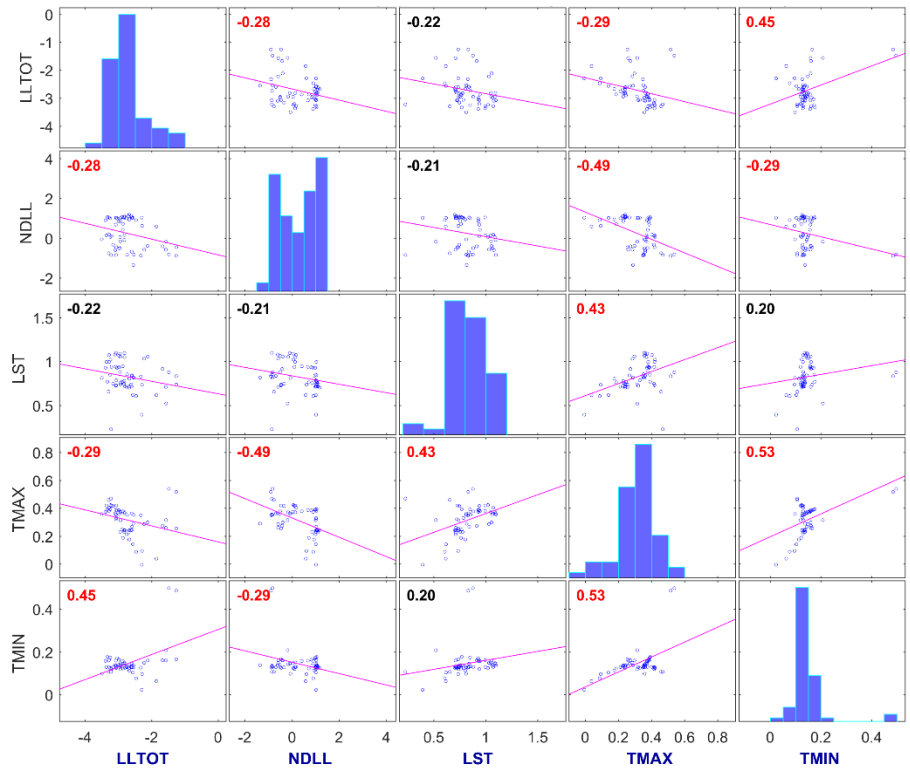


Figura 45. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para agricultura de temporal a asentamiento humano

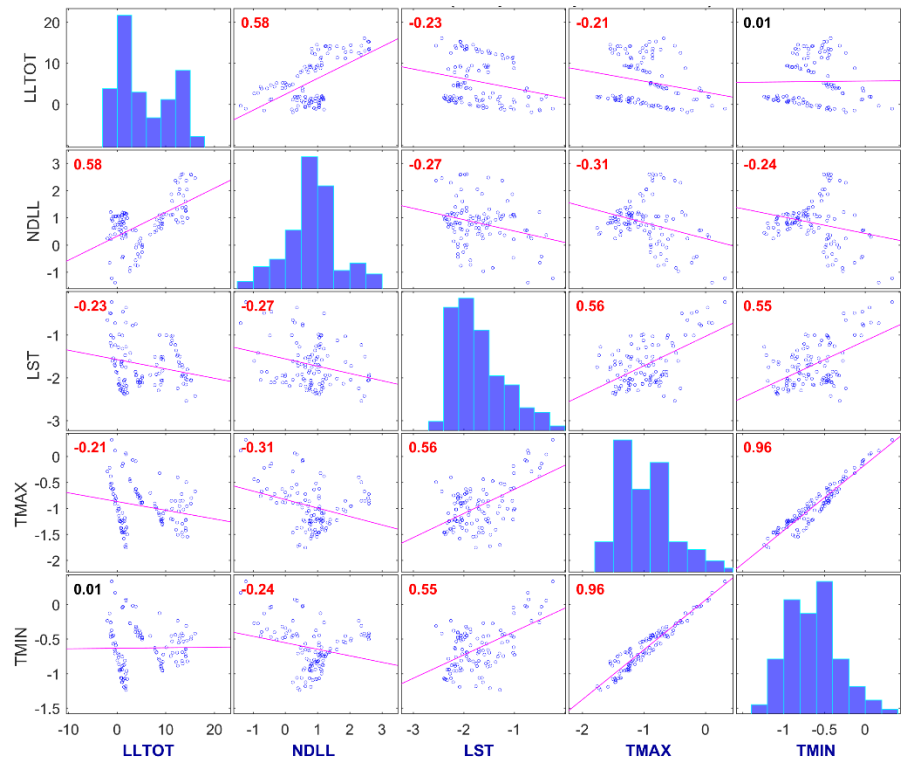


Figura 46. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para bosque a bosque secundario

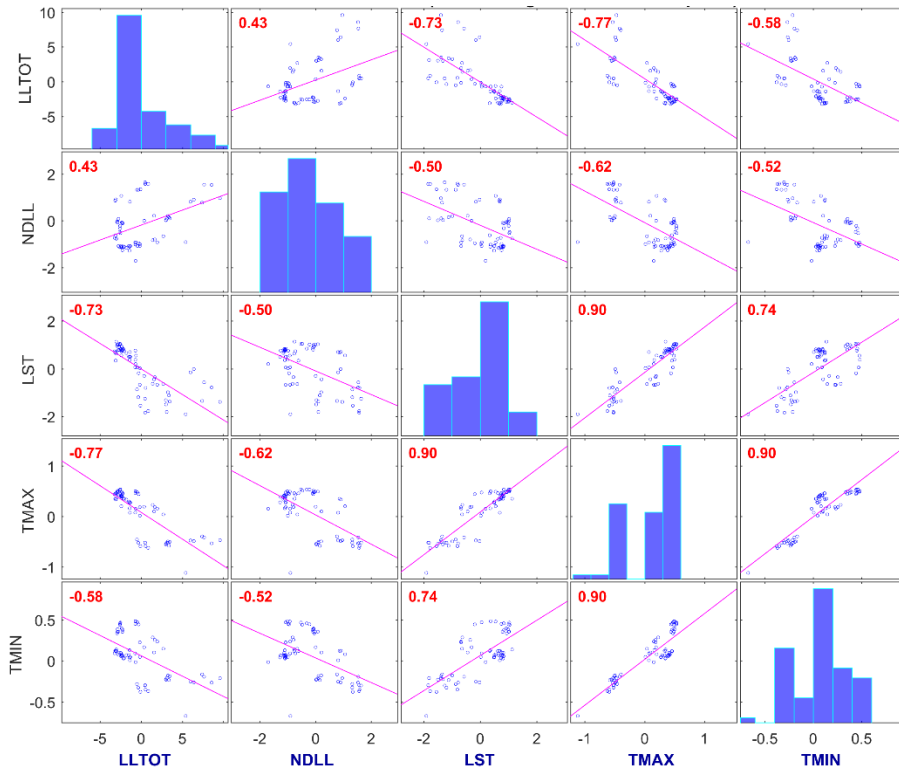


Figura 47. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para pastizal a agricultura de temporal

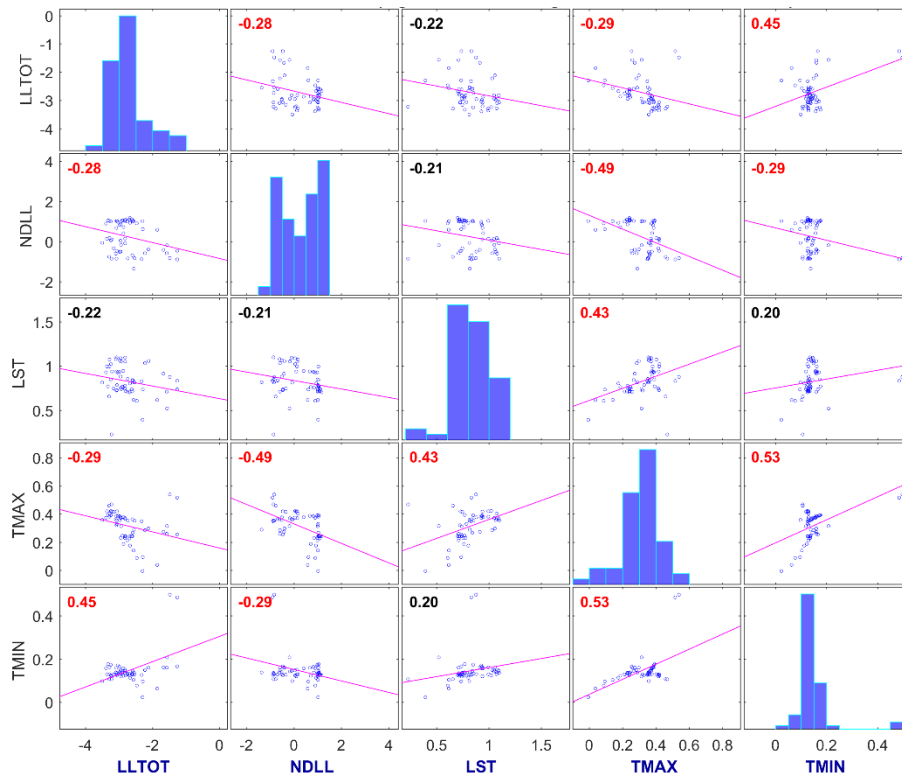


Figura 48. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para agricultura de riego a asentamiento humano

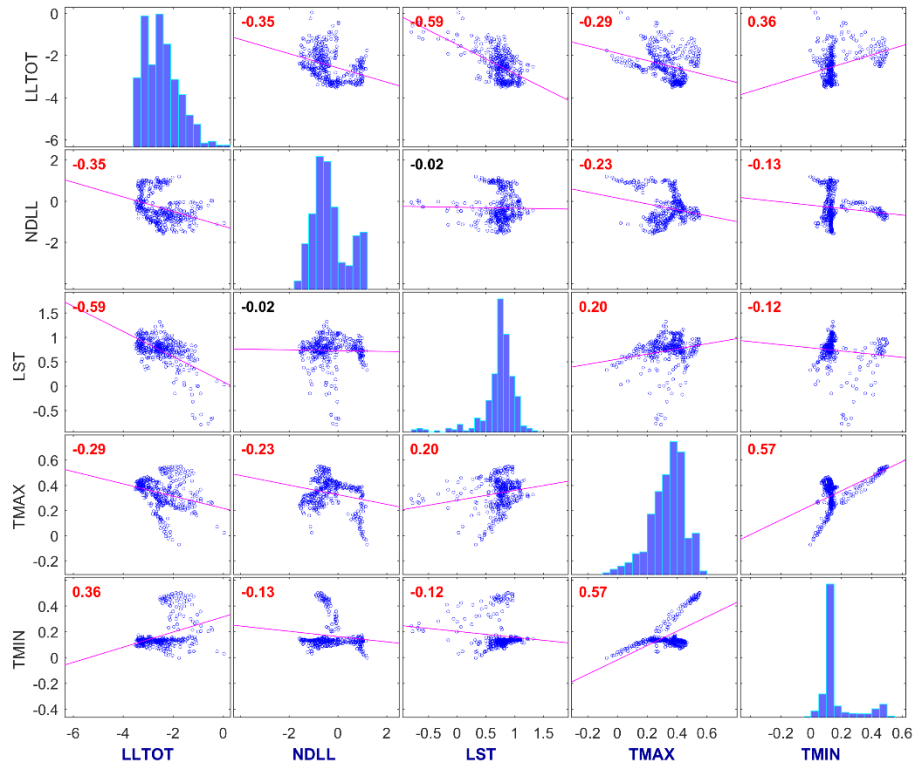


Figura 49. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para agricultura de riego

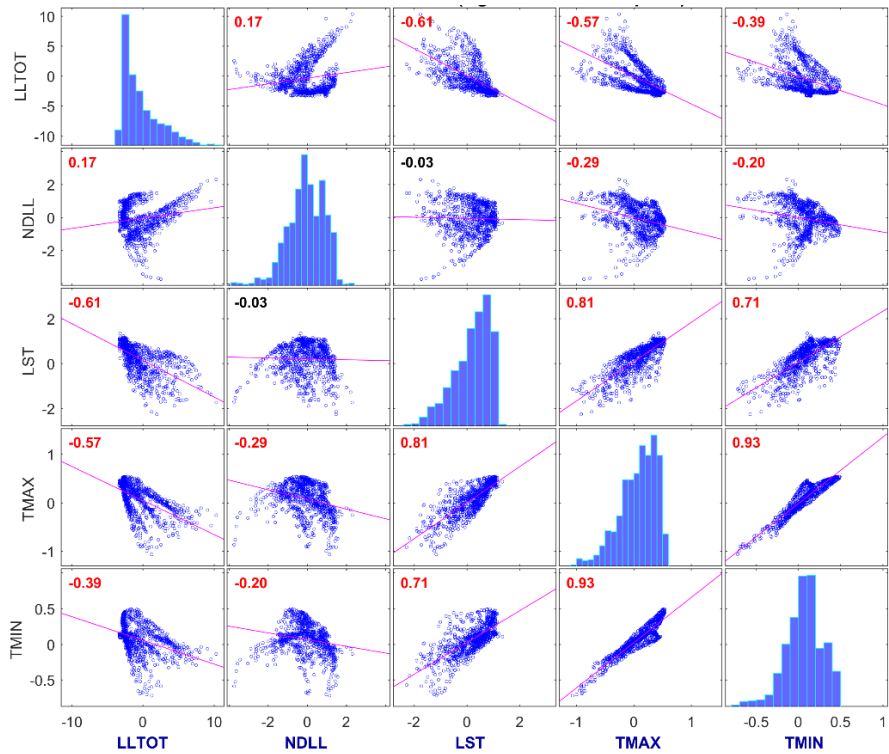


Figura 50. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para agricultura de temporal

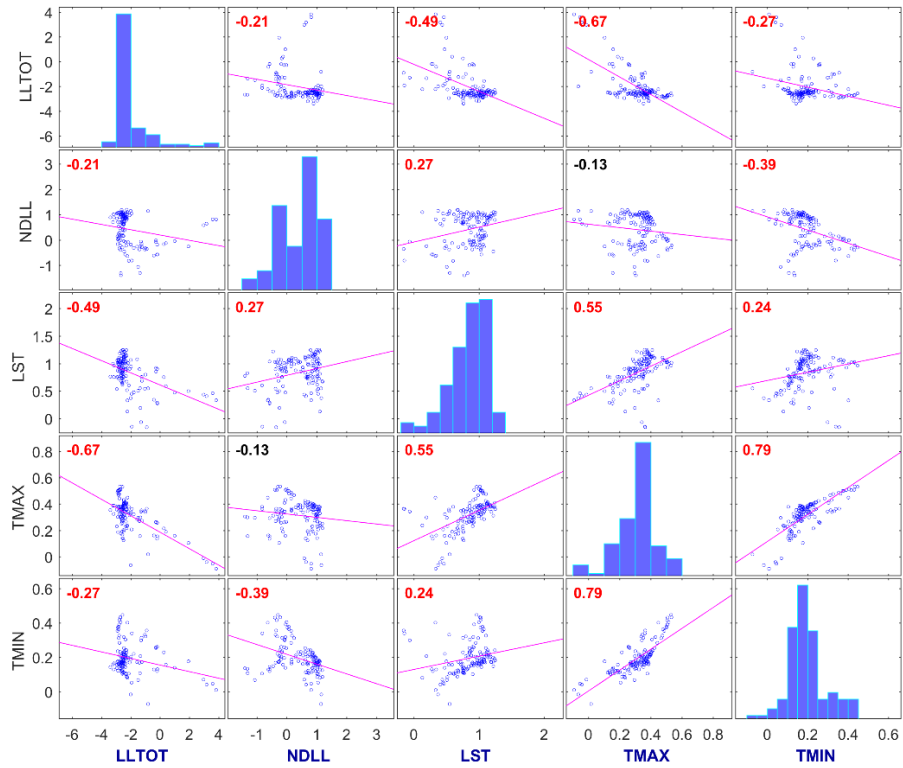


Figura 51. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para asentamiento humano

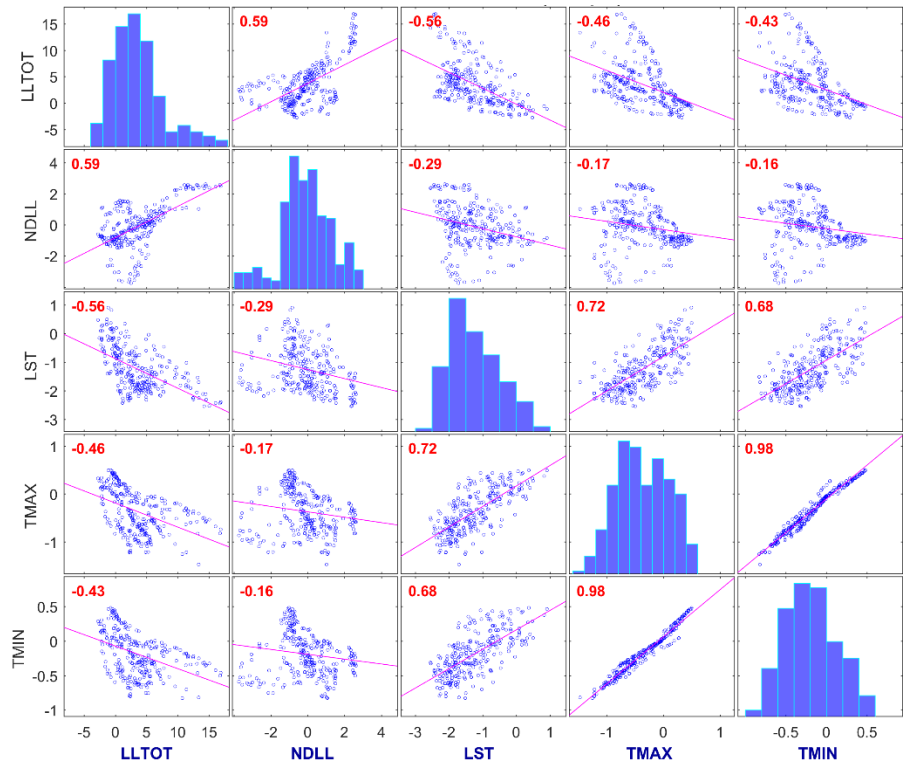


Figura 52. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para bosque

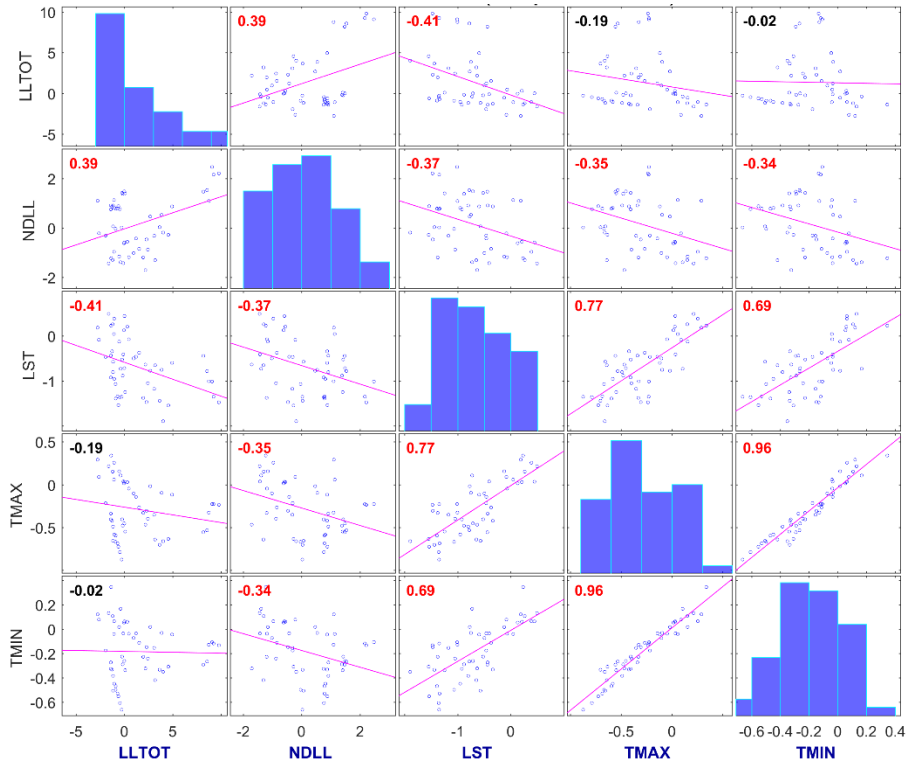


Figura 53. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para bosque secundario

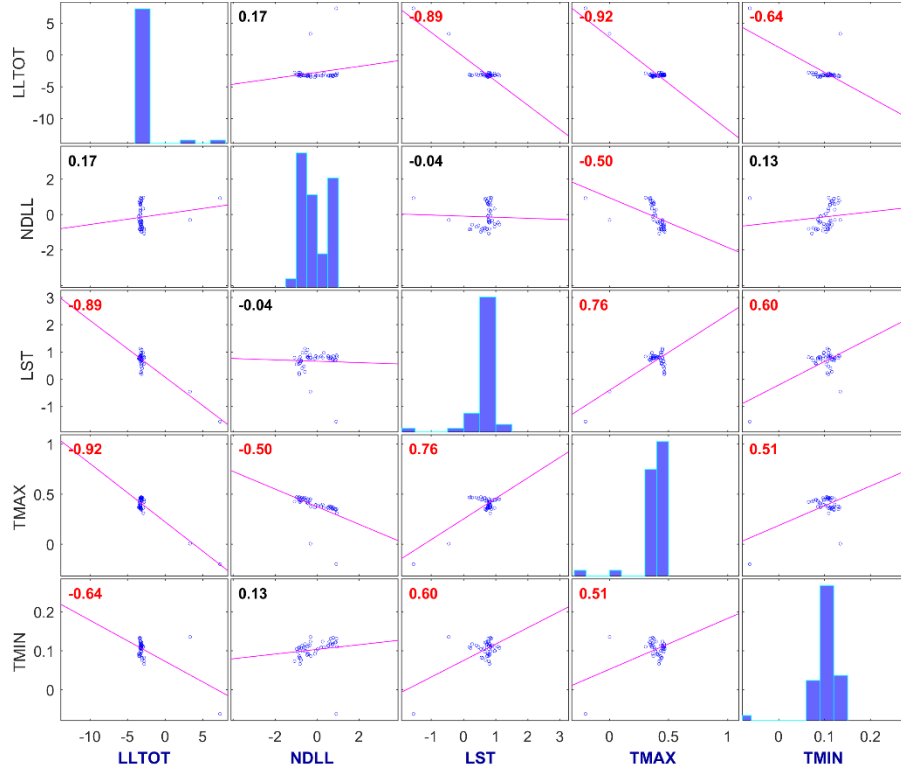


Figura 54. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para cuerpo de agua

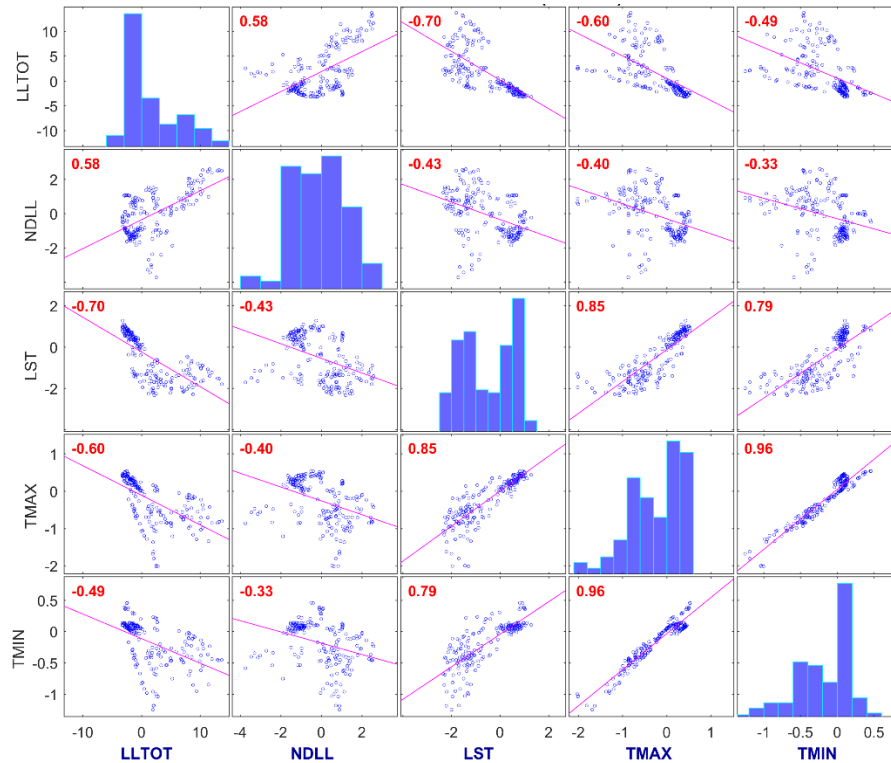


Figura 55. Matriz de correlación de temperatura de superficie (LST), temperatura atmosférica máxima (TMAX), lluvia total acumulada (LLTOT) y número de días con lluvia (NDLL) para uso de suelo que cambió de 1993 a 2014, para pastizal

8.4.3. Efecto del cambio de uso de suelo en la temperatura y la lluvia

Los usos de suelo que cambiaron para las amplitudes de LLTOT (Lluvia Total mensual) en la CACARL que ocurrieron de 1993 a 2014 (Figura 56), en la prueba de Kruskal-Wallis se observaron diferencias en el rango promedio. La prueba de Tukey HSD indicó que el comportamiento de la amplitud de LLTOT en el uso de suelo que cambia de agricultura de riego (AR) o agricultura de temporal (AT) a asentamiento humano (AH) no existen diferencias ($M = -2.71$ y $M = -1.89$ respectivamente). Sin embargo, cuando el cambio es de pastizal (P) a agricultura de temporal (AT) que la puntuación media para la condición de LLTOT es significativamente diferente a las condiciones de B/BS ($M = 5.50$), al igual que P/AT ($M = -0.05$). En conjunto, estos resultados sugieren que el cambio de uso de suelo a asentamiento humano tiene un efecto sobre el comportamiento de la lluvia total mensual, disminuyendo la precipitación en este, mientras que en el cambio de uso de suelo de bosque (B) a bosque secundario (BS) se incrementaron las precipitaciones.

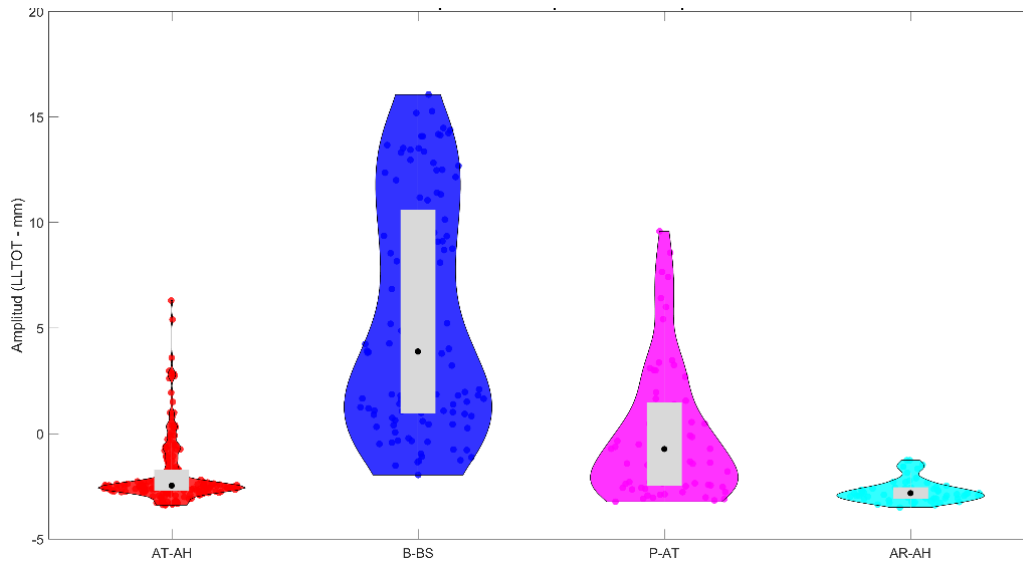


Figura 56. Variación de amplitud de la LLTOT por uso de suelo que cambió en un periodo de 1993 a 2014

Los usos de suelo que cambiaron para las amplitudes de NDLL (Número de Días con Lluvia) en la CACARL de 1993 a 2014 (Figura 57), en la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo que existe una diferencia entre los rangos promedios. En la prueba de Tukey HSD se identificó que el comportamiento de la amplitud del NDLL en los usos de suelo que cambiaron de AT y AR a AH no existen diferencias ($M = 0.20$ y $M = 0.23$ respectivamente). No obstante, los cambios de uso de suelo de P/AT ($M = -0.18$) y B/BS ($M = 0.80$) son sustancialmente diferentes. Con esto, los resultados sugieren que el cambio de uso de suelo a asentamiento humano ha influido en el comportamiento en el número de días con lluvia total mensual, aumentando en menor medida el promedio de días con lluvia, en comparación con el cambio de uso de suelo de bosque a bosque secundario.

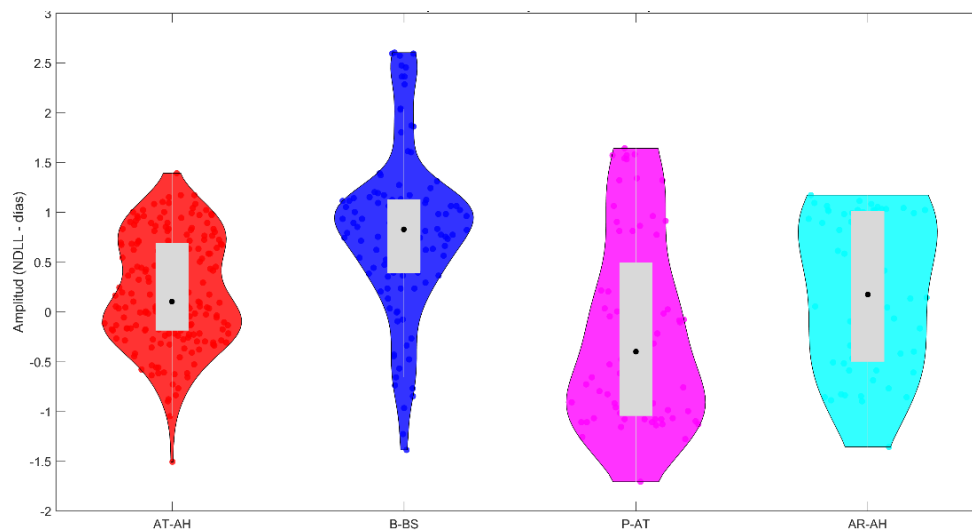


Figura 57. Variación de amplitud del NDLL por uso de suelo que cambió en un periodo de 1993 a 2014

El comportamiento de la amplitud de la temperatura de superficie (LST) en los usos de suelo que cambiaron, en la prueba de Kruskal-Wallis se observó que existen diferencias en los rangos promedio. La prueba de Tukey HSD indicó que en el comportamiento de la amplitud de la temperatura de superficie en uso de suelo que era AT (M = 0.79) y AR (M = 0.82) que cambió a AH no hubo una diferencia significativa, en contra parte el cambio de uso de suelo de bosque a bosque secundario y de pastizal a agricultura de temporal tuvieron diferencias estadísticas significativamente diferentes, donde B-BS obtuvo una media de -1.69 y P-AT M = 0.001. Consecuentemente se puede deducir que el cambio de uso de suelo a asentamiento humano influyó de manera positiva en el comportamiento de la amplitud de la temperatura de superficie, mientras que en el cambio de uso de suelo de Bosque a Bosque Secundario la temperatura tendió a disminuir.

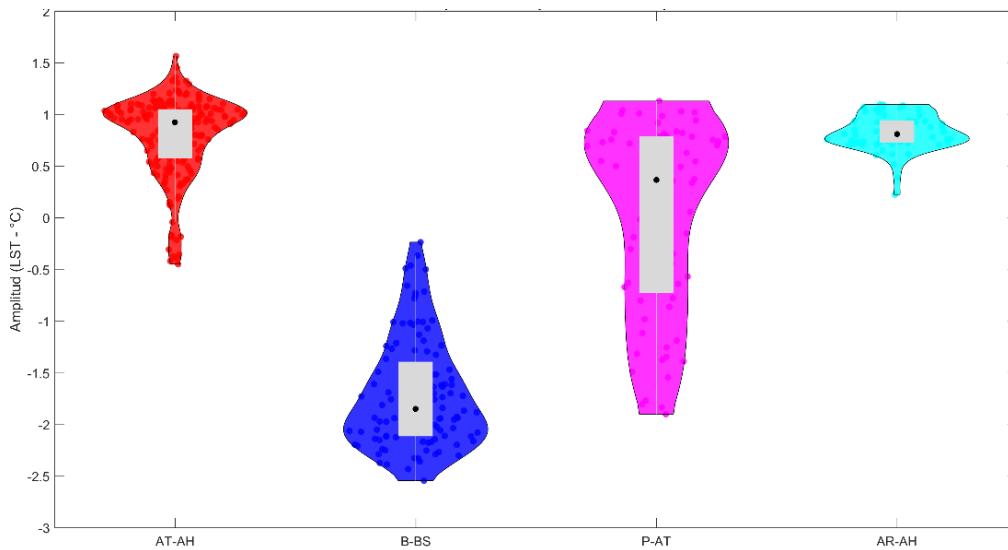


Figura 58. Variación de amplitud de LST por uso de suelo que cambió en un periodo de 1993 a 2014

El comportamiento de la amplitud de la TMAX en los usos de suelo que cambiaron en la prueba de Kruskal-Wallis poseen un comportamiento con diferencias en el rango promedio. La prueba de Tukey HSD indicó que el comportamiento de la amplitud de la TMAX en el uso de suelo que cambia de agricultura de temporal y agricultura de riego a asentamiento humano no existen diferencias (M = 0.31 para ambas). Sin embargo, en el cambio de uso de suelo de B-BS (M = -0.96) y el cambio de P-AT (M = 0.08) son sustancialmente diferentes. En conjunto, los resultados sugieren que el comportamiento de la Temperatura Máxima para los usos de suelo que cambiaron a asentamiento humano ha tenido un comportamiento a incrementar la temperatura. Sin embargo, en el uso de suelo que cambio a bosque secundario la Temperatura Máxima tendió a disminuir.

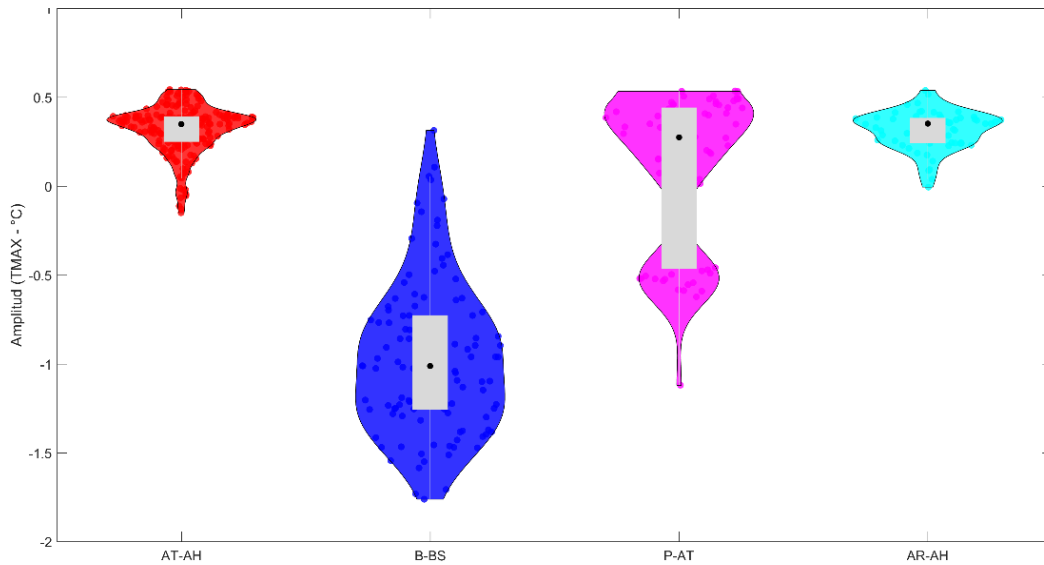


Figura 59. Variación de amplitud de TMAX por uso de suelo que cambió en un periodo de 1993 a 2014

En la prueba de Kruskal-Wallis los datos de la amplitud de temperatura mínima atmosférica (TMIN) en los usos de suelo que cambiaron en la CACARL de 1993 a 2014 (Figura 60), se obtuvo que existen diferencias en los rangos promedios. La prueba de Tukey HSD mostró que el comportamiento de la TMIN en el cambio de uso de suelo de AR/AH ($M = 0.14$) no existen diferencias con los cambios de P/AT ($M = 0.06$) y a AT/AH ($M = -0.20$) empero, existen diferencias entre el cambio de uso de suelo de P/AT con AT/AH. Además, el cambio de uso de suelo de B/BS ($M = -0.63$) es totalmente diferente a los tres cambios de uso de suelo mencionados anteriormente. Dicho de otro modo, los resultados proponen que el cambio de uso de suelo a asentamiento humano influye en el comportamiento de la temperatura mínima atmosférica de forma positiva, por otro lado, el cambio de uso de suelo a bosque secundario generó un decremento en la temperatura mínima.

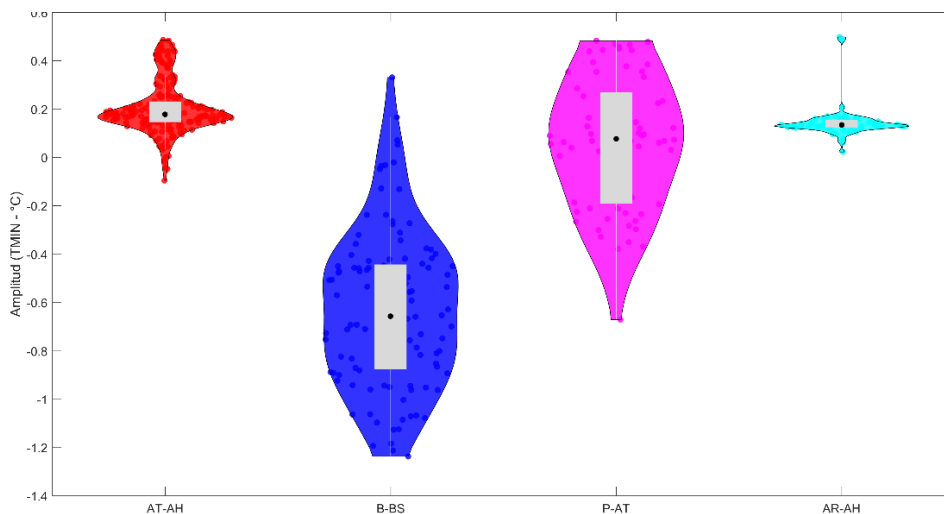


Figura 60. Variación de amplitud de TMIN por uso de suelo que cambió en un periodo de 1993 a 2014

Los usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014 para las amplitudes de LLTOT en la CACARL (Figura 61) en la prueba de Kruskal-Wallis se observaron diferencias en el rango promedio. En la prueba de Tukey HSD indicó que el comportamiento de la amplitud e la LLTOT en los usos de suelo de cuerpo de agua (CA) ($M = -2.80$), AR ($M = -2.48$) y AH ($M = -2.04$) no existen diferencias, así como tampoco existen diferencias entre BS ($M = 1.35$) y P ($M = 1.63$). Sin embargo, existen diferencias en los usos de suelo de AT ($M = -0.40$) y B ($M = 3.55$) que permanecieron. Los resultados sugieren que en los usos de suelo que permanecieron, tales como AR, AT, AH y CA la lluvia total mensual disminuyó, mientras que en los usos de suelo de B, BS y P la lluvia incrementó.

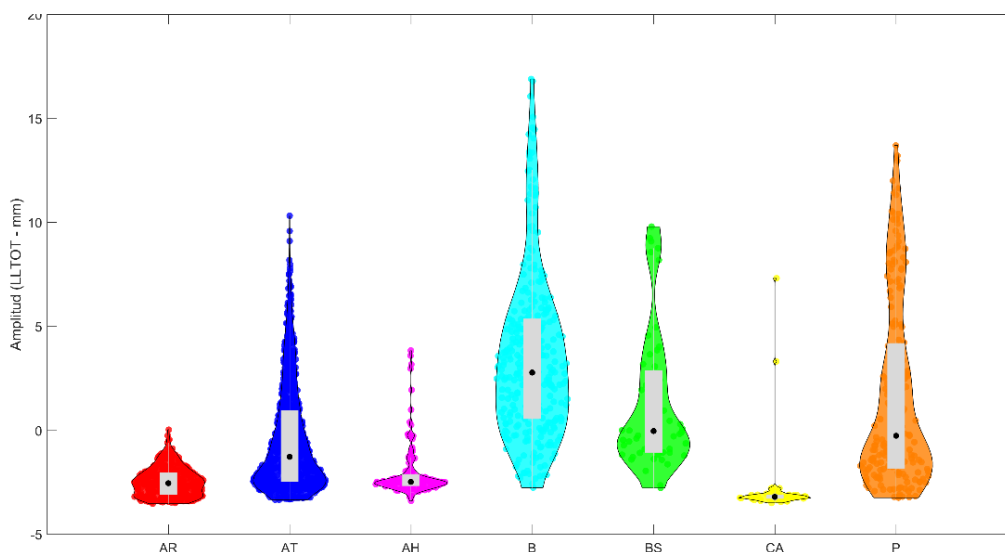


Figura 61. Variación de amplitud de LLTOT por uso de suelo que permaneció en un periodo de 1993 a 2014

Para la amplitud de NDLL (Número de Días con Lluvia) en los usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014 (Figura 62), en la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo que existen diferencias entre los rangos promedios. La prueba de Tukey HSD indicó que no existen diferencias entre los usos de suelo de AR ($M = -0.33$), CA ($M = -0.14$), B ($M = -0.10$) y P ($M = -0.09$), pero tampoco existen diferencias entre CA, B, P, AT ($M = -0.06$) y BS ($M = 0.14$), de igual manera no existen diferencias entre BS y AH ($M = 0.40$). Puede decirse que existen diferencias en los usos de suelo de AR con AT, AH y BS; AT con AH; y AH tiene diferencias con B, CA y P. Estos resultados en conjunto muestran tres grupos homogéneos relacionados entre sí; el primero agrupa cuatro usos de suelo (AR, CA, B y P); el segundo agrupa cinco, de los cuales tres son del primer grupo (CA, B, P, AT y BS); y el último grupo está formado por dos usos de suelo de los cuales uno pertenece al segundo grupo (BS y AH). En los dos primeros grupos el comportamiento de la amplitud de los NDLL disminuye, mientras que en el tercer grupo este tiende a incrementar.

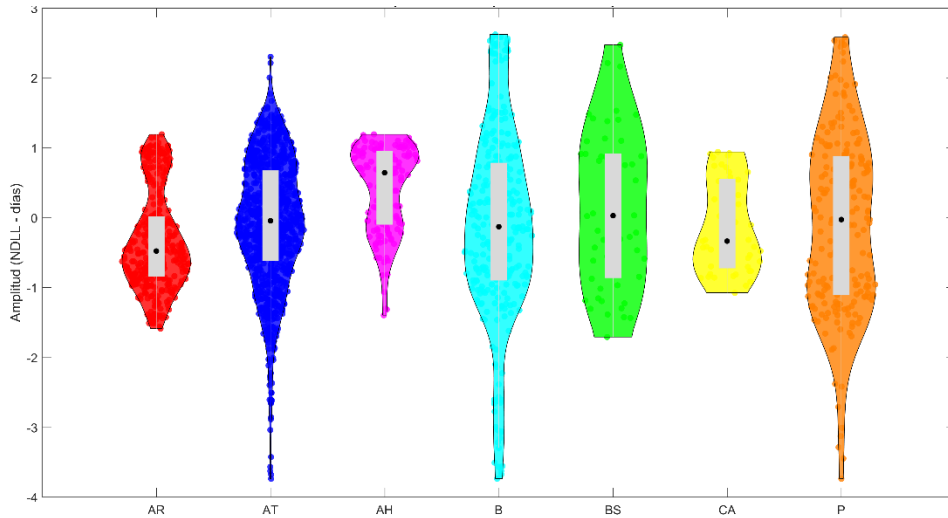


Figura 62. Variación de amplitud de NDLL por uso de suelo que permaneció en un periodo de 1993 a 2014

La prueba de Kruskal-Wallis en la amplitud de la temperatura de superficie (LST) en los usos de suelo que permanecieron, se observó que existen diferencias en el rango promedio. La prueba de Tukey HSD indicó que el comportamiento de la amplitud de LST en los usos de suelo BS ($M = -0.68$) y P ($M = -0.51$) no existen diferencias, al igual que no existen diferencias entre CA ($M = 0.66$), AR ($M = 0.72$) y AH ($M = 0.83$). Sin embargo, el uso de suelo B ($M = -1.24$) y AT ($M = 0.20$) muestra que existen diferencias. Consecuentemente se puede decir que AR, AT y AH han causado un efecto positivo en el comportamiento de la temperatura de superficie, mientras que B, BS y P han generado un decremento en el comportamiento de la amplitud de la LST.

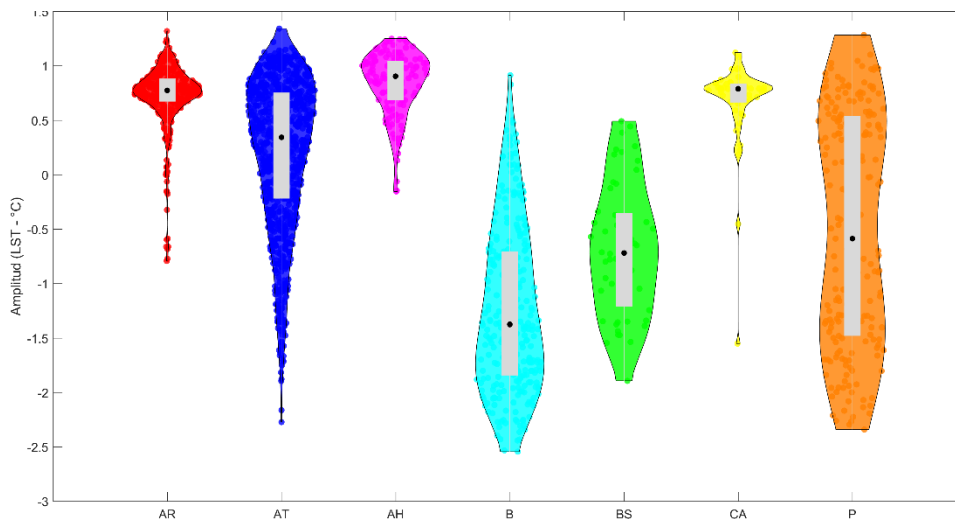


Figura 63. Variación de amplitud de LST por uso de suelo que permaneció en un periodo de 1993 a 2014

Los usos de suelo que permanecieron por las amplitudes de Temperatura Máxima Atmosférica (TMAX) en la CACARL en el periodo de 1993 a 2014 (Figura 64), en la prueba de Kruskal-Wallis se obtuvo que existen diferencias entre los rangos promedio. La prueba de Tukey HSD se observó que no existen diferencias entre AH (M = 0.31), AR (M = 0.33) y CA (M = 0.38), tampoco existen diferencias entre BS (M = -0.28) con B (M = -0.36) y P (M = -0.24), sin embargo, si existen diferencias entre B y P. Por otro lado, existen diferencias sustanciales en AT (M = 0.07) con los demás usos de suelo. Estos resultados muestran que en los usos de suelo AR, AT y AH se incrementó la amplitud e TMAX, mientras que para B, BS y P la amplitud disminuyó.

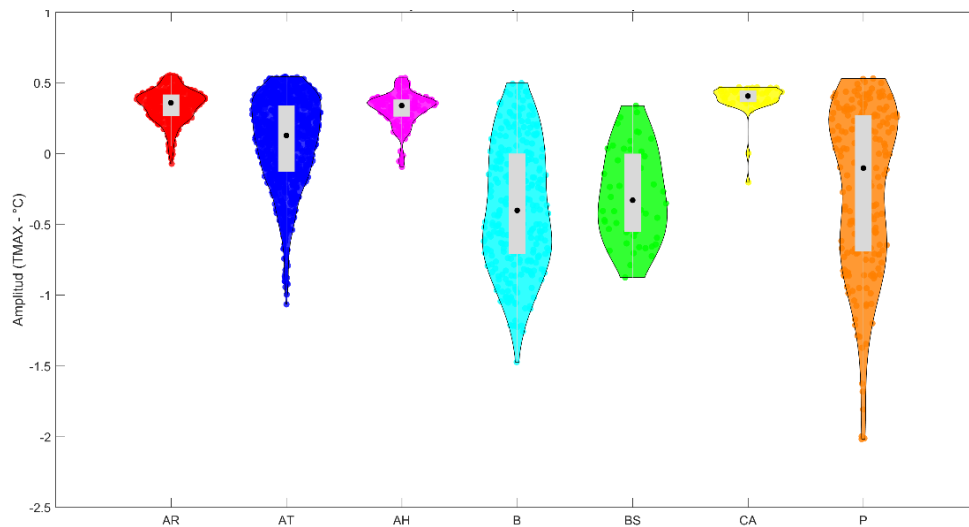


Figura 64. Variación de amplitud de TMAX por uso de suelo que permaneció en un periodo de 1993 a 2014

Al comparar los cambios en las amplitudes de TMIN (Temperatura Mínima Atmosférica) entre 1993 y 2014 en función de los usos de suelo con la prueba de Kruskal-Wallis, se observó que existen diferencias en el rango promedio. La prueba de Tukey HSD indicó que el comportamiento de la amplitud de la TMIN en los suelos B (M = -0.18), BS (M = -0.18) y P (M = -0.17) fue similar, es decir, tendió a disminuir. Por otro lado, en CA (M = 0.10), AR (M = 0.16) y AH (M = 0.19) la amplitud en la TMIN tendió aumentar de manera similar. Finalmente solo AT (M = 0.06) mostró un incremento similar con CA. Estos resultados muestran que los usos de suelo B, BS y P se ha disminuido la amplitud de la TMIN, mientras que el CA, AH, AR y AT mostraron un incremento en las amplitudes.

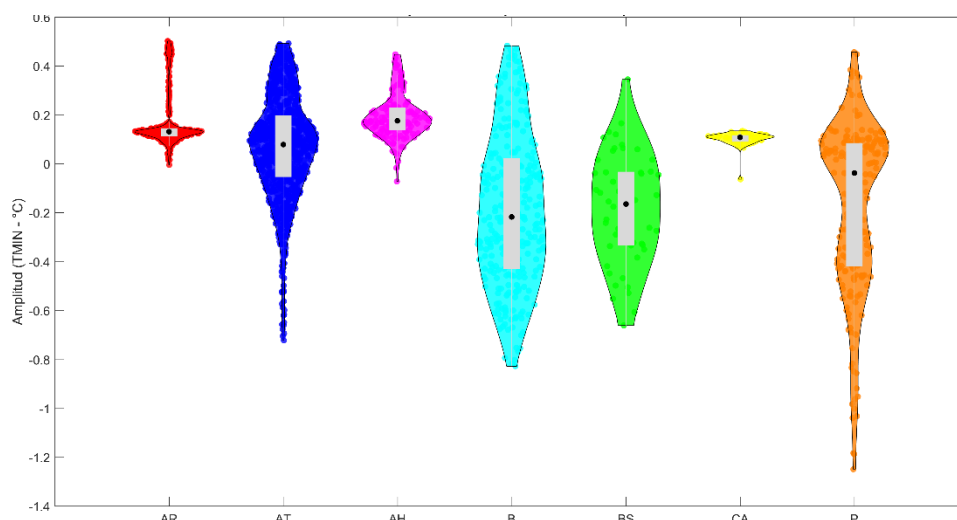


Figura 65. Variación de amplitud de TMIN por uso de suelo que permaneció en un periodo de 1993 a 2014

Se aplicó la prueba de Mann-Whitney para comparar los usos de suelo que permanecieron (control) contra los usos de suelo que cambiaron (tratamiento), con valor de alfa (α) de 0.05 para conocer el valor de P . Esto permitió identificar si existieron diferencias en LLTOT, NDLL, LST, TMAX y TMIN en los casos en que los usos de suelo cambiaron.

Para LLTOT (Tabla 8), se observó que cuando el uso de suelo cambio de AT a AH existió una disminución en la lluvia total mensual en comparación con los lugares que se mantuvieron como AT. En el caso de cambio de B a BS se notó un incremento en la lluvia, en comparación con el uso de suelo que se mantuvo como bosque. El uso de suelo que cambió de P/AT tuvo un decremento mayor en la lluvia en relación con el uso de suelo que se mantuvo como P. Y para el cambio de uso de suelo de AR/AH se percibió un mayor decremento en la lluvia total mensual comparado con el uso de suelo que permaneció como AR.

Tabla 8. Prueba de Mann-Whitney a amplitud de LLTOT para usos de suelo que permanecieron (control) con los usos de suelo que cambiaron (tratamiento), con un periodo de 1993 a 2014.

LLTOT	Mediana	U	P
Agricultura de Temporal (AT)	-1.27	50490.5	0
Agricultura de Temporal / Asentamiento Humano (AT/AH)	-2.46		
Bosque (B)	2.78	18123.5	0.0111
Bosque / Bosque Secundario (B/BS)	3.88		
Pastizal (P)	-0.25	5167.5	0.0067
Pastizal / Agricultura de Temporal (P/AT)	-0.72		
Agricultura de Riego (AR)	-2.54	8926.5	0.0147
Agricultura de Riego / Asentamiento Humano AR/AH	-2.82		

En el NDLL (Tabla 10) se obtuvo que se incrementó el número de días con lluvia cuando se cambió de AT/AH, mientras que en el uso de suelo que permaneció como AT tuvo un decremento. Para el uso de suelo que cambio de B/BS se observa un incremento en el número de días lluviosos, en comparación con el uso de suelo que permaneció como B. En el cambio de uso de suelo de P/AT notó una mayor disminución en el NDLL, en comparación al uso de suelo que permaneció como P. Y para el uso de suelo que cambio de AR/AH se apreció un incremento, mientras que en el uso de suelo que permaneció como AR tuvo una disminución en el NDLL.

Tabla 9. Prueba de Mann-Whitney a amplitud de NDLL para usos de suelo que permanecieron (control) con los usos de suelo que cambiaron (tratamiento), con un periodo de 1993 a 2014

NDLL	Mediana	U	P
Agricultura de Temporal (AT)	-0.04	98265	0.0003
Agricultura de Temporal / Asentamiento Humano (AT/AH)	0.10		
Bosque (B)	-0.13	22513	0
Bosque / Bosque Secundario (B/BS)	0.82		
Pastizal (P)	-0.39	6464	0.7592
Pastizal / Agricultura de Temporal (P/AT)	-0.39		
Agricultura de Riego (AR)	-0.47	15802	0
Agricultura de Riego / Asentamiento Humano AR/AH	0.17		

Para LST (Tabla 10), se observó un mayor incremento en la temperatura de superficie cuando hubo un cambio de uso de suelo de AT/AH, en relación con el uso de suelo que permaneció como AT. Para el uso de suelo que cambio de B/BS se notó un decremento en la temperatura de superficie, al igual que el uso de suelo que permaneció como B. En el uso de suelo que cambio de P/AT se apreció un mayor incremento en la temperatura de superficie en comparación con el uso de suelo que permaneció como P. Para el uso de suelo que cambio de AR/AH se obtuvo un mayor incremento en la temperatura de superficie, comparado con el uso de suelo que permaneció como AR.

Tabla 10. Prueba de Mann-Whitney a amplitud de LST para usos de suelo que permanecieron (control) con los usos de suelo que cambiaron (tratamiento), con un periodo de 1993 a 2014

LST	Mediana	U	P
Agricultura de Temporal (AT)	0.34	132015	0
Agricultura de Temporal / Asentamiento Humano (AT/AH)	0.92		
Bosque (B)	-1.37	9872.5	0
Bosque / Bosque Secundario (B/BS)	-1.85		
Pastizal (P)	-0.58	8615	0.0002
Pastizal / Agricultura de Temporal (P/AT)	0.36		
Agricultura de Riego (AR)	0.77	13213	0.0201
Agricultura de Riego / Asentamiento Humano AR/AH	0.81		

En TMAX (Tabla 11) se notó un incremento mayor en la temperatura máxima atmosférica en el cambio de uso de suelo de AT/AH, comparado con el uso de suelo que permaneció como AT. Para el uso de suelo que cambio de B/BS se observó una disminución considerable en la TMAX, a diferencia del uso de suelo que permaneció como B. En el uso de suelo que cambio de P/AT se obtuvo un incremento en la TMAX, al contrario del uso de suelo que permaneció como P. Y para el uso de suelo que cambio de AR/AH se observó un incremento en la TMAX, al igual que en el uso de suelo que permaneció como AR.

Tabla 11. Prueba de Mann-Whitney a amplitud de TMAX para usos de suelo que permanecieron (control) con los usos de suelo que cambiaron (tratamiento), con un periodo de 1993 a 2014.

TMAX	Mediana	U	P
Agricultura de Temporal (AT)	0.12	124573	0
Agricultura de Temporal / Asentamiento Humano (AT/AH)	0.34		
Bosque (B)	-0.4	5215.5	0
Bosque / Bosque Secundario (B/BS)	-1.01		
Pastizal (P)	-0.1	9184	0
Pastizal / Agricultura de Temporal (P/AT)	0.27		
Agricultura de Riego (AR)	0.36	9535.5	0.0781
Agricultura de Riego / Asentamiento Humano AR/AH	0.35		

Para TMIN (Tabla 12), se observó un mayor incremento en la temperatura mínima atmosférica en uso de suelo que cambio de AT/AH, comparado con el uso de suelo que permaneció como AT. En el uso de suelo que cambio de B/BS una disminución mayor en relación con el uso de suelo que permaneció como B. Para el uso de suelo que cambio de P/AT se notó un incremento en la TMIN a diferencia del uso de suelo que permaneció como P, en la que disminuyó la TMIN. Y para el uso de suelo que permaneció como AR tuvo un comportamiento similar de la TMIN en relación con el uso de suelo que cambió de AR/AH.

Tabla 12. Prueba de Mann-Whitney a amplitud de TMIN para usos de suelo que permanecieron (control) con los usos de suelo que cambiaron (tratamiento), con un periodo de 1993 a 2014.

TMIN	Mediana	U	P
Agricultura de Temporal (AT)	0.07	12178	0
Agricultura de Temporal / Asentamiento Humano (AT/AH)	0.17		
Bosque (B)	-0.21	5074.5	0
Bosque / Bosque Secundario (B/BS)	-0.65		
Pastizal (P)	-0.03	9309	0
Pastizal / Agricultura de Temporal (P/AT)	0.07		
Agricultura de Riego (AR)	0.13	12100	0.2774
Agricultura de Riego / Asentamiento Humano AR/AH	0.13		

9. DISCUSIONES

En este estudio, el cambio de uso de suelo influyó el comportamiento de la temperatura de superficie y atmosférica (máxima y mínima), además de la precipitación (LLTOT y NDLL). Demostrando que algunos usos de suelo impactaron más en el comportamiento de la temperatura y la lluvia.

El comportamiento de la lluvia total en el uso de suelo que cambio de bosque a bosque secundario se incrementó, concordando con lo planteado por Z. Liu & Liu, (2018), donde mencionan que el incremento de la cobertura vegetal impacta en el comportamiento de la precipitación de manera positiva. Por el contrario, los usos de suelo que cambiaron a asentamiento humano registraron una disminución en la lluvia total, discordando con los resultados obtenidos por Méndez et al., (2007), en el que para la ciudad de Toluca encontró un aumento en la lluvia. Sin embargo, ambos estudios coinciden en que el número de días con lluvia en este uso de suelo se incrementó.

De manera general, puede decirse que el comportamiento irregular de la lluvia (espacio-tiempo) en la CACARL puede generar problemas en la realización de análisis de su comportamiento en sistemas naturales usando los métodos convencionales, pues se alejaría de la realidad y por ende su utilidad se reduciría considerablemente. Esto en caso de que se llegase a detectar un fuerte comportamiento estacional, en donde los eventos extremos mostraran un valor muy alto o bajo, o incluso donde se encuentre una tendencia en la magnitud o frecuencia, complicando la identificación del tipo de clima (González-Hidalgo et al., 2005).

Con respecto a los resultados obtenidos de temperatura de superficie, temperatura máxima y mínima, se encontró que los usos de suelo que cambiaron a asentamiento humano tendieron a incrementarse, tal como lo plantearon varios estudios en diferentes ciudades del mundo (Méndez et al., 2007; Dávila et al., 2011; Yao et al., 2015; Rivera et al., 2017). Esto debido a que las disminuciones en el albedo aumentan la adsorción de energía radiativa en la superficie de uso de suelo urbano, contribuyendo al aumento en la temperatura de superficie y atmosférica (Trlica et al., 2017).

La variabilidad climática se ha visto influenciada reciamente por la fuerte necesidad del hombre por alterar el medio a su conveniencia, con el fin de satisfacer sus necesidades, fragmentando las coberturas de uso de suelo. En el caso de la CACARL, su mayor cambio se debió a la gran influencia del crecimiento de la ciudad por el auge de la industrialización (Botello, 2005; A. V. Flores & Cenecorta, 2015), aunque en sus inicios el principal uso de suelo era agrícola (Venancio, 2016). Estos cambios ocurrieron en varias ciudades impulsadas por el crecimiento económico (BELLET, 2018; López, 2019; Serrano Besil, 2020).

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al delimitar las UHI con el algoritmo de dirección de flujo se encontró que el número de islas de calor tanto de superficie como atmosféricas siguen un patrón estacional, en donde para temperatura de superficie posee un mayor número de islas en verano (julio con 84 cuencas de temperatura), mientras que en invierno se observó un menor número (diciembre con 45 cuencas). Para la temperatura atmosférica máxima se observó que en primavera (enero, febrero, mayo y junio con 11 cuencas) tiene un menor número de islas y en otoño (septiembre con 24 cuencas) concentra un mayor número de islas.

La identificación de los puntos más cálidos de las islas de calor de superficie y atmosférica, para el periodo de estudio de 2000 a 2019, y el análisis de estos puntos cálidos emergentes dio como resultado que dentro de la ZMVT no existen puntos cálidos significativos tanto en temperatura de superficie como atmosférica, pero ambas muestran puntos cálidos significativos en la porción sur de la cuenca y en la porción noroeste, donde hay un mayor uso de suelo de agricultura de temporal y de riego.

El comportamiento de la temperatura de superficie en el análisis de serie de tiempo se observó que la temperatura está disminuyendo de manera significativa en las zonas montañosas, específicamente en la Sierra de las Cruces y una porción de la ladera del volcán Nevado de Toluca. Sin embargo, no mostró cambios significativos en la ZMVT. Por otro lado, el resultado obtenido del análisis de serie de tiempo para temperatura atmosférica se observó que en toda la cuenca existe un incremento significativo, especialmente en las zonas montañosas.

Los componentes de lluvia (LLTOT y NDLL) mostraron un incremento significativo sobre la Sierra de las Cruces, también se observó que en la porción este de la ZMVT ha tenido cambios significativos en cuanto al incremento de la lluvia en milímetros y en número de días.

Para el caso de los usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014 se observaron incrementos en la temperatura para asentamiento humano, agricultura de temporal y agricultura de riego. En contra parte el uso de suelo de bosque y bosque secundario se notó un decremento en el comportamiento de la temperatura, así como incrementó la lluvia en estas dos últimas.

El cambio de uso de suelo ha sido constante y unos han sido remplazados en mayor área con respecto a otros, viéndose beneficiado principalmente el asentamiento humano, ocupando usos de suelo que eran destinados a la agricultura, estas últimas se desplazaron a pastizales y bosques, generando pérdidas en cadena.

De manera general se puede concluir que para los usos de suelo que cambiaron de 1993 a 2014 los que influyeron en el comportamiento de LLTOT, NDLL, LST, TMAX y TMIN, fueron principalmente asentamiento humano, el cual causó un incremento en la temperatura en las tres variables estudiadas, mientras que el comportamiento en el uso de suelo que cambió a bosque secundario provocó un decremento en la temperatura.

Aunado a esto, el comportamiento de la lluvia total mensual y el número de días con lluvia también tuvieron un comportamiento positivo en el uso de suelo de bosque secundario, y a pesar de que la lluvia disminuyó en asentamiento humano, el número de días en promedio aumentaron.

El comportamiento de la temperatura (LST, TMAX y TMIN) y los componentes de la lluvia (LLTOT y NDLL) tienen posible relación ya que muestran comportamientos directa o indirectamente proporcionales. Es por ello por lo que a partir de una correlación estadística entre estas variables (temperatura y lluvia) en los diferentes usos de suelo, tanto en los que han cambiado como en los que han permanecido, se notó que el uso de suelo que genera un mayor impacto es el de asentamiento humano, la agricultura de temporal y de riego, además del remplazamiento de bosque a bosque secundario.

Puede decirse que la alteración de las cubiertas vegetales y el remplazamiento de estas ya sea por cultivos, pastizales, entre otros. Además de que principalmente los asentamientos humanos han favorecido el fenómeno de la UHI, debido a sus características intrínsecas. Modificando el comportamiento local de la temperatura de superficie y atmosférica, afectando también el comportamiento de las lluvias en el Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma.

La alteración de las variables como la temperatura y la precipitación se ven influenciadas de manera local por las actividades del hombre que al final afectan la salud, el medio ambiente y en general la calidad de vida.

Y este estudio pretende sentar bases del entendimiento del comportamiento de la UHI y, por ende, el conocimiento del comportamiento del fenómeno de la isla de calor urbana contribuye a generar medidas y propuestas vinculadas a políticas públicas que estén encaminadas a la adaptación y mitigación de posibles cambios climáticos, a umbrales de olas de calor o posibles inundaciones por lluvias extraordinarias, además de incorporar el término de isla de calor en las nuevas propuestas y desarrollo urbano.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Acheampong, M., Yu, Q., Enomah, L. D., Anchang, J., & Eduful, M. (2018). Land use/cover change in Ghana's oil city: Assessing the impact of neoliberal economic policies and implications for sustainable development goal number one – A remote sensing and GIS approach. *Land Use Policy*, 73, 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.019>
- Alhaji, U., Yusuf, A., Edet, C., Oche, C., & Agbo, E. (2018). Trend Analysis of Temperature in Gombe State Using Mann Kendall Trend Test. *Journal of Scientific Research and Reports*, 20. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2018/42029>
- Álvarez, D., & Julián, C. (2014). Metabolismo urbano: Herramienta para la sustentabilidad de las ciudades. *INTERdisciplina*, 2(2), Article 2. <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2014.2.46524>
- Alvear Puertas, N. E. (2018). *Estudio multitemporal de cambio de uso del suelo, en la microcuenca del río escudillas*. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7879>
- Angeles Suazo, J. M., Flores Rojas, J. L., Karam, H. A., Arana Mallma, G. R., & Angeles Vasquez, R. J. (2019). Isla de Calor Urbana Superficial en las Áreas Metropolitanas de Huancayo y Arequipa/Perú. *Repositorio institucional - IGP*. https://doi.org/10.11137/2019_2_197_207
- Antonio, L.-R., William. (2018). *Clima, hidrología y meteorología.: Para ciencias ambientales e ingeniería*. Universidad Piloto de Colombia.
- Arellano, B., García-Haro, A., & Roca, J. (2019). Definición espacial del efecto de enfriamiento de los espacios verdes urbanos mediante teledetección: Estudios de caso en el Área Metropolitana de Barcelona. *International Conference Virtual City and Territory*, 0(13). <https://doi.org/10.5821/ctv.8956>
- Arsiso, B. K., Mengistu Tsidu, G., Stoffberg, G. H., & Tadesse, T. (2018). Influence of urbanization-driven land use/cover change on climate: The case of Addis Ababa, Ethiopia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105, 212-223. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.02.009>
- Arteaga-Ramírez, R., Cervantes-Osornio, R., Vázquez Peña, M. A., & Ojeda Bustamante, W. (2017). Estación meteorológica convencional versus automática sus diferencias evaluadas con índices estadísticos Chapingo, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(6), 1301-1314.
- Banchero, S., Abelleira, D. d, Veron, S. R., Mosciaro, M. J., Arévalos, F., & Volante, J. N. (2020). Recent Land Use and Land Cover Change Dynamics in the Gran Chaco Americano. *2020 IEEE Latin American GRSS ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*, 511-514. <https://doi.org/10.1109/LAGIRS48042.2020.9165579>
- Barnston, A. G., & Schickedanz, P. T. (1984). The effect of irrigation on warm season precipitation in the southern Great Plains. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(6), 865-888.
- Barradas, V. (2013). La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *Oikos*, 1.
- Barradas, V. L. (1987). Evidencia del efecto de la isla térmica en Jalapa, Veracruz, México. *Revista Geofísica*, 26, 125-135.
- Baudena, M., Tuinenburg, O. A., Ferdinand, P. A., & Staal, A. (2021). Effects of land-use change in the Amazon on precipitation are likely underestimated. *Global Change Biology*, 27(21), 5580-5587. <https://doi.org/10.1111/gcb.15810>
- Baumgardner, D., & Raga, G. (2016). Changes in precipitation intensity in Mexico City: Urban Heat island effect or the impact of aerosol pollution. Retrieved July, 15, 2016.
- BELLETT, E. O. Y. C. (2018). ¿ Cambio de modelo? Expectativas de crecimiento urbano en áreas urbanas articuladas por ciudades medias. Algunos casos de estudio. *Ciudades medias y áreas metropolitanas. De la dispersión a la regeneración*, 15, 117.
- Boletín N°5693, Cámara de Diputados. (2015). 5693—*Proponen prevenir y regular efectos de “islas de calor”; pueden aumentar defunciones por altas temperaturas / 06 / Junio / 2015 / Boletines / Comunicación / Inicio—Camara de Diputados*. <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2015/Junio/06/5693-Proponen-prevenir-y-regular-efectos-de-islas-de-calor-pueden-aumentar-defunciones-por-altas-temperaturas>
- Bornstein, R., & Lin, Q. (2000). Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. *Atmospheric Environment*, 34(3), 507-516.
- Botello, N. A. (2005). *Los estudios sobre la zona metropolitana del valle de Toluca. Aproximaciones estructurales y centradas en los actores. Región y Sociedad*, XVIII.

- Cabral Júnior, J. B., Lucena, R. L., Cabral Júnior, J. B., & Lucena, R. L. (2020). ANALYSIS OF PRECIPITATION USING MANN-KENDALL AND KRUSKAL-WALLIS NON-PARAMETRIC TESTS. *Mercator (Fortaleza)*, 19. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19001>
- Campoverde, A. S. B. (2018). Análisis de la isla de calor urbana en el entorno andino de Cuenca-Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, 70, 167-179.
- Casillas-Higuera, A., García-Cueto, R., Camacho, O., & Gonzalez-Navarro, F. F. (2014). Detección de la Isla Urbana de Calor mediante Modelado Dinámico en Mexicali, BC, México. *Información tecnológica*, 25(1), 139-150.
- Change, I. P. O. C. (2014). *Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Changnon Jr, S. A. (1980). More on the La Porte anomaly: A review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61(7), 702-711.
- Chaverra, C. A. P., & Estrada, E. S. (2019). *MEDIDAS DE ADAPTACIÓN/MITIGACIÓN ANTE ISLAS DE CALOR EN EL VALLE DE ABURRÁ*. 125.
- Chávez, A. M., & Guadarrama, J. (2000). La transformación económica y migratoria de la región Centro de México en el contexto de la crisis. *EURE (Santiago)*, 26(78), 5-36.
- Chen, Y., Moufouma-Okia, W., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., & Pirani, A. (2018). Recent progress and emerging topics on weather and climate extremes since the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 35-59.
- Climático, I. N. de E. y C. (s. f.). *Contexto Internacional en materia de Cambio Climático*. gob.mx. Recuperado 14 de julio de 2020, de <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/contexto-internacional-17057>
- COESPO. (2020). *Zonas metropolitanas del Estado de México | Consejo Estatal de Población*. https://coespo.edomex.gob.mx/zonas_metropolitanas
- Colunga, M. L., Cabromón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., & Luna-Soria, H. (2015). The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmósfera*, 28(3), 205-218.
- Conabio. (2021, marzo 24). *Portal de Información Geográfica—CONABIO*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero del Valle de Toluca (1501)*. Diario Oficial de la Federación.
- Conrads, L., & Van Der Hage, J. (1971). A new method of air-temperature measurement in urban climatological studies. *Atmospheric Environment (1967)*, 5(8), 629-635.
- Danilo, A., & Díaz, C. (2000). *Sequía en un mundo de agua*.
- Das, P., Vamsi, K. S., & Zhenke, Z. (2020). Decadal Variation of the Land Surface Temperatures (LST) and Urban Heat Island (UHI) over Kolkata City Projected Using MODIS and ERA-Interim DataSets. *Aerosol Science and Engineering*, 4(3), 200-209.
- Dávila, S. R., Méndez, C. C. M., & Némiga, X. A. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de climatología*, 11.
- De La Convención, P. D. K. (1998). Marco de Las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Naciones Unidas*, 25, 27.
- de la Federación, D. O. (2013). ACUERDO por el que se expide la Estrategia Nacional de Cambio Climático. *México: Secretaría de Gobernación*.
- Deilami, K., Kamruzzaman, Md., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- Delgado, G. C., Gay, C., Imaz, M., & Martínez, M. A. (2010). *México frente al cambio climático*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Devanathan, P., & Devanathan, K. (2011). Heat island effects. *Green Building with Concrete: Sustainable Design and Construction*. CRC Press, Boca Raton, FL, 175-226.
- Dian, C., Pongrácz, R., Dezsó, Z., & Bartholy, J. (2020). Annual and monthly analysis of surface urban heat island intensity with respect to the local climate zones in Budapest. *Urban Climate*, 31, 100573.
- Dixon, P. G., & Mote, T. L. (2003). Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Island–Initiated Precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 42(9), 1273-1284. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1273:PACOAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1273:PACOAU>2.0.CO;2)

- EPA, R. U. H. I. (2015). Compendium of strategies urban heat island basics, 2009. Available on line at: <http://www.epa.gov/hiri/resources/compendium.htm>.
- Esparza, M. G. S., & Sosa, L. C. H. (2017). La vegetación como sistema de control para las islas de calor urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Hábitat Sustentable*, 7(1), 14-23.
- Fang, C., Wang, S., & Li, G. (2015). Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: A case study of 30 provincial capital cities. *Applied energy*, 158, 519-531.
- Farooqi, A., & Thomas, R. (2019). SIMULATION AND COMPARISON OF THEIL SEN REGRESSION, THEIL SEN SIEGEL REGRESSION, AND QUANTILE REGRESSION WITH OUTLIERS. *15th Islamic Countries Conference on Statistical Sciences (ICCS-15)*, 1.
- Flores, A. V., & Cenecorta, A. I. (2015). Gobernanza metropolitana como estrategia para planificar y gestionar el desarrollo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. *Revista de estudios regionales*, 102, 91-118.
- Flores, L., Solís, J. V., & Herrera, J. A. Q. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 123-140.
- Fuentes Pérez, C. A. (2015). Islas de calor urbano en Tampico, México: Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova scientia*, 7(13), 495-515.
- Garza, G. (2002). Evolución de las ciudades mexicanas en el siglo XX. *Revista de información y análisis*, 19, 7-16.
- Garzón, J., & Jimenez-Cleves, G. (2020). Analysis of urban heat islands using Landsat images: Case study Armenia-Colombia 1996-2018 Contenido. *Espacios*, 41, 9.
- Geografía (INEGI), I. N. de E. y. (s. f.). *Mapas. Uso de suelo y vegetación*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. Recuperado 2 de mayo de 2021, de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- Geografía (INEGI), I. N. de E. y. (1910, enero 1). *Población. Censos y conteos. Población y Vivienda*; Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/#Informacion_general
- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE.
- Godínez-Tovar, A. G., & López-Gutiérrez, M. (2018). *Dinámica de la isla de calor urbana y su efecto en la distribución espacio-temporal de la lluvia en las ciudades de Querétaro y San Juan del Río*.
- González Viveros, P. de J. (2012). *Análisis de temperatura, humedad y precipitación por cambio de uso del suelo en la Cuenca del río Actopa*.
- González-Hidalgo, J. C., de Luis Arrillaga, M., & Monné, J. P. (2005). Los eventos extremos de precipitación, la variabilidad del clima y la erosión del suelo. Reflexiones ante el cambio del clima en los sistemas mediterráneos. *Revista C & G*, 19(1-2), 49-62.
- Grigoraş, G., & Urişescu, B. (2018). Spatial Hotspot Analysis of Bucharest's Urban Heat Island (UHI) Using Modis Data. *Annals of Valahia University of Targoviste, Geographical Series*, 18(1), 14-22.
- Gu, Y., & Li, D. (2018). A modeling study of the sensitivity of urban heat islands to precipitation at climate scales. *Urban climate*, 24, 982-993.
- Guha, S., Govil, H., & Diwan, P. (2019). Analytical study of seasonal variability in land surface temperature with normalized difference vegetation index, normalized difference water index, normalized difference built-up index, and normalized multiband drought index. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(2), 024518.
- Guo, X., Fu, D., & Wang, J. (2006). Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. *Atmospheric Research*, 82(1-2), 112-126.
- Harrison, G. (2015). *Meteorological Measurements and Instrumentation*. John Wiley & Sons.
- Henaó, J. J., Salazar, J. F., & Rendon, A. M. (2019). *Trade-offs between Urban Heat Island mitigation and air quality in an idealized urban valley*. 21.
- Herath, H. M. P. I. K., Halwatura, R. U., & Jayasinghe, G. Y. (2018). Evaluation of green infrastructure effects on tropical Sri Lankan urban context as an urban heat island adaptation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 212-222. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.11.013>
- Horton, R. E. (1921). Thunderstorm-breeding spots. *Monthly Weather Review*, 49(4), 193-193.
- Hosseini, S. M., Parvin, M., Bahrami, M., & Olfatifar, M. (2017). Pattern mining analysis of pulmonary TB cases in Hamadan province: Using space-time cube. *International Journal of Epidemiologic Research*, 7.
- Howard, L. (1818). *The Climate of London, deduced from Meteorological Observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis.: Vol. I* (Primera).

- <https://books.google.com.mx/books?id=7skTAAAYAAJ&printsec=frontcover&dq=the+climate+of+london+by+luka+howard+.&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjAx8qlo63UAhUkzIMKHWA5AdIQ6AEIzAA#v=onepage&q=the%20climate%20of%20london%20by%20luka%20howard%20.&f=false>
- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2016). *Anuario estadístico y geográfico de México 2016*.
- Jáuregui, O. (1979). La isla de calor en Toluca, Méx. *Investigaciones geográficas*, 9, 27-37.
- Jáuregui Ostos, E. (1975). Las zonas climáticas de la Ciudad de México. *Investigaciones geográficas*, 6, 47-58.
- Jiang, R., Xie, J., Zhao, Y., He, H., & He, G. (2017). Spatiotemporal variability of extreme precipitation in Shaanxi province under climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(3), 831-845. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1910-y>
- Jiang, X., Xia, B., & Guo, L. (2006). Research on urban heat island and its environmental effects of rapidly urbanized regions. *Ecol. Sci*, 25, 171-175.
- Kaplan, G., Avdan, U., & Avdan, Z. Y. (2018). Urban heat island analysis using the landsat 8 satellite data: A case study in Skopje, Macedonia. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2(7), 358.
- Kharol, S. K., Kaskaoutis, D. G., Badarinath, K. V. S., Sharma, A. R., & Singh, R. P. (2013). Influence of land use/land cover (LULC) changes on atmospheric dynamics over the arid region of Rajasthan state, India. *Journal of Arid Environments*, 88, 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.09.006>
- Kishtawal, C. M., Niyogi, D., Tewari, M., Pielke, R. A., & Shepherd, J. M. (2010). Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1908-1916. <https://doi.org/10.1002/joc.2044>
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate* (Vol. 28). Academic press. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=zkKHiEXZGBIC&oi=fnd&pg=PP1&dq=landsberg+1981+the+urban+climate&ots=-kY9_HtyN5&sig=5PrzoL-FgEjwA76ucys7I2vZ_MU#v=onepage&q=landsberg%201981%20the%20urban%20climate&f=false
- Lee, K., Kim, Y., Sung, H. C., Ryu, J., & Jeon, S. W. (2020). Trend Analysis of Urban Heat Island Intensity According to Urban Area Change in Asian Mega Cities. *Sustainability*, 12(1), 112.
- Li, D., Liao, W., Rigden, A. J., Liu, X., Wang, D., Malyshev, S., & Shevliakova, E. (2019). Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? *Science Advances*, 5(4), eaau4299.
- Li, H., Wolter, M., Wang, X., & Sodoudi, S. (2018). Impact of land cover data on the simulation of urban heat island for Berlin using WRF coupled with bulk approach of Noah-LSM. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1), 67-81. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2253-z>
- Li, L., & Zha, Y. (2019). Satellite-Based Spatiotemporal Trends of Canopy Urban Heat Islands and Associated Drivers in China's 32 Major Cities. *Remote Sensing*, 11(1), 102.
- Lin, W., Yu, T., Wu, W., & Zhang, Y. (2015). Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: Method and test. *Landscape and Urban Planning*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.012>
- Liu, J., & Niyogi, D. (2020). Identification of linkages between urban heat Island magnitude and urban rainfall modification by use of causal discovery algorithms. *Urban Climate*, 33, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100659>
- Liu, X., Zhou, Y., Yue, W., Li, X., Liu, Y., & Lu, D. (2020). Spatiotemporal patterns of summer urban heat island in Beijing, China using an improved land surface temperature. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120529. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120529>
- Liu, Z., & Liu, Y. (2018). Does Anthropogenic Land Use Change Play a Role in Changes of Precipitation Frequency and Intensity over the Loess Plateau of China? *Remote Sensing*, 10(11), 1818. <https://doi.org/10.3390/rs10111818>
- López, G. A. (2019). Las ciudades medias industriales en España: Evolución histórica, proceso de urbanización y estructura urbana. *Eria: Revista cuatrimestral de geografía*, 39(1), 25-49.
- Luo, X., & Peng, Y. (2016). Scale effects of the relationships between urban heat islands and impact factors based on a geographically-weighted regression model. *Remote Sensing*, 8(9), 760.
- Ma, Y., & Liu, G. (2017). Study of spatio-temporal evolution of urban heat island and its cloud effect using modis observations. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 492-495.

- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2012). *Hydrologic time series analysis: Theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Manoli, G., Faticchi, S., Schlöpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G., & Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, *573*(7772), 55-60.
- Marando, F., Salvatori, E., Sebastiani, A., Fusaro, L., & Manes, F. (2019). Regulating Ecosystem Services and Green Infrastructure: Assessment of Urban Heat Island effect mitigation in the municipality of Rome, Italy. *Ecological Modelling*, *392*, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.11.011>
- Martínez-Barbáchano, R., & Martínez-Barbáchano, R. (2020). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el térmico para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, *65*, 17-32. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.1>
- MASAPANTA SÁNCHEZ, M. L. (2018). *VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA*.
- Mastachi-Loza, C. A., Becerril-Piña, R., Gómez-Albores, M. A., Díaz-Delgado, C., Romero-Contreras, A. T., García-Aragon, J. A., & Vizcarra-Bordi, I. (2016). Regional analysis of climate variability at three time scales and its effect on rainfed maize production in the Upper Lerma River Basin, Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *225*, 1-11.
- McKight, P. E., & Najab, J. (2010). Kruskal-Wallis Test. En *The Corsini Encyclopedia of Psychology* (pp. 1-1). American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491>
- Méndez, C. C. M., Uribe, D. M., & Becerril, L. A. G. (2007). Isla de calor en Toluca, México. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, *14*(3), 307-316.
- Méndez-Lemus, Y. (2015). Vieyra, A. y A. Larrazábal (coords.; 2014), Urbanización, Sociedad y Ambiente: Experiencias en ciudades medias, CIGA-UNAM, SEMARNAT, INECC, México, 293 p., ISBN 978-607-02-4403-2. *Investigaciones Geográficas*. <https://doi.org/10.14350/ig.46422>
- Mercado, S. A. S., Caleño, J. D. Q., & Urbano, V. J. B. (2019). Implementación de la prueba de tetrazolio en las semillas de *Raphanus sativus* L. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, *15*(2), 7-15. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3831>
- México, P. (2014). *Ley General de Cambio Climático*.
- Miranda Piedra, A. G. (2018, diciembre). *Actores, territorios y procesos de la urbanización del espacio: Elementos y relaciones para entender la relevancia de la conservación ambiental en las ciudades*. X Jornadas de Sociología de la Universidad Nacional de La Plata (Ensenada, 5 al 7 de diciembre de 2018). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/80306>
- Mitchell Jr, J. M. (1961). The temperature of cities. *Weatherwise*, *14*(6), 224-258.
- Moanga, D., Biging, G., Radke, J., & Butsic, V. (2021). The space-time cube as an approach to quantifying future wildfires in California. *International Journal of Wildland Fire*, *30*(2), 139-153. <https://doi.org/10.1071/WF19062>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, *197*, 522-538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Muñoz Marín, C. M. (2008). *Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del Río Segura*.
- Mutani, G., & Todeschi, V. (2019). An Urban Energy Atlas and Engineering Model for Resilient Cities. *International Journal of Heat and Technology*, *37*(4), 936-947. <https://doi.org/10.18280/ijht.370402>
- Naciones Unidas Cambio Climático. (s. f.). Naciones Unidas Cambio Climático; Naciones Unidas. Recuperado 13 de julio de 2020, de <https://un.org/es/climatechange>
- Nava, L. E. M. (2011). *Atlas de la cuenca del Río Lerma en el Estado de México: Compendio*. Gobierno del Estado de México. <https://books.google.com.mx/books?id=sSh1oAEACAAJ>
- Nielsen, C. C., Amrhein, C. G., Shah, P. S., Stieb, D. M., & Osornio-Vargas, A. R. (2020). Space-time hot spots of critically ill small for gestational age newborns and industrial air pollutants in major metropolitan areas of Canada. *Environmental Research*, *186*, 109472. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109472>
- Ochoa, C. A., Quintanar, A. I., Raga, G. B., & Baumgardner, D. (2015). Changes in intense precipitation events in Mexico City. *Journal of Hydrometeorology*, *16*(4), 1804-1820.
- Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geographical analysis*, *27*(4), 286-306.

- Orozco Hernández, M. E. (2006). Escenarios interpretativos: Tendencias en la transformación de espacios rurales y periféricos de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca. *Investigaciones geográficas*, 60, 110-126.
- Parry, M. (1956). Local temperature variations in the Reading area. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 82(351), 45-57.
- Paulo Gomes, W., & Trindade, M. C. de C. (2016). *Análisis de la isla de calor de superficie en la ciudad de Ubatuba, Brasil*.
- Pérez, J. I. J., Némiga, X. A., Gaytán, J. F. M., Cedillo, J. G. G., Plata, M. Á. B., Loik, M. E., González, M. M. H., & Sanabria, J. M. C. (2010). Variaciones climáticas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca, Estado de México: 1960-2007. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 17(2), 143-153.
- Pierer, C., & Creutzig, F. (2019). Star-shaped cities alleviate trade-off between climate change mitigation and adaptation. *Environmental Research Letters*, 14(8), 085011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2081>
- Porras Vásquez, P. (2018). *Detección de núcleos de islas de calor en la Ciudad de Arequipa*.
- Putrenko, V., Pashvnska, N., & Nazarenko, S. (2018). Data Mining of Network Events with Space-Time Cube Application. *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, 79-83. <https://doi.org/10.1109/DSMP.2018.8478437>
- Radhi, H., Sharples, S., & Assem, E. (2015). Impact of urban heat islands on the thermal comfort and cooling energy demand of artificial islands—A case study of AMWAJ Islands in Bahrain. *Sustainable Cities and Society*, 19, 310-318.
- Rani, M., Kumar, P., Pandey, P. C., Srivastava, P. K., Chaudhary, B. S., Tomar, V., & Mandal, V. P. (2018). Multi-temporal NDVI and surface temperature analysis for Urban Heat Island inbuilt surrounding of sub-humid region: A case study of two geographical regions. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10, 163-172.
- Rivera, E., Antonio-Némiga, X., Origel-Gutiérrez, G., Sarricolea, P., & Adame-Martínez, S. (2017). Spatiotemporal analysis of the atmospheric and surface urban heat islands of the Metropolitan Area of Toluca, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(5), 225. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6538-4>
- Rodrigues, M., Santana, P., & Rocha, A. (2020). Modelling climate change impacts on attributable-related deaths and demographic changes in the largest metropolitan area in Portugal: A time-series analysis. *Environmental Research*, 190, 109998. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109998>
- Rwanga, S. S., & Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 08(04), 611. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Sahagún-Sánchez, F. J., & Reyes-Hernández, H. (2018). Impact of land use cover change on protected natural areas in central region of Sierra Madre Oriental, Mexico. *CienciaUAT*, 12(2), 6.
- Sánchez Rodríguez, R., & CEPAL, N. (2013). *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina*.
- Saryshev, D. V., Kurolap, S. A., & Popova, I. V. (2019). Verification of Urban Heat Island Microclimatic Model by Using Thermal Remote Sensing Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 272(2), 022085.
- Senanayake, I. P., Welivitiya, W., & Nadeeka, P. M. (2013). Remote sensing based analysis of urban heat islands with vegetation cover in Colombo city, Sri Lanka using Landsat-7 ETM+ data. *Urban Climate*, 5, 19-35.
- Senciales-González, J. M., Rodrigo-Comino, J., & Smith, P. (2020). Surveying topographical changes and climate variations to detect the urban heat island in the city of Málaga (Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 46(2), 521-543. <https://doi.org/10.18172/cig.4228>
- Serrano Besil, J. E. (2020). Crecimiento y configuración socioespacial de ciudades petroleras: Los casos de Barrancabermeja (Colombia) y Comodoro Rivadavia (Argentina), 1907-1938. *Cuadernos de historia (Santiago)*, 52, 205-232.
- Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q., & Hu, H. (2017). Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 72, 738-746.
- Shepherd, J. M. (2009). Global urban land-use trends and climate impacts Karen C Seto. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1, 89-95.

- Shepherd, J. M., & Burian, S. J. (2003). Detection of Urban-Induced Rainfall Anomalies in a Major Coastal City. *Earth Interactions*, 7(4), 1-17. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2003\)007<0001:DOUIRA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2003)007<0001:DOUIRA>2.0.CO;2)
- Shepherd, J. M., Pierce, H., & Negri, A. J. (2002). Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), 689-701.
- Shirani-Bidabadi, N., Nasrabadi, T., Faryadi, S., Larijani, A., & Roodposhti, M. S. (2019). Evaluating the spatial distribution and the intensity of urban heat island using remote sensing, case study of Isfahan city in Iran. *Sustainable cities and society*, 45, 686-692.
- Spracklen, D. V., Baker, J. C. A., Garcia-Carreras, L., & Marsham, J. H. (2018). The Effects of Tropical Vegetation on Rainfall. *Annual Review of Environment and Resources*, 43(1), 193-218. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030136>
- Sun, Y., Wang, S., & Wang, Y. (2020). Estimating local-scale urban heat island intensity using nighttime light satellite imageries. *Sustainable Cities and Society*, 57, 102125. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102125>
- Sussman, H. S., Raghavendra, A., & Zhou, L. (2019). Impacts of increased urbanization on surface temperature, vegetation, and aerosols over Bengaluru, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 16, 100261. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100261>
- Thornton, M. M., Thornton, P. E., Wei, Y., Mayer, B. W., Cook, R. B., & Vose, R. S. (2016). *DaymetDaymet: Monthly Climate Summaries on a 1-km Grid for North America, Version 3*. 214516.6730769998 MB. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1345>
- Tovar, A. G. G., Gutiérrez, M. L., Loza, C. A. M., Sosa, E. G., Piña, R. B., & Delgado, C. D. (2019). Metamorfosis espacio-temporal de la precipitación en dos ciudades del altiplano mexicano: Santiago de Querétaro y San Juan del Río. *DIGITAL CIENCIA@ UAQRO*, 12(1), 112-118.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205-1218.
- Tres de cada cinco ciudades corren un alto riesgo de sufrir un desastre natural*. (2018, octubre 31). ONU DAES | Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-cities-day-2018.html>
- Trlica, A., Hutyra, L. R., Schaaf, C. L., Erb, A., & Wang, J. A. (2017). Albedo, Land Cover, and Daytime Surface Temperature Variation Across an Urbanized Landscape. *Earth's Future*, 5(11), 1084-1101. <https://doi.org/10.1002/2017EF000569>
- Tumini, I. (2010). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. *Ponencia SB10 MAD, Edificación sostenible, Revitalización y Rehabilitación de Barrios*, 3.
- Turcios, R. A. S. (2015). *Prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney: Mitos y realidades*. 4.
- Umezaki, A. S., Ribeiro, F. N. D., Oliveira, A. P. de, Soares, J., & Miranda, R. M. de. (2020). Numerical characterization of spatial and temporal evolution of summer urban heat island intensity in São Paulo, Brazil. *Urban Climate*, 32, 100615. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100615>
- Uribe, G. M. G. (2014). Modelo de la Isla de Calor Atmosférico y Superficial: Factores en Común y alternativas para la Mitigación de su Efecto en salud humana y medioambiente urbano. *Recuperado el*, 25.
- Vargas, N., & Magaña, V. (2020a). Warm Spells and Climate Risk to Human Health in the Mexico City Metropolitan Area. *Weather, Climate, and Society*, 12(3), 351-365. <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-19-0096.1>
- Vargas, N., & Magaña, V. (2020b). Climatic risk in the Mexico city metropolitan area due to urbanization. *Urban Climate*, 33, 100644. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100644>
- Venancio, A. (2016). Planificación y gestión del desarrollo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Un Análisis desde la gobernanza, 2005-2012. *Pág.*(33-227), 5.
- Villalobos Puma, E. E., Martínez Castro, D., Shailendra, K., Silva Vidal, Y., & Fashe, O. (2019). *Estudio de tormentas convectivas sobre los Andes Centrales del Perú usando los radares PR-TRMM y KuPR-GPM*.
- Villanueva-Solis24, J. (2018). CLIMA URBANO: MITIGACIÓN DE LA ISLA DE CALOR Y SU INCORPORACIÓN AL PROCESO DE PLANEACIÓN URBANA. EL CASO DE MEXICALI, BC. *Joel F. Audefroy Raymundo Padilla Lozoya*, 121.
- Villarreal, D., & Candanedo, M. (2020). Efecto de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá. *I+D Tecnológico*, 16(2). <https://doi.org/10.33412/idt.v16.2.2829>
- Villavicencio, J. (2010). Introducción a series de tiempo. *Puerto Rico*.

- Voogt, J. A. (2014). Urban heat islands. En *Encyclopedia of Natural Resources-Water and Air-Vol II* (pp. 1071-1077). CRC Press.
- Yadav, N., & Sharma, C. (2018). Spatial variations of intra-city urban heat island in megacity Delhi. *Sustainable Cities and Society*, 37, 298-306. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.026>
- Yagüe, C., Zurita, E., & Martínez, A. (1991). Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25(3), 327-332.
- Yao, X., Wang, Z., & Wang, H. (2015). Impact of Urbanization and Land-Use Change on Surface Climate in Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, 1988–2008. *Advances in Meteorology*, 2015, e395094. <https://doi.org/10.1155/2015/395094>
- Z. Wan, S. H. (2015). *MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006*. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.006>
- Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H., & Lima, G. N. de. (2020). Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), Article 2. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2485>
- Zerrate Díaz, M., & Triana Díaz, V. (2018). *Determinación de la temperatura superficial en el Río Saldaña mediante información satelital*. <http://repositorio.unibague.edu.co:80/jspui/handle/20.500.12313/592>
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z., & Sobrino, J. A. (2019). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 11(1), 48.
- Zhu, X., Zhang, Q., Sun, P., Singh, V. P., Shi, P., & Song, C. (2019). Impact of urbanization on hourly precipitation in Beijing, China: Spatiotemporal patterns and causes. *Global and Planetary Change*, 172, 307-324. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.10.018>