



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**  
**UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS**

**Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y  
Medio Ambiente en Zonas Áridas**

**ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN LA ARIDIZACIÓN DEL  
NORTE DE MÉXICO MEDIANTE ÍNDICES ESPECTRALES**

**T E S I S**

**Que como requisito parcial para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES  
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

**Presenta:**

**SUSANA ALEJANDRA MEJÍA ROMERO**

**Bajo la supervisión del Dr. Armando López Santos**

**Bermejillo, Durango, México. Mayo 2024**



**iniap**  
Instituto Nacional de Investigaciones  
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

## **ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN LA ARIDIZACIÓN DEL NORTE DE MÉXICO MEDIANTE ÍNDICES ESPECTRALES**

Tesis realizada por **SUSANA ALEJANDRA MEJÍA ROMERO** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

### **MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE DE ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR



Dr. Armando López Santos

CO-DIRECTOR



Dr. Arturo Reyes González

ASESOR



Dra. Selenne Yuridia Márquez  
Guerrero

ASESOR



Dr. Francisco Guadalupe  
Echavarría Chairez

## CONTENIDO

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| RESUMEN GENERAL .....                                                                                        | xi  |
| GENERAL ABSTRACT .....                                                                                       | xii |
| CAPITULO I .....                                                                                             | 1   |
| 1.1 Introducción general .....                                                                               | 1   |
| CAPITULO II .....                                                                                            | 4   |
| 2.1 Revisión de literatura .....                                                                             | 4   |
| 2.1.1 La <i>TST</i> y su relación con las propiedades del suelo .....                                        | 4   |
| 2.1.2 Las Zonas Áridas.....                                                                                  | 4   |
| 2.1.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....                                            | 5   |
| 2.1.4 Emisividad de la superficie .....                                                                      | 6   |
| 2.1.5 Islas de Calor Urbano (ICU) .....                                                                      | 6   |
| 2.1.6 Teledetección como herramienta de análisis .....                                                       | 7   |
| 2.2 Literatura citada .....                                                                                  | 7   |
| CAPÍTULO III .....                                                                                           | 12  |
| Evaluación de cambios en la dinámica ambiental bajo un enfoque de islas de calor en el Norte de México ..... | 12  |
| Assessment of changes in environmental dynamics under a heat island approach in Northern Mexico.....         | 12  |
| RESUMEN.....                                                                                                 | 12  |
| 1. Introducción .....                                                                                        | 14  |
| 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....                                                                                | 16  |
| 2.1 Región de interés y delimitación de la unidad de estudio .....                                           | 16  |
| 2.2 Breve descripción de los componentes que determinan la <i>TST</i> .....                                  | 17  |
| 2.3 Fases de la investigación y administración de procesos .....                                             | 18  |
| 2.4 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) .....                                              | 24  |
| 2.5 Información edafológica .....                                                                            | 24  |
| 2.6 Análisis estadísticos .....                                                                              | 24  |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 3. RESULTADOS.....                                              | 25 |
| 3.1 Escenas térmicas .....                                      | 25 |
| 3.2 Datos de verificación en campo.....                         | 28 |
| 3.3 Propiedades edáficas de los sitios .....                    | 29 |
| 3.4 Distribución especial e importancia relativa del NDVI ..... | 30 |
| 3.5 Relación <i>TST</i> Vs <i>TA</i> .....                      | 31 |
| 4. DISCUSIÓN.....                                               | 33 |
| 5. CONCLUSIÓN.....                                              | 34 |
| 6. AGRADECIMIENTOS.....                                         | 35 |
| 7. LITERATURA CITADA .....                                      | 35 |
| 8. Apéndice.....                                                | 41 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Cuadro 1. Insumos empleados en la evaluación de la temperatura de la superficie terrestre. .... | 19 |
| Cuadro 2 Nomenclatura de colecciones (NC) LANDSAT descargadas por año de estudio .....          | 20 |
| Cuadro 3. Categorías, rangos de temperatura y óptimos para diferentes organismos .....          | 21 |
| Cuadro 4 Rangos NDVI, clave y descripción .....                                                 | 24 |
| Cuadro 5. Características de los sitios de verificación .....                                   | 28 |
| Cuadro 6. Descripción de propiedades edáficas de sitios más calientes.....                      | 29 |
| Cuadro 7. Coeficientes de correlación de TA y <i>TST</i> estimada.....                          | 31 |
| Cuadro 8. Resultados de regresión con <i>TST</i> como variable X .....                          | 32 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1. Caracterización de la UE. a) límites y ubicación de la UE, b) climas predominantes, c) GSP, d) Vegetación y uso de suelo.....                                                                                                                                                  | 18 |
| FIGURA 2. Fases de la investigación y administración de procesos para obtener mapas térmicos a nivel regional.....                                                                                                                                                                       | 19 |
| FIGURA 3. Sitios (Centroides-UTM) de verificación de campo (amarillo): A, B, C y D elegidos por presentar los meses más calientes. Claves municipales (blanco). El marco exterior (negro) indica los límites de la UE. ....                                                              | 23 |
| FIGURA 4. Distribución de la TST (arriba) y NDVI (abajo), durante nueve meses del año 2017 (izquierda) y 2021 (derecha). ....                                                                                                                                                            | 27 |
| FIGURA 5. TST calculada de nueve meses en los dos años estudiados y datos históricos diarios de temperatura para 2017 (a,b) y 2021 (c,d). En las figuras b y d las temperaturas máximas y mínimas se indican con líneas roja y azul, respectivamente (Fuente: Weather-Spark, 2024). .... | 28 |
| FIGURA 6. Cambios mensuales en los dos años de estudio en términos de superficie para cinco clases NDVI definidas. ....                                                                                                                                                                  | 31 |

## ÍNDICE DE APÉNDICES

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| APÉNDICE 1. Formulario de recolección de datos utilizado en la verificación de campo .....                                                                   | 41 |
| APÉNDICE 2. Fotografías de sitios de verificación hacia el norte (sup-izq), sur (sup-der), este (inf-izq), oeste (inf-der). Las letras indican el sitio..... | 42 |
| APÉNDICE 3. Superficie por cada rango de temperatura por fecha analizada                                                                                     | 44 |
| APÉNDICE 4. Rangos NDVI y cambios mensuales de superficie en km <sup>2</sup> y porcentaje (%) para 2017 y 2021 en la UE. ....                                | 45 |

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT), por el apoyo económico otorgado a través de la beca (CVU 1183399).

A la URUZA-UACH noble institución, por permitirme continuar con mi formación académica y los apoyos brindados.

Al Dr. Armando López Santos, por su dirección durante el proyecto, por sus grandes enseñanzas, sus aportaciones, su paciencia, apoyo, por siempre impulsarme a seguir adelante y por su confianza al creer que podría con el reto.

Al Dr. Arturo Reyes González, la Dra. Sellenne Yuridia Márquez Guerrero y al Dr. Francisco Guadalupe Echavarría por sus observaciones y aportaciones que siempre fueron para mejora del proyecto.

A todos los profesores y personal de posgrado y de la institución que siempre fueron amables y con disposición para apoyarnos durante nuestra formación, por todas sus enseñanzas y llamados de atención que siempre fueron en pro de nuestra educación.

A mis compañeras Lili, Karen y Margarita con quienes siempre hubo un apoyo e impulso mutuo para culminar nuestras actividades y llevar a buen término nuestra formación. Gracias por la amistad que se formó.



## **DEDICATORIAS**

A mis padres Susy y Sergio, quienes siempre me han apoyado e impulsado para que continúe superándome día con día y me han brindado la confianza para lograr las metas que me propongo.

A Pepe mi esposo y compañero de vida, quien siempre me apoya y me motiva para alcanzar todas mis metas, por estar siempre conmigo en los momentos buenos y en los momentos difíciles y por ayudarme en todo lo posible.

A mi hija Renata, quien, aunque llegó a mitad del camino de esta parte de mi formación, se convirtió en el motivo de buscar mi superación. Por aguantar esos momentos en que me ausentó y siempre recibirme con una sonrisa a mi regreso.

A mis hermanos que siempre han estado al pendiente de mí y me han apoyado cuando lo he requerido.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

### **Datos personales**

Nombre: Susana Alejandra Mejía Romero

Fecha de nacimiento: 10 de noviembre de 1997

Lugar de nacimiento: Gómez Palacio, Durango

CURP: MERS971110MDGJMS00

Profesión: Ingeniero en Sistemas Agrícolas

Cédula profesional: 13659197



### **Desarrollo académico**

Preparatoria: Colegio de Bachilleres del Edo. De Durango, Plantel 14, San Juan de Guadalupe, Durango (2012 – 2015).

Licenciatura: Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas- Universidad Autónoma Chapingo, Bermejillo, Mapimí, Durango (2015-2020).

Obtuvo el grado con mención honorífica de ingeniero en sistemas agrícolas con la tesis “Análisis geoestadístico de variables asociadas al índice de productividad edáfica en Coahuila México”.

### **Desarrollo profesional**

Laboró como capacitador asistente electoral federal (CAE) en el año 2021 en San Juan de Guadalupe, Durango. A finales del 2021 y durante el 2022 formó parte del Instituto Electoral y de Participación Ciudadana como consejera electoral.

# ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN LA ARIDIZACIÓN DEL NORTE DE MÉXICO MEDIANTE ÍNDICES ESPECTRALES

## RESUMEN GENERAL

Las elevadas temperaturas son un fenómeno que se ha ido acrecentando y cuyas consecuencias son cada vez más marcadas; las regiones áridas son aún más vulnerables debido a sus condiciones de escasa precipitación y poca cobertura vegetal. Los objetivos de esta investigación fueron detectar áreas en proceso de aridización en la Región Lagunera (RL) mediante el análisis de índices espectrales utilizando datos de Temperatura de la superficie terrestre (*TST*) para los años 2017 y 2021, así como analizar la relación de la *TST* con la temperatura del aire, NDVI y emisividad de la superficie ( $\epsilon_s$ ). La unidad de estudio (UE) comprendió un área de la RL determinada por la escena 30/42 de LANDSAT. Se extrajeron los datos de la Banda 10 del térmico infrarrojo (TIRS). Se determinaron 6 categorías de temperaturas con los siguientes rangos: C1( $\leq 8^\circ\text{C}$ ), C2( $8-20^\circ\text{C}$ ), C3( $20-32^\circ\text{C}$ ), C4( $32-44^\circ\text{C}$ ), C5( $44-56^\circ\text{C}$ ) y C6( $>56^\circ\text{C}$ ), estas permitieron analizar la distribución de la *TST* determinando así zonas críticas susceptibles a estrés térmico. Los resultados indicaron que incluso en los meses más fríos las temperaturas en la UE no bajaron de  $20^\circ\text{C}$  mientras que en los meses cálidos la *TST* fue mayor a los  $44^\circ\text{C}$  para 2017 y 2021. Sin embargo, el año 2017 fue poco más cálido que el 2021, lo que puede deberse a la presencia de sequías. Además, todos los controladores ambientales presentaron buena correlación con *TST*. Por lo que se concluye que la mayor superficie de la UE es susceptible a los procesos de aridización por las altas temperaturas, además que los controladores analizados predicen eficientemente la *TST*.

**Palabras clave:** Temperatura de la superficie terrestre, islas de calor, índices espectrales, aridización

---

Tesis de Maestría en Ciencias, Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas.

Autor: Susana Alejandra Mejía Romero

Director de tesis: Dr. Armando López Santos

# **ANALYSIS OF TRENDS IN THE ARIDIZATION OF NORTHERN MEXICO USING SPECTRAL INDICES**

## **GENERAL ABSTRACT**

Rising land Surface temperatures (LST) represent a significant threat to arid regions, characterized by low precipitation and limited vegetation cover. This study aims to: identify áreas undergoing aridization within the Lagunera Region (LR) using spectral indices derived from LST data (2017-2021), and assess the relationship between LST and air temperature, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and Surface emissivity ( $\epsilon_s$ ).

The study área (SU) encompasses a designated región of the LR captured by LANDSAT scene 30/42. LST data was extracted from Band 10 of the Thermal Infrared Sensor (TIRS). Six temperature clases were established: C1 ( $\leq 8^\circ\text{C}$ ), C2( $8-20^\circ\text{C}$ ), C3( $20-32^\circ\text{C}$ ), C4( $32-44^\circ\text{C}$ ), C5( $44-56^\circ\text{C}$ ) and C6( $>56^\circ\text{C}$ ). These clases facilitate spatial analysis of LST distribution, aiding in the identification of áreas susceptible to thermal stress.

Results indicate that the SU experiences minimal temperature fluctuations, with minimum values exceeding  $20^\circ\text{C}$  even in the coldest months. Conversely, warm months exhibit LST exceeding  $44^\circ\text{C}$  in both 2017 and 2021. Notably, 2017 displayed a slight temperature increase compared to 2021, potentially attributable to drought events. Furthermore, a strong correlation was observed between LST and all analyzed environmental variables (air temperature, NDVI, and  $\epsilon_s$ ).

We conclude that the majority of the SU exhibits vulnerability to aridization processes driven by high temperatures. Additionally, the employed environmental controllers demonstrate effectiveness in predicting LST patterns.

Keywords: Land surface temperature, heat islands, spectral indices, aridization

---

Master's Thesis in Science, Graduate Program in Natural Resources and Environmental in Arid Zones, Universidad Autónoma Chapingo, Regional University Unit of Arid Zones.

Author: Susana Alejandra Mejía Romero

Advisor: Dr. Armando López Santos

# CAPITULO I

## 1.1 Introducción general

Las altas y crecientes temperaturas son un fenómeno que se presenta de forma cada vez más recurrente a nivel mundial, superándose año con año las temperaturas máximas históricas; para el año 2020, la temperatura promedio estuvo 1.2°C por encima de las temperaturas promedio de la era preindustrial (UNEP, 2022). Para el mes de marzo del 2024, la temperatura superó por 0.73°C el promedio de 1991-2020, logrando un nuevo récord (Olguín, 2024).

Estos eventos extremos de temperaturas elevadas tienen efectos en la salud humana y los ecosistemas. Chesini, Abrutzky y Titto (2019) en un estudio realizado en Buenos Aires, Argentina para el periodo de 2005-2015, reportaron que las olas de calor incrementan el riesgo de muerte natural en un 14%, afectando principalmente a los sectores más vulnerables de la población.

En las zonas áridas, estas condiciones son aún más intensas al tener temperaturas altas y baja precipitación, lo que incrementa el déficit hídrico (Sánchez, 2019). Esta situación crítica se puede ver plasmada en los lugares más calurosos del mundo, como lo son el Desierto de Lut, Irán, y el Desierto de Sonora, México, donde se han registrado temperaturas máximas de 80.8°C (National Geographic, 2024).

Las Islas de Calor Urbano (ICU), consisten en la alteración del equilibrio energético de la superficie terrestre, al ser mayor la *TST* en las áreas urbanas que en las áreas rurales circundantes (Deng et al., 2024). Cabe mencionar que la distribución espacial de la *TST* no es para nada homogénea al verse afectada por diversos factores como lo son el relieve y el albedo (Haibo et al., 2024).

Haibo y et al. (2024) realizaron un estudio en dos ciudades de China con diferente cantidad de población donde analizaron el crecimiento de las ICU. En Zhengzhou del 2000 a 2010 hubo un aumento de 2.2 veces el tamaño, mientras que para el

periodo de 2010 a 2020 en incremento fue de 2.05. En el caso de Beijing, en el primer periodo el aumento fue de 1.42 veces y para el segundo de 1.53 veces.

La temperatura de la superficie terrestre (TST) es un factor de suma importancia pues regula varios procesos biológicos de las plantas (Mangani et al., 2022; León-García y Lasso, 2019). La dinámica de la TST también afecta toda la actividad biológica y química del suelo (Basurto-Lozada et al., 2020). Además, es uno de los parámetros directos relacionados al balance de energía, incluyendo interacciones superficie-atmósfera y flujos de energía; esto hace que tenga impacto en procesos ambientales como las ICU, la humedad del suelo y la cobertura vegetal (Ibrahim y Abu-Mallouh, 2018; Mujabar, 2019; Twumasi et al., 2021).

Getu y Bhatb (2024), en un estudio realizado en Etiopía en el que buscaban conocer la variación espaciotemporal de las TST y su relación con la cobertura del suelo utilizando teledetección, obtuvieron una alta correlación negativa entre TST y NDVI con valores de  $R^2$  mayores a 0.94. Se tiene la suposición de que la TST y la temperatura del aire (TA) tienen una alta correlación, sin embargo, Haibo et al. (2024) demostraron que se tiene una amplia variación en la relación de estas variables entre diferentes estaciones.

Gran parte de la superficie del planeta se encuentra en condiciones áridas (Bento et al., 2020), lo mismo que en el país (Lovriha, 2022). Estas áreas son más susceptibles a los efectos de las altas temperaturas debido a sus condiciones, lo que las hace más vulnerables a fenómenos climáticos como inundaciones, sequías y tormentas de arena y polvo, lo que genera un ambiente hostil, poniendo en riesgo la salud de sus habitantes (Samuels et al., 2022; Xu et al., 2023).

Un estudio realizado por Muhammad, Goswami y Bonafoni (2019), mostró que en las regiones áridas es común que la temperatura en las zonas rurales sea mayor que en las zonas urbanas, debido a la escasa vegetación, teniendo diferencias de TST hasta de 5°C, siendo mayor en las áreas rurales.

La *TST* se ve afectada por diferentes factores como lo son: el color del suelo, el contenido de materia orgánica, la microestructura, textura y contenido de humedad del suelo y la reflectancia y radiación incidente (Basurto-Lozada et al., 2020; Basurto-Lozada, Salas y Acosta-Gallegos, 2023).

Para monitorear los factores antes mencionados, se cuenta con herramientas como los sensores remotos (SR) los cuales facilitan el monitoreo de grandes superficies (Tulandi y Aloanis, 2021; López et al., 2021). El uso de imágenes espectrales facilita el estudio completo del territorio, permitiendo un análisis a diferentes escalas espacio-temporales (Caballero y Duarte, 2023; Zhao, Fang y Xu, 2024).

Actualmente existen plataformas de fácil acceso como el Explorador de la Tierra (Earth Explorer) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) con la serie LANDSAT (Kerzabi et al., 2021).

Los objetivos del presente trabajo son 1) detectar áreas en proceso de aridización en la Región Lagunera (RL) mediante el análisis de índices espectrales; y 2) evaluar el impacto de la aridización en los ambientes naturales de la Comarca Lagunera, considerando su dimensión y posibles implicaciones. Ambas bajo la premisa de que más del 50% de las zonas críticas de *TST* tienen escasa vegetación, lo que las acerca más a la aridización.

El presente trabajo consta de tres capítulos, el primero introduce el tema del trabajo, el segundo proporciona más información que nos sirva de referencia y el tercero y último es un artículo científico en que se escribe la metodología y resultados obtenidos del trabajo de investigación. Se tiene información en la que se está trabajando para obtener otro artículo, sin embargo, el tiempo no nos alcanzó para finalizarlo por lo que solo se presenta uno.

## **CAPITULO II**

### **2.1 Revisión de literatura**

#### **2.1.1 La *TST* y su relación con las propiedades del suelo**

La *TST* juega un papel muy importante en el balance energético, en los flujos de calor y en los flujos de agua en la interfaz suelo-atmósfera y se relaciona fuertemente con fenómenos como el cambio climático, las ICU y la cobertura del suelo (Duan et al., 2020; Matias y Lopes, 2024; Zhang et al., 2024). El vínculo entre la *TST* y la temperatura del aire (TA) se da debido a la transferencia de calor, cuando TA es mayor a *TST* el flujo de calor va de la atmósfera a la superficie (Matias y Lopes, 2024).

La *TST* es medida a partir de la radiación térmica y se relaciona con varios factores como lo son: el horario, la estación, las cubiertas impermeables, vegetación, cuerpos de agua y densidad poblacional (Matias y Lopes, 2024). En un estudio realizado por Patel, Indraganti y Jawarneh (2024) en una zona con clima desértico, durante el periodo de estudio (2000-2023), se observó el aumento de la *TST* durante el verano y por el contrario una disminución en invierno, esto sin importar la cobertura del suelo.

La materia orgánica influye en la temperatura del suelo, al contener mayor cantidad de materia orgánica, el suelo será más oscuro y por tanto absorberá más calor. Sin embargo, la microestructura del suelo juega un papel más importante en los cambios en la *TST*, los suelos arenosos tienen una alta respuesta al enfriarse y calentarse rápidamente debido a sus poros, mientras que los suelos arcillosos lo hacen más lentamente. A su vez, la capacidad del suelo de retener agua influye en los cambios de la *TST* (Basurto-Lozada et al., 2020).

#### **2.1.2 Las Zonas Áridas**

Más del 41% de la superficie del planeta corresponde a una región árida, donde habita alrededor del 35% de la población mundial. Estas condiciones dan pauta



al fenómeno conocido como desertificación, que consiste en la degradación de los subsistemas áridos (UNAM, 2018).

México se encuentra entre los 3 países más grandes en cuanto a extensión territorial de América Latina, donde el 50% de su superficie aproximadamente, está cubierto por zonas áridas. Estas regiones tienen condiciones extremas como lo es la escasa precipitación (<350 mm anuales) y las elevadas temperaturas, generando un evidente estrés hídrico en la región (Arámbula, 2005)

### **2.1.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

El NDVI, es un índice utilizado para conocer la condición del suelo en cuanto a salud, crecimiento, cobertura; para obtener estos datos, los satélites analizan las firmas espectrales de cada objeto que detecta el sensor del satélite (Jin et al., 2021; Li et al., 2024). Este índice trabaja con dos bandas espectrales, la roja de la del infrarrojo cercano, lo que estas realizan es calcular el verdor de las plantas y su densidad (Piedallu et al., 2019; Huang et al., 2021).

La vegetación es un elemento del medio ambiente sensible a variación de temperatura y a su vez influye en la cantidad de radiación que llega a la superficie para calentar el suelo (Meshesha et al., 2024). Estos mismos autores encontraron que la correlación entre TST y NDVI fue negativa y con valores de  $R^2$  entre -70 y -80 en todas las estaciones del año.

El crecimiento de la vegetación en zonas áridas se ve limitado por la disponibilidad de agua en el suelo y las temperaturas tan variantes (Gao et al., 2022). Se prevé que la superficie ocupada por zonas áridas aumente, así como las sequías en cuanto a intensidad y frecuencia. Por tanto, es importante mantener monitoreadas estas áreas tan susceptibles y el NDVI es una herramienta que se puede utilizar con ese fin (Bento et al., 2020).

#### **2.1.4 Emisividad de la superficie**

La emisividad de la superficie ( $\epsilon_s$ ) juega un rol importante en la estimación de la TST, impactando en el clima y las islas de calor. Se ve afectada por la humedad del suelo, principalmente en suelos arenosos (Tian, Song y He, 2019; Yin, Meng y Yu, 2020). Cabe mencionar que los paisajes naturales y las áreas urbanizadas presentan una  $\epsilon_s$  diferente. Además,  $\epsilon_s$  determina la radiación térmica capturada por el satélite (Chakraborty et al., 2021). Chakraborty et al. (2021) en un estudio realizado a nivel global determinaron datos medios de  $\epsilon_{s \text{ urb}}$  de 0.971(verano) y 0.969 (invierno) mientras que para  $\epsilon_{s \text{ rural}}$  fue de 0.975 (verano) y 0.970 (invierno).

Existen dos métodos habituales para obtener los datos de  $\epsilon_s$ ; el primero es basándose en el conocimiento previo o en suposiciones, se asigna un valor de  $\epsilon_s$  de acuerdo a la cobertura del suelo; el segundo es utilizando la alta correlación lineal que existe entre  $\epsilon_s$  y NDVI, entonces a partir de uno puede predecirse el otro (Yin, Meng y Yu, 2020).

#### **2.1.5 Islas de Calor Urbano (ICU)**

Las Islas de Calor Urbano (ICU), son áreas urbanas con temperaturas muy elevadas en comparación con las temperaturas de las áreas rurales de los alrededores, estas se deben principalmente al cambio y uso del suelo (Tanoori, Soltani y Modiri, 2024). Las ICU son un tema al que se está prestando cada vez más atención debido al acceso que se tiene a datos de observación de la Tierra. Es complicado identificar las causas de la presencia de ICU debido a lo complejo que son los intercambios de energía en el ambiente urbano y el entorno (Deng et al., 2024).

La intensidad de las ICU se determina por la diferencia de la temperatura del aire que se tiene en el centro de la ciudad y las periferias durante el día y la noche. El fenómeno depende principalmente de la densidad poblacional, el nivel de urbanización del área y las actividades que impliquen un cierto consumo de energía (Cichowicz y Bochenek, 2024).

### **2.1.6 Teledetección como herramienta de análisis**

Los datos de teledetección son utilizados principalmente para monitorear el ambiente, con ellos se puede realizar un mapeo de los recursos de la Tierra, observar y analizar su comportamiento tanto a nivel espacial como temporal (Yuan et al., 2020). Los sensores remotos como los TIRS de LANDSAT pueden recabar información de la temperatura de brillo de la superficie (TB) y generar productos de *TST* (Duan et al., 2020; Zhang et al., 2024).

Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los sensores remotos son herramientas útiles para obtener datos del uso y cobertura del suelo y de *TST*; juntos son el combo perfecto para analizar los datos obtenidos (Das et al., 2021). Sin embargo, la radiación del térmico infrarrojo se ve afectada por el vapor de agua atmosférico, las nubes, la velocidad del viento y la lluvia (Duan et al., 2020)

### **2.1.7 Propiedades térmicas del suelo**

La granulometría, agregación y contenido de humedad del suelo influyen en las propiedades térmicas del suelo; estas propiedades son las siguientes: capacidad calorífica, calor específico, conductividad térmica (CT) y difusividad térmica. A su vez, estas se vinculan a la mineralización, actividad microbiana y humificación de la materia orgánica del suelo. Cuando el contenido de humedad aumenta también lo hace la CT, lo que modifica los cambios de temperatura del suelo (Rojas et al., 2007).

## **2.2 Literatura citada**

- Arámbula, L. T. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 4(2), 17-21.
- Basurto-Lozada, D., Hillier, A., Medina, D., Pulido, D., Karaman, S., y Salas, J. (2020). Dynamics of soil surface temperature with unmanned aerial systems. *Pattern Recognition Letters*, 138, 68-74.
- Basurto-Lozada, D., Salas, J., y Acosta-Gallegos, J. A. (2023). Crop plot segmentation based on soil surface temperature dynamics. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 29, 100871.

- Bento, V. A., Gouveia, C. M., DaCamara, C. C., Libonati, R., y Trigo, I. F. (2020). The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. *Global and Planetary Change*, 190, 103198.
- Caballero C., C. P., y Duarte L., V. (2023). Análisis de la variación de la Temperatura de la Superficie Terrestre (TST) y del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (IVN) en el área metropolitana de Asunción. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 28(2), 352-369.
- Chakraborty, T. C., Lee, X., Ermida, S., y Zhan, W. (2021). On the land emissivity assumption and Landsat-derived surface urban heat islands: A global analysis. *Remote Sensing of Environment*, 265, 112682.
- Chesini, F., Abrutzky, R., y Titto, E. D. (2019). Mortality from heat waves in the city of Buenos Aires, Argentina (2005-2015). *Cadernos de Saúde Pública*, 35 (9). <https://doi.org/10.1590/0102-311X00165218>
- Cichowicz, R., & Bochenek, A. D. (2024). Assessing the effects of urban heat islands and air pollution on human quality of life. *Anthropocene*, 100433.
- Das, N., Mondal, P., Sutradhar, S., y Ghosh, R. (2021). Assessment of variation of land use/land cover and its impact on land surface temperature of Asansol subdivision. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(1), 131-149.
- Deng, X., Yu, W., Shi, J., Huang, Y., Li, D., He, X., Zhou, W. y Xie, Z., (2024). Characteristics of surface urban heat islands in global cities of different scales: Trends and drivers, *Sustainable Cities and Society*, Volume 107, 105483, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105483>.
- Duan, S. B., Han, X. J., Huang, C., Li, Z. L., Wu, H., Qian, Y., Fang G., M. y Leng, P. (2020). Land surface temperature retrieval from passive microwave satellite observations: State-of-the-art and future directions. *Remote Sensing*, 12(16), 2573.
- Gao, W., Zheng, C., Liu, X., Lu, Y., Chen, Y., Wei, Y., y Ma, Y. (2022). NDVI-based vegetation dynamics and their responses to climate change and human activities from 1982 to 2020: A case study in the Mu Us Sandy Land, China. *Ecological Indicators*, 137, 108745.
- Getu, K., y Bhat, H. G. (2024). Quantifying Spatio-temporal dynamics of land surface temperature for the rapidly growing city of Bahir Dar, Northwest Ethiopia using multidated Landsat data. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103543>
- Haibo, Y., Zhengrong, W., Dawson, R. J., Barr, S., Ford, A. y Li, Y. (2024). Quantifying surface urban heat island variations and patterns: comparison of two cities in three-stage dynamic rural–urban transition. *Sustainable Cities and Society*, 105538, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105538>.

- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., y Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Ibrahim, M., y Abu-Mallouh, H. (2018). Estimate land surface temperature in relation to land use types and geological formations using spectral remote sensing data in Northeast Jordan. *Open Journal of Geology*, 8(2), 174-185. DOI: 10.4236/ojg.2018.82011
- Jin, H., Chen, X., Wang, Y., Zhong, R., Zhao, T., Liu, Z., y Tu, X. (2021). Spatio-temporal distribution of NDVI and its influencing factors in China. *Journal of Hydrology*, 603, 127129.
- León-García, IV, y Lasso, E. (2019). Alta tolerancia al calor en plantas del altiplano andino: implicaciones para los páramos en un mundo más cálido. *PLoS One*, 14 (11), e0224218. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224218>
- Li, X., Xu, J., Jia, Y., Liu, S., Jiang, Y., Yuan, Z., Du, H., Han, R. y Ye, Y. (2024). Dinámica espacio-temporal de la vegetación en áreas nubladas en el suroeste de China extraída de cuatro productos NDVI. *Informática Ecológica*, 102630.
- López G., F. M., Navarro N., L. A., Díaz C., R. E., y Navarro-Estupiñán, J. (2021). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora. *Frontera norte*, 33.
- Lovriha, I. M. (2022). Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particularidades en zonas desérticas de México. *Vivienda y comunidades sustentables*, (12), 9-25
- Mangani, T., Mangani, R., Chirima, G., Khomo, L., y Truter, W. (2022). Using mulching to reduce soil surface temperature to facilitate grass production. *Heliyon*, 8(12). Mohammad, P., Goswami, A., & Bonafoni, S. (2019). The impact of the land cover dynamics on surface urban heat island variations in semi-arid cities: a case study in Ahmedabad City, India, using multi-sensor/source data. *Sensors*, 19(17), 3701.
- Matias, M., y Lopes, A. (2024). LCZ thermal and exoatmospheric albedo assessment using Landsat 8 land surface temperature and reflectance dataset: Case study of Lisbon. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 101163.
- Meshesha, K. S., Shifaw, E., Kassaye, A. Y., Tsehayu, M. A., Eshetu, A. A., y Wondemagegnehu, H. (2024). Evaluating the relationship of vegetation dynamics with Rainfall and Land Surface Temperature using geospatial techniques in South Wollo zone, Ethiopia. *Environmental Challenges*, 15, 100895.
- Mujabar, P. S. (2019). Spatial-temporal variation of land surface temperature of Jubail Industrial City, Saudi Arabia due to seasonal effect by using Thermal

- Infrared Remote Sensor (TIRS) satellite data. *Journal of African Earth Sciences*, 155, 54-63. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2019.03.008
- National Geographic (2024). *Lugares más calurosos de la Tierra: conoce los 3 sitios que tuvieron temperatura récord de calor*. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2024/01/lugares-mas-calurosos-de-la-tierra-conoce-los-3-sitios-que-tuvieron-temperatura-record-de-calor>
- Olguín L., M. (2024). *Marzo de 2024, el mes más cálido registrado a nivel mundial*. [https://unamglobal.unam.mx/global\\_revista/marzo-de-2024-el-marzo-mas-calido-registrado-a-nivel-mundial/](https://unamglobal.unam.mx/global_revista/marzo-de-2024-el-marzo-mas-calido-registrado-a-nivel-mundial/)
- Patel, S., Indraganti, M., y Jawarneh, R. N. (2024). Land surface temperature responses to land use dynamics in urban areas of Doha, Qatar. *Sustainable Cities and Society*, 104, 105273.
- Piedallu, C., Cheret, V., Denux, J. P., Perez, V., Azcona, J. S., Seynave, I., y Gegout, J. C. (2019). Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Science of the Total Environment*, 651, 2874-2885.
- Rojas, A., Zúñiga, O., Prager, M. S. D., Pérez, J., y Gascó, J. M. (2007). Conductividad térmica del suelo, materia orgánica, actividad y biomasa microbianas en sistemas de cultivo de maracuyá en Toro, Valle del Cauca. *Acta Agronómica*, 56(1), 17-22.
- Samuels, M. I., Masubelele, M. L., Cupido, C. F., Swarts, M. B. V., Foster, J., De Wet, G., Links, A., Van Orsdol, K. y Lynes, L. S. (2022). Climate vulnerability and risks to an indigenous community in the arid zone of South Africa. *Journal of Arid Environments*, 199, 104718.
- Sánchez C., J. E. (2019). *Desarrollo sostenible de zonas áridas y semiáridas frente al cambio climático*. Durango: Universidad Juárez del Estado de Durango
- Tanoori, G., Soltani, A., y Modiri, A. (2024). Machine Learning for Urban Heat Island (UHI) Analysis: Predicting Land Surface Temperature (LST) in Urban Environments. *Urban Climate*, 55, 101962.
- Tian, J., Song, S., y He, H. (2019). The relationship between soil emissivity and soil reflectance under the effects of soil water content. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 110, 133-137.
- Tulandi, D. A., y Aloanis, A. A. (2021). Dynamics Analysis of Surface Temperature and Vegetation Index in Settlement Area around the Lokon Volcano, Tomohon, North Sulawesi. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9(10), 118-129
- Twumasi, Y. A., Merem, E. C., Namwamba, J. B., Mwakimi, O. S., Ayala-Silva, T., Frimpong, D. B., Ning, Z. H., Asare-Ansah, A. B., Annan, J. B., Oppong, J., Loh, P. M., Owusu, F., Jeruto, V., Petia, B. M., Okwemba, R., McClendon-Peralta, J., Akinrinwoye, C. O. y Mosby, H. J. (2021).

Estimation of Land Surface Temperature from Landsat-8 OLI Thermal Infrared Satellite Data. A Comparative Analysis of Two Cities in Ghana. *Advances in Remote Sensing*, 10(4), 131-149. DOI: 10.4236/ars.2021.104009

UN Environment Programme [UNEP] (2022). *El aumento de las temperaturas mundiales es alarmante*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/el-aumento-de-las-temperaturas-mundiales-es-alarmante>

UNAM (2018). *Las zonas áridas ocupan 41% de los continentes*. <https://www.gaceta.unam.mx/las-zonas-aridas-ocupan-41-de-los-continentes/>

Xu, L., Gao, G., Wang, X., y Fu, B. (2023). Distinguishing the effects of climate change and vegetation greening on soil moisture variability along aridity gradient in the drylands of northern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 343, 109786.

Yin, C. L., Meng, F., y Yu, Q. R. (2020). Calculation of land surface emissivity and retrieval of land surface temperature based on a spectral mixing model. *Infrared Physics & Technology*, 108, 103333.

Yuan, Q., Shen, H., Li, T., Li, Z., Li, S., Jiang, Y., Xu, H., Tan, W., Yang, Q., Wang, J., Gao, J. y Zhang, L. (2020). Deep learning in environmental remote sensing: Achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 241, 111716.

Zhang, W., Jia, Z., Li, B., Liu, Q., Zhu, X., Jia, C., Gu, X. y Yu, T. (2024). Research on Landsat 8 land surface temperature retrieval and spatial-temporal migration capabilities based on random forest model. *Advances in Space Research*.

Zhao, H., Fang, Y., y Xu, X. (2024). Quantifying morphology evolutions of urban heat islands and assessing their heat exposure in a metropolis. *Sustainable Cities and Society*, 105244.

### CAPÍTULO III

#### Evaluación de cambios en la dinámica ambiental bajo un enfoque de islas de calor en el Norte de México

#### Assessment of changes in environmental dynamics under a heat island approach in Northern Mexico

Susana Alejandra Mejía-Romero (0009-0003-1090-1355)<sup>1</sup>, Selenne Yuridia Márquez-Guerrero (0000-0001-5910-8794)<sup>2</sup>, Arturo Reyes-González (0000-0002-6983-0905)<sup>3</sup>, Francisco Guadalupe Echavarría-Chairez (0000-0002-4910-5677)<sup>4</sup>, Armando López-Santos (0000-0002-2186-433X)<sup>1\*</sup>

\*Corresponding author: [alopez@chapingo.uruza.edu.mx](mailto:alopez@chapingo.uruza.edu.mx)

<sup>1</sup> Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Vía Gómez P.-Cd. Juárez, Chih. Bermejillo, 35230 km 40

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Torreón. Vía Torreón-Sn Pedro km 7.5, 27170 Torreón, Coah.

<sup>3</sup> INIFAP Campo Experimental La Laguna. Blvd. José Santos Valdez 1200 pte. Centro. CP 27440. Matamoros, Coah.

<sup>4</sup> INIFAP Campo Experimental Zacatecas. Calera de Víctor Rosales, Zacatecas.

**RESUMEN.** Los objetivos de la presente investigación fueron: 1) evaluar el comportamiento de la distribución espacial de la *TST* de la Región Lagunera (RL) para 2017 y 2021 basado en LANDSAT; 2) analizar la relación entre la *TST* con datos de estaciones meteorológicas convencionales (EMC), así como con el comportamiento temporal de la vegetación mediante el NDVI, y la emisividad de la superficie ( $\epsilon_s$ ). La unidad de estudio (UE) comprendió parte (42.6%) de la RL para facilitar el empleo escenas LANDSAT (30/42), para su acoplamiento con otros recursos cartográficos (1:250,000); la *TST* en °C se reclasificó en seis categorías: C1 ( $\leq 8$ ), C2 (8-20), C3 (20-32), C4 (32-44), C5 (44-56), y C6 ( $> 56$ )



para evaluar cambios temporales; se analizó la relación de la *TST* con controladores ambientales: Temperatura del Aire (TA), NDVI, y emisividad de la superficie ( $\epsilon_s$ ). Los resultados indican que durante los meses más fríos más del 80% tuvo temperaturas  $\leq 20^\circ\text{C}$ , mientras que para los meses más cálidos  $>60\%$  tuvo temperaturas  $>44^\circ\text{C}$ , esto para ambos años; 2017 fue un poco más cálido que 2021. En este estudio se observó una fuerte correlación de *TST* con los controladores ambientales analizados, destacando  $\epsilon_s$  con coeficientes de Pearson ( $R^2$ ) mayores a 0.95 en todas las fechas; se concluye que estos controladores predicen eficientemente *TST*.

**Palabras clave:** *TST*; NDVI; LANDSAT; emisividad; zonas áridas

**ABSTRACT.** – The land surface temperature (*LST*) has easily exceeded records from at least three previous decades; The heat island approach applied to natural environments has increased interest to detect thermal stress conditions. The objectives of this research were: 1) evaluate the behavior of the spatial distribution of the *LST* of the Lagunera Region LR) for 2017 and 2021 based on LANDSAT; 2) analyze the relationship between *LST* with data from conventional meteorological stations (CMS), as well as with the temporal behavior of vegetation through NDVI, and surface emissivity ( $\epsilon_s$ ). The study unit (SU) included part (41.7%) of the LR to facilitate the use of LANDSAT scenes (30/42), for coupling with other cartographic resources (1:250,000); *LST* in  $^\circ\text{C}$  was reclassified into six categories: C1 ( $\leq 8$ ), C2 (8-20), C3 (20-32), C4 (32-44), C5 (44-56), and C6 ( $>56$ ). to evaluate temporal changes; The relationship of the *LST* with environmental drivers was analyzed: Air Temperature (AT), NDVI, and surface emissivity ( $\epsilon_s$ ). The results indicate that during the coldest months more than 80% had temperatures  $\leq 20^\circ\text{C}$ , while for the warmest months  $>60\%$  had temperatures  $>44^\circ\text{C}$ , this for both years; 2017 was a little warmer than 2021. In this study, a strong correlation of *LST* with the environmental drivers analyzed was observed, highlighting  $\epsilon_s$  with Pearson coefficients ( $R^2$ ) greater than 0.95 on all dates; it is concluded that these drivers efficiently predict *LST*.

**Keywords:** *TST*; NDVI; LANDSAT; emissivity; arid land

## Highlights

- Se evaluó el comportamiento de la Temperatura de la Superficie Terrestre (*TST*) de la Región Lagunera (RL) para el 2017 y 2021.
- Se analizó la relación de *TST* con la Temperatura del Aire (*TA*), el NDVI y la Emisividad de la Superficie ( $\epsilon_s$ ).
- Los rangos de *TST* dominantes en la UE fueron de 44-56°C y  $\geq 56^\circ\text{C}$  para ambos años.
- Los meses más secos de 2017 y 2021 tuvieron una superficie de Suelo Desnudo (SD) de 46 y 65%, respectivamente.
- Los controladores ambientales analizados pueden ser utilizados para determinar la *TST* a nivel regional.

## 1. Introducción

La temperatura de la superficie terrestre (*TST*) es un indicador muy importante en la evaluación de cambios ecosistémicos (Wan et al., 2020); los componentes orgánicos e inorgánicos del ecosistema al emitir y remitir energía pueden revelar diferentes estados de estabilidad molecular (Hamlyn, 2014); la incidencia radiativa intensa puede provocar estrés térmico en grados superiores a su rango de adaptación; por ejemplo los rangos de adaptación en fase de crecimiento para maíz y frijol son de 20 a 32°C (Ruiz-Corral et al., 2002), y de 2 a 27°C (Marin-Tinoco et al., 2023), respectivamente.

En años recientes a nivel global las temperaturas han superado máximas históricas; por ejemplo, para 2023 la temperatura fue 1.36°C más alta que el promedio preindustrial de 1850-1900 (NASA, 2023; National Geographic, 2023), además, los meses de junio a diciembre batieron los récords de temperaturas máximas (OMM, 2024). De acuerdo con la OMM (2020), el 20 de junio del 2020,

la ciudad rusa de Verkhoyansk ubicada a 115 km del círculo polar ártico presentó un récord al alcanzar 38°C.

El enfoque de Islas de Calor (IC), tradicionalmente utilizado en entornos urbanos con fines de salud pública, puede emplearse de modo análogo a áreas no urbanizadas (Aragoneses de la Rubia, 2020; Scholes, 2020; Araiza-Olivares, 2022; Lovriha, 2022; Ramakreshnan y Aghamohammadi, 2024; Žgela et al., 2024); por ejemplo, Žgela et al. (2024) señalan que la zonificación climática local, bajo el enfoque de las islas de calor, es factible mediante la adecuada utilización de recursos de teledetección.

En el norte árido de México, donde reside el 24.94% de la población nacional, las ondas de calor tienden a ser aún más críticas, especialmente durante los meses más cálidos del año (INEGI, 2020; CNA-SMN, 2024). La zonificación basada en el enfoque de las IC presenta un enorme potencial en la implementación de medidas de mitigación y adaptación frente a riesgos por estrés térmico (Lovriha, 2022).

La *TST* derivada de escaneos mediante sensores hiperespectrales como los de LANDSAT (USGS, 2018), puede emplearse para detectar áreas estresadas por factores ambientales extrínsecos (Akinbobola, 2019; Tulandi y Aloanis, 2021). La escasez de vegetación o su estado senescente en un área puede expresarse en una alta *TST* (Bindajam et al., 2020), pero en algunos casos puede estar más influenciada por la precipitación, radiación solar, velocidad del viento y las características del suelo (Twumasi et al., 2021).

No obstante, la existencia del Sistema de Alerta Temprana, creado originalmente para la prevención de incendios forestales, basada en puntos de calor derivados de MODIS- MODIS-VIIRS, son empleados para crear mapas de riesgo (CONABIO, 2024). Los estudios que emplean puntos de calor ('hot spots'), o la *TST*, en México son limitados y suelen enfocarse más a áreas urbanas (López et al., 2021; López et al., 2021; Barrera et al., 2023; Álvarez-Hernández et al., 2023).

Por ejemplo, estudios como el de Flores-de la O et al. (2018), realizado en los Juegos Mecánicos de un parque con vegetación frondosa en Torreón, Coahuila, México, revelaron que la temperatura en esa área era 12.5°C más alta que en el resto del parque; López et al. (2021), en Hermosillo, Sonora, México, analizaron la relación negativa entre la *TST* y la cobertura vegetal, sugiriendo que un aumento del 10% en la cobertura vegetal podría disminuir la *TST* en 1.1°C.

El análisis de las causas y características de la distribución espacial de la *TST* debe realizarse en diferentes períodos de tiempo (Zhang et al., 2024) para identificar variables que se relacionen consistentemente con la *TST*. La temperatura del aire (TA) medida por Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC), por ejemplo, puede no tener una correlación estable. Es crucial considerar la cobertura del suelo para obtener datos más precisos (Chen et al., 2011), así como otros factores socioeconómicos y ambientales (Zhang et al., 2024).

Con base en lo anterior, los objetivos de esta investigación son: 1) evaluar el comportamiento de la distribución espacial de la *TST* de la RL para 2017 y 2021 basado en LANDSAT; y 2) analizar la relación entre la *TST* con datos de EMC, así como con el comportamiento temporal de la vegetación mediante el NDVI, y la emisividad de la superficie ( $\epsilon_s$ ). Ambos objetivos se plantean bajo la premisa de que la *TST* presenta una correlación adecuada con controladores ambientales como el NDVI, la emisividad y la TA en más del 50% de los meses analizados.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Región de interés y delimitación de la unidad de estudio**

La Unidad de Estudio (UE) comprendió una porción equivalente al 42.6% de la superficie total (41,290.41 km<sup>2</sup>) de la Región Lagunera (RL); se ubica a 1,139 msnm en el centro norte de México (102.366°-104.783°W y 24.366°-26.383°N); la RL consta de cinco municipios del Estado de Coahuila y diez del Estado de Durango (INEGI, 2018) (Figura 1a).

La UE se definió a partir del Sistema de Referencia Mundial (WRS, por sus siglas en inglés) de LANDSAT; se realizó un ajuste cuadrangular del territorio de la RL y la cobertura de la escena diurna (WRS2, 'descending'), quedando en los vértices extremos superior (104.2829°W y 26.5649°N) e inferior (102.9269°W, y 25.4189°N); la escena empleada se identifica como WRS2 Path:30/Row:42 (Figura 1a).

La UE cubrió 80% (12/15) de los municipios que integran la RL, cuyos nombres y claves (municipales) son por Coahuila: Francisco I. Madero (009), San Pedro (033), Matamoros (017), Viesca (036), y Torreón (035); en tanto que por Durango: Lerdo (012), Nazas (015), San Luis del Cordero (029), San Pedro del Gallo (030), Mapimí (013), Gómez Palacio (007) y Tlahualilo (036).

## **2.2 Breve descripción de los componentes que determinan la TST**

**2.2.1 Clima.-** predomina el grupo de clima seco (B), que es muy árido, semicálido, con rango de temperatura media anual de 18-22°C; por orden de importancia se identificaron tres subgrupos: 1) BWhw (80.4%), BSokw (12.43%), BSohw (4.66%) y BS<sub>1</sub>kw (2.54%) (INEGI, 2008) (Figura 1b).

**2.2.2 Grupos de suelo principales (GSP), uso y cubiertas.** – en la RL se identificaron 14 GSP ubicados en la capa superior del suelo (Figura 1c), de los cuales, 13 están asociados a la UE; en una extensión aproximada de 16,716 km<sup>2</sup>; se detectó predominio de Calcisol (CL) (35.3%), Leptosol (LP) (21.1%) y Regosol (RG) (15.8%) (Figura 1c). También se tienen otros GSP como: Luvisol, LV (5.9%), Phaeozem, PH (4.7%), Vertisol, VR (4.1%), Cambisol, CM (4%), Solonchak, SC (3.8%), Solonetz, SN (2.3%), Gypsisol, GY (1.1%), Fluvisol, FL (0.4%), Kastanozem, KS (0.4%) y Chernozem, CH (0.1%) (INEGI, 2007). Respecto al uso y cubiertas del suelo (Figura 1d), predomina el matorral xerófilo (56.4%), la vegetación inducida (17.4%) y la agricultura de riego (16.7%). También se presenta(n) pastizal (4.3%), asentamientos humanos (2.2%), agricultura de secano (1.6%), suelo desnudo (0.8%), cuerpos de agua (0.12%), selva caducifolia (0.02%) y bosque de coníferas (0.01%) (INEGI, 2018).

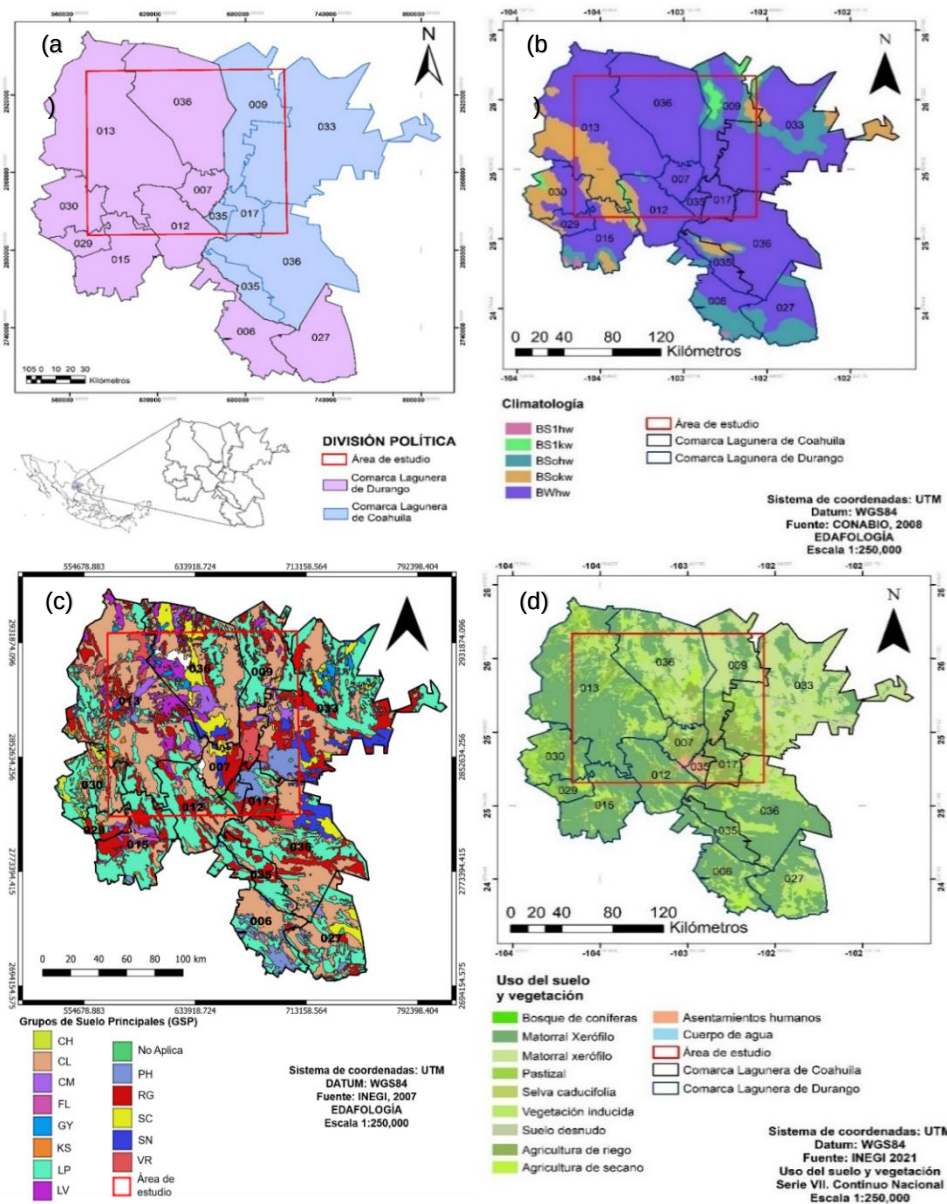


FIGURA 1. Caracterización de la UE. a) límites y ubicación de la UE, b) climas predominantes, c) GSP, d) Vegetación y uso de suelo.

## 2.3 Fases de la investigación y administración de procesos

La investigación constó de dos fases: Preproceso y Postproceso. La primera implicó la búsqueda y preparación de insumos básicos y complementarios para establecer los alcances geográficos y su aplicación en la

UE, cuyas fuentes principales fueron el INEGI (2018), y el USGS (2023), de donde se realizaron descargas como se indica en la Figura 2.

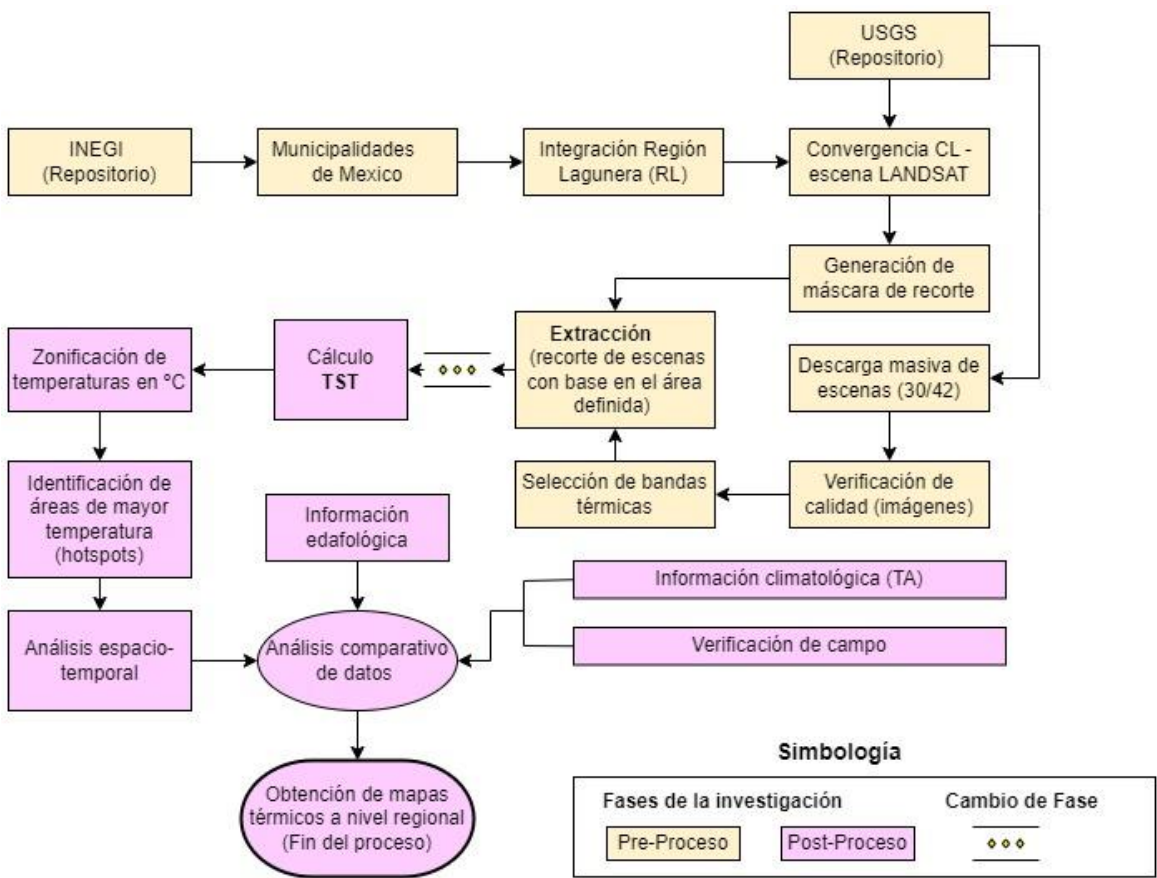


FIGURA 2. Fases de la investigación y administración de procesos para obtener mapas térmicos a nivel regional.

### 2.3.1 Origen y características de los insumos empleados

Conforme a lo descrito por Wan et al (2020), se integraron los controladores que influyen en la *TST* (Figura 2), como se muestra en al Cuadro 1.

Cuadro 1. Insumos empleados en la evaluación de la temperatura de la superficie terrestre.

| Insumo                                                                                                                      | Descripción y fuente                                                                | Objetivo                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conjuntos vectoriales, <i>shp</i></b>                                                                                    |                                                                                     |                                                                         |
| Integración municipal nacional                                                                                              | División política municipal, 2005, esc. 1:250,000 (INEGI, 2018)                     | Extraer municipios que integran la RL                                   |
| Uso de suelo y vegetación (USV)                                                                                             | USV serie VII, esc. 1:250,000 (INEGI, 2018)                                         | Caracterizar distribución espacial de usos de suelo/vegetación de la RL |
| Edafología                                                                                                                  | Conjunto vectorial edafológico. Esc. 1:250,000. Serie II. (INEGI, 2007)             | Identificar extensión y límites espaciales de los GSP de la RL          |
|                                                                                                                             | Perfiles edafológicos, serie II, esc. 1:250,000 (INEGI, 2013)                       | Describir propiedades de la capa $\leq 10$ cm                           |
| Climatología                                                                                                                | Tipos de climas de México, reclasificado por García, esc. 1:1,000,000 (INEGI, 2008) | Distinguir grupo y subgrupo climáticos de la RL                         |
| <b>Conjuntos de bandas en formato ráster de LANDSAT</b>                                                                     |                                                                                     |                                                                         |
| Bandas TIRS2                                                                                                                | Bandas IR, nivel 1 (L1), colección (C2) de LANDSAT 8-9 (2022 y 2023)                | Determinar temperatura de la superficie del suelo de la UE              |
| Bandas OLI2                                                                                                                 | Bandas 4-5                                                                          | Analizar la cobertura del suelo de la UE                                |
| TIRS2= Thermal Infrared Sensor 2; OLI2= Operational Land Imager; GSP = Grupos de Suelo Principales; IR = Infrarrojo térmico |                                                                                     |                                                                         |

### 2.3.2 Seguimiento y descarga de conjuntos LANDSAT

El análisis y seguimiento de la *TST* y su relación con el NDVI, apoyado en los conjuntos LANDSAT comprendió los años 2017 y 2021; la selección y descarga de insumos (Figura 2) se realizó basado en: a) escenas diurnas WRS2; 2) nubosidad  $\leq 15\%$ ; y 3) alta calidad geométrica y radiométrica; se identificaron y descargaron nueve colecciones LANDSAT; los meses de marzo, agosto y diciembre fueron excluidos por no cumplir los requisitos de calidad como se muestra en la Cuadro 2.

Cuadro 2 Nomenclatura de colecciones (NC) LANDSAT descargadas por año de estudio

| Mes | NC-LANSAT-2017 | NC-LANSAT-2021 |
|-----|----------------|----------------|
|-----|----------------|----------------|



|     |                                                 |                                                 |
|-----|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Ene | LC08_L2SP_030042_20170119_20200905_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20210114_20210308_02_T1_ST_B10 |
| Feb | LC08_L2SP_030042_20170119_20200905_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20210215_20210301_02_T1_ST_B10 |
| Abr | LC08_L2SP_030042_20170409_20200904_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20210420_20210430_02_T1_ST_B10 |
| May | LC08_L2SP_030042_20170511_20201016_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20210522_20210529_02_T1_ST_B10 |
| Jun | LC08_L2SP_030042_20170628_20200903_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20210607_20210615_02_T1_ST_B10 |
| Jul | LC08_L2SP_030042_20170730_20200903_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20210725_20210803_02_T1_ST_B10 |
| Sep | LC08_L2SP_030042_20170916_20200903_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20210911_20210916_02_T1_ST_B10 |
| Oct | LC08_L2SP_030042_20171103_20200902_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20211029_20211109_02_T1_ST_B10 |
| Nov | LC08_L2SP_030042_20171119_20200902_02_T1_ST_B10 | LC08_L2SP_030042_20211114_20211125_02_T1_ST_B10 |

### 2.3.3 Cálculo de la TST y su distribución espacial

Las bandas térmicas LANDSAT, fueron empleadas para calcular la distribución espacial de la temperatura (Figura 2) mediante (Ecuación 1):

$$TST = [(Qcal \times VCa) + VCo] - 273.15 \quad (1)$$

Dónde:  $Qcal$ , son valores digitales (DN) contenidos en la imagen raster;  $VCo$  y  $VCa$ , son constantes obtenidas de los metadatos (\*MTL.txt), el primero (0.00341802) usado para calibrar los DN, y el segundo (149.0) es un valor para transformar a grados kelvin (°K);  $273.15$  = constante de conversión de °K a °C.

La distribución espacial de  $TST$  fue determinada mediante seis clases consideradas como rangos críticos de cambios de temperatura (Cuadro 3).

Cuadro 3. Categorías, rangos de temperatura y óptimos para diferentes organismos

| Clase | Rango | Óptimo por categoría                                         | Referencia                                           |
|-------|-------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| C1    | ≤8    | <i>Polaromonas vacuolata</i> , <i>Methanogenium frigidum</i> | Belmar y Alfonso, 2018.                              |
| C2    | 8-20  | <i>Fragaria vesca</i>                                        | SIAP, 2010; Chaves-Barrantes y Gutiérrez-Soto, 2017. |
| C3    | 20-32 | <i>Fragaria ananassa</i> Duch                                | Tang et al., 2020, Samad et al., 2021.               |

|    |       |                                                                                                                                                                                         |                                              |
|----|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|    |       | <i>Oryza sativa</i> L.                                                                                                                                                                  | Jagadish et al., 2007; Nagai y Makino, 2009. |
|    |       | <i>Zea mays</i> L.                                                                                                                                                                      | Wahid et al., 2007                           |
|    |       | <i>Musa spp.</i>                                                                                                                                                                        | Sabitti et al., 2018.                        |
| C4 | 32-44 | Bacterias de la familia <i>Clostridiaceae</i> , <i>Pseudomonaceae</i> , <i>Staphylococcaceae</i> .<br>Hongos de los géneros <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Fusarium</i> . | Laich, 2011.                                 |
| C5 | 44-56 | Bacterias del género <i>Bacillus</i> y hongos <i>Actinomicetes</i>                                                                                                                      | Laich, 2011.                                 |
| C6 | >56   | Bacterias del género <i>Thermus</i> , <i>Hydrogenobacter</i> .                                                                                                                          | Laich, 2011.                                 |

---

### 2.3.4 Zonificación de temperaturas

Se implementó un análisis geoestadístico de las imágenes (*TST*) en Qgis por mes para 2017 y 2021; del análisis de frecuencias se obtuvieron: temperatura media (*Tmed*) y máxima (*Tmax*). La zonificación de temperaturas mensuales se realizó agregando 5°C para cada una de las seis clases definidas previamente (Cuadro 3); la zonificación de *TST* fue por segmentación de imágenes mediante la calculadora ráster con base en el siguiente algoritmo (Ecuación 2):

$$TSTzi = (TST > Tmed + 5)AND(TST < Tmax) \quad (2)$$

Dónde: *TSTzi* es la *TST* mensual *z*, para el *i* ésimo mes (°C); *Tmed* y *Tmax* respectivamente corresponden a las temperaturas media y máxima obtenidas del análisis de frecuencias.

### 2.3.5 Zonificación y verificación de campo

Las seis categorías de *TST* segmentadas permitieron determinar la extensión y ubicación de las zonas con registros de temperatura más cálidas (Figura 2), como fueron los casos C5(44-56°C) y C6(>56°C); sobre ambas zonas se eligieron

cuatro sitios al azar cuyas temperaturas fueron persistentemente más cálidas para los meses estudiados (Figura 3).

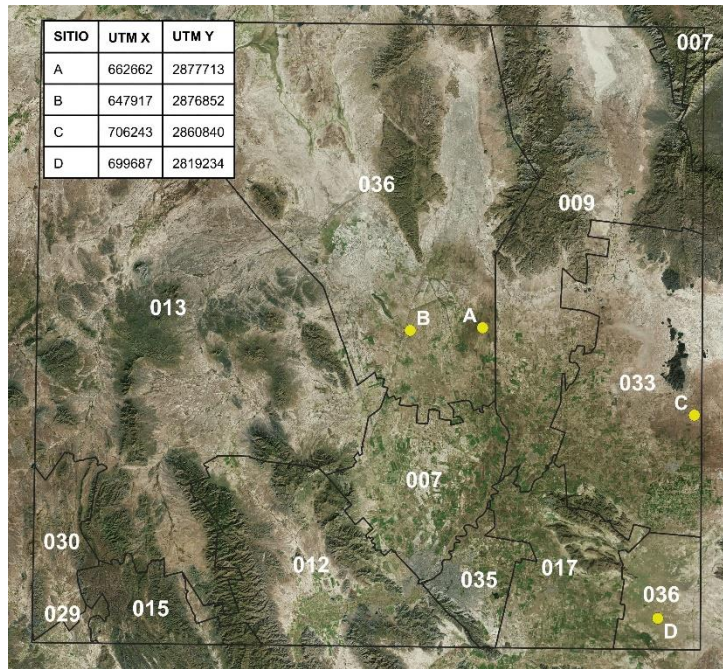


FIGURA 3. Sitios (Centroides-UTM) de verificación de campo (amarillo): A, B, C y D elegidos por presentar los meses más calientes. Claves municipales (blanco). El marco exterior (negro) indica los límites de la UE.

En cada uno de los sitios definidos (A-D) se realizó un recorrido de campo que consistió en la verificación (Figura 3) de seis factores que genéricamente influyen en la *TST* (formulario en Apéndice 1) como son: 1) tipo de vegetación, 2) densidad relativa de la vegetación, 3) fase física de la capa superior del suelo, 4) color del suelo, 5) uso del suelo, y 6) humedad superficial. Se tomaron fotografías alrededor del punto de visita como evidencia gráfica (Apéndice 2)

## 2.4 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI se empleó para conocer el estado de la vegetación, de manera que para las mismas fechas calculadas de *TST* se emplearon las bandas 4 (Rojo) y 5 (Infrarrojo Cercano), como se indica a continuación (Ecuación 3):

$$NDVI = (b5 - b4) / (b5 + b4) \quad (3)$$

La *TST* se relacionó espacialmente con las características de los índices NDVI obtenidos conforme a la clasificación propuesta por López-Pérez, Martínez-Menes y Fernández-Reynoso (2015) (Cuadro 4).

Cuadro 4 Rangos NDVI, clave y descripción

| Rango NDVI | Clave | Descripción                                |
|------------|-------|--------------------------------------------|
| <0.01      | NA    | Nubes, agua u otros elementos no vegetales |
| 0.01-0.1   | SD    | Suelo desnudo                              |
| 0.1-0.2    | EV    | Zonas con escasa cobertura vegetal         |
| 0.2-0.4    | MV    | Zonas con mediana cobertura vegetal        |
| >0.4       | AV    | Zonas con alta cobertura vegetal           |

## 2.5 Información edafológica

La información de campo fue contrastada con los datos de la capa superior del suelo de estratos 10-15 cm de profundidad, extraídos de los perfiles edafológicos de INEGI (2013) como son: textura, color y tono, materia orgánica, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, y conductividad eléctrica, entre otros.

## 2.6 Análisis estadísticos

Además de la verificación de campo ya mencionada (2.3.5), en Qgis se empleó la herramienta *puntos aleatorios en la extensión* para generar una capa vectorial de 500 puntos aleatorios dentro de la UE; dichos puntos fueron empleados como

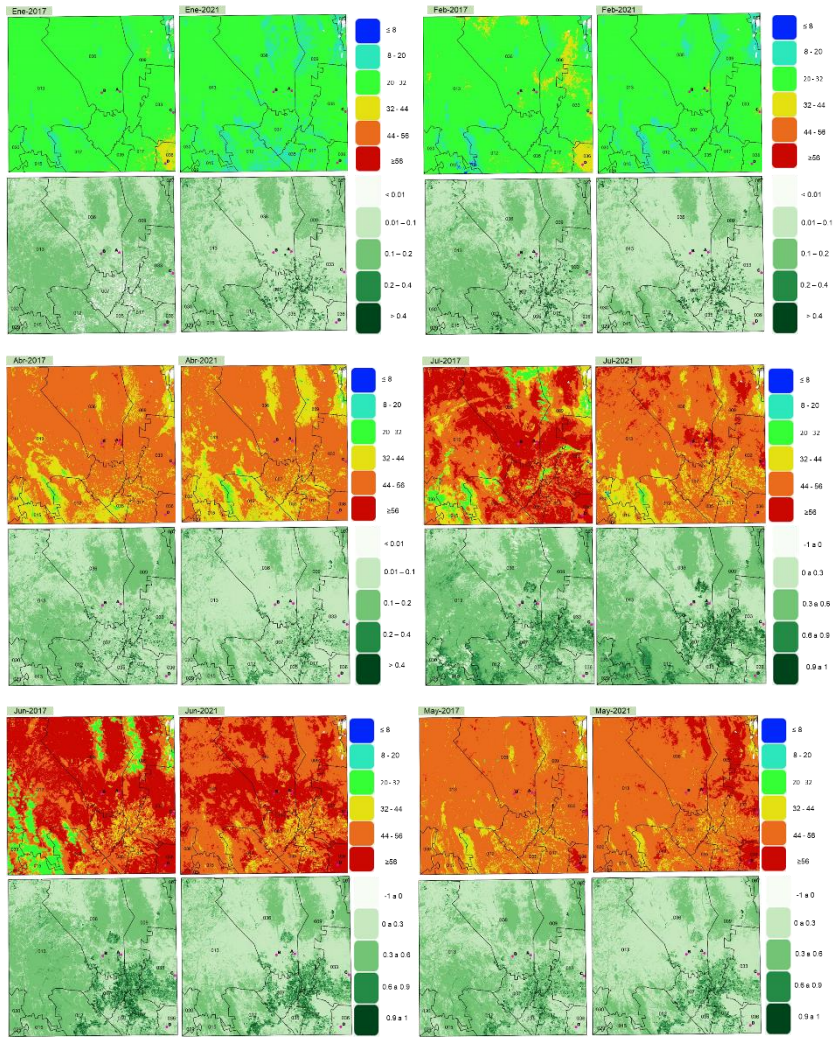
sitios de muestreo sobre las imágenes  $TST$ ,  $\varepsilon_s$  y NDVI de las 9 escenas ráster analizadas; se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson ( $R^2$ ) y el error típico mediante un análisis estadístico en el programa Excel 2016 (Office), usando  $TST$  como variable independiente.

Para relacionar la TA y  $TST$ , se obtuvo el coeficiente de correlación con datos de las Temperaturas Máximas Extremas Mensuales (TMEM) de 10 EMC localizadas en la UE obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y se contrastaron con las temperaturas máximas de cada escena analizada.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Escenas térmicas**

De acuerdo con los cinco rangos de  $TST$  establecidos (Cuadro 3) se encontró que las clases de mayor predominio fueron C3(20-32°C), C4(32-44°C), y C5(44-56°C); además, en junio y julio del año 2017, se tuvo una mayor superficie con temperaturas >56°C. La  $TST$  más elevada y que se mantuvo constante durante los 9 meses, se localizó en los municipios 036 (de ambos años), 033, 017 y 009, ubicados al este de la UE. Mientras que la mayor superficie con temperaturas altas fue en el año 2017, en junio y julio (Figura 4).





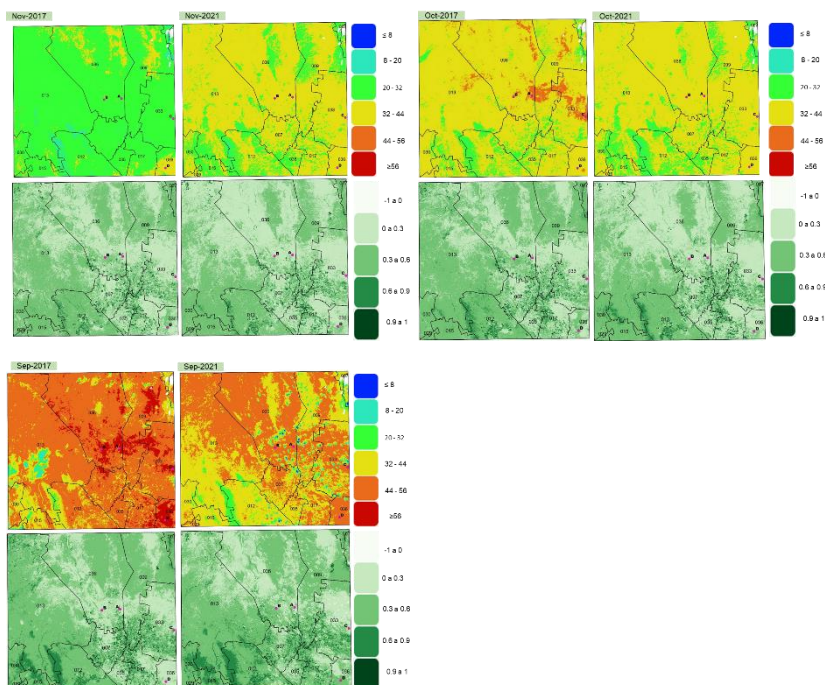


FIGURA 4. Distribución de la TST (arriba) y NDVI (abajo), durante nueve meses del año 2017 (izquierda) y 2021 (derecha).

Históricamente, los meses más calientes corresponden a Mayo y Junio con temperaturas que rondan los 40°C (Figura 5b,5d); la *TST* calculada mostró que los rangos de temperatura para las clases C5(44-56°C) y C6( $\geq 56^\circ\text{C}$ ) tuvieron los mayores efectos sobre el territorio en ambos años; en 2017 para los meses de Junio y Julio la C6 afectó entre el 40-50% de la UE; en 2021, la C5 se asoció a los meses de Abril y Mayo, cuando la temperatura máxima apenas alcanzó los 35°C (Figura 5d) la *TST* en Mayo afectó casi el 80% del territorio de la UE (Ver Apéndice 3) (Figura 5).

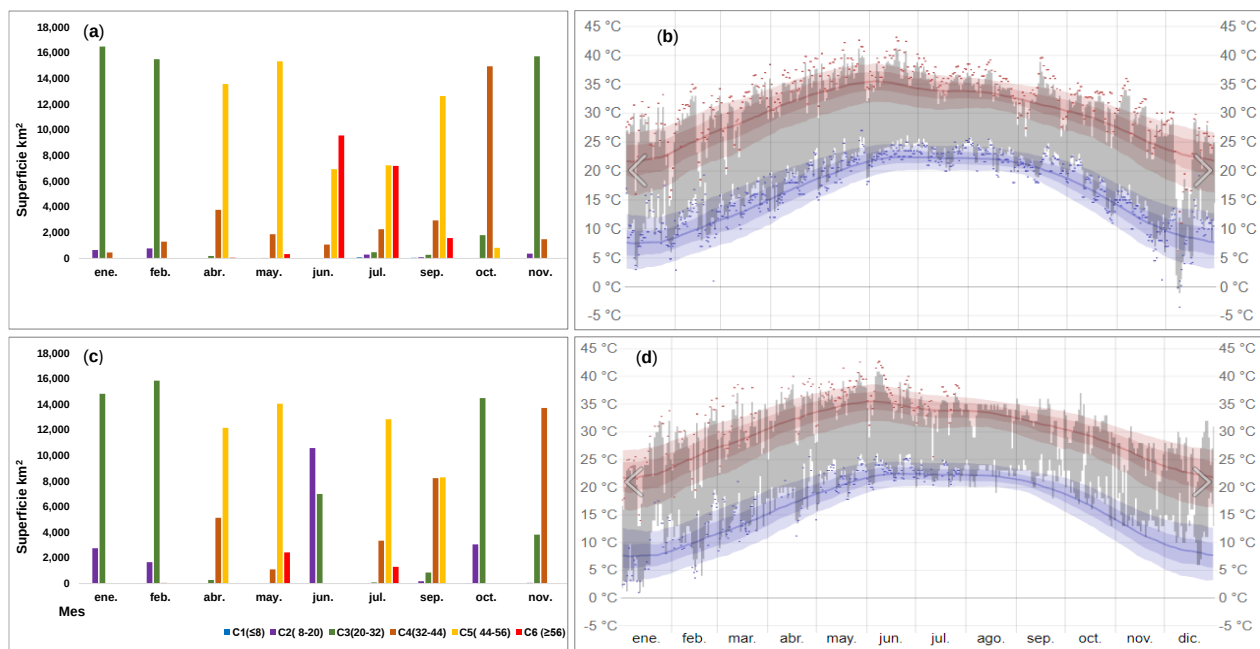


FIGURA 5. TST calculada de nueve meses en los dos años estudiados y datos históricos diarios de temperatura para 2017 (a,b) y 2021 (c,d). En las figuras b y d las temperaturas máximas y mínimas se indican con líneas roja y azul, respectivamente (Fuente: Weather-Spark, 2024).

### 3.2 Datos de verificación en campo

La información recabada en campo para los cuatro sitios elegidos se integró en cinco componentes como se muestra a continuación (Cuadro 5).

Cuadro 5. Características de los sitios de verificación

| Componente                   | Sitio | Descripción                                     |
|------------------------------|-------|-------------------------------------------------|
| Localidad más cercana        | A     | El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango     |
|                              | B     | Ejido Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango |
|                              | C     | San Pedro de las Colonias, Coahuila             |
|                              | D     | Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila               |
| Tipo de Vegetación/ densidad | A     | Matorral xerófilo/poco denso                    |
|                              | B     | Matorral xerófilo/medianamente denso            |
|                              | C     | Matorral xerófilo/muy poco denso                |



|               |   |                                                                    |
|---------------|---|--------------------------------------------------------------------|
| Suelo         | D | Matorral xerófilo/poco denso                                       |
|               | A | Arcilloso, compacto, color claro                                   |
|               | B | Arcilloso, compacto, color claro                                   |
|               | C | Arcilloso, muy suelto, grisáceo                                    |
| Uso del suelo | D | Arenoso, compacto, color claro                                     |
|               | A | Granjas de pollo, establos y cultivo de maíz, caminos y carretera  |
|               | B | Camino y canal de riego                                            |
|               | C | Carretera                                                          |
| Descripción   | D | Carretera                                                          |
|               | A | Áreas con suelo completamente desnudo                              |
|               | B | Camino al lado del canal con costras de sales y vegetación natural |
|               | C | Áreas con suelo completamente desnudo                              |
|               | D | Vegetación natural                                                 |

---

Fuente: Elaboración propia con información recabada en campo.

### 3.3 Propiedades edáficas de los sitios

Cuadro 6. Descripción de propiedades edáficas de sitios más calientes

| Sitio                    | A           | B                    | C               | D                    |
|--------------------------|-------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| GSP                      | LP          | CL                   | SN              | CL                   |
| Espesor (cm)             | 7           | 15                   | 11              | 15                   |
| % Arena                  | 44          | 44                   | 78              | 22                   |
| % Limo                   | 39          | 30                   | 6               | 26                   |
| % Arcilla                | 17          | 26                   | 16              | 52                   |
| Textura                  | F           | F                    | FA              | FR                   |
| Da (g ml <sup>-1</sup> ) | 1.3-1.5     | 1.3-1.5              | 1.4-1.6         | 1.2-1.3              |
| CC (%)                   | 21.2        | 24.4                 | 13.1            | 38.7                 |
| PMP (%)                  | 14.4        | 18.5                 | 9.9             | 32.8                 |
| HA (%)                   | 6.8         | 5.9                  | 3.2             | 5.9                  |
| C. Color                 | 10YR5/3     | 10YR4/2              | 10YR3/1         | 10YR4/2              |
| Tono                     | Café oscuro | Café grisáceo oscuro | Café muy oscuro | Café grisáceo oscuro |

|             |       |      |      |       |
|-------------|-------|------|------|-------|
| CE          | 0.1   | 2    | 2    | 2     |
| MO (%)      | 1.72  | 0.69 | 0.34 | 1.03  |
| D: S-C (km) | 16.36 | 5.42 | 0.65 | 16.15 |

---

GSP=Grupos de Suelos Principales; LP=Leptosol; CL=Calcisol;  
 SN=Solonetz; A=Arena; L=Limo; R=Arcilla; Da=Densidad aparente;  
 CC=Capacidad de campo; PMP=Punto de marchitez permanente;  
 HA.=Humedad aprovechable; C. Color=Clave de Color;  
 CE=Conductividad Eléctrica; MO=Materia Orgánica; D:S-C=Distancia  
 Sitio-Calicata

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2013.

Al contrastar la información de los cuatro sitios verificados en campo con datos de los perfiles edafológicos antes descritos (Cuadro 6) se identificaron tres GSP: Leptosoles, Calcisoles y Solonets.

### 3.4 Distribución especial e importancia relativa del NDVI

De acuerdo con los valores de NDVI, la mayor parte del territorio de la UE para ambos años presenta dos condiciones predominantes: suelo desnudo [SD(0.01-0.1) y escasa vegetación [EV(0.1-0.2)], cuyos promedios anuales de la superficie total que se ubican en rangos equivalentes de 40-55% y 39-55%, respectivamente; además, se distingue que las áreas con mediana vegetación [MV(0.2-0.4)] y alta cobertura vegetal [AV(>0.4)] oscilan entre el 5 y el 6%. Además, se encontró que para los meses más secos (noviembre-mayo) la condición de suelo desnudo en 2017 y 2021 respecto a la superficie total fue equivalente al 46 y 65%, respectivamente (Ver Apéndice 4) (Figura 6).

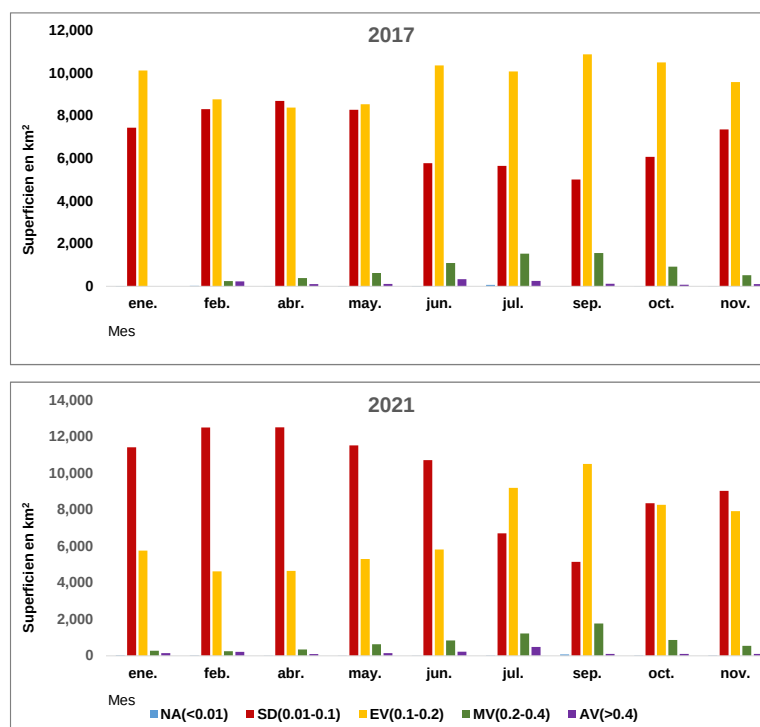


FIGURA 6. Cambios mensuales en los dos años de estudio en términos de superficie para cinco clases NDVI definidas.

### 3.5 Relación *TST* Vs *TA*

Del análisis de correlación entre *TST* y *TA* se encontró que en el 95% de los datos de las EMC presentaron por encima del 70% (0.7); únicamente la EMC No. 5139 para 2017 el índice de correlación fue de 0.589, pero en 2021 su valor se incrementó a 0.927; los mejores coeficientes de correlación por encima de 0.9, se tienen en las EMC ubicadas al Este de la Unidad de Estudio: Zapata, Francisco I. Madero y Tlahualilo (Cuadro 7). Estos datos indican que ambas variables están relacionadas linealmente.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de *TA* y *TST* estimada

| Clave EMC | Nombre EMC      | Coef. Corr. (2017) | Coef. Corr. (2021) |
|-----------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 5053      | Matamoros       | 0.864              | 0.830              |
| 5036      | San Pedro       | 0.820              | 0.874              |
| 5139      | Emiliano Zapata | 0.589              | 0.927              |
| 5159      | Acatita         | 0.940              | 0.856              |

|       |                 |       |       |
|-------|-----------------|-------|-------|
| 5180  | Fco. I. Madero  | 0.835 | 0.909 |
| 10045 | Mapimí          | 0.840 | 0.844 |
| 10085 | Tlahualilo      | 0.860 | 0.931 |
| 10108 | Cd. Lerdo (DGE) | 0.874 | 0.813 |
| 10168 | Cartagena       | 0.872 | 0.759 |
| 10169 | CBTA Gómez P.   | 0.774 | 0.838 |

Entre la  $TST$  y la  $\varepsilon_s$  del análisis de regresión los resultados indican un buen índice de  $R^2$ , durante todos los meses, ya que se obtuvieron valores cercanos a 1; lo cual indica que la modelación lineal es fiable para realizar predicciones futuras en cualquier temporada. En el caso de NDVI, los valores de  $R^2$  fueron menores comparados con los de  $\varepsilon_s$ , aunque también se observó que dicho indicador mejoró ligeramente en ambos años para los meses más fríos: Octubre y Noviembre (Cuadro 8).

Cuadro 8. Resultados de regresión con  $TST$  como variable X

| Año  | Mes | --- NDVI --- |              | --- $\varepsilon_s$ --- |              |
|------|-----|--------------|--------------|-------------------------|--------------|
|      |     | $R^2$        | Error típico | $R^2$                   | Error típico |
| 2017 | Ene | 0.774        | 0.059        | 0.985                   | 0.108        |
|      | Feb | 0.745        | 0.062        | 0.981                   | 0.124        |
|      | Abr | 0.822        | 0.048        | 0.986                   | 0.105        |
|      | May | 0.775        | 0.057        | 0.990                   | 0.086        |
|      | Jun | 0.756        | 0.066        | 0.977                   | 0.138        |
|      | Jul | 0.738        | 0.073        | 0.963                   | 0.180        |
|      | Sep | 0.761        | 0.070        | 0.980                   | 0.128        |
|      | Oct | 0.807        | 0.056        | 0.985                   | 0.110        |
|      | Nov | 0.843        | 0.046        | 0.986                   | 0.105        |
| 2021 | Ene | 0.791        | 0.048        | 0.981                   | 0.124        |
|      | Feb | 0.725        | 0.056        | 0.976                   | 0.142        |
|      | Abr | 0.777        | 0.050        | 0.988                   | 0.097        |

|     |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| May | 0.736 | 0.059 | 0.990 | 0.086 |
| Jun | 0.737 | 0.061 | 0.991 | 0.082 |
| Jul | 0.657 | 0.089 | 0.983 | 0.120 |
| Sep | 0.780 | 0.066 | 0.979 | 0.132 |
| Oct | 0.779 | 0.059 | 0.988 | 0.098 |
| Nov | 0.785 | 0.055 | 0.989 | 0.093 |

---

#### 4. DISCUSIÓN

Es común que en las zonas áridas las temperaturas sean muy elevadas debido a sus condiciones ambientales como la escasez de agua, alta radiación solar y poca cobertura vegetal (Aboelnour y Engel, 2018; Gohain, Mohammad y Goswami, 2021; Tariq et al., 2020).

Otros factores que pueden influir en la alta temperatura es el uso de la tierra: si se trata de tierras agrícolas, tierras no cultivables, de uso ganadero o áreas urbanas, siendo la actividad antropogénica la principal causa de las elevadas temperaturas (Gohain, Mohammad y Goswami, 2021; Guha y Govil, 2021; Guha, Govil, Dey, et al., 2018; Tariq et al., 2020, Zhao et al., 2020).

Los LP son suelos muy delgados particularmente y pedregosos con un alto contenido de carbonatos de calcio, son susceptibles a erosión, la vegetación que más se desarrolla en este tipo de suelos es el matorral desértico rosetófilo, En cuanto a los CL, son suelos con alto contenido de carbonatos de calcio (>15%) en su capa superficial, la cual puede estar cementada. Se encuentran principalmente en zonas áridas al norte del país. Y SN tiene pH muy elevado y las capas del subsuelo comúnmente se encuentran endurecidas, este tipo de suelos se localizan en lugares con clima seco caluroso con altas concentraciones de sodio (INEGI, 2015).

Un estudio realizado en zonas semiáridas por Bindajam et al.(2020) reveló que la *TST* más elevada se presentó en las áreas rocosas y en las edificaciones. Sin embargo, datos obtenidos por Singh, Prakash y Kushwaha (2023), mostraron que

existe una correlación de 0.12 entre la *TST* y los carbonatos como el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Al tratarse de suelos claros, se refleja la mayor cantidad de radiación, la cual es percibida por los sensores del satélite, lo que registra altas temperaturas. Además, el alto contenido de arcillas influye en el calor específico de los suelos al haber menos poros y por tanto menor circulación de agua y aire (Rucks et al., 2004).

Iqbal y Alí (2022), realizaron un estudio en que se evaluó la relación entre *TST* y *TA* en un ambiente semiárido a árido en el noroeste de Pakistán, y se comprobó que los modelos lineales y cuadráticos son efectivos para estimar la *TA* a partir de la *TST* en invierno y verano con coeficientes de correlación de Pearson de 0.62 y 0.78 para el verano y de 0.59 y 0.78 para el invierno.

Abulibdeh (2021), analizó la relación entre *TST* y *NDVI* en la región árida y semiárida del Golfo Pérsico, donde encontró que los suelos desnudos tenían temperaturas más altas que las áreas urbanas y verdes que fluctuaban entre 1 y 2°C para las primeras y entre 1 y 7°C para las segundas.

## 5. CONCLUSIÓN

En este estudio se utilizaron datos de LANDSAT 8 y 9 y datos de EMC para determinar la distribución espacial y temporal de *TST*, *NDVI*,  $\epsilon_s$  y *TA* de un área de la RL durante 9 meses de los años 2017 y 2021. Según los hallazgos, la *TST* tiene valores por encima de los 20°C. La *TST* más elevada se presentó al este de la UE. Además, la  $\epsilon_s$  y las altas temperaturas de por sí son constantes en esta zona donde las condiciones ambientales son extremas, a su vez, las características de los suelos y la actividad antropogénica contribuyen a su aumento. La correlación entre *TST* y  $\epsilon_s$ , *NDVI* y *TA* fue buena para todos los meses estudiados en ambos años, lo que nos indica que estos controladores pueden ser utilizados para determinar la *TST* a escala regional. Cabe mencionar

que la  $\varepsilon_s$  ejerció una mayor influencia en la TST con una correlación de Pearson de (0.99).

## 6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo-URUZA por la formación y el apoyo proporcionados. Se hace especial mención al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca de maestría (CVU 1183399) otorgada.

## 7. LITERATURA CITADA

- Aboelnour, M., y Engel, B. A. (2018). Application of remote sensing techniques and geographic information systems to analyze land surface temperature in response to land use/land cover change in Greater Cairo Region, Egypt. *Journal of Geographic Information System*, 10(1), 57-88. <https://doi.org/10.4236/igis.2018.101003>
- Abulibdeh, A. (2021). Análisis de las características de las islas de calor urbanas y estrategias de mitigación para ocho ciudades de la región árida y semiárida del golfo. *Ciencias Ambientales de la Tierra*, 80, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09540-7>
- Akinbobola, A. (2019) Simulating Land Cover Changes and Their Impacts on Land Surface Temperature in Onitsha, South East Nigeria. *Atmospheric and Climate Sciences*, 9, 243-263. <http://doi.org/10.4236/acs.2019.92017>
- Álvarez-Hernández, G., Yera-Grillo, D., Robles-Morúa, A., Navarro-Estupiñan, J., Reyes-Castro, P.A., Encinas-Cárdenas, A.A., Duarte-Tagles, H.F., & Candia-Plata, M.D. (2023). Spatial correlation of dengue with socioeconomic status and land temperature in northwest Mexico. *Biotechnia*. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v26i1.2175>
- Aragoneses de la Rubia, E. (2020). Caracterización de la isla de calor urbana en el campus de la UAM por medio de teledetección. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 43–67. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.678>
- Araiza-Olivares, G. A. (2022). La isla de calor en la Ciudad de México: Un análisis decadal (1950-2010). *Revista Geográfica de América Central*, (69), 415-436. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.69/2.15>
- Barrera A., I. G., Caudillo C., C. A., Medina F., S. L., Ávila J., F. G., y Montejano E., J. A. (2023). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura

- urbana de la Ciudad de México. *Revista de ciencias tecnológicas*, 5(3). <https://doi.org/10.37636/recit.v5n3e227>
- Belmar, R., y Alfonso, V. (2018) Microorganismos extremófilos. Psicrófilos y sus mecanismos de adaptación. *Nature*, 409, 1092-1101.
- Bindajam, A. A., Mallick, J., AlQadhi, S., Singh, C. K., y Hang, H. T. (2020). Impacts of vegetation and topography on land surface temperature variability over the semi-arid mountain cities of Saudi Arabia. *Atmosphere*, 11(7), 762. <https://doi.org/10.3390/atmos11070762>
- Chaves-Barrantes, N. F., y Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <http://dx.doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Chen, Y., Yang, K., He, J., Qin, J., Shi, J., Du, J., & He, Q. (2011). Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20). <https://doi.org/10.1029/2011JD015921>
- CNA-SMN (2024). Se pronostican temperaturas máximas superiores a 45 grados Celsius en seis entidades de México. Comunicado de Prensa No. 0332-24. Consultado (15/05/2024) en: <https://smn.conagua.gob.mx/files/pdfs/comunicados-de-prensa/Comunicado0332-24.pdf>
- CONABIO (2024). Sistema de Alerta Temprana de Incendios Forestales (SATIF). Consultado (15/05/2024) en: <http://incendios-beta.conabio.gob.mx/?>
- Flores-De la O., J. L., Villanueva-Solis, J. y Quiroa-Herrera, J. A. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 123-140. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.52-2.7>
- Gohain, K. J., Mohammad, P., y Goswami, A. (2021). Assessing the impact of land use land cover changes on land surface temperature over Pune city, India. *Quaternary International*, 575, 259-269. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.052>
- Guha, S., Govil, H., Dey, A., & Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 667-678. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>
- Hamlyn G., J. (2014). Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology / Hamlyn G. Jones, professor emeritus, Division of Plant Science University of Dundee at the James Hutton Institute, Invergowrie, Dundee, DD2 5DA, UK. – Third edition. ISBN 978-0-521-27959-8
- INEGI (2007b). Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Hidalgo del Parral. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236052>



- INEGI (2007c). Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Juan Aldama. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236014>
- INEGI (2007d). Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Monclova. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236151>
- INEGI (2007e). Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Santiago Papasquiaro. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236083>
- INEGI (2007f). Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Tlahualilo de Zaragoza. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236069>
- INEGI (2007g). Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Torreón. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236090>
- INEGI (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI (2013). Conjunto de datos de Perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional). Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- INEGI (2015). Guía para la interpretación de cartografía: edafología: escala 1:250 000: serie III. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.
- INEGI (2018a). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- INEGI (2018b). División política municipal 1:250000. Aguascalientes, México. Consultado (15/03/2023): [https://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/muni\\_2018gw.html](https://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/muni_2018gw.html)
- INEGI (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#tabulados>
- Iqbal, B. y Ali, M. (2022). Estimación de la temperatura del aire espacio-temporal a partir de LST satelital en un ambiente semiárido a árido en la cuenca de Peshawar, noroeste de Pakistán. *Avances en la investigación espacial*, 70 (4), 961-975. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.052>
- Jagadish, S. K., Craufurd, P. Q., y Wheeler, T. (2007). High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of experimental botany*, 58(7), 1627-1635. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm003>
- Laich, F. (2011). El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje. Instituto Canario de Investigaciones Agrarias. ICIA, 2011, 1-7.

- López González, F. M., Navarro Navarro, L. A., Díaz Caravantes, R. E., y Navarro-Estupiñán, J. (2021). Cobertura vegetal y la distribución de islas de calor/oasis urbanos en Hermosillo, Sonora. *Frontera norte*, 33. <https://doi.org/10.33679/rfn.v1i1.2088>
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 121-137. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222015000100007&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222015000100007&script=sci_arttext)
- Lovriha, I. M. (2022). Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particularidades en zonas desérticas de México. *Vivienda y comunidades sustentables*, (12), 9-25. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.196>
- Marin-Tinoco, R.I., Sanchez-Sanchez, V.E., Barrón-Segovia, I.B., Luis Manuel Valenzuela-Nuñez, L.M., Gutiérrez-Montenegro, et al (2023). Aspectos ambientales vinculados al cultivo de frijol al este de Durango. INVESTIGACIÓN APLICADA, UN ENFOQUE EN LA TECNOLOGÍA, Vol 8(16). <https://doi.org/10.60968/iaet.3594-035X.695>
- Nagai, T., y Makino, A. (2009). Differences between rice and wheat in temperature responses of photosynthesis and plant growth. *Plant and Cell Physiology*, 50(4), 744-755. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp029>
- NASA (2023). *Temperatura global*. <http://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/temperatura-global/?intent=111>
- National Geographic (2023). *La Tierra bate el récord de temperatura media dos días seguidos, y seguirá subiendo*. [http://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/tierra-bate-record-temperaturas-lunes-fue-dia-mas-caluroso-historia\\_20291](http://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/tierra-bate-record-temperaturas-lunes-fue-dia-mas-caluroso-historia_20291)
- Organización Meteorológica Mundial [OMM] (2020). *Notificado un nuevo récord de temperatura de 38 °C al norte del círculo polar ártico*. <https://wmo.int/es/media/notificado-un-nuevo-record-de-temperatura-de-38-degc-al-norte-del-circulo-polar-artico>
- OMM (2024). *La Organización Meteorológica Mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords*. <http://wmo.int/es/news/media-centre/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-en-2023-la-temperatura-mundial-batio-todos-los>
- Ramakreshnan, L. y Aghamohammadi, N. (2024) The Application of Nature-Based Solutions for Urban Heat Island Mitigation in Asia: Progress, Challenges, and Recommendations. *Curr Envir Health Rpt* 11, 4–17 (2024). <http://doi.org/10.1007/s40572-023-00427-2>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., y Hill, M. (2004). Propiedades físicas del suelo. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay.

<https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>  
<https://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>

- Ruiz-Corral, J. A., Flores-López, H. E., Ramírez-Díaz, J. L., y González-Eguiarte, D. R. (2002). Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*, 36(5), 569-577.
- Sabitti, G., Ininda, J. M., Ogallo, L. A., Ouma, J., Artan, G., Basalirwa, C., Opijah, F., Nimusiima, A., Ddumba, S. D., Mwesigwa, J. B., Otieno, G. y Nanteza, J. (2018). Adapting agriculture to climate change: suitability of banana crop production to future climate change over Uganda. *Limits to climate change adaptation*, 175-190. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-64599-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-64599-5_10)
- Samad, S., Butare, D., Marttila, S., Sønsteby, A. y Khalil, S. (2021). Effects of Temperature and Photoperiod on the Flower Potential in Everbearing Strawberry as Evaluated by Meristem Dissection. *Horticulturae*, 7 (11), 484. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110484>
- Scholes, R. J. (2020). The future of semi-arid regions: A weak fabric unravels. *Climate*, 8(3), 43. <https://doi.org/10.3390/cli8030043>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] (2010). Capacitación en línea, EDUSIAP. [http://encuestascontinuas.siap.gob.mx/edu\\_siap/segunda.php?cv\\_cultivo=14000&cv\\_ciclo=1](http://encuestascontinuas.siap.gob.mx/edu_siap/segunda.php?cv_cultivo=14000&cv_ciclo=1)
- Servicio Geológico, USA [USGS] (2018), *colecciones Landsat: Hoja informativa del Servicio Geológico de EE. UU.* 2018–3049, 2 p., <http://doi.org/10.3133/fs20183049>
- Singh, VK, Prakash, R. y Kushwaha, DP (2023). Impacto de la temperatura de la superficie en las propiedades químicas del suelo mediante un enfoque acoplado de imágenes de satélite, pruebas gamma y modelos basados en regresión en zonas semiáridas. En Desarrollo y gestión de recursos de aguas superficiales y subterráneas en la región semiárida: estrategias y soluciones para la gestión sostenible del agua (págs. 337-363). Cham: Editorial Internacional Springer.
- Tang, Y., Ma, X., Li, M. y Wang, Y. (2020). The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse. *Energía Solar*, 195, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.070>
- Tariq, A., Riaz, I., Ahmad, Z., Yang, B., Amin, M., Kausar, R., Andleeb, S., Farooqi, M. A. y Rafiq, M. (2020). Land surface temperature relation with normalized satellite indices for the estimation of spatio-temporal trends in temperature among various land use land cover classes of an arid Potohar region using Landsat data. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8766-2>
- Tulandi, D. A., y Aloanis, A. A. (2021). Dynamics Analysis of Surface Temperature and Vegetation Index in Settlement Area around the Lokon Volcano, Tomohon, North Sulawesi. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9(10), 118-129. [10.4236/gep.2021.910009](https://doi.org/10.4236/gep.2021.910009)

- Twumasi, Y. A., Merem, E. C., Namwamba, J. B., Mwakimi, O. S., Ayala-Silva, T., Frimpong, D. B., Ning, Z. H., Asare-Ansah, A., Annan, J. B., Oppong, J., Loh, P. M., Owusu, F., Jeruto, V., Petja, B. M., Okwemba, R., McClendon-Peralta, J., Akinrinwoye, C. O. y Mosby, H. J. (2021). Estimation of land surface temperature from Landsat-8 OLI thermal infrared satellite data. A comparative analysis of two cities in Ghana. *Advances in Remote Sensing*, 10(4), 131-149. [10.4236/ars.2021.104009](https://doi.org/10.4236/ars.2021.104009)
- USGS (U.S. Geological Survey). 2023. Descargado (03/03/2023) from: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., y Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and experimental botany*, 61(3), 199-223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wan Mohd Jaafar, W.S., Abdul Maulud, K.N., Muhmad Kamarulzaman, A.M., Raihan, A., Md Sah, S., Ahmad, A., Saad, S.N.M., Mohd Azmi, A.T., Jusoh Syukri, N.K.A. y Razzaq Khan, W. (2020) The Influence of Deforestation on Land Surface Temperature—A Case Study of Perak and Kedah, Malaysia. *Forests*, 11, 670. <https://doi.org/10.3390/f11060670>
- Weather-Spark (2024). El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo. Consultado (19/05/2024) en <https://es.weatherspark.com/>
- Žgela, M., Herceg-Bulić, I., Lozuk, J., & Jureša, P. (2024). Linking land surface temperature and local climate zones in nine Croatian cities. *Urban Climate*, 54, 101842. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101842>
- Zhang, M., Cao, Y., Zhang, Z., Zhang, X., Liu, L., Chen, H., Gao, Y., Yu, F. y Liu, X. (2024). Spatiotemporal variation of land surface temperature and its driving factors in Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 16(3), 373-395. <https://doi.org/10.1007/s40333-024-0072-5>
- Zhao, B., Mao, K., Cai, Y., Shi, J., Li, Z., Qin, Z., Meng, X., Shen, X. & Guo, Z. (2020). A combined Terra and Aqua MODIS land surface temperature and meteorological station data product for China from 2003 to 2017. *Earth System Science Data*, 12(4), 2555-2577. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2555-2020>

## 8. Apéndice

APÉNDICE 1. Formulario de recolección de datos utilizado en la verificación de campo

### DATOS DEL SITIO

Coordenadas: Long X: \_\_\_\_\_ Lat Y: \_\_\_\_\_

Fecha de visita: \_\_\_\_\_ msnm: \_\_\_\_\_

Localidad más cercana: \_\_\_\_\_

Tipo de vegetación (especies): \_\_\_\_\_

Densidad de la vegetación: \_\_\_\_\_

Fase física de la capa superior del suelo: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Color del suelo: \_\_\_\_\_

Uso del suelo: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Humedad superficial: \_\_\_\_\_

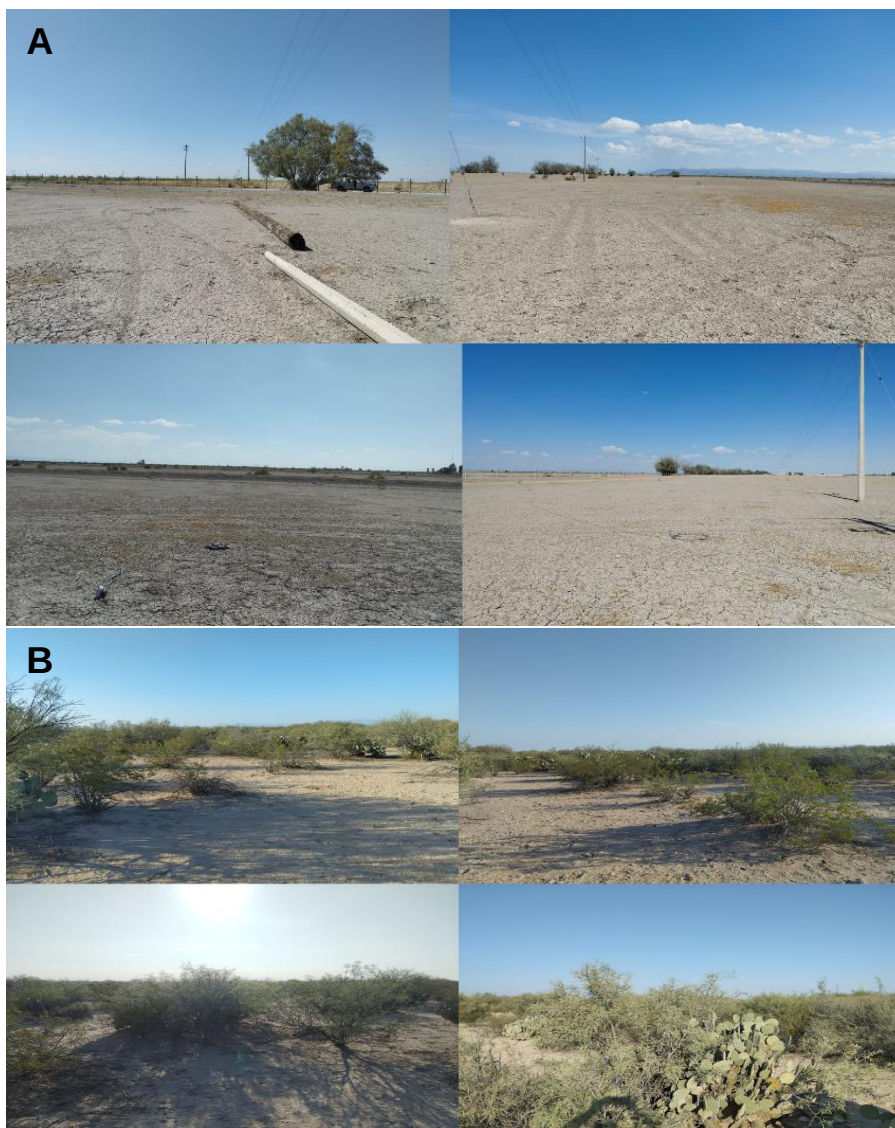
Observaciones:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

APÉNDICE 2. Fotografías de sitios de verificación hacia el norte (sup-izq), sur (sup-der), este (inf-izq), oeste (inf-der). Las letras indican el sitio.



Cont. Apéndice 2.





APÉNDICE 3. Superficie por cada rango de temperatura por fecha analizada

| ----- Superficie (km <sup>2</sup> ) (%)/ Clase (C) y rango de TST (°C) ----- |               |            |               |                |                 |                |               |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|
| Año                                                                          | Mes           | C1<br>≤8   | C2<br>8-20    | C3<br>20-32    | C4<br>32-44     | C5<br>44-56    | C6<br>≥56     |
| 2017                                                                         | Ene           | 0(0)       | 651(3.7)      | 16,487.1(93.7) | 457.6(2.6)      | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | Feb           | 17.6(0.1)  | 774.2(4.4)    | 15,501.8(88.1) | 1,302.1(7.4)    | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | Abr           | 0(0)       | 0(0)          | 193.6(1.1)     | 3,783.1(21.5)   | 13,566.3(77.1) | 52.7(0.3)     |
|                                                                              | May           | 0(0)       | 0(0)          | 35.2(0.2)      | 1,882.7(10.7)   | 15,343.5(87.2) | 334.3(1.9)    |
|                                                                              | Jun           | 0(0)       | 0(0)          | 0(0)           | 1,073.3(6.1)    | 6,950.3(39.5)  | 9572.1(54.4)  |
|                                                                              | Jul           | 105.6(0.6) | 299.2(1.7)    | 475.1(2.7)     | 2,269.8(12.9)   | 7,249.4(41.2)  | 7,196.6(40.9) |
|                                                                              | Sep           | 52.8(0.3)  | 88(0.5)       | 281.5(1.6)     | 2,956.1(16.8)   | 12,633.7(71.8) | 1,583.6(9)    |
|                                                                              | Oct           | 0(0)       | 7(0.04)       | 1,812.4(10.3)  | 14,949.3(84.96) | 827(4.7)       | 0(0)          |
|                                                                              | Nov           | 0(0)       | 369.5(2.1)    | 15,730.6(89.4) | 1,495.6(8.5)    | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | <i>Prom</i>   | 19.5(0.1)  | 243.2(1.4)    | 5,613(31.9)    | 3,352.1(19.1)   | 6,285.5(35.7)  | 2,082.1(11.8) |
|                                                                              | <i>DesvSt</i> | 36.7(0.2)  | 300.9(1.7)    | 7,743.2(44)    | 4,463.5(25.4)   | 6,374.2(36.2)  | 3,657.5(20.8) |
| 2021                                                                         | Ene           | 0(0)       | 2,762.5(15.7) | 14,833.2(84.3) | 0(0)            | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | Feb           | 5.3(0.03)  | 1671.6(9.5)   | 15,866(90.17)  | 52.8(0.3)       | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | Abr           | 0(0)       | 0 (0)         | 281.4(1.599)   | 5,137.9(29.2)   | 12,176.2(69.2) | 0.2(0.001)    |
|                                                                              | May           | 0(0)       | 0 (0)         | 0(0)           | 1,108.6(6.3)    | 14,058.9(79.9) | 2,428.2(13.8) |
|                                                                              | Jun           | 985.4(5.6) | 9,607.2(54.6) | 7,003.1(39.8)  | 0(0)            | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | Jul           | 1.8(0.01)  | 7 (0.04)      | 88(0.5)        | 3,352(19.05)    | 12,844.8(73)   | 1,302.1(7.4)  |
|                                                                              | Sep           | 17.6(0.1)  | 176 (1)       | 862.2(4.9)     | 8,234.7(46.8)   | 8,305.2(47.2)  | 0(0)          |
|                                                                              | Oct           | 35.2(0.2)  | 3,061.7(17.4) | 14,498.8(82.4) | 0(0)            | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | Nov           | 0 (0)      | 52.8(0.3)     | 3,818.3(21.7)  | 13,724.6(78)    | 0(0)           | 0(0)          |
|                                                                              | <i>Prom</i>   | 116.1(0.7) | 1,926.5(10.9) | 6,361.2(36.2)  | 3,512.2(20)     | 5,265.0(29.9)  | 414.4(2.4)    |
|                                                                              | <i>DesvSt</i> | 326.1(1.9) | 3,137.0(17.8) | 6,912.2(39.3)  | 4,796(27.3)     | 6,426.4(36.5)  | 869.2(4.9)    |



APÉNDICE 4. Rangos NDVI y cambios mensuales de superficie en km<sup>2</sup> y porcentaje (%) para 2017 y 2021 en la UE.

| Año  | Mes | NA(<0.01)  | SD(0.01-0.1)   | EV(0.1-0.2)    | MV(0.2-0.4)   | AV(>0.4)    |
|------|-----|------------|----------------|----------------|---------------|-------------|
| 2017 | Ene | 18.1(0.11) | 7064.5(42.3)   | 9616.4(57.59)  | 0.0(0)        | 0.0(0)      |
|      | Feb | 19.9(0.12) | 8146.4(47.27)  | 8598.1(49.9)   | 240.7(1.4)    | 227.1(1.32) |
|      | Abr | 12.4(0.07) | 8520.1(49.44)  | 8218.7(47.69)  | 376.7(2.19)   | 104.3(0.61) |
|      | May | 13.2(0.08) | 8118.7(47.11)  | 8373.7(48.59)  | 616.2(3.58)   | 110.4(0.64) |
|      | Jun | 65.3(0.09) | 5535.2(32.86)  | 9876.6(58.91)  | 1502.5(6.22)  | 252.7(1.93) |
|      | Jul | 15.0(0.38) | 5662.6(32.12)  | 10150.7(57.31) | 1071.5(8.72)  | 332.4(1.47) |
|      | Sep | 7.7(0.04)  | 4911.7(28.5)   | 10666.8(61.9)  | 1528.8(8.87)  | 117.1(0.68) |
|      | Oct | 8.4(0.05)  | 5954.8(34.56)  | 10289.2(59.71) | 905.8(5.26)   | 74.1(0.43)  |
|      | Nov | 8.3(0.05)  | 7214.6(41.87)  | 9390.0(54.49)  | 514.4(2.99)   | 104.9(0.61) |
| 2021 | Ene | 21.0(0.12) | 11174.7(64.85) | 5634.2(32.7)   | 264.6(1.54)   | 137.8(0.8)  |
|      | Feb | 14.7(0.09) | 12241.3(71.04) | 4524.0(26.25)  | 239.7(1.39)   | 212.5(1.23) |
|      | Abr | 9.4(0.05)  | 12245.0(71.06) | 4549.8(26.4)   | 336.0(1.95)   | 92.1(0.53)  |
|      | May | 9.3(0.05)  | 11284.5(65.48) | 5187.7(30.1)   | 613.4(3.56)   | 137.4(0.8)  |
|      | Jun | 8.5(0.05)  | 10490.9(60.88) | 5697.1(33.06)  | 820.3(4.76)   | 215.5(1.25) |
|      | Jul | 10.4(0.06) | 6560.0(38.07)  | 9002.8(52.24)  | 1190.4(6.91)  | 468.6(2.72) |
|      | Sep | 74.0(0.43) | 5038.0(29.24)  | 10289.9(59.71) | 1732.3(10.05) | 98.0(0.57)  |
|      | Oct | 13.7(0.08) | 8178.6(47.46)  | 8096.5(46.98)  | 849.0(4.93)   | 94.4(0.55)  |
|      | Nov | 12.4(0.07) | 8840.9(51.3)   | 7753.1(44.99)  | 526.8(3.06)   | 99.0(0.57)  |

Fuente: Elaboración propia.