



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Comparación de técnicas de percepción remota para la detección de islas de calor en la Ciudad de México y zona conurbada a partir de imágenes satelitales Landsat 8 OLI y datos puntuales**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Geomática**

**P R E S E N T A**

Marbel Citlali Loera Saldivar

**DIRECTORA DE TESIS**

Dra. Griselda Berenice Hernández Cruz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

*"Haz de tu vida un sueño, y de tu sueño una realidad"*

*Antoine de Saint-Exupéry*

## *Agradecimientos*

*A mi familia, por impulsarme a cumplir mis objetivos.*

*A mis amigos, por sus ánimos y acompañamiento en esta etapa de mi vida.*

*A todas aquellas personas que me impulsaron a perseverar.*

*A mi directora de tesis, la Dra. Berenice, por su paciencia e inspiración.*

*A mis sinodales, que dedicaron una porción de su tiempo a la revisión y retroalimentación de este escrito.*

*Esta es una investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM (PAPIIT-IT101621 "Estudio de la temperatura superficial terrestre (LST), en zonas urbanas y suburbanas de la Ciudad de México mediante técnicas de percepción remota y prototipos de bajo costo").*

# INDICE

|  |           |
|--|-----------|
| 1.1. Planteamiento del problema.....   | 1         |
| 1.2. Justificación .....   | 1         |
| 1.3. Hipótesis .....   | 2         |
| 1.4. Objetivos.....  | 2         |
| 1.4.1 Objetivo general.....  | 2         |
| 1.4.2. Objetivos particulares .....  | 2         |
| <b>Capítulo II Percepción remota e islas de calor.....</b>                   | <b>3</b>  |
| 2.1. Percepción remota.....  | 3         |
| 2.2. Espectro electromagnético .....   | 6         |
| 2.2.1. Porción óptica .....  | 9         |
| 2.2.2. Porción térmica .....   | 9         |
| 2.3 Sensores Remotos .....   | 10        |
| 2.3.1. LANDSAT 8 OLI.....  | 11        |
| 2.3.2 Imágenes satelitales térmicas .....                                    | 11        |
| 2.4. Calor Superficial Terrestre .....                                       | 12        |
| 2.5. Islas de calor .....  | 13        |
| 2.5.1 Estudios a nivel internacional .....                                   | 14        |
| 2.5.2 Estudios a nivel nacional.....   | 17        |
| 2.5.3 Estudios en CDMX .....   | 18        |
| <b>Capítulo III Islas de calor utilizando sensores remotos, CDMX .....</b>   | <b>20</b> |
| 3.1. Características físico-geográficas de la CDMX.....                      | 20        |
| 3.2. Selección del área de estudio .....                                     | 23        |
| 3.3. Adquisición de imágenes satelitales.....                                | 24        |
| 3.4. Cálculo de la temperatura en la Ciudad de México y zona conurbada. .... | 27        |
| 3.5 Análisis de resultados por el método ANOVA.....                          | 33        |
| <b>Capítulo IV Resultados y conclusiones.....</b>                            | <b>36</b> |
| Resultados.....  | 36        |
| Conclusiones.....  | 51        |
| Referencias Consultadas .....  | 53        |
| Anexo 1.....   | 58        |
| Anexo 2.....   | 60        |

# Capítulo I Introducción

## 1.1. Planteamiento del problema.

Recientemente México está experimentando la pérdida de cobertura de áreas verdes debido a la demanda de uso de suelo para desarrollo urbano, siendo las condiciones ambientales, incluyendo la climatología urbana, un producto en gran medida de la transformación de este espacio natural sobre el que se realiza el emplazamiento de la ciudad.

Cualquier proceso de urbanización sustituye suelos y áreas verdes por superficies construidas, de las cuales, sus materiales se caracterizan por una baja reflectividad, con disminución de la capacidad de absorción de agua y un comportamiento térmico propicio para el almacenamiento y la emisión de calor. Estos elementos contribuyen a acrecentar la temperatura atmosférica de la ciudad en relación con su entorno menos urbanizado a través de un fenómeno conocido como efecto de islas de calor (Fuentes, 2015).

Durante el verano este fenómeno incrementa el consumo de energía, la emisión de contaminantes del aire afecta a la salud humana y daña la calidad del agua. La demanda eléctrica aumenta en el punto máximo de las islas de calor entre un 1.5% y 2% cada 0.6°C. Esto quiere decir que entre un 5% y un 10% de la población consume electricidad para compensar su impacto (Wong, 2014).

Así mismo, las islas de calor pueden agravar las olas de calor generadas por el calentamiento global con efectos letales. En su informe sobre cambio climático y salud de febrero de 2018, la Organización Mundial de la Salud advirtió que el aumento en la temperatura contribuye directamente a muertes por problemas cardiovasculares y respiratorios (OMS, 2018), particularmente en las personas de edades avanzadas, lo que representa un riesgo inminente para los dos millones adultos mayores que habitan en la Ciudad de México (INEGI, 2020).

Por lo anterior, se propone monitorear continuamente la temperatura de la Ciudad de México a través de técnicas de percepción remota que mejoren y agilicen la recopilación de datos.

## 1.2. Justificación

Un claro ejemplo del cambio climático son las islas de calor, ya que además de modificar la temperatura, también influyen en el cambio de la precipitación por el aumento de la convección o flujo de calor sensible; alteran la humedad del aire, que al elevarse la temperatura lo hace más seco; afectan los patrones del viento que, combinados con la estructura de la ciudad, generan que se vuelvan más turbulentos, deformándose por los diferentes niveles de construcciones, siendo así esencial su monitoreo (SECTEI, 2019)

En México, la percepción remota aún no es una herramienta predominante en comparación con las investigaciones en campo, por lo que se espera distinguir las potencialidades de los métodos indirectos para el monitoreo de fenómenos climáticos concretos en un área específica. Esto permitiría no solo aumentar la eficacia en la obtención de información, sino también en la disminución de costos por investigación, generando así un nuevo sistema de sondeo.

### 1.3. Hipótesis

El uso de técnicas de percepción remota en el monitoreo de islas de calor disminuirá los costos de investigación y proporcionará información con mayor eficacia.

### 1.4. Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo general

- ❖ Determinar la metodología con mayor eficacia necesaria para la detección de islas de calor en la Ciudad de México y zona conurbada mediante el uso de imágenes satelitales.

#### 1.4.2. Objetivos particulares

- ❖ Selección de los sitios de monitoreo para comparar las temperaturas de superficie aplicando el algoritmo *Split Window (SW)*.
- ❖ Procesamiento de imágenes satelitales.
- ❖ Elaboración de mapas temáticos
- ❖ Comparación y análisis estadístico de las temperaturas obtenidas.

## Capítulo II **Percepción remota e islas de calor**

### 2.1. Percepción remota

Desde el lanzamiento del primer satélite artificial (1957) y a partir de la primera conferencia de las Naciones Unidas sobre la Explotación del Espacio Ultraterrestre con fines pacíficos, se han desarrollado de manera extenuante la ciencia y la tecnología en muchas ramas del conocimiento, sobre todo en aquellas relacionadas con el espacio terrestre (Catuna, 1995). Una de las técnicas que más se ha fortalecido junto con el desarrollo de las nuevas tecnologías geoespaciales ha sido la Percepción Remota.

La Percepción Remota es un campo basado en ciencia que permite el desarrollo, la adquisición, el procesamiento y el análisis de imágenes adquiridas por sensores espaciales y aerotransportados junto con otros datos físicos de la Tierra (CentroGeo, 2021). También es descrita por la revista KUXULKAB' como la ciencia que busca obtener información de un objeto sin estar necesariamente en contacto con él, requiriendo de diversos elementos para el análisis de imágenes satelitales tomadas de la superficie de la Tierra, (Collado, Gama, Díaz. 2015), mientras que Chuvieco (1990) establece: “Si hemos definido la Teledetección Espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos suponiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial”. Por lo anterior, se puede resumir que la percepción remota es la ciencia encargada de adquirir información a distancia de la superficie terrestre a través de nuevas tecnologías mediante la obtención, procesamiento y análisis de imágenes satelitales.

El concepto “percepción remota” fue acuñado en 1960 por Evelyn Pruitt de la Oficina de Indagación Naval de USA, aunque la utilización del término “percepción remota” es de manera considerable más vieja. Las primeras fotografías aéreas fueron tomadas a partir de un globo alrededor de París en 1858. A lo largo de los próximos cincuenta años se lograron adelantos significativos en el diseño de cámaras y emulsiones de películas. Las fotografías fueron tomadas a partir de distintas plataformas como papalotes, cohetes y palomas mensajeras. La primera fotografía tomada desde un aeroplano fue una cinta captada sobre Centochelli, Italia en 1909, en un avión piloteado por Wilbur Wright. Los científicos, no obstante, reconocieron el potencial de la fotografía aérea como un instrumento de mapeo y gradualmente la ciencia de fotogrametría se fue desarrollando (SEMAR, 2009).

Durante la Primera Guerra Mundial, la fotografía aérea se adquirió sistemáticamente y se utilizó ampliamente. Las cámaras fueron diseñadas específicamente para el reconocimiento aéreo, lo que llevó al desarrollo de técnicas de interpretación fotográfica para extraer información de inteligencia de estas imágenes.

Las películas de color fueron primeramente desarrolladas durante este período, sin embargo, tuvieron solamente pequeñas aplicaciones aéreas hasta la Segunda Guerra Mundial. Varias áreas de la investigación científica fueron también iniciadas, constituyendo el fundamento de la percepción remota moderna y de sus técnicas, así mismo la Segunda Guerra Mundial proporcionó otro catalizador para el rápido desarrollo tecnológico en el campo de la percepción remota. De nuevo, la adquisición de fotografía para inteligencia militar, en viajes de reconocimiento, fue la aplicación primaria. Las técnicas de fotointerpretación se volvieron altamente sofisticadas. Un aspecto valioso para estudios posteriores de zonas costeras fue el uso de la fotografía aérea para la planificación de asaltos anfibios. La primera película infrarroja de color fue también desarrollada durante la guerra para detección de camuflaje. (Butler, Mouchot, Barale, LeBlanc, 1990)

En la década de 1940, se construyeron extensas redes de radar para proporcionar sistemas de alerta temprana para detectar aeronaves. Los avances en la tecnología de radar han llevado al desarrollo de pequeños transeptores adecuados para uso aéreo. Esta clase incluía un radar PPI (Indicador de posición del plan), que proporcionaba una imagen del terreno debajo de la aeronave, independientemente de las condiciones climáticas o la disponibilidad de luz. Los radares PPI se utilizaron principalmente para la detección de objetivos en bombardeos nocturnos y sobre nubes a gran altitud, y también resultaron útiles en la navegación costera.

A partir de 1950, se desarrollaron sistemas de imágenes térmicas infrarrojas para proporcionar una "película térmica" de objetos y terreno. Al igual que el radar, los sistemas de infrarrojos térmicos no dependen de la disponibilidad de la luz, pero a diferencia del radar, no pueden penetrar las nubes. El radar de observación lateral (SLAR) se desarrolló casi al mismo tiempo para mejorar las imágenes relativamente granuladas producidas por los radares PPI. Ambos sistemas se diseñaron originalmente para fines militares y no estuvieron disponibles para uso civil durante muchos años.

El lanzamiento del Sputnik 1 por la U.R.S.S en 1957, marcó el principio de la era espacial, mientras que, en 1959, el satélite Estadounidense EXPLORER-6 transmitió la primera imagen de la tierra vista desde el espacio. El primer satélite meteorológico del mundo TIROS-1 fue lanzado en 1960, encabezando a los satélites ambientales más avanzados que actualmente están en operación. Los vuelos espaciales tripulados por hombres fueron particularmente importantes para crear interés en la potencialidad para el mapeo de recursos y el monitoreo desde el espacio. (Córdoba, Pérez, Quiróz, 1997)

Las primeras fotografías de la Tierra tomadas por cámaras manuales desde el espacio proporcionaron una cantidad impresionante de detalles de las características de esta, y de grandes áreas de agua. Misiones posteriores realizadas por los Estados Unidos y la Unión Soviética transportaron cámaras más sofisticadas y equipo barredor específicamente para la adquisición de imágenes para evaluación de recursos naturales (Lara, Chamorro, 2018)

Aunque las misiones tripuladas demostraron exitosamente el valor de las imágenes espaciales no proporcionaron una cobertura global uniforme debido a su corta duración. Estas limitaciones se

han superado en gran medida con el desarrollo de satélites de recursos terrestres, como la serie LANDSAT de EE. UU., que operan en órbitas más pequeñas que los satélites meteorológicos. LANDSAT y sistemas posteriores, han proporcionado un gran detalle espacial, aunque su cobertura temporal es menos frecuente. Aunque los sensores fueron seleccionados primariamente para aplicaciones terrestres, han probado ser bastante útiles en estudios costeros y marinos (Córdoba, Pérez, Quiróz, 1997).

Los rápidos avances en la tecnología informática están afectando todos los aspectos de la percepción remota. Las técnicas de procesamiento digital desarrolladas para el análisis de datos son de particular interés para los usuarios tales como los programas disponibles para corrección geométrica, realce de imágenes y extracción cuantitativa de datos. La velocidad de las computadoras digitales, permiten a un sólo operador realizar análisis de datos de grandes áreas geográficas en relativamente pequeños períodos de tiempo (Villegas, 2008).

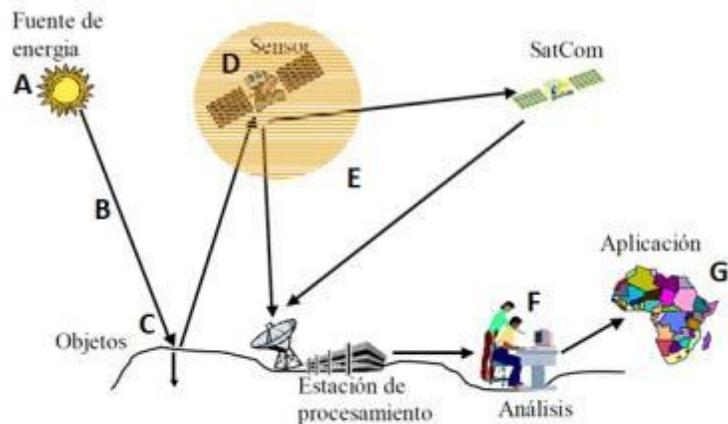
En la actualidad, el principal reto al que se enfrenta la percepción remota es el proporcionar información eficaz de manera oportuna a aquellos que la necesitan, por lo que debe haber un progreso continuo en las técnicas de recolección y análisis de datos, por lo que se requiere una infraestructura para tener acceso y distribuir datos, y una comunidad de usuarios que puedan aplicar estos datos a sus programas. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), está activamente motivando un más amplio y efectivo uso de esta tecnología, ya que ha proporcionado una estructura para la cooperación internacional en materia de percepción remota a través de sus programas de investigación, publicaciones y cursos de capacitación. (Córdoba, Pérez, Quiróz, 1997).

Elementos básicos que constituyen el proceso de la percepción remota (Fig.1):

- La fuente de iluminación, formada en este caso por el Sol que emite luz o radiación solar.
- El paisaje, configurado por todos los objetos presentes en el territorio explorado por el operador, tales como el mar, los ríos, vegetación o rocas.
- La escena, es aquella sección o superficie del paisaje donde se enfoca el interés, pudiendo ser esta la superficie de una roca o un valle completo.
- El sensor remoto, con el que se captura la luz proveniente de la escena y que permite obtener una representación visual de aquella región del paisaje que ha sido enfocada por el iris y el cristalino del ojo.
- La plataforma, que es el lugar donde se coloca o instala el sensor remoto para obtener una visión de conjunto de la escena.
- El sistema de procesamiento, compuesto por el dispositivo para procesar cualitativa o cuantitativamente los datos proporcionados por el sensor remoto acerca de la escena, los

cuales, interpretados en este ejemplo por el cerebro, producen información en relación con el paisaje, la que es útil en la eventual toma de decisiones sobre el medio ambiente.

- El apoyo de campo, que consiste en la inspección directa, en varios puntos seleccionados de la escena, de diferentes atributos de los objetos que se encuentran en el terreno, con el fin de evaluar los datos obtenidos previamente a distancia (SEMAR, 2009).



- (A) Fuente de Energía o Iluminación**
- (B) Radiación Electromagnética y Atmosfera**
- (C) Interacción con el Objeto**
- (D) Registro de la Energía por el Sensor**
- (E) Transmisión, recepción y Procesamiento de Datos**
- (F) Interpretación y análisis**
- (G) Aplicaciones**

Figura 1. Elementos de la percepción remota. (Morales, 2021)

## 2.2. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas propagadas a través del espacio y ordenadas según su frecuencia.

El límite teórico inferior del espectro electromagnético es 0, debido a que no existen frecuencias negativas y el teórico superior es infinito. Con la tecnología actual se han detectado frecuencias electromagnéticas inferiores a 30 Hz y superiores a  $2.9 \times 10^{27}$  Hz, aunque formalmente el espectro es infinito y continuo, se cree que la longitud de onda electromagnética (distancia entre dos valores de amplitud máxima de la onda) más pequeña posible es la longitud de Planck ( $l_p \approx 1.616252 \times 10^{-35} m$ ),

No todas las ondas electromagnéticas se comportan igual en el medio de propagación, el mismo origen o forma de interacción con la materia. Por lo tanto, el espectro electromagnético se divide tradicionalmente en segmentos o bandas de frecuencia. Esta división se ha realizado en función de diversos criterios, y en todo caso no es exacta, produciéndose en ocasiones un sobreposicionamiento en las bandas, haciendo que una frecuencia quede por tanto incluida en dos rangos (por ejemplo, debido a diferentes fenómenos físicos que originan la radiación, o a diferentes aprovechamientos de la energía radiada a una frecuencia concreta (Luque, 2012)

La clasificación más típica del espectro electromagnético según la SEMAR (2009) establece las siguientes categorías de radiación electromagnética (Fig.2):

- Ondas subradio: se denominan ondas subradio o subhertz a aquellas pertenecientes a la banda 3 e inferiores; es decir, a las frecuencias por debajo de 3 kHz. Así, según la nomenclatura ITU-R, incluye las ondas ULF, SLF y ELF. Las ondas subradio se utilizan para la comunicación debido a dos inconvenientes distintos. El ancho de banda es tan estrecho que la tasa de transmisión es muy baja y requiere antenas inabarcables.
- Ondas radioeléctricas: Esta banda sirve para una variedad de propósitos de transmisión de información porque sus características de propagación en la Tierra y su capacidad para atravesar la atmósfera para comunicaciones espaciales a través de satélites crean comunicaciones de radio.
- Microondas: Las microondas constituyen el segmento superior del espectro radioeléctrico. Habitualmente se consideran microondas aquellas ondas radioeléctricas entre 1 y 300 GHz.
- Rayos T: Es una radiación no ionizante que se propaga en la línea de visión a través de varios materiales no conductores (excepto metales y agua).
- Rayos infrarrojos: El infrarrojo es una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda más largas que la luz visible y más cortas que las microondas. Dependiendo de la clasificación, su rango de longitud de onda es de 0.7 a 1000  $\mu\text{m}$ . La radiación infrarroja también se denomina radiación térmica porque la emiten objetos cuya temperatura es superior a 0°K (cero absoluto, -273,15°C).
- Luz visible: El espectro visible es la porción del espectro electromagnético que el ojo humano puede percibir. La radiación electromagnética en este rango se denomina luz visible o luz, y percibida por los humanos como una serie continua de colores y tonos.
- Rayos ultravioleta: La radiación ultravioleta o UV originalmente llamados “Rayos desoxidantes” es una radiación electromagnética con longitudes de onda entre 10 y 400 nm, es decir, se encuentra entre los rayos X y la luz visible.

- **Rayos X:** La energía de los rayos X se encuentran generalmente entre los rayos ultravioleta y los rayos gamma ( $\gamma$ ) naturales. Su longitud de onda se encuentra entre aproximadamente  $10^{-11}$  y  $10^{-8}$  m, corresponde a frecuencias en el rango de aproximadamente  $3 \cdot 10^{16}$  a  $3 \cdot 10^{19}$  Hz, y su rango de energía es de 120 eV a 120 keV. Los rayos X forman radiación ionizante porque cuando interactúan con la materia, hacen que los átomos se ionicen, creando partículas cargadas (iones).
- **Rayos gamma:** La radiación " $\gamma$ " generalmente se produce por procesos de partículas elementales, como la aniquilación de un par positrón-electrón (desexcitación de un nucleón de un nivel o estado excitado a otro estado de menor energía) (formado por fotones) es una forma de radiación electromagnética. Los rayos o "gamma" de los isótopos radiactivos ayudan a los astrónomos a estudiar objetos o regiones de alta energía, gracias a su capacidad de penetración en la materia y la producción de isótopos radiactivos cuando ionizan la materia.
- **Rayos cósmicos:** Con frecuencias del orden de los YHz y ZHz, formada por partículas subatómicas que golpean la atmósfera de la Tierra con energías muy altas e interactúan con su campo magnético

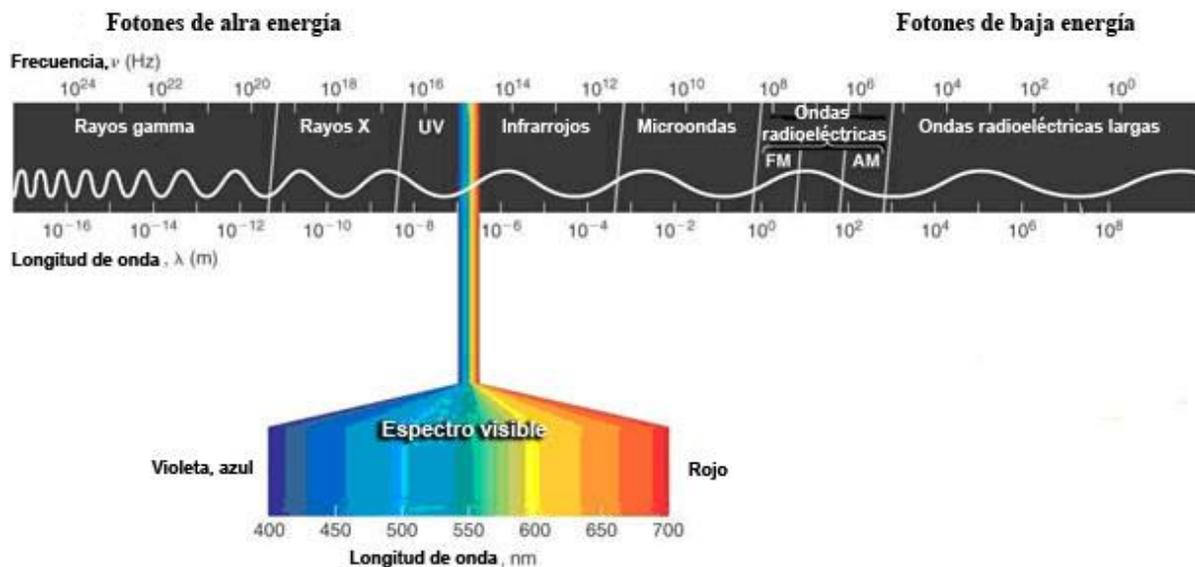


Figura 2. Espectro electromagnético (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, Light Sensitivity, 2008)

### 2.2.1. Porción óptica

La porción del espectro electromagnético comprendida entre 1 milímetro (mm) hasta 100 nanómetros (nm) se denomina radiación óptica y abarca la radiación ultravioleta, la radiación visible y la radiación infrarroja. El paso de una región a otra no es gradual, ya que no hay unos valores determinados de longitud de onda para cada área, sin embargo, se han establecido algunos límites basados en el rendimiento. Las radiaciones ópticas son las más utilizadas hoy en día, por lo tanto, son también las radiaciones más utilizadas en aplicaciones relacionadas a la percepción remota, optometría, óptica y oftalmológicas. También podemos decir que las radiaciones ópticas son radiaciones no ionizantes, ya que al incidir sobre la materia no son capaces de arrancar ninguno de sus electrones. Pero, pueden provocar daños al ser humano, aunque no sean capaces de ionizar la materia.

El ojo humano no logra distinguir longitudes de onda más largas o más cortas que las que comprende el espectro visible, pero eso no significa que no exista luz en esas regiones. No logran ser percibidas ya que nuestro pigmento retiniano no es capaz de captarlas o porque otras estructuras oculares impiden que lleguen a la retina. Por lo que el ojo humano no es capaz de distinguir longitudes de onda más largas o más cortas que las que comprende el espectro visible, pero eso no significa que no exista luz en esas regiones (Pérez, 2007).

### 2.2.2. Porción térmica

La porción térmica descrita por Calles (2019), abarca las longitudes de onda desde 780 nm hasta 1 mm que a su vez se puede dividir en tres porciones: infrarrojo cercano, infrarrojo medio e infrarrojo lejano:

- Infrarrojo cercano (IRA): abarca valores desde los 780 nm hasta los 1400 nm. Este tipo de radiación atraviesa la córnea y el cristalino hasta llegar a la retina. El sistema visual del ser humano no es capaz de detectar esta radiación por lo que no se produce respuesta natural de protección ocasionando afectaciones a la retina.
- Infrarrojo medio (IRB): se encuentra con longitudes de onda desde los 1400 nm hasta los 3000 nm. El humor acuoso puede absorber longitudes de onda comprendidas hasta los 1400 nm, si se trata de una longitud de onda superior el humor vítreo es el encargado de absorberlas, por lo tanto, la retina queda protegida.
- Infrarrojo lejano (IRC): abarca las longitudes de onda desde los 3000 nm hasta 1 mm. Esta radiación es captada por la córnea, que debido a su poder térmico puede generar quemaduras en la misma. Una exposición continua o altas intensidades de esta pueden producir una pérdida de la transparencia, lo que conlleva a una turbidez de los medios transparentes.

## 2.3 Sensores Remotos

Los sensores remotos son instrumentos capaces de captar las relaciones espectrales de objetos y materiales observables a una considerable distancia de éstos. Actualmente hay muchas aplicaciones en las que los sensores pueden usarse para generar la información detallada, ya sea sobre materiales y/o objetos en la superficie terrestre. Algunas de ellas son: geología, minería, urbanismo, incendios, etc.

Los dispositivos de detección remota pueden detectar muchos tipos de energía, como la radiación electromagnética, la gravedad, el magnetismo, la geofísica y las ondas de radio, pero generalmente la mayoría de los dispositivos o dispositivos de detección remota se utilizan para registrar datos de la superficie de la Tierra, a partir de la distribución de energía dentro del espectro electromagnético. Estos sensores recogen datos de la emisión y reflexión de la radiación electromagnética de las propiedades de la superficie terrestre (Pérez, 2007).

La Universidad de Murcia (2021) menciona la siguiente clasificación de los sensores remotos:

- Sistemas de adquisición secuencial
  - Sensores Activos:  
Los sensores activos emiten energía que permite escanear objetos y áreas con lo que el teledetector mide la radiación reflejada del objetivo. Un ejemplo de estos sensores es el radar, ya que genera la radiación directa hacia un objeto, registrando de esa forma los datos. Estos sistemas de sensores activos operan en los espectros de microondas y ondas de radio dentro del espectro electromagnético.
  - Sensores Pasivos:  
Los sensores pasivos detectan o reciben radiación natural emitida o reflejada por el objeto o área circundante que está siendo observada. La luz solar reflejada es uno de los tipos de radiación más comunes medidos por esta clase de sensor. Algunos ejemplos pueden ser la fotografía, los infrarrojos, los sensores CCD y los radiómetros.
- Según el tipo de sensor
  - Orbital:  
Estos sensores se denominan así debido a que se embarcan en satélites que siguen una órbita específica. Su característica más importante es que pueden observar toda la superficie de la Tierra de forma periódica, captando una vasta extensión en cada circunvalación. Todos operan a una altura suficiente para escapar a la resistencia atmosférica, pero sin abandonar el campo gravitacional dominante, es decir, a una altitud comprendida entre 150 y 40 000 km. La mayoría han sido lanzados desde cohetes, pero algunos se han puesto en órbita desde un transbordador espacial, que los ha descargado en el espacio. Recientemente se ha demostrado que la reparación en

vuelo de los sistemas de satélite es factible, pero es probable que esta operación no sea rentable para las naves espaciales no tripuladas (Meaden, Kapetsky, 1992).

- **Aerotransportado:**

Estos sensores son denominados aerotransportados debido a que se colocan en algún tipo de aeronave, como son helicópteros, aviones, globos, ultraligeros, etc. La aplicación va desde una cámara de pequeño formato, embarcada en un aeromodelo, hasta cámaras que rondan los cientos de dólares que son transportadas en aviones de costos similares (Freitas, Ribeiro, 2010).

### 2.3.1. LANDSAT 8 OLI

El 11 de febrero de 2013 se lanzó el vehículo Atlas-V que transporta el satélite LDCM (Landsat Data Continuity Mission) desde el buque USS Vandenberg. Dicha nave fue diseñada para continuar el programa de captura global de imágenes espaciales implementado por Estados Unidos desde 1972 con la ayuda de la serie Landsat.

La LDCM contiene un equipo de detección remota que está compuesto por un radiómetro de barrido multicanal OLI (Operational Land Imager) y un radiómetro infrarrojo de dos canales TIRS (Thermal Infrared Sensor). Ball Aerospace & Technologies desarrollaron el instrumento OLI, que opera en nueve longitudes de onda en el rango de 0.433-2.300 $\mu$ m, proporcionando imágenes con una resolución máxima de 15 metros utilizando avanzadas tecnologías de imágenes espaciales. Para su creación se utilizó el satélite experimental EO-1 (lanzado en el año 2000 y equipado con el radiómetro Advanced Land Imager, un prototipo del radiómetro OLI). Las imágenes obtenidas con el instrumento TIRS tienen una resolución espacial de 100 metros teniendo como objetivo principal obtener las características de temperatura de la superficie y estudiar el proceso de transferencia de calor y humedad en el ámbito de la agricultura, la gestión del agua, etc. (EOS, 2021) Debido a las características antes mencionadas, se seleccionaron imágenes de este satélite para estudiar la temperatura de superficie.

### 2.3.2 Imágenes satelitales térmicas

Las imágenes satelitales térmicas se pueden usar para calcular el balance de energía en la superficie de la tierra y son útiles para calcular el uso de agua en paisajes urbanos y riego agrícola con estimaciones más precisas en comparación con los datos de onda corta. La imagen de banda térmica

proporciona baja resolución radiométrica con baja saturación y rango dinámico extendido a valores altos de DN (número digital). Las bandas térmicas están sintonizadas por cavidades oscuras que actúan como obturadores y puntos de acceso altamente emisivos a la temperatura ambiente del instrumento. Los datos se transmiten como radiación condicionada en la parte superior de la

atmósfera (sensores) que se pueden convertir a una temperatura de brillo que corresponde a las variaciones de temperatura en función del ruido.

La cinta térmica también se puede utilizar para medir temperaturas superficiales. Un ejemplo de esto es el Observatorio de la Tierra, que usa sus medidas para indicar áreas de fuego, temperatura del suelo o flujo volcánico. La mayoría de las imágenes son monocromáticas. A veces se utilizan superposiciones de propiedades térmicas en imágenes en escala de grises o en color verdadero, principalmente en el caso de incendios y volcanes (EOS, 2021). Además, estas bandas pueden y pueden usarse para medir el estrés térmico en las plantas. Sin embargo, el análisis de campo carece de un programa de adquisición de datos estable y archivos de datos históricos muy pequeños. Su calibración indirecta proporciona un método independiente para calcular la ruta del sensor en órbita en función de la masa de agua medida (Mendoza, Rodríguez, 2001).

## 2.4. Calor Superficial Terrestre

El conocimiento sobre la temperatura de superficie terrestre (LST) proporciona información sobre las variaciones temporales y espaciales del estado de equilibrio de la superficie, siendo de fundamental importancia en muchas aplicaciones (Kerr, Lagouarde, Nerry, Otlé, 2000). Como tal, el LST se usa ampliamente en una variedad de campos que incluyen evapotranspiración, cambio climático, ciclo hidrológico, monitoreo de vegetación, clima urbano y estudios ambientales, entre otros (Arnfield, 2003). Debido a la fuerte heterogeneidad de las características de la superficie terrestre, como la vegetación, la topografía y el suelo (Liu, Hiyama, Yamaguchi, 2006), la LST cambia rápidamente tanto en el espacio como en el tiempo (Prata, Caselles, Coll, Sobrino, Otlé, 1995), y una adecuada caracterización de la distribución LST y su evolución temporal, por lo tanto, requiere mediciones con muestreo espacial y temporal detallado.

Dada la complejidad de la temperatura de la superficie sobre la Tierra, las mediciones del suelo no pueden proporcionar valores en áreas amplias. Con el desarrollo de la teledetección desde el espacio, los datos satelitales ofrecen la única posibilidad de medir LST en todo el mundo con una resolución temporal suficientemente alta y con valores promediados espacialmente completos en lugar de valores puntuales. El calor que emite la Tierra se cuantifica mediante el flujo de calor superficial, que es la cantidad de calor que pierde el planeta por unidad de superficie y tiempo (Li, Tang, Wu, Ren, Yan, Wan, Sobrino, 2013).

La temperatura de brillo en los diferentes sensores asume a la superficie terrestre como un cuerpo negro, es decir, tiene una emisividad espectral de 1.0, además de incluir efectos atmosféricos como la absorción y emisiones a lo largo del trayecto. Cada vez es más reconocida la importancia de LST, además de existir un gran interés en desarrollar metodologías para medirla desde el espacio (UE, 2007).

## 2.5. Islas de calor

Se denomina islas de calor al fenómeno de origen térmico que se produce en áreas urbanas en donde se presenta una diferencia de temperatura, tendiendo a ser más elevada durante la noche. Es en el centro de las ciudades donde se suele producir una edificación masiva en comparación a las áreas de alrededor, como extrarradios o zonas rurales.

Expertos atribuyen este fenómeno a varios factores, entre ellos:

- Hay muchos elementos que generan calor en el centro de la ciudad. Los sistemas de climatización, los coches, las luces especialmente concentradas en estos sitios, calientan el aire de los centros urbanos mucho más que en las afueras.
- Los materiales que se utilizan para construir en las ciudades (asfalto, cemento, etc.) lo favorecen. Por la noche, estos materiales se desprenden muy lentamente del calor que captan durante el día, lo que aumenta las temperaturas nocturnas. Algo que no sucede en las áreas más rurales que rodean las ciudades, donde abunda la tierra que tiene la capacidad de perder el calor rápidamente.

En 1958 surge por primera vez el término "isla de calor urbana" (urban heat island) debido al climatólogo inglés Gordon Manley, que relaciona el aumento de las temperaturas en los ámbitos urbanos con la reducción de las precipitaciones de nieve en las ciudades inglesas. El fenómeno de la "isla de calor" o "isla térmica" es provocado por diversos factores en las ciudades. La forma en que están edificados los centros urbanos contribuye a elevar su temperatura, además de que los materiales de construcción utilizados comúnmente en las ciudades, como el hormigón o el asfalto, almacenan mucho calor que se libera durante la noche.

Como es sabido, la climatología urbana estudia las alteraciones que sufre el clima ocasionadas por el proceso de urbanización. Con la revolución industrial en Europa y Estados Unidos se origina el pronto crecimiento de las grandes capitales como Londres, París, Berlín y Nueva York. Desde entonces sus habitantes percibieron el aire urbano más denso y turbio, más tibio y seco que el aire del campo aledaño.

En 1818 Luke Howard, reconocido climatólogo inglés, publicó un libro que resume sus observaciones sobre el clima de Londres, incluyendo el tema de la contaminación del aire por las emanaciones de la ciudad. Al describir en 1820 una tabla de temperaturas del aire de dos lugares, uno dentro y otro en los alrededores, Howard pudo determinar que el aire en la ciudad era más tibio en la noche y más fresco en el día que en el campo, atribuyendo dicho fenómeno a la quema de combustible (Chander, Markham, Helder, 2009). En 1985, el climatólogo francés E. Renou, encuentra diferencias de temperatura (de 1 a 2° C) entre el centro de París y los suburbios, atribuyendo este fenómeno al calor metabólico emanado de los parisinos y de las numerosas chimeneas de la ciudad.

En la última década del siglo y aparentemente ajeno a los descubrimientos de Howard y Renou, el climatólogo mexicano Manuel Moreno y Anda (1899) publica el trabajo titulado “Una comparación de los climas de México y Tacubaya”. En dicho trabajo, se describe la utilización de los datos de dos estaciones, una urbana (del Observatorio Meteorológico Central) y otro rural (el Observatorio Astronómico de Tacubaya), determinó los contrastes ciudad-campo que caracterizan a la llamada isla de calor urbano, de 1895 a 1896.

En el periodo de 1858 a 1910 la capital del país registró un importante desarrollo; su área urbana aumentó cuatro veces (Garza, 1988). Según G. Garza, el crecimiento de la ciudad estuvo asociado entonces a la expansión del sistema de transporte urbano que primero contó con tranvías y luego con los eléctricos.

La población de la capital pasó en el periodo antes mencionado de 185,000 a 471,000 habitantes, lo que implica que entre 1895-1896, de los datos de Moreno, la ciudad contaba con unos 400, 000 habitantes y ya concentraba las más importantes fábricas de papel, tabacaleras y de aceites del país. La extensión de las ciudades limitaba a un cuadrado de unos 4 km de lado (según el plano de Valdéz y Cuevas de 1880) es decir, unos 16 km<sup>2</sup>.

### 2.5.1 Estudios a nivel internacional

- Effective monitoring and warning of Urban Heat Island effect on the indoor thermal risk in Bucharest-Romania (Constantinescu, Cheval, Caracaş, Dumitrescu, 2016)

Debido a que diversos eventos extremos y las olas de calor ocurren con frecuencia en Bucarest durante la temporada cálida se desencadena un estrés por calor significativo y riesgos térmicos, especialmente en edificios con ventilación inadecuada, mientras que los escenarios de cambio climático coinciden con la tendencia al calentamiento a lo largo de las próximas décadas.

Este estudio investiga el impacto de la Isla de Calor Urbano en el régimen térmico de los edificios, con el fin de desarrollar un sistema de alerta capaz de emitir señales tempranas cuando el riesgo térmico alcanza niveles elevados en Bucarest. Las advertencias deben ser precisas con respecto a la intensidad del riesgo, el ajuste temporal y la ubicación, además de recopilar información compleja (por ejemplo, temperatura de la superficie del aire y del suelo, cobertura del suelo, edificios y características de los planos). Para este estudio, fueron utilizados datos meteorológicos terrestres y productos satelitales para calcular la temperatura ambiente en varias áreas de prueba durante los meses de verano, y el clima interior se modeló dinámicamente con una resolución horaria. El riesgo térmico se determinó utilizando índices de confort estandarizados, concluyendo que la amplitud

térmica entre el centro y la periferia está en una relación inversa con la temperatura del aire sobre la ciudad, siendo así mucho más complejo el comportamiento de la temperatura de superficie terrestre.

Dado que futuras investigaciones validan las altas correlaciones encontramos entre Tair y LST, los resultados podrían ser aplicado en evaluaciones más precisas del UHI. Desde el punto de vista metodológico, estudiar la isla de calor urbano basado en imágenes de satélite, con una resolución espacial de 1 km, una cobertura temporal de máximo cuatro imágenes por día y posiblemente extendido por toda el área metropolitana de Bucarest como se usa en este proyecto, representa un progreso significativo en comparación con los datos de puntos recuperados por dos o tres estaciones o con perfiles cruzados expedicionarios. Los productos MODIS MOD11-L2 y MYD11-L2 tienen el potencial de ser explotados tanto en modo cuasi-operativo. Así mismo, suelen estar disponibles dentro de las 24 a 72h después del paso elevado del satélite, y en estudios de climatología exploratoria, estando activas desde 2000. Sin embargo, dada la alta complejidad de los factores que influyen en la generación y los parámetros del UHI de Bucarest (es decir, tejido urbano, suelo, cubierta, condiciones atmosféricas), así como su importancia para numerosos aspectos sociales, el seguimiento y los estudios debe contemplarse también a escalas temporales y espaciales más finas.

- Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección (Vargas, Olave, 2011)

La ciudad de estudio, Santiago de Cali, experimentó un fuerte crecimiento urbano en la década de 1990 en el suroeste y este de la ciudad, bordeando las márgenes del río Cauca. En este estudio, adquirimos imágenes Landsat 4 TM 1989 y Landsat 7 ETM+ 2001 para calcular la temperatura superficial del área de estudio y comparar cómo los cambios en el comportamiento del uso del suelo afectan la presencia de islas de calor. El crecimiento urbano, la pérdida de agua, la reducción del vigor de las plantas, etc. conducen a la existencia de islas de calor urbanas.

Este artículo muestra que el cambio de uso del suelo (aumento de la actividad humana) de zonas con vegetación a zonas edificadas es una de las causas del aumento de las temperaturas.

Los resultados muestran los efectos de la liberación de calor antropogénico en presencia de unidades de cuidados intensivos, por lo que el Relleno Sanitario de Navarro, que estuvo en funcionamiento en 2001, es fácilmente identificable, y las zonas industriales de la ciudad apuntan a temperaturas más altas identificadas. Durante el desarrollo del artículo, quedó claro lo importante que es procesar cuidadosamente los parámetros de cada imagen, según

el sensor y la fecha de captura. Se aplicó a cada imagen una corrección llamada “Algoritmo mínimo de histograma”, que mejoró significativamente la calidad de la imagen original, pero los errores que se muestran a lo largo del estudio están relacionados con la presencia de nubes. Los resultados se ajustan a las realidades de la zona de estudio.

- A study of Ibiza's urban heat island (Pardo, 2007)

Los estudios sobre el clima de las ciudades españolas proliferan, cada vez son más las ciudades que disponen de más datos. Hasta el momento, no parece que se hayan realizado estudios sobre el clima urbano de Ibiza, y mucho menos sobre el fenómeno de las islas de calor. Para remediarlo, este artículo presenta los resultados de un estudio sobre el fenómeno de la isla de calor en la ciudad de Ibiza, demostrando la existencia del fenómeno y sus características. Las temperaturas se midieron en dos campañas (invierno y verano) mediante el método de transectos. Estas mediciones de temperatura ayudaron a fundamentar dos hipótesis iniciales: por un lado, el fenómeno de la isla de calor existe en la ciudad de Ibiza y, por otro, se produce con mayor intensidad en verano que en invierno debido a los tours de actividad.

Las encuestas han encontrado que la intensidad del evento en la ciudad de Ibiza tiene un promedio de 3.2°C. No es un número alto de ninguna manera, pero es un número importante. La máxima intensidad parece darse en verano cuando las condiciones meteorológicas son favorables, especialmente anticiclones con olas de calor. Esto significa que se alcanzó una intensidad máxima de 6,4 °C, que es un valor alto. La intensidad media más alta puede alcanzar los 5,4°C.

La configuración de isla de calor indica que en casi todos los casos investigados existe una isoterma cerrada en el centro de la ciudad. Esta isoterma localiza el máximo térmico de la isla de calor.

La mayor parte del distrito de *s'Eixample* se encuentra dentro de este núcleo, especialmente en verano, lo cual es normal dada la morfología de la ciudad. Este máximo se suele observar ya que puede extenderse fuera del casco urbano por la calle Sant Josep de *sa Talaia*. El centro de la isla de calor suele ser más pequeño en invierno y suele estar situado en la calle *Isidor Macabich*. Coincide con el tramo de parada del autobús, donde es importante el calor generado por la combustión del combustible del vehículo. En verano, el núcleo revela una mayor extensión que ocupa parte del barrio de Platte, la mayor parte del Eixample y Barra de Rei.

Ocasionalmente este núcleo llega cerca de *ses Figueretes*. Los bulevares que conducen a la ciudad parecen jugar el papel de un corredor que impregna el calor de la ciudad en el campo. El último ejemplo se refiere a la Autopista de San José. Los centros urbanos satélite de *Sant Jordi y Puig d'en Vals* también demuestran los cambios que está provocando el entorno urbano. Estos dos núcleos son, por tanto, casi 1 °C más cálidos que el entorno rural. Por un lado, se ha demostrado la existencia del fenómeno de isla de calor y, por otro lado, este fenómeno es más pronunciado en verano que en invierno, por lo que podemos concluir que las dos primeras hipótesis parecen cumplirse. La primera hipótesis se cumple claramente, pero la segunda hipótesis no, ya que la diferencia de intensidad entre el invierno y el verano es de solo 0,2 °C.

### 2.5.2 Estudios a nivel nacional

- La isla de calor en Toluca, México (Jáuregui, 1979)

Como se menciona en otros artículos, las ciudades con mucha población tienden a ser propensas al efecto isla de calor. En este caso, determinaron el contraste de temperatura entre zonas urbanas y rurales de la ciudad de Toluca, México, gracias a una campaña de observación realizada a través de dos termómetros montados en el parabrisas de un automóvil a 1,20 m de la acera. Esta posibilidad visita 47 puntos de la ciudad en unas 2 horas.

Se ha determinado que el manto de contaminación que cubre la ciudad absorbe la radiación de onda larga de las zonas urbanas y la refleja hacia el suelo, provocando diferencias de temperatura entre las mañanas y las noches de invierno.

El análisis anterior determinó que la ciudad tiene una intensidad de isla de calor de 5°C. Estos resultados son consistentes con la expansión urbana, y también se examinaron las variaciones estacionales en las islas de calor y las variaciones espaciales en la humedad. Es importante destacar que el aumento de la contaminación del aire que ya se ha visto en las ciudades está exacerbando aún más el efecto de isla de calor.

- Islas de calor urbano en Tampico, México. Impacto del microclima en la calidad del hábitat (Fuentes, 2015)

De todos los cambios climáticos provocados por las ciudades, el calor es el más familiar para los propios ciudadanos. Los efectos transformadores de los espacios naturales en los que se ubican las ciudades se convierten en los principales productores de las condiciones ambientales, incluido el clima de la ciudad. Cada proceso de urbanización reemplaza suelos y espacios naturales por superficies construidas con materiales caracterizados por baja reflectancia, reducida capacidad de absorción de agua y comportamiento térmico propicio para el almacenamiento y liberación de calor. Estos factores contribuyen al aumento de las

temperaturas atmosféricas en las ciudades en comparación con sus alrededores no urbanizados a través de un fenómeno conocido como efecto de isla de calor urbano que tiene impactos microclimáticos en la calidad del hábitat. El propósito de este estudio experimental aplicado es demostrar la metodología de investigación utilizada para realizar un estudio de isla de calor urbano en Tampico, México. Las conclusiones extraídas son la síntesis y análisis de los datos obtenidos del trabajo de investigación según los resultados estacionales de 2012 como consecuencia de las exposiciones a isotermas de isla de calor invernal en la zona de estudio, el centro histórico está ubicado en el sur, dentro del círculo polilíneo, y su temperatura promedio es de 22.0–21.5 °C, por lo que el área de estudio norte tiene una temperatura promedio de 22.0 a 19.5 a polilíneo.

De manera similar, las isotermas de islas de calor de verano, donde se encuentra el centro urbano del área de estudio, se encuentran dentro de un círculo polilíneo con temperaturas medias entre 28,0 y 27,5 °C. Los círculos indican temperaturas medias entre 28,0 y 25,5 °C. Los estudios experimentales aplicados reflejaron datos climáticos macroclimáticos de CONAGUA, SENEAM y CFE, con temperaturas que oscilaron entre 18,0 y 26,0 °C en enero durante el experimento, con fluctuaciones de temperatura de -0,6 a +9,4 °C. Las temperaturas en agosto oscilan entre 26,0 y 34,0°C con una variación de -0,1 a +4,9°C. Las islas de calor urbanas identificadas en el área de estudio muestran una clara relación espacial entre la humedad relativa y superficies escasamente vegetadas con baja reflectancia, lo que ayuda a explicar las altas temperaturas que las caracterizan. Por lo tanto, se propone mantener los niveles de agua urbanos y las zonas de vegetación, evitar grandes áreas de asfalto, especialmente en estacionamientos y vehículos, y considerar a Tampico como una ciudad más compacta significa crecimiento vertical, lo que lleva a distancias más cortas, evitando el uso indiscriminado de vehículos y priorizando el uso de peatones y bicicletas para mitigar las islas de calor y mejorar la calidad del hábitat.

### 2.5.3 Estudios en CDMX

- Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. Revisión y perspectivas. Jauregui Ostos Ernesto (Jauregui, 1995)

En este texto se puede encontrar una visión diferente respecto al cambio climático debido a la urbanización en la Ciudad de México, es decir, se estudian otros factores como el bioclima, el balance energético, la radiación solar y el smog, etc., para así demostrar que la temperatura del aire urbano se ha elevado a un ritmo que es más de tres veces mayor que el calentamiento global atribuido al efecto invernadero, en un intento por remarcar la importancia que tienen también los cambios de clima a la escala local e impacto sobre la población.

Es importante destacar que la radiación solar y la precipitación son factores que han sufrido las modificaciones más importantes a lo largo del último siglo, un claro ejemplo es que en el transcurso de este tiempo, la temperatura del aire incrementó 1.5°C en la capital, dando así un contraste térmico entre el aire de la ciudad y del campo vecino de unos 10°C aproximadamente.

Como se ha visto en este trabajo, el fenómeno de las islas de calor de la Ciudad de México y otras alteraciones del clima guardan una relación estrecha con la extensión del tejido urbano, que a su vez, es función del desarrollo poblacional, dado que es evidente que la creciente migración hacia la capital acentúa dichas modificaciones climáticas.

- La isla de calor urbano de la Ciudad de México a finales del siglo XIX. Jáuregui Ostos Ernesto (Jáuregui, 1993)

Según el autor, Manuel Moreno y Anda, climatólogo de la Agencia Meteorológica, publicó un trabajo sobre la diferencia de temperatura entre las zonas urbanas y rurales de la Ciudad de México durante la última década del siglo XIX. Usando datos de temperatura explicó las variaciones estacionales en la intensidad de la isla de calor en lo que entonces era un pequeño pueblo. También se realizó un análisis de tendencia de la estación de la ciudad (dentro del Palacio Nacional) durante un período de 11 años, que mostró una tendencia creciente en la temperatura mínima debido a la urbanización. Existe una diferencia entre el aire de la capital y el del área metropolitana. Incluso teniendo en cuenta la diferencia de elevación entre los dos lugares, la diferencia de temperatura permanece. Utilizando datos de temperatura de un estudio realizado por Moreno y Anda y otros en la Agencia Meteorológica de Japón, Jáuregui obtuvo los siguientes resultados. El tamaño de la isla de calor urbana era pequeño (alrededor de 2 °C) en relación con el tamaño de la ciudad.

Durante el período de 11 años (1878-1889) existe una tendencia a que la temperatura mínima en los meses secos de Palacio Nacional aumente significativamente. Este aumento es probablemente el resultado de la creciente urbanización que se produjo durante este período.

La intensidad de la isla de calor nocturna muestra variaciones estacionales que son mayores en la estación seca. Esto puede deberse a cambios estacionales en la tolerancia del suelo en el campo circundante. La isla de calor persistió en la capital por la tarde y se minimizó en los meses secos.

### Capítulo III Islas de calor utilizando sensores remotos, CDMX

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para la delimitación, obtención y procesamiento de las imágenes satelitales pertinentes para la comprobación de la hipótesis antes mencionada.

#### 3.1. Características físico-geográficas de la CDMX

La Ciudad de México está ubicada en el Valle de México con coordenadas que van de 19° 03' a 19° 36' de latitud norte y de 98° 57' a 99° 22' de longitud oeste. Su territorio, consta de 1,486.45Km<sup>2</sup>(según el Marco Geoestadístico del INEGI), que representa aproximadamente el 0.08% de la superficie total del país. En cuanto a la altitud, va aumentando de norte a sur, siendo 2,240 msnm la altura que corresponde al piso del Valle.

La ciudad de México colinda al norte, este y oeste con el Estado de México, mientras que con Morelos colinda al sur (Figura 3).



Figura 3. Colindancias de la Ciudad de México.

La Ciudad de México tiene dos tipos predominantes de uso de suelo: el urbano (asentamientos humanos), que se encuentra básicamente hacia el centro-norte, que cubre cerca de 45% del territorio nacional y el rural (agrícola) en la porción sur, oeste y con vestigios en lo correspondiente a las Sierras de Guadalupe y Santa Catarina, correspondiente al 55% del territorio. Las zonas forestales, pecuarias y agrícolas son consideradas como reserva ecológica (Figura 4).

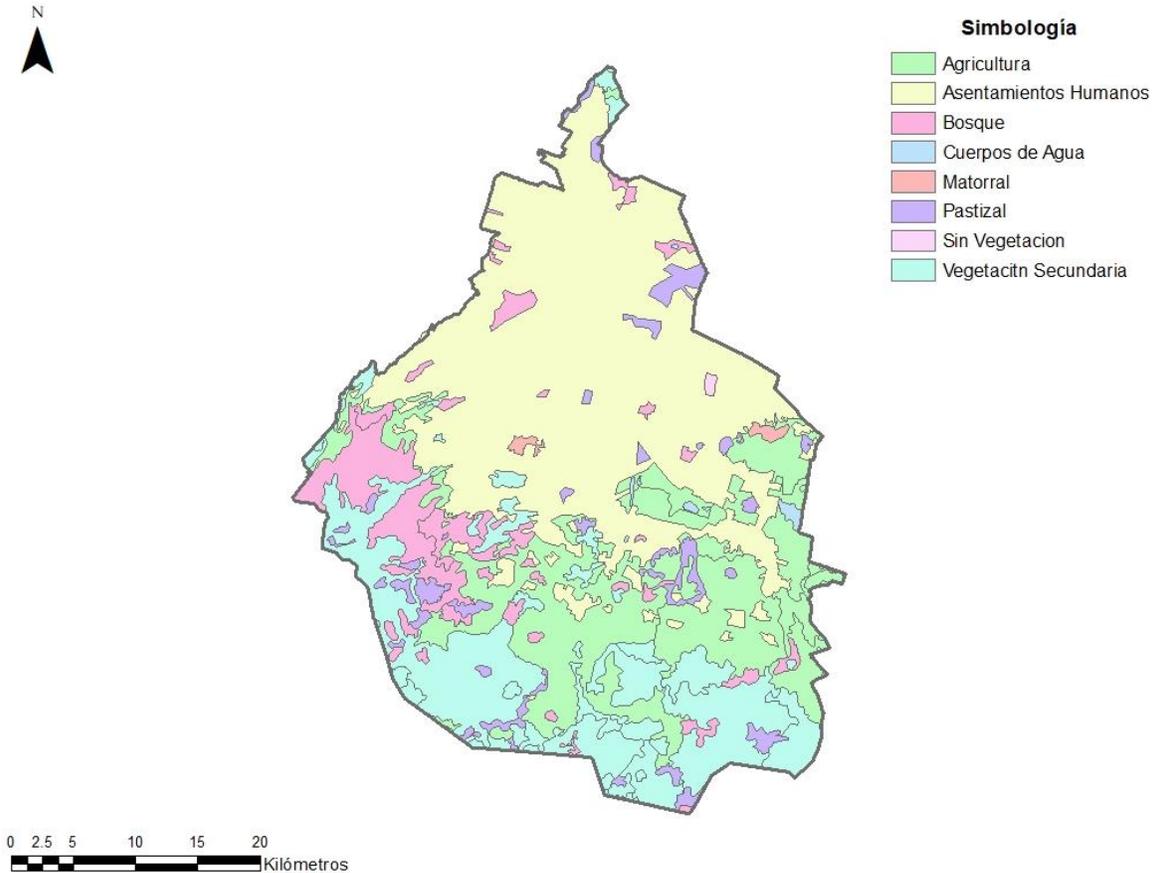


Figura 4. Distribución de uso de suelo de la Ciudad de México.

Al encontrarse a una altitud superior a los 2,000 msnm, la Ciudad de México cuenta con los siguientes cuatro tipos de climas (Figura 5):

- Templado subhúmedo (C(w)): cubre más de la mitad de la superficie, con precipitaciones en verano, la temperatura media anual oscila entre 12° y 18°C con grado de humedad media. Se considera el invierno como la estación con mayor porcentaje de lluvias. El total de la precipitación anual va de menos de 600 mm en el noroeste a menos de 1.500 mm en la parte occidental, lo que es muy favorable para el desarrollo de los asentamientos humanos.
- Semifrío subhúmedo (C(E)(w)): se localiza al sur y suroeste de la Ciudad de México, presentando lluvias en verano, con un grado de humedad alto y temporada lluviosa en el

verano, la temperatura media anual oscila entre 5° y 12° C, mientras que la precipitación total anual entre 1,200 a menos de 1,500 milímetros.

- Semifrío húmedo (C(E)(m)): hacia el sureste de la Ciudad de México considerada la región más húmeda de la capital, con abundantes lluvias en verano, temperatura media anual entre 5° y los 12° y precipitación total anual mayor a 1,200 mm al año.
- Clima semiseco templado (BS1k): se prioriza hacia la zona noreste limitando con el Vaso de Texcoco; ocupa 10.0% del territorio, con clima semiseco templado, lluvias en verano, temperatura media anual oscilante entre 12° y 18° C y con una precipitación total anual menor de 600 mm.

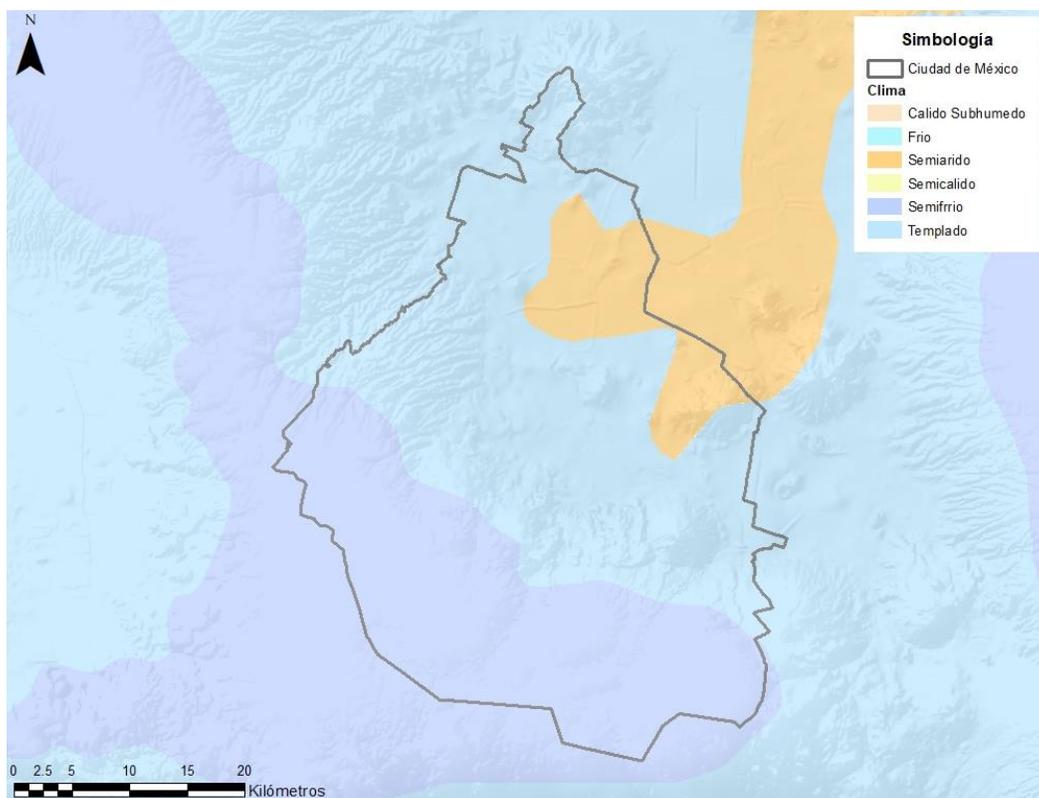


Figura 5. Distribución del clima de la Ciudad de México.

En cuanto a temas de hidrología, La Ciudad de México conecta con 3 de las 37 regiones hidrológicas del país, donde las regiones hidrológicas se subdividen en cuencas y éstas a su vez en subcuencas: siendo la principal y la que ocupa mayor superficie territorial la RH26 Pánuco (subcuena L. Texcoco y Zumpango); las otras dos son la RH18 Balsas (subcuencas R. Apatlaco y R. Yautepec) y la RH12 Lerma-Santiago (subcuena R. Almoloya – Oztolotepec), ubicadas hacia el sur y suroeste respectivamente como se muestra en la figura 6. (PAOT, 2021)

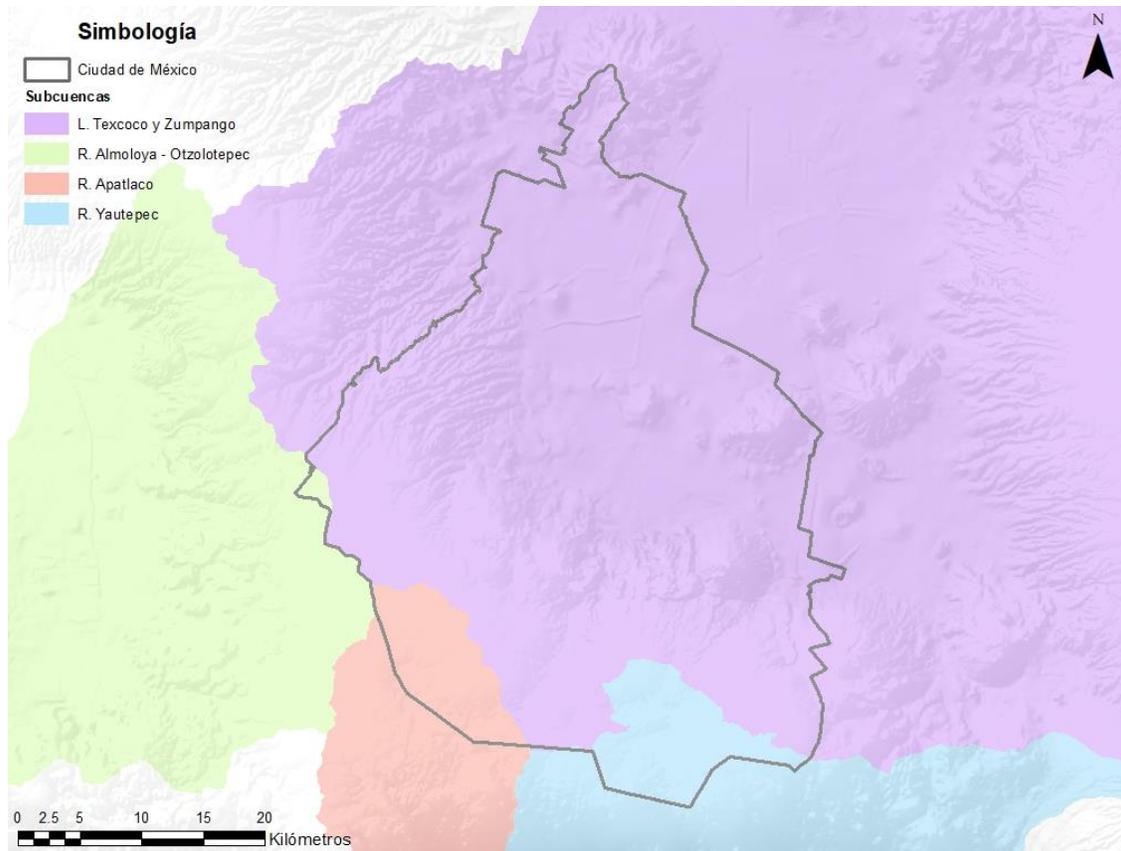


Figura 6. Subcuencas de la Ciudad de México.

### 3.2. Selección del área de estudio

La Ciudad de México está dividida en dieciséis zonas territoriales, con una población urbana casi en su totalidad y solo el 1% de la población rural. Entre 1980 y 2017, la población urbana de México creció de poco más de 14 millones de personas a poco más de 21 millones registrados el año pasado, lo que representa una tasa de crecimiento poblacional de 1.1%. Al mismo tiempo, la tasa de crecimiento acumulada se triplicó (3.3 %), de una superficie de 61 820 37 hectáreas en 1980 a 235,267,873 hectáreas, que registró la Ciudad de México en 2017, y ocupó el segundo lugar en los rankings de población después del Estado de México y por delante de ciudades como Guadalajara y Monterrey (ONU Hábitat, 2018).

Por ello, la expansión y desarrollo urbano descontrolado en la Ciudad de México está ocupando cada vez más áreas protegidas: áreas no urbanizadas con bosques, barrancas, ríos y zonas de cultivo. Estos sitios albergan más de 1,800 especies de flora y fauna, algunas endémicas; permiten la captación de carbono con los mantos montañosos del sur; regular el clima, crear condiciones para la infiltración del agua en la época de lluvias y contribuir a la recarga de los acuíferos. Además, participan en el equilibrio general de la circulación atmosférica, constituyendo así un área de investigación de gran importancia (López, 2019).

Debido al desarrollo urbano antes mencionado, la Ciudad de México y los municipios aledaños a ella fueron seleccionados como sitio de estudio (Figura 7).

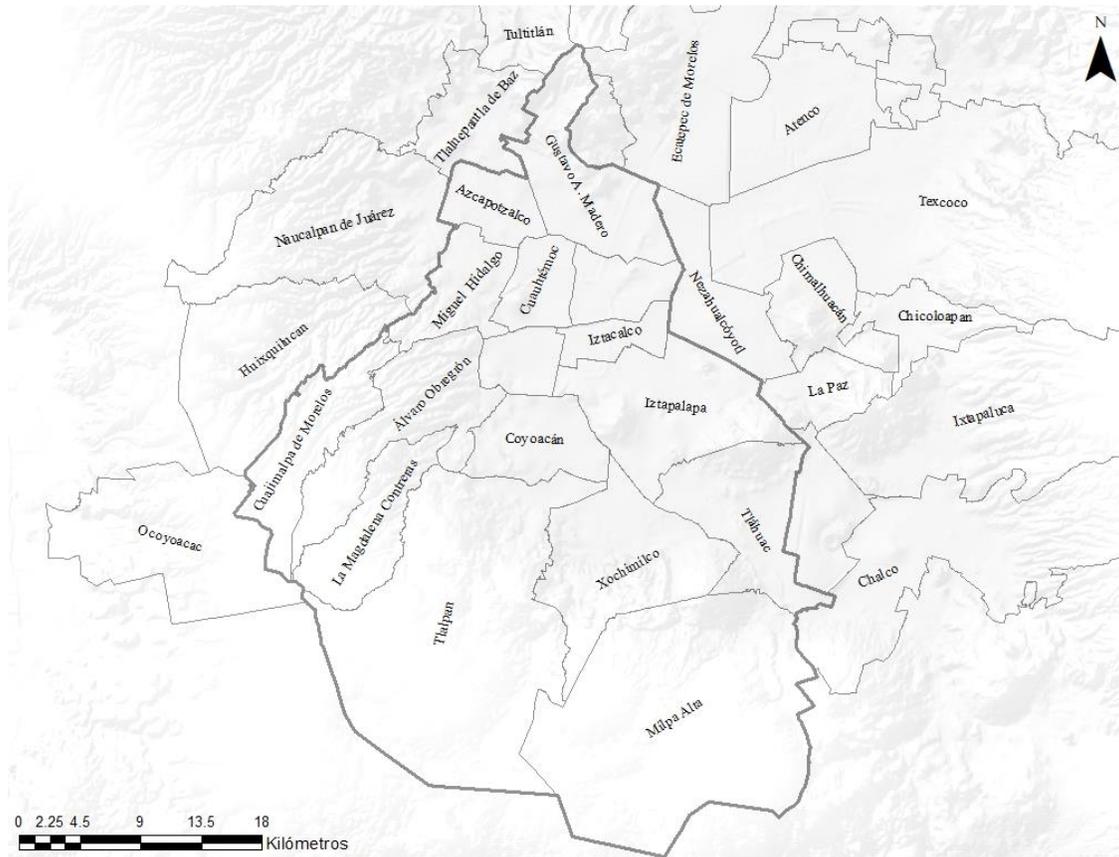


Figura 7. Área de estudio.

### 3.3. Adquisición de imágenes satelitales

Las imágenes fueron adquiridas de la plataforma *Earth Explorer*, a través de la creación de una cuenta de usuario. Una vez realizado el registro se ingresaron los siguientes criterios de búsqueda:

- Geocodificador
- Límites de búsqueda
- Rango de fechas
- Porcentaje de cobertura de nubes
- Conjunto de datos a obtener

Los datos ingresados para la obtención de las imágenes a tratar fueron:

- Geocodificador: GNIS
- Límites de búsqueda:

| ID | Latitud     | Longitud     |
|----|-------------|--------------|
| 1  | 19°07'51''N | 099°19'18''W |
| 2  | 19°04'35''N | 098°57'33''W |
| 3  | 19°34'40''N | 098°56'09''W |
| 4  | 19°35'59''N | 099°20'23''W |

Tabla 1. Parámetros para la selección de imágenes satelitales.

- Rango de fechas: 01 de enero de 2020 al 15 de julio de 2020
- Porcentaje de cobertura de nubes: 0 a 10%
- Conjunto de datos a obtener: *Landsat Collection 1 Level-1/Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level 1*

Como resultado de la obtención de escenas, se seleccionaron las siguientes dos imágenes (Figuras 8 y 9):

Imagen 1. LC08\_L1TP\_026047\_20200217\_20200225\_01\_T1

|                      |                  |                          |                   |
|----------------------|------------------|--------------------------|-------------------|
| Fecha                | 17-feb-20        | UR Corner Long           | 98 ° 00'49.18 "O  |
| Inicio de toma (UTC) | 59:54.9          | LL esquina lat           | 18 ° 05'56.18 "N  |
| Fin de toma (UTC)    | 00:26.7          | LL esquina larga         | 100 ° 10'11,39 "O |
| Latitud central      | 18 ° 47'15.04 "N | LR esquina lat           | 17 ° 43'55.31 "N  |
| Longitud del centro  | 99 ° 05'43.62 "O | LR Corner Long           | 98 ° 25'12.47 "O  |
| Lat de esquina UL    | 19 ° 49'55.85 "N | Escena cubierta de nubes | 5.61              |
| Esquina UL larga     | 99 ° 46'54.48 "O | DATUM                    | WGS84             |
| UR esquina lat       | 19 ° 28'01.88 "N | Elipsoide                | WGS84             |

Tabla 2. Metadatos Imagen LC08\_L1TP\_026047\_20200217\_20200225\_01\_T1

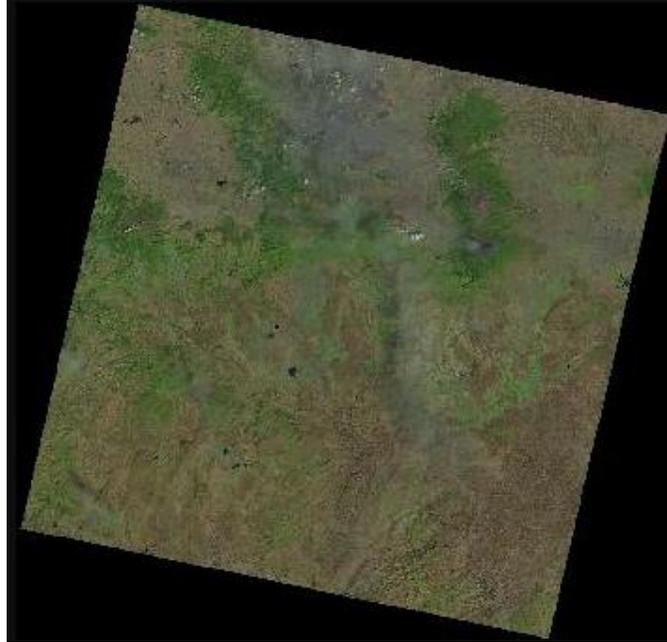


Figura 8. Imagen obtenida del sitio web *Earth Explorer*

Imagen 2. LC08\_L1TP\_026047\_20200710\_20200721\_01\_T1

|                      |                  |
|----------------------|------------------|
| Fecha                | 10-jul-20        |
| Inicio de toma (UTC) | 59:35.4          |
| Fin de toma (UTC)    | 00:07.2          |
| Latitud central      | 18 ° 47'14.39 "N |
| Longitud del centro  | 99 ° 06'32.11 "O |
| Lat de esquina UL    | 19 ° 49'56.46 "N |
| Esquina UL larga     | 99 ° 47'40.09 "O |
| UR esquina lat       | 19 ° 28'00.44 "N |

|                             |                   |
|-----------------------------|-------------------|
| UR Corner Long              | 98 ° 01'37.74 "O  |
| LL esquina lat              | 18 ° 05'56.54 "N  |
| LL esquina larga            | 100 ° 10'59,95 "O |
| LR esquina lat              | 17 ° 43'53.62 "N  |
| LR Corner Long              | 98 ° 26'03,91 "O  |
| Escena cubierta de<br>nubes | 4.56              |
| DATUM                       | WGS84             |
| Elipsoide                   | WGS84             |

Tabla 3. Metadatos Imagen LC08\_L1TP\_026047\_20200710\_20200721\_01\_T1

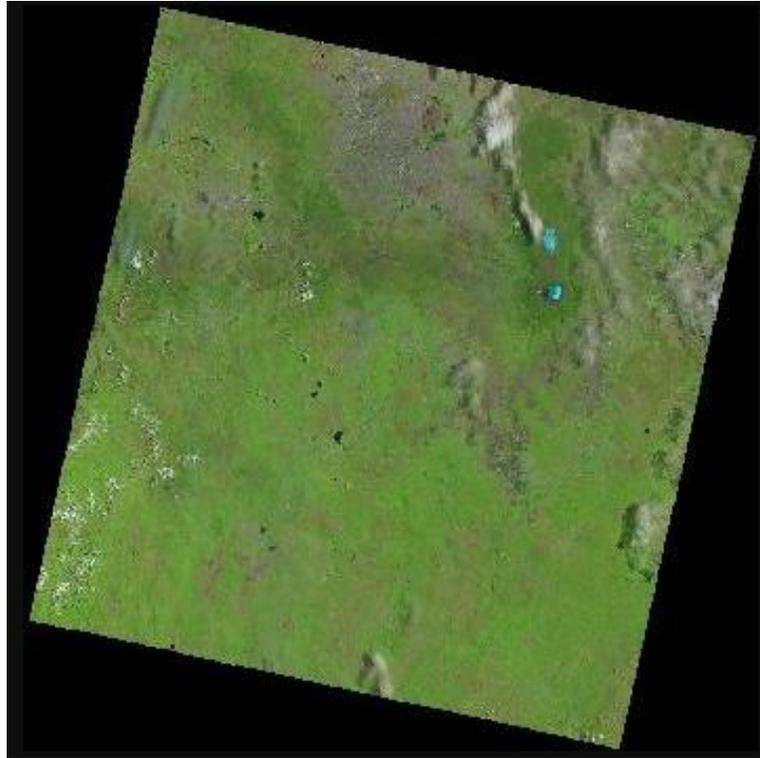


Figura 9. Imagen obtenida del sitio web *Earth Explorer*

### 3.4. Cálculo de la temperatura en la Ciudad de México y zona conurbada.

En este apartado se presentan tres diferentes métodos para obtener y calcular la temperatura de superficie en diferentes sitios de la Ciudad de México y zona conurbada.

#### **Método 1. Estaciones meteorológicas de la Ciudad de México**

Para este método, fueron recabados los datos puntuales de temperatura de la página “Calidad del aire” del Gobierno de la Ciudad de México para las fechas 17 de febrero y 10 de julio del 2020 de 38 estaciones meteorológicas a las 10:59 am. Estos datos son obtenidos del Sistema de Monitoreo Atmosférico, a través del subsistema REDMET, que está integrada con equipos continuos para la medición de las principales variables meteorológicas de superficie: temperatura, humedad relativa, radiación solar, etc.

Debido a que algunas estaciones no presentaron datos de temperatura para las fechas del paso del satélite sólo fueron seleccionadas veintitrés de ellas:

- Benito Juárez
- Ajusco Medio
- Chalco
- FES Acatlán
- Cuajimalpa
- Gustavo A. Madero

- Instituto de Investigaciones Nucleares
- Merced
- Montecillo
- Lab. de Análisis Ambiental
- Miguel Hidalgo
- Nezahualcóyotl
- Pedregal
- San Agustín
- Santa Fe
- Xalostoc
- Tláhuac
- Tlalnepantla
- UAM Xochimilco
- UAM Iztapalapa
- Villa de las Flores

Los datos puntuales obtenidos de las estaciones meteorológicas debieron someterse a un proceso de vectorización para así agregarlos a un sistema de información geográfica y poder ser comparados con la información obtenida de los otros dos métodos. Para esto se requirió realizar una tabla de atributos con las coordenadas de cada estación, misma que fue cargada como archivo .csv al software Qgis, donde fue exportado como formato .shp para obtener su representación espacial.

Gracias a la representación espacial de las temperaturas obtenidas de las 21 estaciones meteorológicas, es posible calcular por medio de la interpolación de Spline mapas de isotermas correspondientes a las fechas y horas de la toma de las imágenes satelitales.

La interpolación Spline es un método que estima valores a partir de una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, resultando en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada (ArcGis Pro, 2021). Mientras más puntos se especifiquen, mayor será la influencia entre los valores medios de la superficie resultante.

## Método 2. Algoritmo RS&GIS

Este plugin de libre acceso fue elaborado en lenguaje Python para la plataforma QGis, teniendo como propósito la salida de productos estándar a partir de datos de Landsat y LISSEn la Figura 10, se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento del plugin.

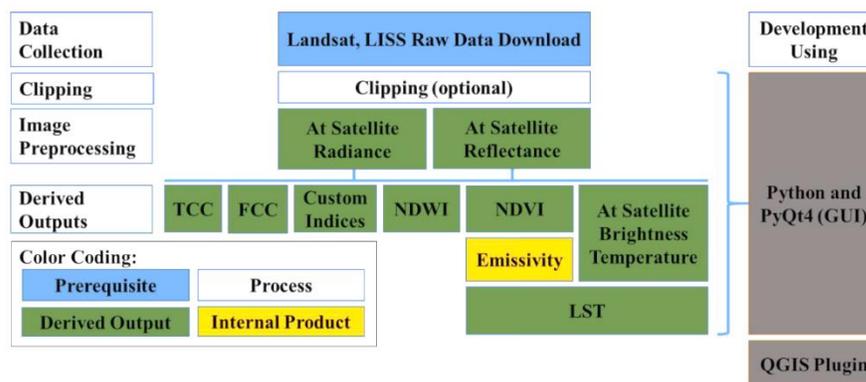


Figura 10. Diagrama de flujo del *plugin RS&Gis* (Prathamesh B. 2017)

Para iniciar con el proceso de obtención de la temperatura de superficie con el *plugin*, es necesario cargar las bandas en formato ráster o directamente seleccionando el archivo .zip que contiene las bandas. De ser necesario, es posible cargar un archivo vectorial que funcione como máscara para extraer o delimitar el área de estudio.

Una vez cargadas las bandas se debe seleccionar la ruta de salida en donde se indica que el producto será un ráster. Asimismo, es necesario indicar algunos parámetros respecto a la información a procesar. En este caso, fueron seleccionados los siguientes:

- Ignorar valores sin información.
- Para Landsat 8 se excluyen datos de nubosidad y cirrus + nubosidad

Mientras que para la salida extra derivada se seleccionó la opción:

- LST (Celsius)

Una vez seleccionados todos los parámetros se debe iniciar el proceso para la obtención del producto en formato ráster.

### **Método 3 Algoritmo S.W.**

El algoritmo Split Window combina en la misma ventana de transmisión atmosférica los datos obtenidos simultáneamente por dos canales espectrales que oscilan entre las 10 y 12 $\mu$ m (TIR). Jiménez M. J C, Sobrino J. A., Dražen S., Mattar C., Cristóbal J. (2014) mencionan que la base de esta técnica radica en que la absorción atmosférica que experimenta la radiancia emitida por la superficie terrestre es proporcional a la diferencia entre las radiancias de mediciones simultáneas en dos longitudes de onda diferentes.

Una vez descargadas las imágenes, fue necesario suprimir los valores nulos que se aprecian como el marco oscuro alrededor de ellas (figuras 3 y 4), para esto, fue utilizada la siguiente fórmula:

$$((\text{"Banda"} \geq 0) * \text{"Banda"}) / (((\text{"Banda"} > 0) * 1) + ((\text{"Banda"} \leq 0) * 0)) \quad (\text{A})$$

Para evitar errores en el cálculo de la temperatura, se realizó una extracción por el método de máscara de los niveles digitales correspondientes a nubes, por lo que primero fue necesario crear un archivo tipo vectorial que abarcara el área de interés y a partir de la herramienta "Clipper" en la sección "Ráster" colocar como archivo de entrada la banda correspondiente y como archivo de máscara el polígono. El resultado será el mismo ráster con las mismas propiedades, pero sin los valores seleccionados.

Para poder utilizar las imágenes anteriores, fue necesario realizar el cambio de los valores de niveles digitales a valores físicos de radiancia, por lo que se efectuó la siguiente operación con la fórmula de la “Radiancia espectral”:

$$I_i = ML * Q_{cal} + AL \quad (B)$$

Donde se ingresaron primero las imágenes en formato ráster al software libre QGIS, para después indicar en la calculadora ráster la ecuación con los valores del factor multiplicativo (ML) y el factor aditivo (AL) sustituidos por los valores correspondientes a las bandas dadas a conocer en el archivo de metadatos MTL (Figura 11).

```

QUANTIZE_CAL_MIN_BAND_11 = 1
END_GROUP = MIN_MAX_PIXEL_VALUE
GROUP = RADIOMETRIC_RESCALING
RADIANCE_MULT_BAND_1 = 1.2861E-02
RADIANCE_MULT_BAND_2 = 1.3169E-02
RADIANCE_MULT_BAND_3 = 1.2136E-02
RADIANCE_MULT_BAND_4 = 1.0233E-02
RADIANCE_MULT_BAND_5 = 6.2623E-03
RADIANCE_MULT_BAND_6 = 1.5574E-03
RADIANCE_MULT_BAND_7 = 5.2492E-04
RADIANCE_MULT_BAND_8 = 1.1581E-02
RADIANCE_MULT_BAND_9 = 2.4474E-03
RADIANCE_MULT_BAND_10 = 3.3420E-04
RADIANCE_MULT_BAND_11 = 3.3420E-04
RADIANCE_ADD_BAND_1 = -64.30304
RADIANCE_ADD_BAND_2 = -65.84710
RADIANCE_ADD_BAND_3 = -60.67754
RADIANCE_ADD_BAND_4 = -51.16672
RADIANCE_ADD_BAND_5 = -31.31148
RADIANCE_ADD_BAND_6 = -7.78688
RADIANCE_ADD_BAND_7 = -2.62460
RADIANCE_ADD_BAND_8 = -57.90665
RADIANCE_ADD_BAND_9 = -12.23724
RADIANCE_ADD_BAND_10 = 0.10000
RADIANCE_ADD_BAND_11 = 0.10000

```

Factor Multiplicativo (ML) ←

← Factor Aditivo (AL)

Figura 11. Factor multiplicativo y aditivo de la imagen LC08\_L1TP\_026047\_20200710\_20200721\_01\_T1

Este proceso se realizó para las bandas 10 y 11 de cada imagen como se muestra a continuación:

Imagen Febrero.

$$I_i = 3.3420E - 04 * B10 + 0.10000 \quad (\text{Para la banda 10})$$

$$I_i = 3.3420E - 04 * B10 + 0.10000 \quad (\text{Para la banda 11})$$

Imagen Julio.

$$l_i = 3.3420E - 04 * B10 + 0.10000 \quad (\text{Para la banda 10})$$

$$l_i = 3.3420E - 04 * B10 + 0.10000 \quad (\text{Para la banda 11})$$

Una vez obtenidas las imágenes con valores en radiancia, se procedió a realizar el cálculo de temperatura de brillo en el techo de la atmósfera (TOA) a partir de las siguientes ecuaciones para las bandas 10 y 11 respectivamente desde la calculadora ráster del software:

Banda 10

$$(1321.0789/(\ln((774.8853D/B10) + 1))) \quad (C)$$

Banda 11

$$(1201.1442/(\ln((480.8883/B11) + 1))) \quad (D)$$

Una vez calculada la temperatura de brillo, ya es posible calcular la temperatura de superficie de estas imágenes, para lo cual, se utilizará el algoritmo SW establecido por la siguiente ecuación:

$$LST = T_{10} + C_1(T_{10} - T_{11}) + C_2(T_{10} - T_{11})^2 + C_0 + (C_3 + C_4w)(1 - \epsilon) + (149 - 26w)\Delta\epsilon \quad (E)$$

Donde las constantes equivalen a:

- $C_0 = -0.268$
- $C_1 = 1.378$
- $C_2 = 0.183$
- $C_3 = 54.30$
- $C_4 = -2.238$
- $C_5 = -129.20$
- $C_6 = 16.40$

El valor del vapor de agua “w” contenido en la atmósfera se obtuvo a partir de la imagen .tiff de tipo punto flotante de la página de NeoNasa (Figura 12), donde se seleccionó el parámetro de vapor de agua promedio semanal, el satélite TERRA/MODIS y un tamaño de 1 grado o 360x180. Una vez descargadas las imágenes, fueron cargadas en el software QGis, en donde fue seleccionada la Ciudad de México con la herramienta “Información”, obteniendo así los valores  $1.06 \text{ g} * \text{cm}^{-2}$  para la imagen de febrero y  $1.63 \text{ g} * \text{cm}^{-2}$  para la imagen de julio.

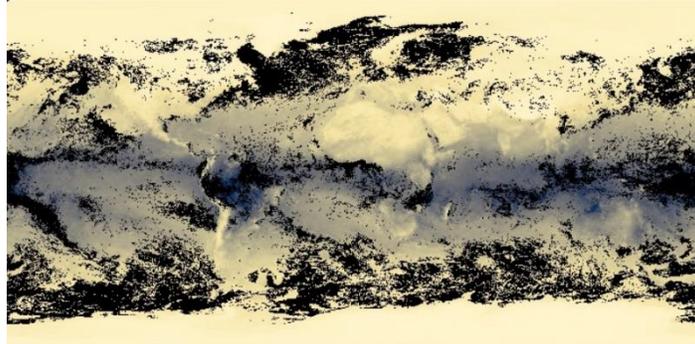


Figura 12. Imagen .tiff del vapor de agua del mes de julio 2020.

Por otro lado, los valores de emisividad "ε" y la diferencia de emisividad "Δε" fueron obtenidos a partir del artículo “Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method” (Xiaolei, Xulín, Zhaocong, 2014):

$$\epsilon = 0.5 * (\epsilon_i - \epsilon_j) \quad (F)$$

Donde la emisividad del suelo y vegetación para las bandas 10 y 11 ( $\epsilon_i - \epsilon_j$ ) de Landsat 8 TIRS equivale a:

| Banda | Suelo  | Vegetación |
|-------|--------|------------|
| 10    | 0.9668 | 0.9863     |
| 11    | 0.9747 | 0.9896     |

Tabla 4. Emisividad del suelo y vegetación para las bandas 10 y 11.

Por lo que:

$$\epsilon = 0.5(0.9668 - 0.9747)$$

$$\epsilon = -0.00395$$

Mientras que la diferencia de emisividades equivale a:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{11} \quad (G)$$

$$\Delta\varepsilon = (0.9668 - 0.9747)$$

$$\Delta\varepsilon = -0.0079$$

Cabe mencionar que los valores a utilizar serán las emisividades para suelo, por lo que al agregar estos valores a la ecuación (E) se obtiene la siguiente fórmula que será ingresada al software QGIS por medio de la calculadora ráster:

Para la imagen de Febrero:

$$B10+(1.378*(B10-B11))+ (0.183 * ((B10 - B11)^2))-0.268+((54.30+(-2.238*1.06))*(1-(0.00395)))+((-129.20+(16.40*1.06))*(-0.0079)) \quad (H)$$

Para la imagen de Julio:

$$B10+(1.378*(B10-B11))+ (0.183 * ((B10 - B11)^2))-0.268+((54.30+(-2.238*1.63))*(1-(0.00395)))+((-129.20+(16.40*1.63))*(-0.0079)) \quad (I)$$

Como resultado obtendremos una imagen ráster de la BOA en grados Kelvin, por lo que se debe restar en la calculadora ráster el valor de 273.15 para convertir la temperatura en grados kelvin a grados Celsius.

### 3.5 Análisis de resultados por el método ANOVA.

Para obtener la correlación de los datos obtenidos con mayor precisión se realizó un muestreo con 128 puntos aleatorios (Anexo 3), sustrayendo la temperatura por el método de interpolación “spline” que evalúa los valores utilizando una función matemática para minimizar la curvatura general de la superficie, dando como resultado una superficie suave que pasa exactamente por dichos puntos.

Al querer obtener una ecuación matemática, se planteó asignar un número a los meses en que se registró la temperatura, es decir, a febrero se le asignó el número 2, mientras que a Julio se le asignó el número 7. En cuanto a las metodologías, fueron agrupadas en un sólo rubro denominado “Fuente”, en donde se asignó el número 1 a la obtención de temperatura por estaciones meteorológicas, el número 2 a la obtención de temperatura por el *plugin RS&Gis* y el número 3 a

la obtención de temperatura por el algoritmo SW. De la misma manera los resultados de las metodologías fueron agrupados en un rubro llamado “temperatura”.

A partir de los resultados de la interpolación se calculó la tabla ANOVA con el software Minitab, definida por los siguientes criterios: SC, G de L, MS, Fo, Fa y p, además del factor

- Donde los rubros fuente, mes y ID fueron considerados como factores, así como la interacción ID vs Fuente (que fue agregada para linealizar la ecuación), mientras que la temperatura se consideró como la respuesta, matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$Y = f(x_1, x_2) = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_3x_1$$

Donde:  $x_3x_1 = x_4$

$$Y = f(x_1, x_2) = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4$$

- Suma de cuadrados (SC): La suma de cuadrados permite cuantificar la variabilidad de un conjunto de datos centrándonos en la diferencia entre cada punto de datos y la media de todos los puntos de datos del conjunto. Siendo definida por  $\sum_{i=1}^n x_1^2, x_2^2, x_3^2, \text{etc.}$
- Grados de libertad (G de L): Los grados de libertad indican el número de datos independientes utilizados para calcular cada suma de cuadrados. Definida por  $K - 1$ .
- Suma de cuadrados medios (CM): Para obtener la suma de los cuadrados medios se dividió cada suma de los cuadrados por los grados de libertad correspondientes.
- Razón F(Fo)

Para realizar el análisis de la tabla ANOVA, se plantearon las siguientes hipótesis:

- Hipótesis Nula  $H_0$ : Los factores no afectan a la temperatura.
- Hipótesis Alternativa  $H_1$ : Al menos un factor afecta a la temperatura.

El criterio de aceptación o rechazo de la hipótesis nula es que si  $F_o < F_\alpha$  o si  $p > \alpha$  entonces no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula. Si  $F_o > F_\alpha$  o si  $p < \alpha$  entonces se rechaza la hipótesis nula.

### 3.5.1 Coeficiente de correlación entre las temperaturas obtenidas.

Para obtener el coeficiente de correlación entre las temperaturas obtenidas a partir del *Plugin RS&Gis* y el *logaritmo SW* se utilizó el método de correlación de Pearson, en donde fue necesario calcular:

Media aritmética

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Varianza xy

$$\sigma_x^2 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2$$

Desviación típica xy

$$\sigma_x = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \bar{x}^2}$$

Covarianza xy

$$\sigma_{xy} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - (\bar{x} * \bar{y})$$

Coeficiente de correlación

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

## Capítulo IV Resultados y conclusiones

### Resultados

#### Resultados del método 1. Recuperación de datos de estaciones meteorológicas.

Para realizar el primer método, fueron seleccionadas las siguientes 21 estaciones meteorológicas ubicadas en la Ciudad de México y zona conurbada (Figura 13):

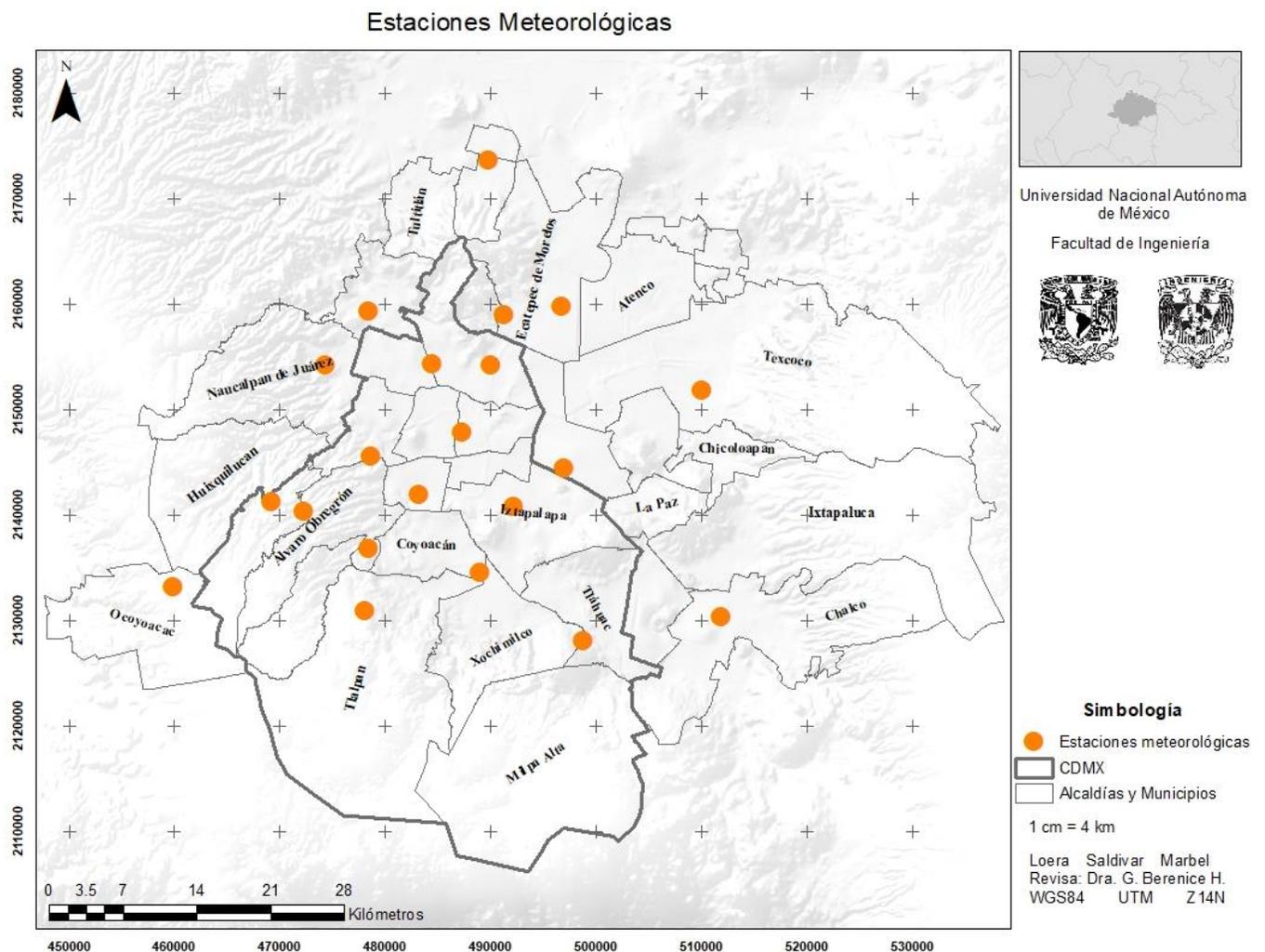


Figura 13. Mapa de las 21 estaciones meteorológicas utilizadas para el muestreo.

Respecto al mapa de isotermas correspondiente al día 17 de febrero de 2020 (Figura 14) se observa una mayor presencia de temperaturas entre los 17.1°C y 20°C en la zona de la Ciudad de México a

excepción de las Alcaldías Azcapotzalco, Miguel Hidalgo y Tlalpan, que muestran temperaturas mayores que oscilan entre los 20.1°C y 23°C, y Milpa Alta que presenta temperaturas más bajas que oscilan entre los 14.1°C y 17°C debido a la presencia del volcán Teuhtli. En cuanto al área conurbada, los municipios de Huixquilucan, La Paz, Nezahualcóyotl y Chimalhuacán presentan temperaturas que oscilan entre los 14.1°C y 17°C, mientras que las zonas industriales como Naucalpan de Juárez, Tlalnepantla de Baz (que cuenta con un relleno sanitario) y los municipios de Chiautla, Chiconcuac, Tezoyuca y gran parte de Texcoco, Ixtapaluca y Chalco presentan una temperatura que oscila entre los 20.1°C y 23°C, siendo el territorio restante de Texcoco e Ixtapaluca las zonas con mayor temperatura, oscilando entre los 23.1°C y 26°C.

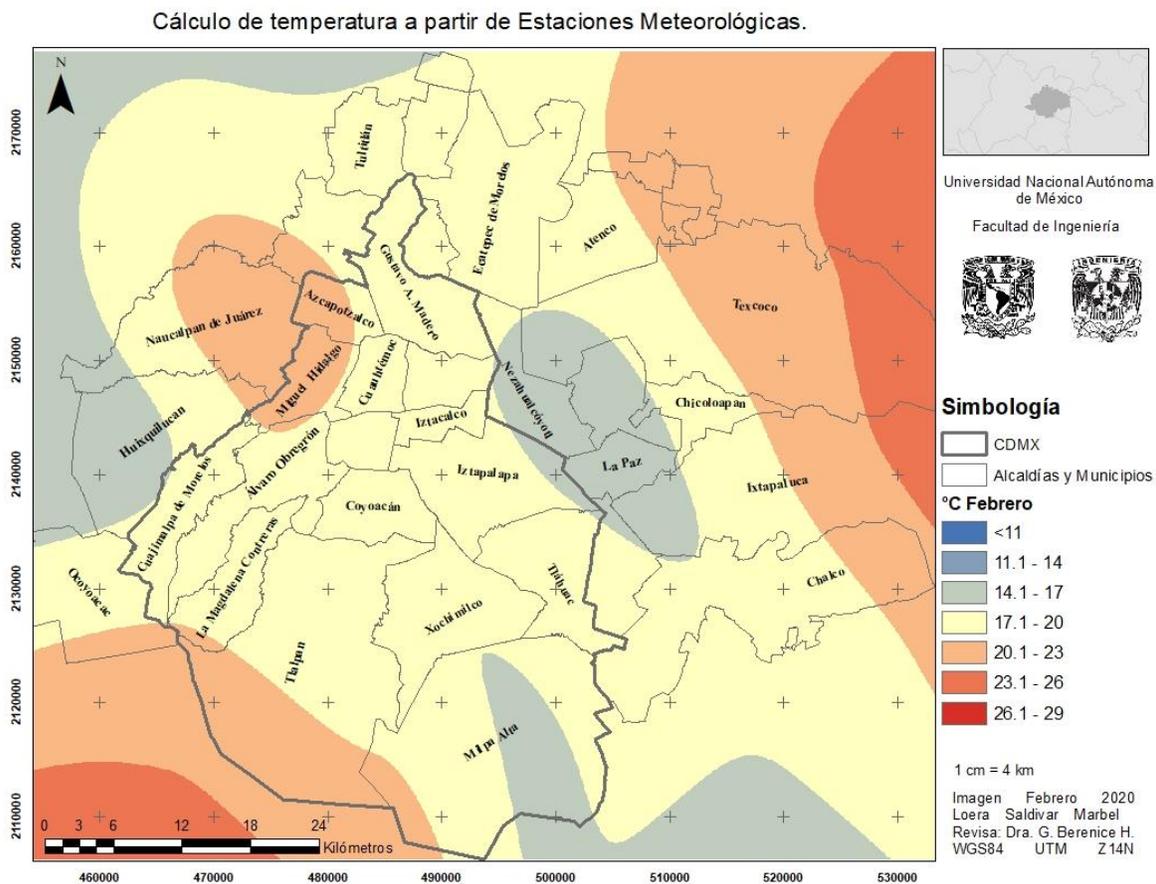


Figura 14. Mapa de isotermas calculado con los datos puntuales de las 21 estaciones meteorológicas en febrero del 2020.

En cuanto al mapa de isotermas del día 10 de julio de 2020 (Figura 15) se puede inferir que las alcaldías ubicadas en el sur y poniente de la Ciudad de México como Cuajimalpa de Morelos, gran parte de Tlalpan, Álvaro Obregón Xochimilco y Milpa Alta presentan temperaturas que oscilan entre los 14.1°C y 17°C, relacionadas con las zonas con mayor vegetación más la humedad generada por la precipitación ocurrida en esa época del año, al contrario de las alcaldías céntricas como

Cuauhtémoc, Benito Juárez, Coyoacán e Iztapalapa presentan temperaturas que oscilan entre los 20.1°C y 23°C debido a la alta presencia de urbanización, además de la falta de vegetación y cuerpos de agua, las alcaldías Miguel Hidalgo y Azcapotzalco también se encuentran dentro de éstas temperaturas. Las alcaldías restantes presentan temperaturas que oscilan entre los 17.1°C y 20°C.

En cuanto al área conurbada los municipios de Huixquilucan, Ocoyoacac y la Paz presentan las temperaturas más bajas oscilando entre los 14.1°C y 17°C, mientras que municipios como Naucalpan, Atenco, Chalco y gran parte de Ixtapaluca y Texcoco se presentan temperaturas que oscilan entre los 20.1°C y 23°C. En las Alcaldías Tezoyuca, Chiconcuac, Chiautla, Ixtapaluca y parte del territorio de las alcaldías Texcoco, Atenco y Ecatepec presentan una temperatura que oscila entre los 23.1°C y 26°C. En cuanto al territorio faltante del área conurbada presenta temperaturas que oscilan entre los 17.1°C y 20°C.

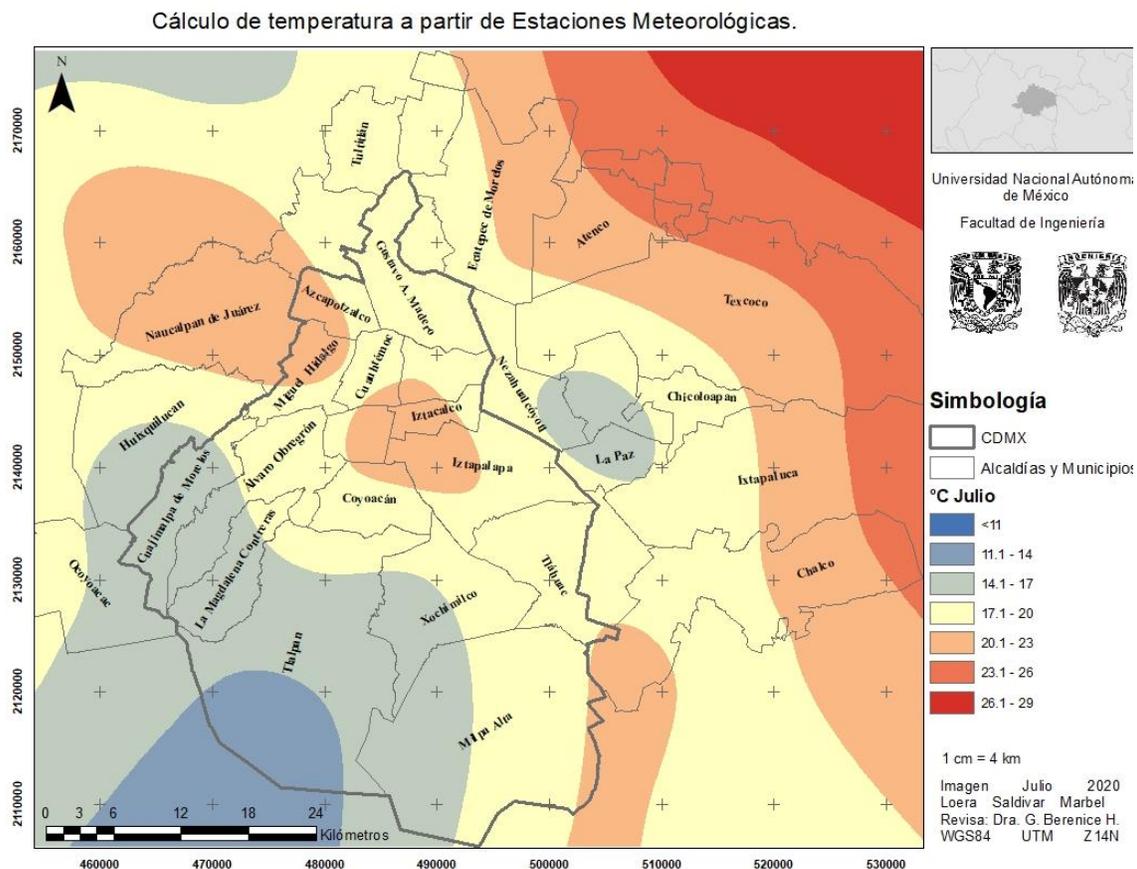


Figura 15. Mapa de isotermas calculado con los datos puntuales de las 21 estaciones meteorológicas en julio del 2020.

Entre los mapas de isotermas del 17 de febrero y 10 de julio se puede apreciar que en este último se presentan temperaturas mayores en comparación al mapa de isotermas del 17 de febrero en la zona centro de la Ciudad de México y la zona oriente del área conurbada.

## Resultados método 2. *Plugin RS&Gis.*

Gracias al *plugin RS&Gis* se obtuvieron los siguientes mapas en donde fue calculada la temperatura a partir de las dos imágenes satelitales descargadas.

Del mapa del 17 de febrero de 2020 (Figura 16) se infiere que la temperatura promedio tanto de la Ciudad de México como del área conurbada oscila entre los 25.1°C y 30°C. En la zona sur y oriente de la ciudad, se pueden apreciar temperaturas más bajas, oscilando entre los 15.1°C y 25°C, a excepción de las alcaldías Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y una pequeña parte del territorio de Tlalpan que registraron temperaturas oscilantes entre los 10.1°C y 15°C. Las alcaldías que presentaron temperatura entre los 30.1°C y 35°C fueron Tláhuac, Milpa Alta, Cuauhtémoc, Venustiano Carranza, Iztapalapa y Azcapotzalco. La zona con presencia de temperaturas mayores a 35.1°C es Tláhuac.

En cuanto a la zona conurbada, los municipios como Huixquilucan, Ocoyoacac y algunas zonas del territorio de Chalco, Ixtapaluca y Texcoco presentan temperaturas bajas, que oscilan entre los 15.1°C y 25°C. Siendo Ocoyoacac, Ixtapaluca y Texcoco los municipios con zonas en donde la temperatura osciló entre los 10.1°C y 15°C.

Cálculo de temperatura de la Ciudad de México y área conurbada con el *plugin RS&Gis*.

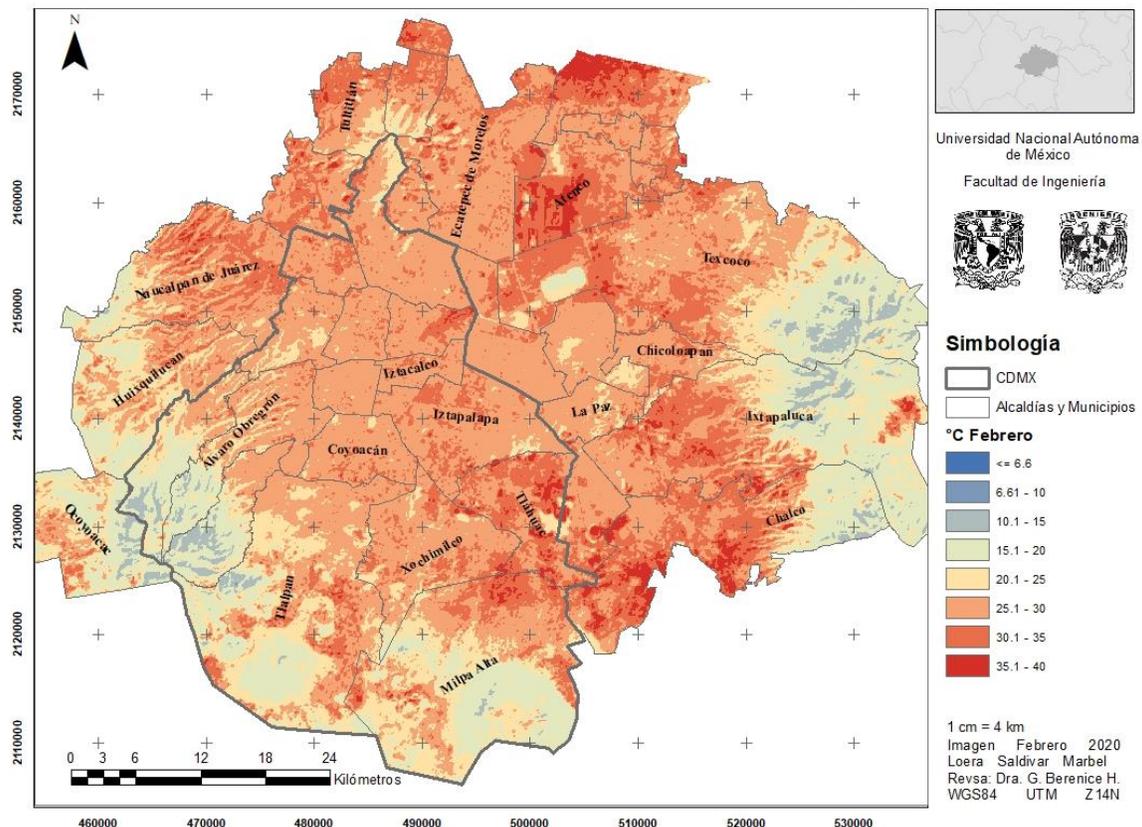


Figura 16. Mapa de temperatura obtenido con el *Plugin RS&Gis* en febrero del 2020.

Del mapa del 10 de julio de 2020 (Fig.17) se infiere que la temperatura de la zona sur, poniente y oriente de la zona de estudio es más baja, oscilando principalmente entre los 20.1°C y 25°C. En donde alcaldías como Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras registran temperaturas entre los 10.1°C y 15°C. Además de los municipios como Chalco, Ixtapaluca y Texcoco que presentan temperaturas menores a 6.6°C.

Las temperaturas más altas registradas en la Ciudad de México que oscilan entre los 35.1°C y 40°C pertenecen a algunas zonas del territorio de las alcaldías Tláhuac, Iztapalapa, Venustiano Carranza y Azcapotzalco. También se puede observar que las alcaldías céntricas como Cuauhtémoc, Benito Juárez y Coyoacán mantienen una temperatura promedio entre todo su territorio de entre 25.1°C y 30°C.

Cálculo de temperatura de la Ciudad de México y área conurbada con el plugin RS&Gis.

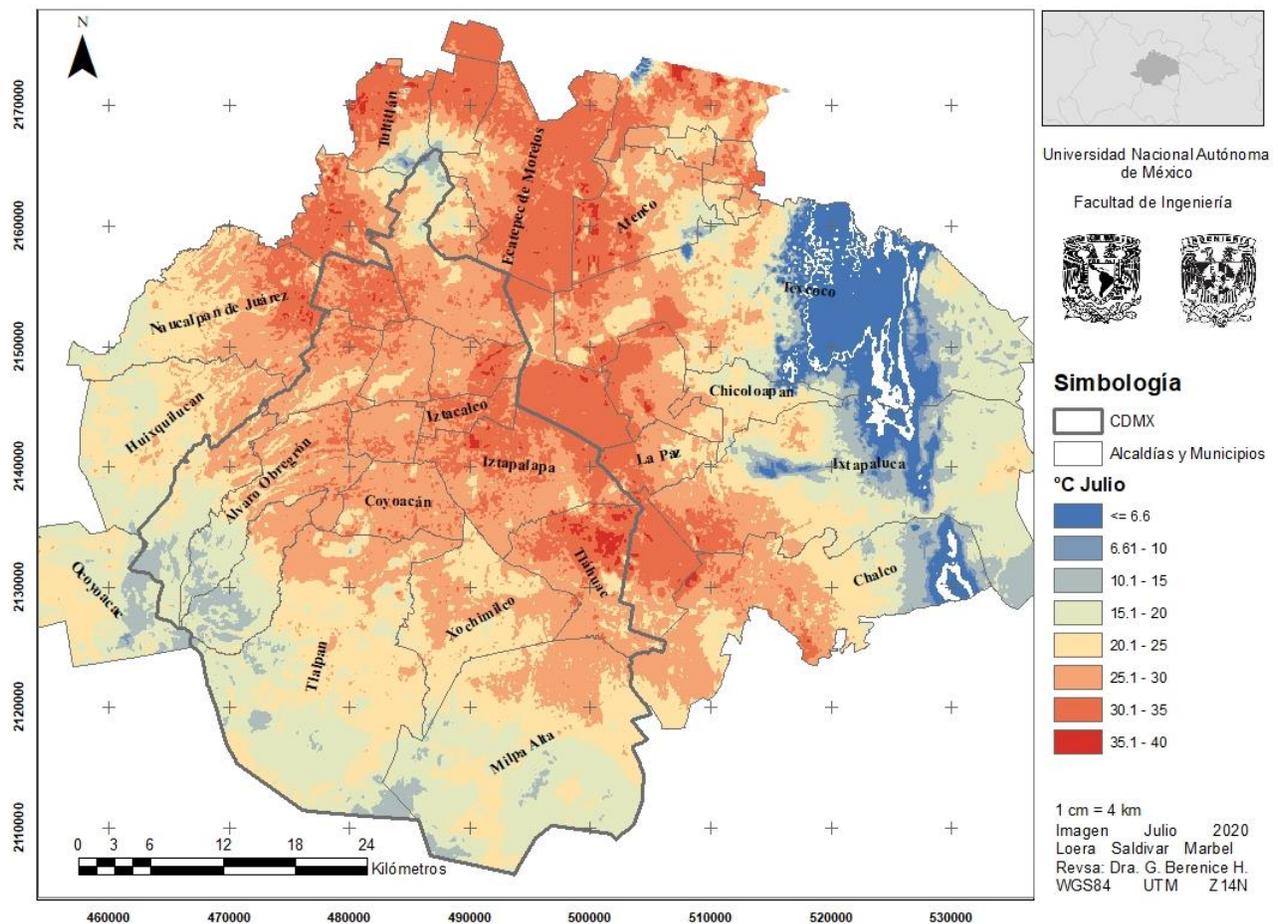


Figura 17. Mapa de temperatura obtenido con el *Plugin RS&Gis* en julio del 2020.

En ambos mapas se observa que las bajas temperaturas prevalecen en la zona sur y oriente de la zona de estudio, mientras que las zonas con mayores temperaturas se concentran en el centro y norte de esta. Las alcaldías con mayor temperatura registradas en ambas fechas son Tláhuac, Milpa Alta y Venustiano Carranza. Siendo Cuauhtémoc, Coyoacán y Benito Juárez las alcaldías que no tuvieron un gran cambio de temperatura, ya que siguen oscilando entre los 25.1°C y 30°C.

### Resultados método 3. Algoritmo SW.

Como resultado del cálculo de radiancia se obtuvieron las siguientes imágenes:

Imagen 1. Febrero

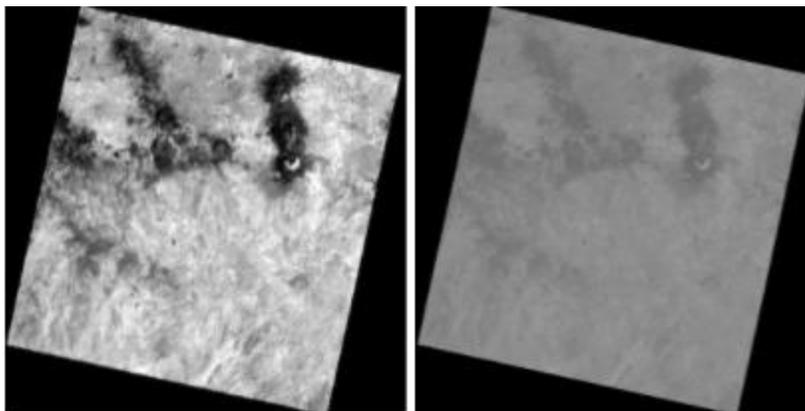


Figura 18. Se muestra la banda 10 original a la derecha, mientras que a la izquierda se muestra la banda 10 en valores de radiancia.

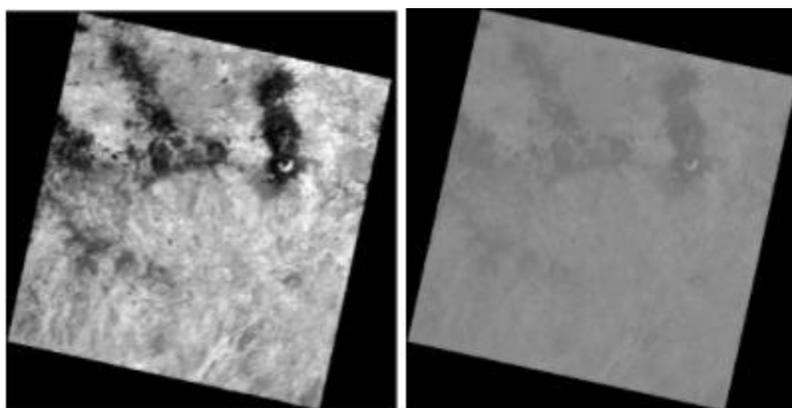


Figura 19. Se muestra la banda 11 original a la derecha, mientras que a la izquierda se muestra la banda 10 en valores de radiancia.

Imagen 2. Julio

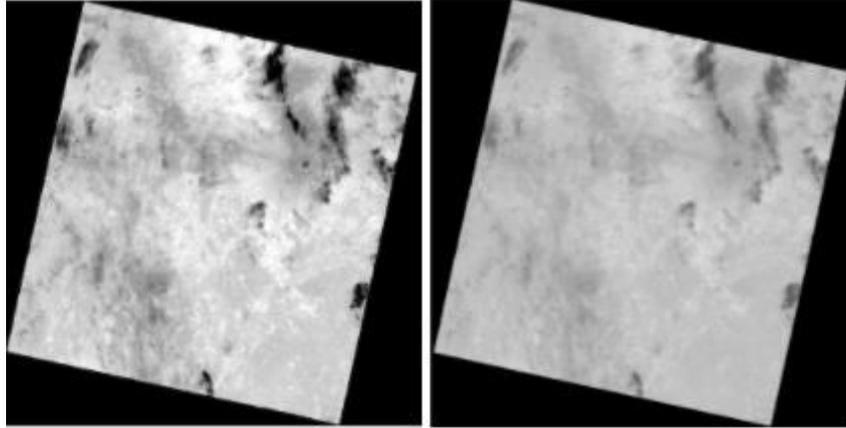


Figura 20. Se muestra la banda 10 original a la derecha, mientras que a la izquierda se muestra la banda 10 en valores de radiancia.

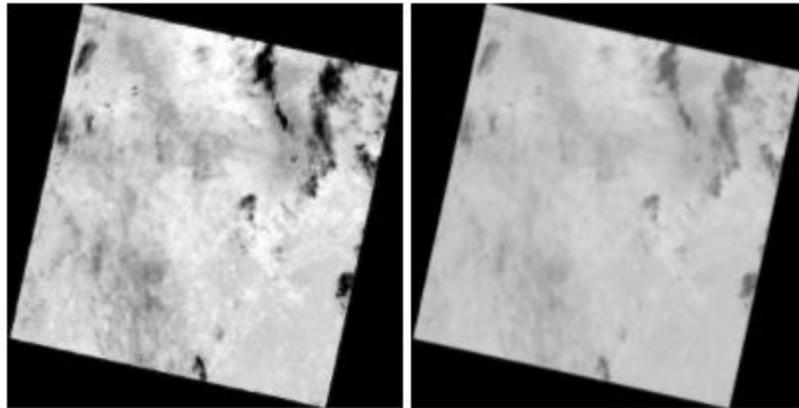


Figura 21. Se muestra la banda 10 original a la derecha, mientras que a la izquierda se muestra la banda 10 en valores de radiancia.

A partir de las bandas anteriores se calculó la temperatura con el algoritmo SW, obteniendo los siguientes resultados:

Imagen 1. Febrero

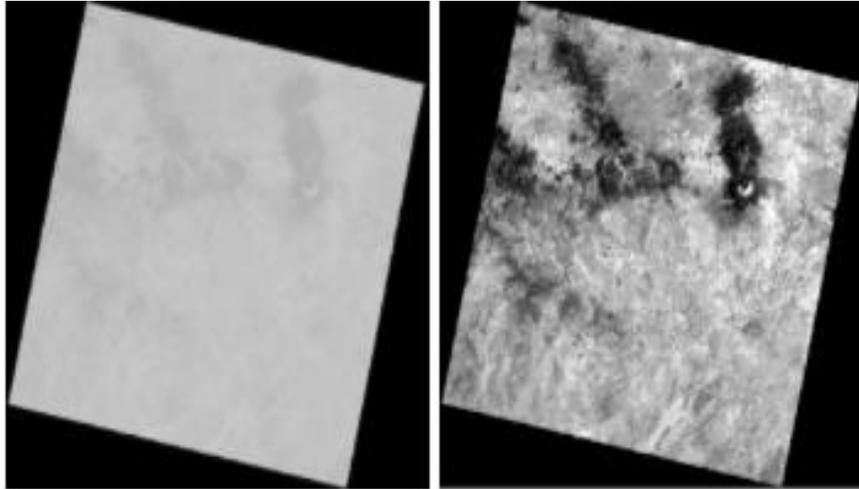


Figura 22. Temperatura en ambiente de las bandas 10 y 11 respectivamente.

Imagen 2. Julio

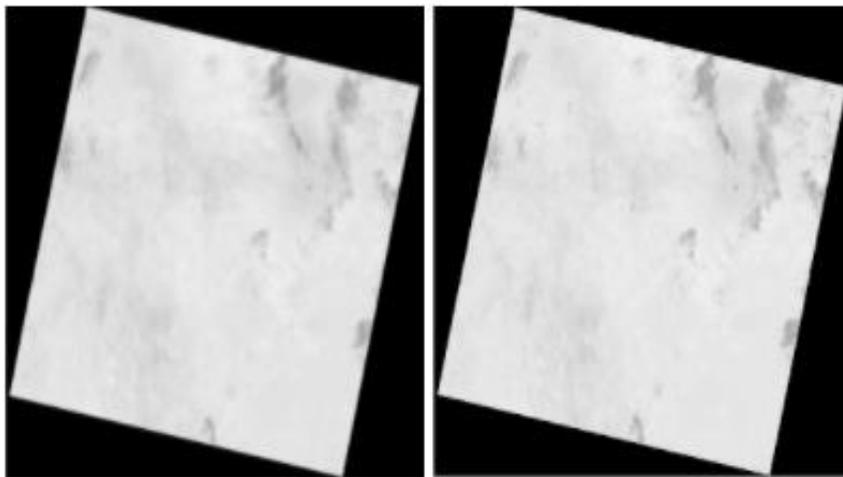


Figura 23. Temperatura en ambiente de las bandas 10 y 11 respectivamente.

Una vez obtenida la temperatura en grados Kelvin, se calculó la temperatura de brillo (LST) para ambas imágenes como se muestra a continuación:

Imagen 1. Febrero

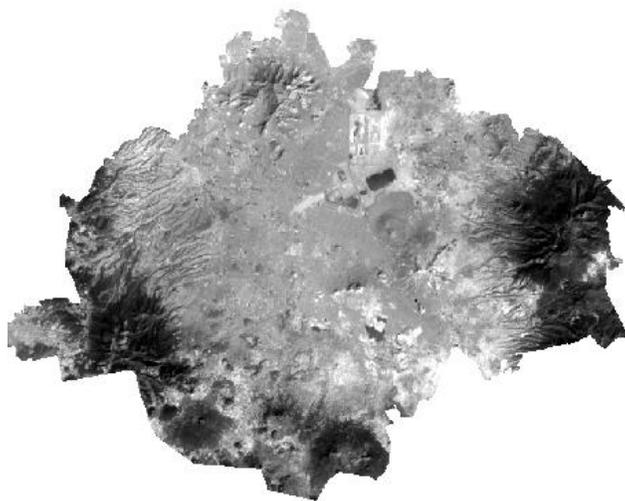


Figura 24. Cálculo de temperatura LST para la imagen de febrero.

Imagen 2. Julio

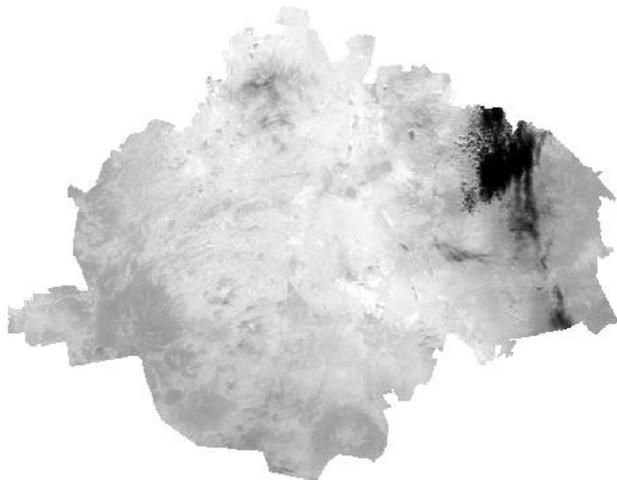


Figura 25. Cálculo de temperatura LST para la imagen de julio.

Para obtener el resultado final, se convirtió la temperatura de grados Kelvin a grados Celsius, obteniendo así los siguientes mapas (Figuras 26 y 27), de los cuales se puede inferir que en el mapa del 17 de febrero de 2020 (Figura 26) la temperatura que más prevalece en la zona de estudio oscila entre los 25.1°C y 30°C, las alcaldías y municipios de zonas sur, poniente y oriente como Cuajimalpa de Morelos, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Huixquilucan de Juárez, Ocoyoacac, y partes

del territorio de Texcoco, Ixtapaluca y Chalco presentan temperaturas más bajas oscilando entre los 20.1°C y 25°C. Las alcaldías que presentan áreas con temperaturas mayores oscilando entre los 35.1°C y 40°C son Tláhuac, Milpa Alta, Venustiano Carranza, Iztapalapa y Azcapotzalco, mientras que los municipios que comparten las mismas temperaturas son Valle de Chalco, Naucalpan, Atenco, Ecatepec, Tlalnepantla de Baz y partes del territorio de Chalco, Ixtapaluca y Texcoco.

Cálculo de temperatura con el algoritmo SW en la Ciudad de México y área conurbada.

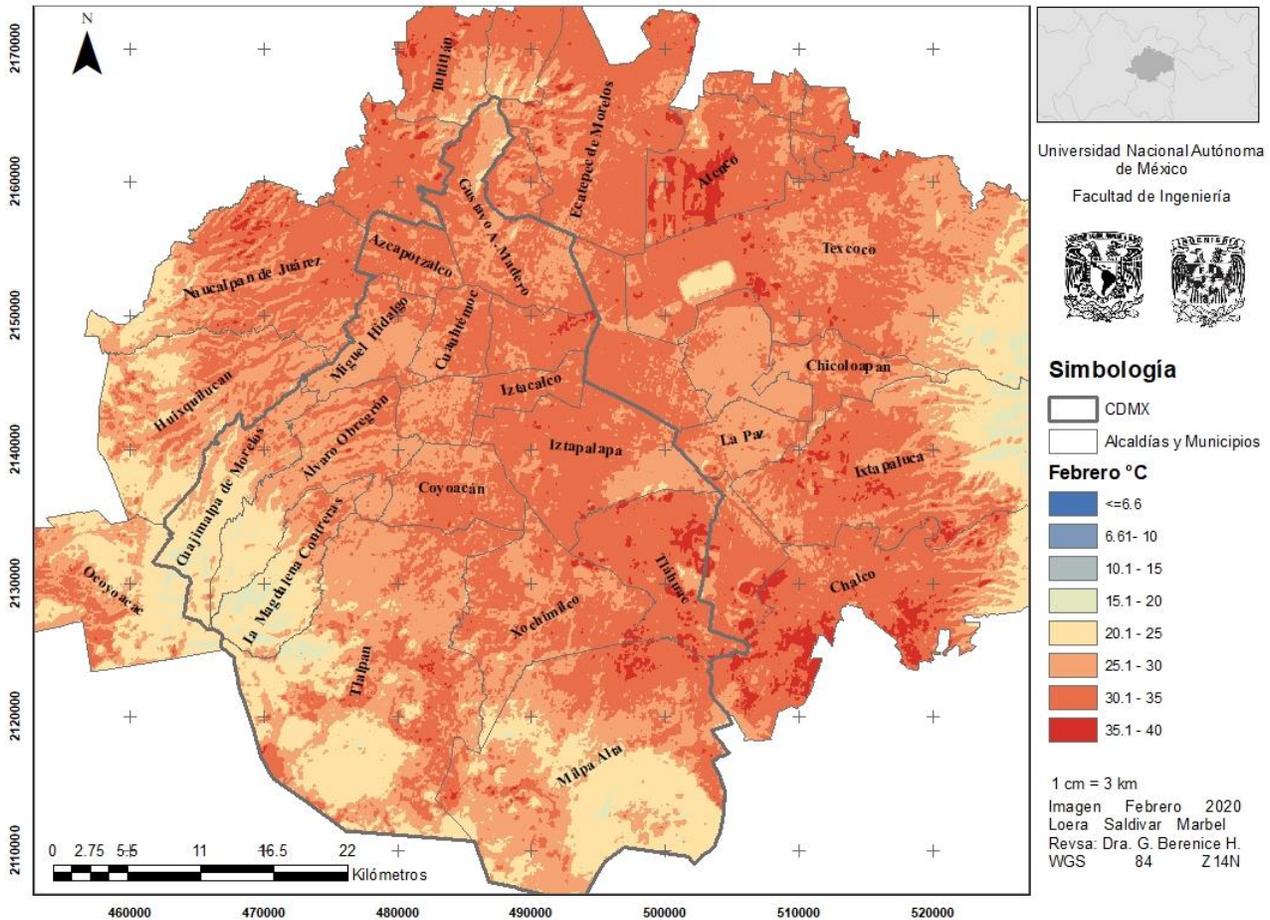


Figura 26. Mapa de temperatura obtenido con el algoritmo SW en febrero del 2020.

En el mapa del 10 de julio de 2020 (Figura 27) podemos observar que nuevamente las alcaldías ubicadas en el sur, poniente y oriente del área de estudio presentan temperaturas más bajas oscilando principalmente entre los 20.1°C y 25°C. a excepción de algunas zonas los municipios de Texcoco, Ixtapaluca y Chalco, que presentan temperaturas menores a los 6.6°C. Las alcaldías que presentan territorio con temperaturas oscilantes entre los 35.1°C y 40°C son Tláhuac, Iztapalapa, Venustiano Carranza y Azcapotzalco, mientras que los municipios con temperaturas similares son Atenco,

Nezahualcóyotl, Ecatepec de Morelos, Tultitlán, Tlalnepantla de Baz, Chimalhuacán, Valle de Chalco y parte del territorio de Texcoco y Naucalpan de Juárez.

Cálculo de temperatura con el algoritmo SW en la Ciudad de México y área conurbada.

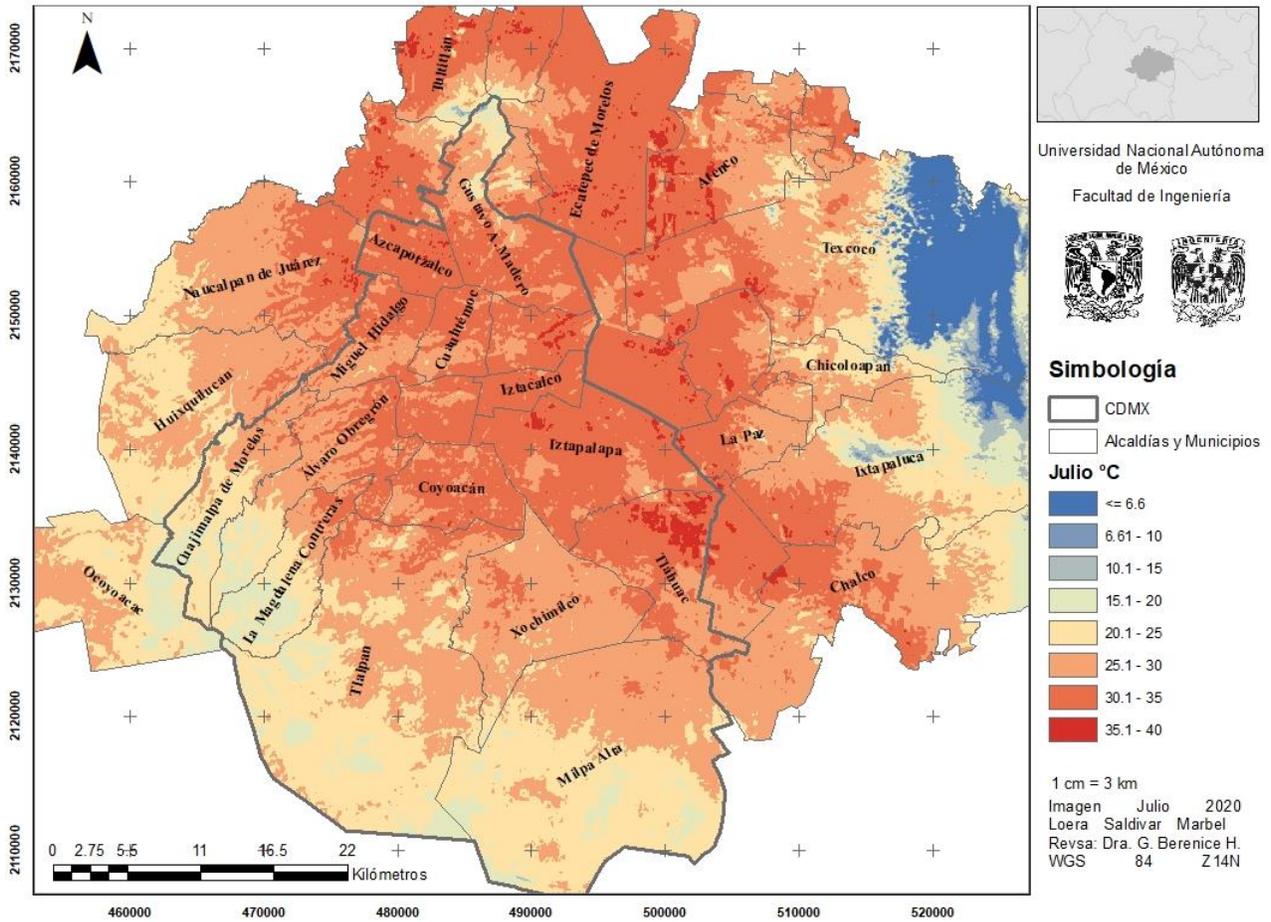


Figura 27. Mapa de temperatura obtenido con el Algoritmo SW en julio del 2020.

Entre ambos mapas se puede observar que en algunas zonas del sur y oriente de la zona de estudio se mantienen las temperaturas bajas, mientras que al centro y norte aumenta la temperatura en el mes de julio.

En la siguiente tabla y en la Figura 28, se muestra la comparación de temperaturas obtenidas con las 3 metodologías anteriores en las 21 estaciones meteorológicas:

| ID | Estaciones meteorológicas  | Estaciones Meteorológicas °C |       | Plugin °C |       | Algoritmo SW °C |       |
|----|----------------------------|------------------------------|-------|-----------|-------|-----------------|-------|
|    |                            | Febrero                      | Julio | Febrero   | Julio | Febrero         | Julio |
| 1  | Montecillo                 | 18.8                         | 19.4  | 30.65     | 26.08 | 32.55           | 28.75 |
| 2  | Chalco                     | 17.2                         | 18.9  | 28.7      | 29.25 | 29.86           | 31.32 |
| 3  | Cuajimalpa                 | 18.1                         | 16.5  | 27.38     | 26.44 | 29.73           | 28.74 |
| 4  | FES Acatlán                | 21.4                         | 22.2  | 26.76     | 26.07 | 30.70           | 30.14 |
| 5  | Merced                     | 18.8                         | 20    | 28.73     | 27.63 | 30.42           | 29.48 |
| 6  | Nezahualcóyotl             | 16.5                         | 17.8  | 28.61     | 30.11 | 31.43           | 32.43 |
| 7  | Pedregal                   | 18.4                         | 18.9  | 27.57     | 29.29 | 29.35           | 29.94 |
| 8  | San Agustín                | 18.3                         | 20.2  | 28.93     | 32.66 | 30.40           | 33.70 |
| 9  | Santa Fe                   | 19.1                         | 17.3  | 32.99     | 28.88 | 33.28           | 30.50 |
| 10 | Tláhuac                    | 17.7                         | 19.1  | 29.84     | 29.28 | 31.16           | 31.49 |
| 11 | Tlalnepantla               | 20.1                         | 19.8  | 30.11     | 31.62 | 31.58           | 32.85 |
| 12 | UAM Xochimilco             | 17.6                         | 18.5  | 28.92     | 28.98 | 30.23           | 29.47 |
| 13 | UAM Iztapalapa             | 19                           | 20.5  | 28.4      | 29.62 | 30.63           | 31.99 |
| 14 | Villa de las Flores        | 17.5                         | 19.2  | 31.03     | 33.52 | 32.23           | 33.98 |
| 15 | Xalostoc                   | 18.7                         | 19.4  | 31.26     | 33.90 | 31.01           | 33.44 |
| 16 | Miguel Hidalgo             | 20.1                         | 19.7  | 30.08     | 29.14 | 31.51           | 31.37 |
| 17 | Ajusco Medio               | 18.4                         | 17    | 27.71     | 27.73 | 30.13           | 31.97 |
| 18 | Benito Juárez              | 18.7                         | 20.2  | 31.44     | 30.95 | 33.86           | 32.39 |
| 19 | Investigaciones Nucleares  | 17.7                         | 16.7  | 22.49     | 19.83 | 30.06           | 27.36 |
| 20 | Gustavo A. Madero          | 18.6                         | 19.9  | 27.82     | 27.27 | 30.44           | 30.89 |
| 21 | Laboratorio de Análisis A. | 19.5                         | 19.6  | 29.39     | 31.08 | 29.52           | 31.44 |

Tabla 5. Comparación de temperaturas obtenidas por los tres métodos de estudio.

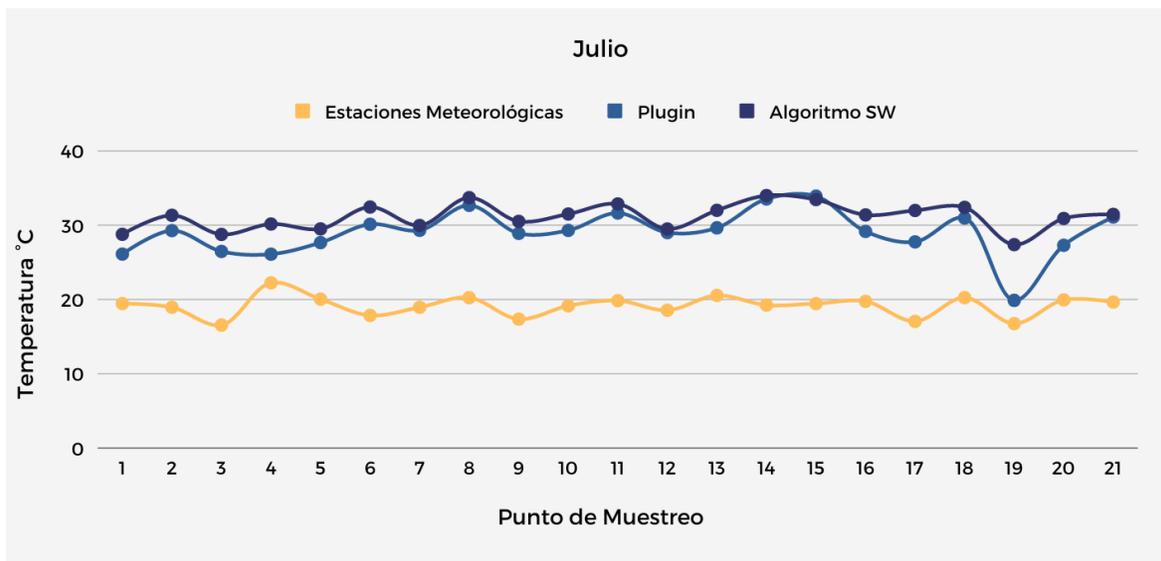
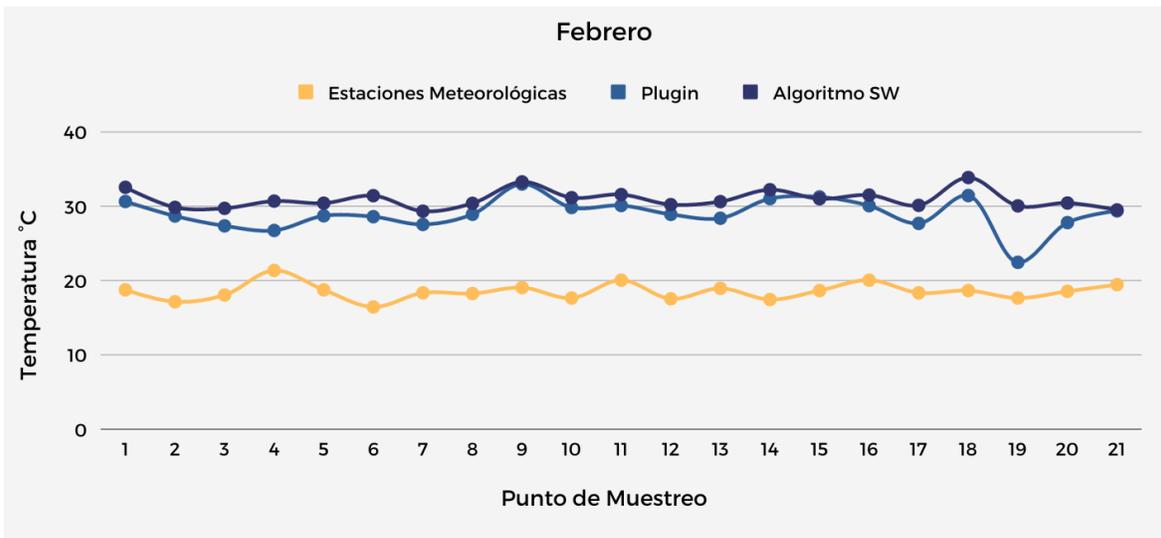


Figura 28. Gráficas de correlación entre métodos.

En las gráficas anteriores (Figura 28) se puede observar que existe una correlación significativa entre las temperaturas obtenidas con el *plugin RS&Gis* y el *algoritmo SW*. Para tener una mayor certeza de los datos, se realizó la tabla ANOVA obteniendo los siguientes resultados:

| Factor     | SS    | G de L | MS     | Fo      | Fa     | p         |
|------------|-------|--------|--------|---------|--------|-----------|
| Fuente     | 13588 | 2      | 6794   | 453.019 | 3.0212 | 2.545E-98 |
| ID         | 7550  | 176    | 42.898 | 2.860   | 1.234  | 2.821E-17 |
| Mes        | 1528  | 1      | 1528   | 101.886 | 3.868  | 3.194E-21 |
| IDvsFuente | 13044 | 352    | 37.057 | 2.471   | 1.192  | 3.218E-17 |
| Error      | 5309  | 5309   | 354    | 1       | 1.191  | 0.5       |
| Ajuste     | 2183  | 177    | 12.333 | 0.822   | 1.234  | 0.92908   |
| Error Puro | 3126  | 177    | 17.661 | 1.178   | 1.233  | 0.10028   |
| Total      | 45906 | 1061   |        |         |        |           |

Tabla 6. Tabla ANOVA.

En este caso se puede apreciar que los factores que afectan a la temperatura son ID, Fuente, Mes y la Interacción ID vs Fuente.

De acuerdo con el intervalo de confianza obtenido de la regresión múltiple, se puede inferir que al factor ID presenta como intervalo de confianza  $-0.0259 \leq ID \leq 0.0067$  por lo que puede considerarse como cero, lo cual elimina a ID como Factor y también a la interacción ID vs Fuente, de tal manera que la ecuación de correlación podría formularse como:

$$\text{Temperatura} = 19.81 + 1.5993 * \text{Fuente} - 0.6529 * \text{Mes} + 0.3868 * \text{Fuente} * \text{Mes}$$

Es decir:

$$\text{Temperatura} = 19.81 + 1.5993x - 0.6529y + 0.386xy$$

Por lo anterior se puede apreciar que la temperatura depende de la fuente y del mes. Siendo que en Julio se presentan temperaturas más altas en comparación del mes de febrero en ciertas zonas de la Ciudad de México y área conurbada.

En cuanto al cálculo de la correlación entre las temperaturas obtenidas por el *plugin RS&Gis* y el *algoritmo SW* se obtuvieron los siguientes resultados:

|                            | <b>Febrero</b> | <b>Julio</b> |
|----------------------------|----------------|--------------|
| <b>Media X</b>             | 26.929628      | 23.78404786  |
| <b>Media Y</b>             | 29.23680899    | 27.08747648  |
| <b>Varianza X</b>          | 22.6821856     | 78.73594096  |
| <b>Varianza Y</b>          | 12.9953983     | 45.42283361  |
| <b>Desviacion tipica X</b> | 4.76258182     | 8.873327502  |
| <b>Desviacion tipica Y</b> | 3.604913078    | 6.739646401  |
| <b>Covarianza XY</b>       | 17.12509751    | 59.12232981  |
| <b>Coef.Correlacion</b>    | 0.997460728    | 0.988616642  |

Tabla 7. Cálculo de correlación entre el método del plugin y el algoritmo SW.

Al presentar coeficientes cercanos a 1 se puede asumir que existe una correlación entre ambos métodos, es decir su comportamiento es muy similar.

## Conclusiones.

En la presente tesis se implementaron tres diferentes metodologías para la obtención de la temperatura de superficie en la Ciudad de México y área conurbada, llegando a las siguientes conclusiones:

Se determinó mediante el análisis de correlación que el *plugin* y el algoritmo SW tienen una relación fuerte en su comportamiento, infiriendo que el *plugin RS&Gis* es una herramienta válida y confiable para la detección de temperatura de superficie, mencionando que este último tiene mayor grado de asertividad debido a que efectúa una clasificación de las imágenes satelitales para calcular la emisividad (NDVI). Su precisión de la clasificación tiene un impacto directo en el cálculo de la LST ya que en el algoritmo Split Window es usado el mismo valor de emisividad de suelo para toda la zona de estudio.

Se debe mencionar que los resultados de la temperatura de las estaciones meteorológicas y las técnicas de percepción remota tendrán una variación significativa debido a que las estaciones detectan esta magnitud física a nivel atmosférico, mientras que los sensores captan longitudes de onda. En este caso, es observable que a pesar de existir esta diferencia de grados Celsius entre métodos, todos presentan un comportamiento similar.

A partir del procesamiento de las imágenes obtenidas de febrero y julio, se observa en los resultados obtenidos del *algoritmo SW* y *plugin RS&Gis* que hay ciertas zonas de la Ciudad de México y área conurbada que presentan mayores temperaturas en el mes de julio en comparación al mes de febrero. Algunas de estas zonas cuentan con mayor población y desarrollo urbano, como son Chalco, Nezahualcóyotl, Ecatepec, Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Coacalco de Berriozábal, Tlalnepantla de Baz, etc. Como se muestra en los mapas de resultantes, la mayoría de las Alcaldías o Municipios que presentan este aumento de temperatura asociado con la temporada de verano se ubican al norte y centro de la Ciudad de México.

En el caso de otras alcaldías y municipios que presentan este fenómeno del aumento de temperatura y que no cuentan con un número considerable de habitantes o desarrollo urbano, deben analizar otros factores como las actividades económicas, como es el caso de Tláhuac, que al este de su territorio se efectúan actividades agrícolas, como la siembra de maíz y hortalizas, que contribuyen a la liberación y concentración de gases de efecto invernadero, ocasionando una mayor retención del calor.

Debido a los resultados anteriores, se puede inferir que el uso de técnicas de percepción remota podría reducir costos y agilizar los estudios sobre la detección de islas calor, ya que se puede ver reflejado el aumento de temperatura entre una estación y otra. Es esencial que a futuro se considere su implementación, debido al calentamiento global, que a corto plazo puede traer consecuencias en

la vida humana a través del desarrollo de enfermedades causadas por virus y bacterias como el paludismo o dengue, así mismo, se puede acelerar la pérdida de las especies de flora y fauna debido al deterioro del ecosistema.

Se espera que alguna dependencia implemente el uso del *plugin RS&Gis* o alguna técnica de percepción remota de manera continua para el monitoreo del fenómeno de islas de calor a nivel nacional y así concientizar a la población del riesgo inminente de la urbanización descontrolada.

## Referencias Consultadas

ArcGis Pro (2021) Cómo funciona Spline. Recuperado de: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm#:~:text=La%20herramienta%20Spline%20utiliza%20un,por%20los%20puntos%20de%20entrada.>

Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23, 1–26.

Butler, M.J.A.; Mouchot, M.C.; Barale, V.; LeBlanc C.(1990) “Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas: manual introductorio”. FAO Documento Técnico de Pesca. No. 295. Roma, FAO. 212 p. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/t0355s/T0355S00.HTM#toc>

Calidad del Aire de la Ciudad de México. Recuperado de: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27ZA==>

Calles A. P.(2019) “Seguridad ocular de la iluminación mediante luz en el espectro visible e invisible” .Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/232122918.pdf>

Camara S. A. (2005) Método contextual para fusión de datos” Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/437/camarasanchez.pdf?sequence=14>

Catuna R., N. (1995). “La percepción remota y el análisis del espacio geográfico”. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía,. Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/70766>

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial. “Percepción Remota” <https://www.centrogeo.org.mx/investigacion/area-05>

Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425709000169>

Chuvieco, E., 1990. Fundamentos de Teledetección Espacial. 2ª Edición, Ediciones RIALP, S.A., Madrid (España), 459 pp.

Collado T. R. A., Gama C. L. M., Díaz L. H. M. (2015) “Percepción Remota. Elementos Básicos”. Revista KUXULKAB’. Recuperado de: <http://ri.ujat.mx/bitstream/20.500.12107/2286/1/1001-860-A.pdf>

Constantinescu, D., Cheval, S., Caracaş, G., Dumitrescu, A. (2016). “Effective monitoring and warning of Urban Heat Island effect on the indoor thermal risk in Bucharest (Romania)”. *Energy and Buildings*, 127, 452-468.

Cordoba G. M, Pérez B. R, Quiróz A. C. (1997) “Centro de análisis de información satelital que brinde servicios en tiempo real. Caso FUNAP” Universidad de Costa Rica. Reuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/215/1/17677.pdf>

Earth Explorer. (2021) USGS. Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Earth Observing System “LANDSAT 8. IMÁGENES LANDSAT 8” Recuperado de: <https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/>

Earth Observing System “Térmico, combinación de bandas térmicas” Recuperado de: <https://eos.com/es/make-an-analysis/thermal/>

Freitas O. E., Ribeiro de Francisco G. (2010) “Sensores Aerotransportaos” MundoGeo. Recuperado de: <https://mundogeo.com/2000/01/01/sensores-aerotransportados-2/>

Fuentes P. C. A. (2015). “Islas de calor urbano en Tampico, México: Impacto del microclima a la calidad del hábitat”. *Nova scientia*, 7(13), 495-515. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S200707052015000100024&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200707052015000100024&lng=es&tlng=es).

INEGI.(2020) “Presentación de resultados Ciudad de México Censo 2020 Población y Vivienda” Recuperado de: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020\\_pres\\_res\\_cdmx.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/cpv2020_pres_res_cdmx.pdf)

Jáuregui O, E. (1993). “La isla de calor urbano de la ciudad de México a finales del siglo XIX”. *Investigaciones Geográficas*, 1(26). Recuperado de: <https://doi.org/10.14350/riig.59016>

Jáuregui O. E. (1979). “La isla de calor en Toluca. *Investigaciones Geográficas*”, Recuperado de: <https://doi.org/10.14350/riig.58913>

Jauregui O. E. (1995) “Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. Revisión y perspectivas”. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n31/n31a1.pdf>

Jiménez M. J C, Sobrino J. A., Dražen S., Mattar C., Cristóbal J. (2014) "Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6784508>

Kerr, Y. H., Lagouarde, J. P., Nerry, F., & Ottlé, C. (2000). "Land surface temperature retrieval techniques and applications." In D. A. Quattrochi, & J. C. Luvall (Eds.), Thermal remote sensing in land surface processes (pp. 33–109). Boca Raton, Fla.: CRC Press.

Lara V. N; Chamorro S. H. (2018) "Uso de los sensores remotos en mediciones forestales". Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/236411301.pdf>

Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., ... Sobrino, J. A. (2013). "Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives". Remote sensing of environment, 131, 14-37. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712004749>

Liu, Y., Hiyama, T., & Yamaguchi, Y. (2006). "Scaling of land surface temperature using satellite data: A case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous terrain area". Remote Sensing of Environment, 105, 115–128.

López P. (2019) Avanza la mancha urbana sobre la CdMx. Gaceta UNAM. Recuperado de: <https://www.gaceta.unam.mx/avanza-la-mancha-urbana-sobre-cdmx/>

Luque O. J. (2012) "Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico". Autores Científicos-Técnicos y Académicos. ISSN 1888-6051, N°. 62, 2012, págs. 17-31. Recuperado de: [https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias\\_y\\_tecnologia/062017.pdf](https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf)

Meaden J. Geoffrey, -kapetsky M. James. (1992) "Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura" Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/t0446s/t0446s04.htm>

Mendoza, P. J., Rodríguez, M. E. (2001). "Obtención de imágenes térmicas y termoelectrónicas mediante Radiometría Fototérmica Infrarroja. Superficies y vacío", (12), 28-32. Recuperado de: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/5753/1.16.%20La%20imagen%20t%C3%A9rmica.pdf?sequence=17&isAllowed=y>

Morales A. M. A. Geomática sin fronteras. "Percepción Remota ¿Qué es la Percepción Remota?". Recuperado de: <https://geomatiksinfronteras.wordpress.com/percepcion-remota/>

NeoNASA Earth Observations. (2021) Recuperado de: [https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2\\_M\\_SKY\\_WV](https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_SKY_WV)

ONU Hábitat. (2018) “Superficie de CDMX crece a ritmo tres veces superior al de su población”. Recuperado de: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/superficie-de-cdmx-crece-a-ritmo-tres-veces-superior-al-de-su-poblacion>

Organización Mundial de la Salud. (2018) ”Cambio climático y salud”. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>

PAOT. (2021) “Condiciones Geográficas, Población y Desarrollo Económico del Distrito Federal y la Zona Metropolitana”. Recuperado de: <https://paot.org.mx/centro/inegi/ambdf/condic.html#:~:text=El%20Distrito%20Federal%2C%20ubicado%20en,la%20superficie%20total%20del%20pa%C3%ADs>

Pardo, J. A. S. (2007). “A study of Ibiza's urban heat island”. *Investigaciones Geográficas*, (44), 55. Recuperado de: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/10232>

Pérez J. D. (2007) “Introducción a los sensores remotos. Aplicaciones en geología” Universidad de Buenos Aires. Recuperado de: [http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso\\_SR/Guia\\_Curso\\_sr\\_2007.pdf](http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf)

Prata, A. J., Caselles, V., Coll, C., Sobrino, J. A., Otlé, C. (1995). Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: Current status and future prospects. *Remote Sensing Reviews*, 12, 175–224

Prathamesh B. (2017). “NITK\_RS-GIS\_17/Plugin\_Structure\_and\_Guidance” Recuperado de: [https://github.com/PrathamGitHub/NITK\\_RSGIS\\_17/blob/master/Plugin\\_Structure\\_and\\_Guidance.pdf](https://github.com/PrathamGitHub/NITK_RSGIS_17/blob/master/Plugin_Structure_and_Guidance.pdf)

Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (2008) , “Light Sensitivity, Espectro electromagnético”. Recuperado de: [https://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihp/docs/scenihp\\_o\\_019.pdf](https://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihp/docs/scenihp_o_019.pdf)

Secretaría de Marina SEMAR. (2009) “Percepción Remota”. Recuperado de: <http://2006-2012.semar.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html>

SECTEI Barradas M. V. (2019) “Islas de calor, un efecto más que exacerbada el cambio climático en las ciudades”. Recuperado de: <https://www.sectei.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/islas-de-calor-un-efecto-mas-que-exacerba-el-cambio-climatico-en-las-ciudades?fbclid=IwAR0R6wtqLyJAeZpB8lVPw4IG8GWAx5M2kw-TsUE5wMY1RYa9H7nZUoXDFnI>

Unión Europea (2007) “Guía para el análisis, valoración e interpretación de perfiles térmicos” Investigación de los recursos geotérmicos de extremadura (España), Alentejo y Región Centro

(Portugal) en el marco del proyecto PROMOEENER\_A\_4\_E. Recuperado de: [http://sigeo.juntaex.es/portalsigeco/c/document\\_library/get\\_file?uuid=29dbbe8d-be86-4220-b95b-e4a9b9c92862&groupId=10137](http://sigeo.juntaex.es/portalsigeco/c/document_library/get_file?uuid=29dbbe8d-be86-4220-b95b-e4a9b9c92862&groupId=10137)

Universidad de Murcia “Sistemas de Información Geográfica de la licenciatura de Ciencias Ambientales e Introducción a los Sistemas de Información Geográfica de la licenciatura de Geografía Tema 3”. Recuperado de: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf>

Vargas, M. P., Olave, A. A. (2011). “Análisis de presencia de islas de calor en Santiago de Cali empleando técnicas de teledetección” [Analysis of presence of heat islands in Santiago de Cali using remote sensing techniques]. Recuperado de: <https://revistasum.umanizales.edu.co/ojs/index.php/ventanainformatica/article/view/162/210>

Villegas V. H. (2008). “Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas”. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Recuperado de: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf>

Wong E. (2014) “Reduction urban heat islands compendium of strategies. Urban Heat Island Basics” Recuperado de: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/basicscompendium.pdf>

## Anexo 1

Temperaturas registradas por estaciones meteorológicas de la ciudad de México y zona conurbada

| Estación                               | Coordenadas |            | Temperatura |            |
|--|-------------|------------|-------------|------------|
|  | Latitud     | Longitud   | 17/02/2020  | 10/07/2020 |
| Acolman                                | 19.635501   | -98.912003 | 29.4        | -          |
| Ajusco Medio                           | -           | -          | -           | -          |
| Atizapán                               | -           | -          | -           | -          |
| Benito Juárez                          | 19.371612   | -99.158969 | 29          | 25.4       |
| Camarones                              | 19.468404   | -99.169794 | 25.8        | 26.2       |
| Centro de Ciencias de la Atmósfera     | -           | -          | -           | -          |
| Chalco                                 | 19.266948   | -98.886088 | 23.8        | 21.4       |
| Cuautitlán                             | 19.722186   | -99.198602 | 28.8        | 26.1       |
| Cuajimalpa                             | 19.365313   | -99.291705 | 30.5        | 25.4       |
| Hospital General de México             | -           | -          | 28.2        | -          |
| FES Acatlán                            | -           | -          | -           | -          |
| FEZ Aragón                             | -           | -          | -           | -          |
| Gustavo A. Madero                      | -           | -          | -           | -          |
| Hospital General de México             | 19.411617   | -99.152207 | 28.4        | 25.6       |
| Instituto de Investigaciones Nucleares | 19.291968   | -99.38052  | 26.9        | 24.4       |
| Iztacalco                              | 19.384413   | -99.117641 | 26.7        | 23.6       |
| La Presa                               | 19.534727   | -99.11772  | 29.3        | 26.8       |
| Lab. de Análisis Ambiental             | 19.483781   | -99.147312 | 24.5        | 21.9       |
| Los Laureles                           | -           | -          | -           | -          |
| Merced                                 | -           | -          | -           | -          |
| Miguel Hidalgo                         | 19.40405    | -99.202603 | 28          | 25.4       |
| Milpa Alta                             | 19.1769     | -98.990189 | 28.3        | 22.9       |
| Montecillo                             | -           | -          | -           | -          |
| Nezahualcóyotl                         | -           | -          | -           | -          |
| Pedregal                               | 19.325146   | -99.204136 | 27.9        | 24.3       |
| San Agustín                            | 19.532968   | -99.030324 | 29.1        | 26.7       |
| San Nicolás Totolapan                  | 19.250385   | -99.256462 | 28.2        | 26.2       |
| Santa Fe                               | 19.357357   | -99.262865 | 28.1        | 24.6       |
| Santa Úrsula                           | -           | -          | -           | -          |
| Santiago Acahualtepec                  | 19.34561    | -99.009381 | 28.5        | 25.2       |
| Tláhuac                                | 19.246459   | -99.010564 | 25.4        | 20.9       |
| Tlalnepantla                           | 19.529077   | -99.204597 | 25          | -          |
| Tlalpan                                | -           | -          | 28          | 25.2       |
| Tultitlán                              | 19.602542   | -99.177173 | 21.9        | 19.9       |

|                     |           |           |      |      |
|---------------------|-----------|-----------|------|------|
| UAM Iztapalapa      | 19.360794 | -99.07388 | 28.7 | 25.7 |
| UAM Xochimilco      | -         | -         | -    | -    |
| Villa de las Flores | 19.658223 | -99.09659 | -    | 27.1 |
| Xalostoc            | -         | -         | -    | -    |

Tabla 8. Datos de estaciones meteorológicas.

## Anexo 2

Temperaturas obtenidas a través del muestreo de 183 puntos para la elaboración de la tabla Anova.

| ID | Estaciones Meteorológicas |          | Plugin     |          | Algoritmo SW |          |
|----|---------------------------|----------|------------|----------|--------------|----------|
|    | °C Febrero                | °C Julio | °C Febrero | °C Julio | °C Febrero   | °C Julio |
| 0  | 17.29                     | 19.42    | 32.63      | 30.93    | 34.06        | 33.51    |
| 1  | 17.65                     | 19.21    | 27.23      | 23.12    | 29.66        | 26.74    |
| 2  | 18.04                     | 18.96    | 26.53      | 22.57    | 29.36        | 26.35    |
| 3  | 18.86                     | 18.00    | 19.40      | 18.95    | 23.78        | 23.29    |
| 4  | 17.32                     | 18.45    | 21.95      | 21.22    | 25.90        | 25.00    |
| 5  | 17.62                     | 16.90    | 20.99      | 19.13    | 24.98        | 23.36    |
| 6  | 18.53                     | 17.30    | 23.12      | 20.79    | 26.96        | 24.70    |
| 7  | 19.47                     | 16.94    | 29.53      | 23.60    | 31.21        | 27.02    |
| 8  | 20.05                     | 16.07    | 13.79      | 14.20    | 19.43        | 19.46    |
| 9  | 19.15                     | 15.86    | 22.67      | 18.04    | 26.29        | 22.06    |
| 10 | 17.52                     | 15.68    | 21.38      | 21.85    | 25.07        | 25.04    |
| 11 | 17.59                     | 15.83    | 20.84      | 21.35    | 24.96        | 24.86    |
| 12 | 19.17                     | 17.51    | 28.39      | 28.67    | 30.00        | 30.35    |
| 13 | 19.63                     | 18.65    | 28.16      | 28.75    | 30.21        | 30.67    |
| 14 | 18.88                     | 18.11    | 24.08      | 24.35    | 27.13        | 27.01    |
| 15 | 18.71                     | 17.66    | 29.19      | 28.94    | 30.59        | 30.87    |
| 16 | 18.99                     | 15.77    | 21.63      | 21.11    | 25.23        | 24.55    |
| 17 | 19.67                     | 15.41    | 15.72      | 15.74    | 20.58        | 20.15    |
| 18 | 18.63                     | 15.82    | 15.08      | 14.95    | 20.30        | 19.45    |
| 19 | 15.87                     | 16.61    | 19.62      | 17.46    | 23.82        | 21.80    |
| 20 | 15.63                     | 17.61    | 21.98      | 19.04    | 26.05        | 23.07    |
| 21 | 17.83                     | 17.65    | 29.33      | 25.17    | 31.53        | 27.85    |
| 22 | 20.27                     | 14.43    | 22.56      | 19.56    | 26.43        | 23.14    |
| 23 | 20.82                     | 13.24    | 25.24      | 19.75    | 27.70        | 23.09    |
| 24 | 20.84                     | 13.36    | 21.97      | 19.36    | 25.38        | 23.28    |
| 25 | 20.53                     | 14.44    | 30.84      | 16.18    | 32.26        | 20.93    |
| 26 | 19.50                     | 15.80    | 25.75      | 18.45    | 28.61        | 22.13    |
| 27 | 19.25                     | 16.46    | 23.05      | 21.46    | 26.05        | 24.87    |
| 28 | 18.24                     | 17.19    | 27.64      | 20.40    | 29.12        | 23.95    |
| 29 | 16.95                     | 18.10    | 18.64      | 16.64    | 22.90        | 20.63    |
| 30 | 16.94                     | 19.65    | 18.83      | 16.17    | 23.12        | 20.28    |
| 31 | 17.02                     | 18.97    | 27.57      | 26.41    | 29.64        | 28.91    |
| 32 | 17.25                     | 18.78    | 36.35      | 25.23    | 36.57        | 28.10    |
| 33 | 17.04                     | 17.04    | 29.99      | 24.89    | 31.60        | 27.49    |
| 34 | 17.35                     | 17.04    | 18.45      | 17.06    | 22.82        | 21.48    |
| 35 | 18.78                     | 14.88    | 27.06      | 22.95    | 29.46        | 26.04    |

|    |       |       |       |        |       |       |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 36 | 17.88 | 17.42 | 28.23 | 28.26  | 30.56 | 30.41 |
| 37 | 17.21 | 16.34 | 28.09 | 21.10  | 30.18 | 24.49 |
| 38 | 17.35 | 17.84 | 24.79 | 23.05  | 27.44 | 26.38 |
| 39 | 17.09 | 17.22 | 28.17 | 26.91  | 30.35 | 29.57 |
| 40 | 17.11 | 17.41 | 28.65 | 26.34  | 30.94 | 29.13 |
| 41 | 18.01 | 19.17 | 29.24 | 31.07  | 30.93 | 33.03 |
| 42 | 17.54 | 18.71 | 34.06 | 31.41  | 34.50 | 31.69 |
| 43 | 17.98 | 20.22 | 35.47 | 27.66  | 35.69 | 29.94 |
| 44 | 17.90 | 20.33 | 29.01 | 21.71  | 30.67 | 24.83 |
| 45 | 17.95 | 20.03 | 33.35 | 26.61  | 33.89 | 29.32 |
| 46 | 17.22 | 18.94 | 26.06 | 27.74  | 29.04 | 30.55 |
| 47 | 17.38 | 18.78 | 28.70 | 31.24  | 30.65 | 33.12 |
| 48 | 16.78 | 17.35 | 32.73 | 25.84  | 33.55 | 28.72 |
| 49 | 18.90 | 19.16 | 30.80 | 22.49  | 31.67 | 27.20 |
| 50 | 21.90 | 22.34 | 14.99 | -3.08  | 19.76 | 9.95  |
| 51 | 20.58 | 22.08 | 32.27 | 18.37  | 32.90 | 23.12 |
| 52 | 20.16 | 22.00 | 22.29 | 17.35  | 25.57 | 21.51 |
| 53 | 18.03 | 19.95 | 33.43 | 26.07  | 33.91 | 28.69 |
| 54 | 18.08 | 19.80 | 28.56 | 25.15  | 30.19 | 28.02 |
| 55 | 19.68 | 20.55 | 27.91 | 19.78  | 29.55 | 23.44 |
| 56 | 18.38 | 19.30 | 35.52 | 20.70  | 35.28 | 23.17 |
| 57 | 19.31 | 21.28 | 19.10 | 18.11  | 23.06 | 22.60 |
| 58 | 17.94 | 19.70 | 32.45 | 26.94  | 33.36 | 29.51 |
| 59 | 17.39 | 18.54 | 27.67 | 24.24  | 29.94 | 27.88 |
| 60 | 19.02 | 20.49 | 30.85 | 30.97  | 32.58 | 32.94 |
| 61 | 18.38 | 19.50 | 29.92 | 29.87  | 31.65 | 31.66 |
| 62 | 17.72 | 19.28 | 30.41 | 31.53  | 31.95 | 33.10 |
| 63 | 18.23 | 20.07 | 27.82 | 27.92  | 29.80 | 30.36 |
| 64 | 17.82 | 18.85 | 28.00 | 26.18  | 30.00 | 29.45 |
| 65 | 22.33 | 24.54 | 16.68 | 13.07  | 21.28 | 18.38 |
| 67 | 23.03 | 25.08 | 20.20 | 17.70  | 23.89 | 21.93 |
| 68 | 22.78 | 24.35 | 19.27 | 17.40  | 23.15 | 21.68 |
| 69 | 24.56 | 25.77 | 23.16 | 20.36  | 26.43 | 24.00 |
| 71 | 22.60 | 23.58 | 21.17 | -0.95  | 24.18 | 12.14 |
| 72 | 23.11 | 23.66 | 12.64 | 14.11  | 18.29 | 19.14 |
| 73 | 23.91 | 24.24 | 13.57 | 13.94  | 19.03 | 18.79 |
| 74 | 23.28 | 23.44 | 14.63 | 4.97   | 19.84 | 14.26 |
| 75 | 22.67 | 22.79 | 16.91 | -15.49 | 21.42 | -0.74 |
| 76 | 20.96 | 20.89 | 25.93 | -16.78 | 28.34 | -4.88 |
| 77 | 19.28 | 19.94 | 27.63 | 19.50  | 29.68 | 28.31 |
| 78 | 16.11 | 17.57 | 28.15 | 29.87  | 29.86 | 31.66 |

|     |       |       |       |        |       |       |
|-----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 79  | 16.13 | 17.86 | 22.49 | 23.34  | 25.93 | 26.61 |
| 80  | 17.60 | 19.65 | 32.51 | 26.86  | 33.44 | 29.68 |
| 81  | 19.70 | 21.30 | 25.67 | 24.72  | 28.16 | 27.41 |
| 82  | 21.49 | 22.82 | 27.44 | 17.53  | 29.79 | 22.78 |
| 83  | 22.05 | 23.11 | 26.72 | -15.13 | 29.17 | -3.78 |
| 84  | 21.86 | 22.17 | 28.08 | -20.99 | 30.17 | -8.61 |
| 85  | 23.29 | 23.68 | 19.48 | 0.83   | 23.33 | 16.83 |
| 86  | 24.59 | 25.21 | 18.25 | 18.44  | 22.58 | 22.30 |
| 88  | 25.20 | 26.07 | 16.58 | 16.01  | 21.66 | 20.72 |
| 89  | 25.13 | 26.33 | 17.90 | 16.52  | 22.37 | 21.21 |
| 90  | 19.51 | 22.55 | 29.58 | 29.03  | 31.16 | 31.28 |
| 91  | 20.10 | 23.28 | 28.88 | 26.70  | 30.62 | 32.65 |
| 92  | 19.54 | 22.17 | 31.52 | 23.59  | 32.50 | 26.82 |
| 93  | 18.32 | 20.79 | 32.53 | 30.64  | 33.34 | 32.31 |
| 94  | 18.07 | 19.95 | 29.19 | 29.89  | 31.09 | 31.86 |
| 95  | 18.42 | 19.40 | 28.37 | 30.27  | 30.34 | 32.22 |
| 96  | 18.71 | 19.08 | 30.35 | 24.54  | 31.74 | 27.46 |
| 97  | 18.29 | 19.78 | 27.96 | 31.64  | 29.96 | 33.37 |
| 98  | 18.66 | 20.16 | 29.01 | 29.83  | 30.79 | 31.50 |
| 99  | 18.94 | 21.76 | 29.04 | 32.11  | 30.86 | 33.38 |
| 101 | 18.73 | 20.52 | 30.16 | 32.78  | 31.84 | 34.01 |
| 102 | 21.28 | 24.33 | 29.92 | 28.23  | 31.34 | 29.97 |
| 103 | 21.49 | 24.82 | 28.54 | 27.60  | 30.31 | 29.76 |
| 104 | 20.88 | 22.41 | 32.07 | 30.97  | 33.34 | 33.21 |
| 105 | 20.60 | 21.05 | 30.71 | 22.15  | 32.12 | 25.72 |
| 106 | 18.16 | 19.71 | 28.45 | 31.20  | 30.21 | 32.87 |
| 107 | 18.81 | 20.41 | 28.71 | 30.65  | 30.51 | 32.33 |
| 108 | 18.88 | 20.43 | 28.66 | 29.59  | 30.85 | 31.68 |
| 109 | 18.89 | 20.27 | 27.26 | 27.67  | 29.37 | 29.62 |
| 110 | 19.01 | 20.02 | 27.33 | 28.96  | 29.48 | 31.09 |
| 111 | 19.79 | 19.84 | 29.06 | 30.47  | 30.93 | 32.22 |
| 112 | 20.41 | 19.99 | 25.35 | 23.99  | 27.88 | 26.50 |
| 113 | 20.46 | 19.65 | 25.45 | 26.35  | 27.87 | 28.62 |
| 114 | 20.78 | 20.63 | 29.44 | 30.04  | 31.32 | 32.34 |
| 115 | 19.04 | 19.90 | 29.65 | 28.50  | 31.10 | 31.41 |
| 116 | 19.18 | 19.97 | 29.50 | 25.34  | 31.22 | 27.41 |
| 117 | 18.35 | 19.84 | 27.22 | 25.45  | 29.38 | 28.58 |
| 118 | 18.75 | 20.24 | 31.55 | 33.05  | 32.87 | 34.26 |
| 119 | 17.86 | 19.50 | 34.06 | 34.65  | 34.41 | 35.39 |
| 120 | 18.59 | 19.93 | 29.48 | 29.48  | 30.86 | 31.98 |
| 121 | 17.89 | 19.69 | 24.49 | 23.95  | 27.24 | 26.94 |

|     |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 122 | 18.98 | 19.88 | 28.91 | 27.53 | 30.58 | 30.65 |
| 123 | 19.26 | 19.69 | 28.86 | 29.81 | 30.88 | 31.81 |
| 124 | 19.12 | 18.47 | 27.05 | 24.04 | 29.17 | 28.15 |
| 125 | 18.73 | 18.03 | 27.82 | 22.73 | 29.94 | 26.97 |
| 126 | 18.85 | 19.01 | 26.57 | 19.30 | 29.11 | 21.17 |
| 127 | 18.94 | 18.87 | 30.21 | 27.36 | 31.49 | 29.35 |
| 128 | 18.77 | 18.67 | 30.56 | 23.65 | 31.95 | 26.81 |
| 129 | 19.67 | 19.30 | 24.68 | 26.34 | 28.59 | 28.89 |
| 130 | 20.58 | 20.46 | 29.20 | 30.88 | 30.94 | 32.22 |
| 131 | 20.07 | 19.99 | 28.40 | 30.18 | 30.56 | 31.97 |
| 132 | 18.98 | 19.50 | 28.74 | 27.89 | 30.45 | 30.53 |
| 133 | 20.93 | 22.05 | 29.01 | 31.01 | 30.90 | 32.53 |
| 134 | 20.45 | 22.36 | 23.31 | 21.87 | 27.05 | 25.40 |
| 135 | 19.30 | 21.58 | 27.17 | 22.67 | 29.31 | 25.61 |
| 136 | 17.67 | 20.00 | 25.69 | 22.07 | 28.63 | 25.46 |
| 138 | 20.29 | 21.27 | 32.77 | 26.20 | 33.97 | 28.84 |
| 139 | 21.31 | 22.31 | 30.98 | 31.87 | 32.46 | 32.92 |
| 140 | 21.12 | 20.99 | 26.09 | 30.14 | 28.83 | 31.86 |
| 141 | 21.00 | 21.36 | 28.89 | 28.05 | 30.80 | 30.10 |
| 142 | 21.02 | 22.64 | 25.95 | 24.54 | 28.86 | 27.49 |
| 143 | 16.98 | 17.46 | 27.72 | 24.24 | 30.17 | 27.31 |
| 144 | 16.25 | 16.00 | 19.79 | 19.09 | 24.18 | 22.92 |
| 145 | 21.03 | 24.41 | 28.24 | 29.94 | 30.34 | 31.70 |
| 146 | 20.47 | 23.88 | 27.33 | 23.33 | 29.66 | 30.30 |
| 147 | 19.89 | 23.29 | 28.73 | 28.42 | 30.63 | 30.51 |
| 148 | 19.59 | 22.56 | 31.73 | 28.23 | 32.56 | 30.57 |
| 149 | 17.54 | 19.66 | 29.46 | 30.61 | 30.95 | 33.02 |
| 150 | 19.87 | 19.84 | 25.68 | 24.63 | 27.83 | 27.42 |
| 151 | 18.91 | 18.85 | 30.90 | 17.36 | 32.11 | 21.76 |
| 152 | 17.99 | 18.16 | 27.97 | 19.49 | 29.71 | 24.70 |
| 153 | 16.70 | 17.07 | 28.62 | 26.32 | 30.37 | 28.20 |
| 154 | 15.78 | 16.58 | 25.33 | 29.46 | 28.02 | 31.24 |
| 155 | 15.97 | 17.16 | 28.05 | 31.79 | 30.11 | 33.35 |
| 156 | 16.43 | 18.13 | 29.06 | 30.48 | 30.87 | 32.14 |
| 157 | 17.30 | 19.35 | 29.40 | 29.71 | 30.95 | 32.03 |
| 158 | 18.38 | 19.78 | 28.92 | 30.32 | 31.63 | 32.96 |
| 159 | 16.15 | 16.86 | 25.24 | 27.55 | 27.92 | 29.86 |
| 160 | 16.18 | 17.05 | 28.35 | 32.27 | 30.33 | 33.65 |
| 161 | 16.04 | 16.59 | 24.72 | 24.72 | 27.69 | 27.27 |
| 162 | 16.10 | 16.57 | 24.07 | 26.24 | 26.98 | 29.18 |
| 163 | 16.49 | 16.89 | 30.38 | 24.80 | 31.55 | 28.26 |

|     |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 164 | 17.15 | 19.30 | 35.13 | 33.09 | 35.53 | 34.16 |
| 165 | 17.21 | 19.69 | 30.52 | 32.71 | 31.88 | 33.86 |
| 166 | 17.63 | 19.66 | 32.90 | 33.87 | 33.88 | 34.83 |
| 167 | 17.93 | 19.11 | 30.02 | 31.44 | 31.74 | 33.21 |
| 168 | 18.23 | 18.56 | 33.26 | 31.95 | 34.14 | 33.62 |
| 169 | 18.54 | 17.84 | 27.31 | 17.73 | 29.42 | 20.14 |
| 170 | 18.43 | 17.75 | 25.24 | 22.06 | 27.93 | 27.33 |
| 171 | 17.70 | 17.75 | 30.92 | 32.81 | 32.59 | 34.03 |
| 172 | 17.41 | 18.01 | 28.63 | 31.01 | 30.70 | 32.16 |
| 173 | 17.80 | 17.95 | 28.08 | 29.84 | 30.15 | 31.90 |
| 174 | 18.17 | 17.76 | 28.32 | 25.59 | 30.40 | 29.08 |
| 175 | 18.99 | 18.16 | 25.48 | 20.81 | 27.94 | 24.01 |
| 177 | 19.32 | 18.93 | 30.92 | 29.55 | 32.07 | 31.04 |
| 178 | 20.01 | 20.06 | 30.11 | 30.79 | 31.38 | 32.04 |
| 179 | 20.75 | 21.18 | 31.78 | 32.08 | 33.05 | 32.93 |
| 180 | 20.32 | 20.16 | 33.13 | 34.89 | 33.46 | 35.20 |
| 181 | 19.64 | 19.01 | 29.09 | 29.54 | 30.68 | 31.46 |
| 182 | 19.56 | 18.86 | 30.88 | 31.78 | 31.74 | 32.59 |

Tabla 9. Muestreo de puntos aleatorios para tabla ANOVA.