

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



“Importancia de ríos urbanos como infraestructura verde/azul para la mitigación de las islas de calor en las ciudades”

Presenta

Ivone Guadalupe Zapata Wah

Como requisito para obtener el título de Ingeniero Civil

Directora de Tesis:

Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón

San Nicolás de los Garza, Nuevo León

Diciembre de 2023

COMITÉ EVALUADOR

Directora de tesis

Dra. Fabiola Doracely Yépez Rincón

Co-Director

Dr. Ricardo Alberto Cavazos González

Co-Director

Dr. Roberto Emmanuel Huerta García



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE TITULACIÓN NÚMERO: _____

DEL SEÑOR: ITA: Ivone G. Zapata Wah

FECHA: 8 de Diciembre

COMITÉ DE TITULACIÓN

PRESIDENTE: Dr. Fabiok D. Yépez Rincón

SECRETARIO: Dr. Ricardo A. Carras González

VOCAL: Dr. Roberto E. Huerta García

En la Ciudad de Monterrey, capital del Estado de Nuevo León, a los 8 días del mes de diciembre del año 2023, siendo las 11:58 horas, reunidos en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, los señores Ingenieros: Dr. Fabiok D. Yépez Rincón, Dr. Ricardo A. Carras González y Dr. Roberto E. Huerta García

profesores (as) de la misma, quienes fueron designados por la Dirección de la Facultad para integrar el Comité de Titulación de Ivone Guadalupe Zapata Wah, quien cursó y aprobó todas y cada una de las unidades de aprendizaje de la Carrera de Ingeniero Civil, tal como lo disponen la Ley Orgánica de la Universidad Autónoma de Nuevo León publicada en el Periódico Oficial el siete de junio de mil novecientos setenta y uno, el Estatuto General, el Reglamento General de Titulación y el Reglamento Interno de la Facultad.

Se procedió a tomar la Protesta de Ley por el Presidente del Comité de Titulación y en cumplimiento de lo dispuesto por los preceptos legales y reglamentarios, firman la presente acta los profesores (as), ante la presencia del Secretario del Comité que da fe.

PRESIDENTE
Dr. Fabiok D. Yépez Rincón

SECRETARIO
Dr. Ricardo A. Carras González

VOCAL
Dr. Roberto E. Huerta García

M.C. René Alberto Hinojosa Alanis
Coordinador Académico de Licenciatura
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Autónoma de Nuevo León

Estimado M.C. René Alberto Hinojosa Alanis

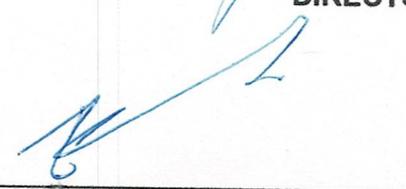
Por medio de la presente hacemos de su conocimiento que hemos finalizado la revisión de la tesis: **"Importancia de ríos urbanos como infraestructura verde/azul para la mitigación de las islas de calor en las ciudades"**, que presenta la C. Ivone Guadalupe Zapata Wah, como requisito para obtener el grado de Ingeniero Civil. De esta manera nos permitimos informar a Usted que después de haber leído y evaluando la calidad de la tesis, expresamos que la misma es **APROBADA**, proponiendo como fecha del examen de grado el día 8 de diciembre del presente año.

Sin otro particular, y agradecemos de antemano sus atenciones, quedando a sus órdenes para cualquier aclaración.

Atentamente,
"Alere Flammam Veritatis"
Ciudad Universitaria, 4 de diciembre de 2023



DRA. FABIOLA DORACELY YÉPEZ RINCÓN
DIRECTORA DE TESIS



DR. RICARDO ALBERTO CAVAZOS GONZÁLEZ **DR. ROBERTO EMMANUEL HUERTA GARCÍA**
SINODAL SINODAL

 *Hello Future*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa en este proyecto de tesis.

A la Dra. Fabiola Yépez por sus consejos y correcciones. Su guía constante fue imprescindible para la realización de esta investigación. Gracias por ser un ejemplo para las mujeres que desean incursionar en la investigación científica.

También quiero agradecer a mis co-directores, el Dr. Roberto Huerta y el Dr. Ricardo Cavazos por su tiempo y esfuerzo dedicado a revisar y mejorar este trabajo. Sus observaciones fueron invaluable.

Agradezco a mis compañeros del Departamento de Geomática por ayudarme cuando tenía dudas con algún software, por sus comentarios y por hacer más agradables las horas de oficina.

A mis amigas de la universidad. A lo largo de estos años de estudio su amistad ha sido una fuente inagotable de alegría y motivación. Gracias hoy y siempre por formar parte de mi experiencia universitaria.

No puedo dejar de mencionar a mi familia ya que sin su apoyo incondicional no podría haberlo logrado. Su ánimo y paciencia fueron esenciales para poder terminar este proyecto y la carrera. Gracias infinitas siempre

ÍNDICE

Introducción.....	1
Antecedentes del problema.....	3
Planteamiento del problema.....	6
Hipótesis	9
Objetivos del proyecto.....	9
General	9
Específicos	9
Marco teórico y conceptual	10
Sensores remotos.....	10
LANDSAT	11
Islas de calor urbanas (ICU)	14
Temperatura superficial del suelo (LST)	15
Local Climate Zones (LCZ)	16
Infraestructura verde/azul (IVA)	16
Metodología	19
Área de estudio.....	19
Materiales y métodos.....	21
WUDAPT LCZ Generator	21
Google Earth Engine (GEE)	27
Resultados	30
Clasificación de LCZ	30
Temperatura superficial del suelo (LST)	35
Relación de LCZ y LST.....	43
Discusión	46

Conclusión	48
Referencias	49
Anexos	58
Anexo 1. Cronograma de actividades	58
Anexo 2. Zonas climáticas locales sin procesar	59
2.1. LCZ para 2003	59
2.2. LCZ para 2013.....	60
2.3. LCZ para 2021.....	61
Anexo 3. Precisiones Generales (Overall Accuracy) de las LCZ	62
3.1. LCZ Overall Accuracy (2003)	62
3.2. LCZ Overall Accuracy (2013).....	63
3.3. LCZ Overall Accuracy (2021).....	64
Anexo 4. Scripts para la obtención de LST	65
4.1. LST para 2003.....	65
4.2. LST para 2013.....	71
4.3. LST para 2021.....	77
Anexo 5. Temperatura superficial del suelo sin procesar	83
5.1. LST para 2003.....	83
5.2. LST para 2013.....	84
5.3. LST para 2021.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de las ICU en diferentes tipos de cubiertas	7
Figura 2. Espectro electromagnético	11
Figura 3. Cronología de misiones LANDSAT	12
Figura 4. Publicaciones sobre el estudio de ICU en México.....	15
Figura 5. Ríos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey	19
Figura 6. Cuenca del río San Juan y subcuenca urbana del río Pesquería.....	20
Figura 7. Jerarquía de datos WUDAPT	22
Figura 8. Método de clasificación de LCZ.....	26
Figura 9. Infraestructura de Google Earth Engine	27
Figura 10. Obtención de LST.....	29
Figura 11. Zonas climáticas locales del AMM.....	32
Figura 12. Estaciones meteorológicas del AMM.....	35
Figura 13. Temperaturas mínimas, máximas y promedio (2003)	36
Figura 14. Temperaturas mínimas, máximas y promedio (2013)	36
Figura 15. Temperaturas mínimas, máximas y promedio (2021)	38
Figura 16. LST del Área Metropolitana de Monterrey (2003)	40
Figura 17. LST del Área Metropolitana de Monterrey (2013).....	41
Figura 18. LST del Área Metropolitana de Monterrey (2021).....	42
Figura 19. Comparación de temperaturas promedio de las LCZ	44
Figura 20. Temperatura superficial del suelo de los puntos aleatorios	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas LANDSAT 5.....	13
Tabla 2. Características técnicas LANDSAT 8.....	13
Tabla 3. Servicios de los ecosistemas	17
Tabla 4. Clases de la metodología de LCZ.....	23
Tabla 5. Área total de zonas climáticas locales	31
Tabla 6. Precisiones generales obtenidas	33
Tabla 7. Interpretación de valores de Kappa	34
Tabla 8. Temperaturas promedio de las zonas climáticas locales	43

NOMENCLATURA

ICU	Isla de calor urbana
LCZ	Local Climate Zone (Zona climática local)
LST	Land Surface Temperature (Temperatura superficial del suelo)
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
IVA	Infraestructura verde/azul
GEE	Google Earth Engine
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tools

RESUMEN

Este estudio abordó la importancia de los ríos urbanos como infraestructura verde/azul para la mitigación de las islas de calor producto de la urbanización desmedida en el Área Metropolitana de Monterrey en los últimos años. El objetivo principal de la investigación fue demostrar la relación entre la temperatura superficial del suelo y la infraestructura verde/azul, y cómo el efecto térmico de las islas de calor urbanas producto de la urbanización y la actividad industrial disminuye bajo la presencia de los ríos urbanos (Pesquería, La Silla y Santa Catarina) y de las áreas verdes. Se planteó una metodología con enfoque cuantitativo, de alcance correlacional y con diseño no experimental. El desarrollo de la perspectiva teórica se basó en la revisión de documentación académica, y la evaluación de los parámetros principales se realizó analizando imágenes satelitales de los años de estudio en la plataforma Google Earth Engine y por medio de la metodología de clasificación de uso de suelo WUDAPT desarrollada por Stewart y Oke. De acuerdo con el análisis elaborado, se concluye que existe una relación entre las zonas climáticas locales (LCZ) y temperatura superficial del suelo (LST). Al valorar el área de estudio durante los meses de mayo a junio de los años 2003, 2013 y 2021, se encontró que las temperaturas son mayores en las zonas climáticas construidas a comparación de las zonas naturales con una diferencia de alrededor de 4°C. Dentro de las zonas naturales hay una variación en la LST; las áreas con infraestructura verde/azul densa presentan temperaturas menores a comparación de las cubiertas naturales con poca o nula vegetación.

Palabras clave: infraestructura verde/azul, zonas climáticas locales, temperatura superficial del suelo, ríos urbanos, islas de calor urbanas

Introducción

El proceso de urbanización global ha ido en alza junto con el crecimiento de la población (Chen et al, 2006). En las últimas décadas se ha visto un desarrollo exponencial de las zonas urbanas, creando así áreas metropolitanas en las que es difícil de identificar los límites entre una ciudad y otra. El rápido aumento de las áreas urbanas se debe a que, en busca de mejores oportunidades de vida, la población de zonas no tan desarrolladas opta por mudarse a las ciudades con el objetivo de mejorar su calidad de vida. Para el desarrollo urbano, esto ha significado un crecimiento desmedido en el cual no siempre se consideran aspectos como la planificación de las vialidades, distribución de servicios básicos para toda la población, espacios suficientes de vivienda, entre otros; resultando en una mancha urbana que no se da abasto para la cantidad de personas que habitan en ella.

En el caso del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), estas problemáticas han ido en incremento durante los últimos años y se evidencian en situaciones como el desabasto de agua, falta de planeación urbana, contaminación y reducción de áreas verdes. En la actualidad, Monterrey y sus municipios colindantes presentan problemas medioambientales que han traído consigo una mala calidad del aire constante y un aumento significativo de la temperatura. El uso del suelo urbano puede causar que el aire local y las temperaturas superficiales aumenten varios grados por encima de las temperaturas del ambiente alrededor (Mirzaei et al 2020). Estos efectos negativos pueden verse contrarrestados gracias a la acción de vegetación, zonas verdes e incluso con la presencia de cuerpos de agua, ya que las morfologías espaciales de los espacios verdes generan efectos de enfriamiento que mitigan las islas de calor urbanas (ICU) en ciudades metropolitanas (Jiang et al, 2021).

Lamentablemente la mancha urbana del AMM es tan grande que la acción de zonas verdes y cuerpos de agua -en este caso, los ríos Santa Catarina, La Silla y Pesquería- no se da abasto y se crean islas de calor.

Una isla de calor es un fenómeno en el cual, debido a la urbanización, la temperatura del aire en la ciudad o zonas urbanas es considerablemente más alta que en el campo (Yao et al, 2017). Es un producto inevitable del desarrollo urbano y tiene un impacto prominente en la temperatura del aire, sin mencionar que puede agudizar la contaminación, afectando la calidad de vida de sus habitantes y empeorando el clima de la región. El efecto de las ICU conducirá a problemas como la disminución del confort térmico urbano, degradación del microclima e incluso daños a la salud y seguridad públicas (Xu, D., Zhou, D. 2016).

Dentro de las consecuencias que traen consigo las ICU es que reducen la calidad de vida de los residentes en muchos aspectos, afectando su salud y bienestar. Gosling et al. (2009) reportaron que el incremento de la temperatura urbana está ligado con los índices de mortalidad. Otros estudios han mostrado que los ciudadanos en zonas con islas de calor urbanas sufren de enfermedades relacionadas al calor como padecimientos digestivos, problemas del sistema nervioso, insomnio, depresión y enfermedades mentales. (Huynen et al., 2001; Tan et al, 2010).

Debido a los efectos negativos que las ICU tienen con el ambiente y en la salud humana, evaluar sus patrones de distribución, así como su comportamiento con la infraestructura verde/azul de la metrópolis es necesario para poder mitigar sus efectos.

Antecedentes del problema

El rápido crecimiento de la población y la industria han hecho que el proceso de urbanización tenga un desarrollo desordenado. En las últimas décadas esto ha generado procesos degradantes que alteran la superficie de la tierra y, por ende, el estado natural de las cuencas y ríos también se ven afectados (Castro-López et al., 2019; Everard & Moggridge, 2012; Wilson et al., 2005). En el caso de los ríos que fluyen a través de zonas urbanas, factores como los asentamientos irregulares además de modificar la morfología del cauce, traen consigo problemáticas ambientales como la acumulación y quema de residuos, deforestación, contaminación del agua, entre muchos otros (Newson, 2022).

El efecto de las ICU se ha convertido en un problema significativo en las ciudades. La mala planeación y gestión urbana causan que áreas con vegetación sean reemplazadas por superficies impermeables como concreto y asfalto, alterando así la morfología y resultando en el aumento de las temperaturas locales y de la radiación de onda larga y de la temperatura (Jiang, et al., 2021). Este problema ha sido monitoreado y estudiado en la región delta del río Yangtze en Shanghái debido a que las temperaturas extremas han tenido un impacto importante en el desarrollo de la agricultura y economía de la zona; se espera que la predicción y monitoreo de temperaturas extremas sea un medio para reducir las pérdidas causadas por desastres relacionados a las altas temperaturas y promover un desarrollo más sustentable (Shi, G., & Ye, P. 2021). El monitoreo del ambiente térmico urbano puede proporcionar información importante sobre las estructuras térmicas urbanas. Estudios realizados en Reino Unido encontraron que las infraestructuras verde y azul mejoran la porosidad de la superficie y aumentan la capacidad de almacenamiento de agua y, por lo tanto, cuerpos de agua como ríos y lagos tienen el potencial de reducir las ICU y regresar los niveles de humedad a valores similares a los de áreas rurales (Hathway, E. A., Sharples, S., 2012).

Una de las problemáticas principales del AMM es la provisión de agua para su población, por lo que es indispensable analizar la condición de conservación de sus cuencas y los ecosistemas naturales e intervenidos que proveen este servicio ecológico (Cantú et al., 2018). La situación del agua en la Región Hidrológica 24 Bravo-Conchos es sumamente compleja. Los principales problemas a los que se enfrenta la región son baja precipitación con un promedio anual de 485.8 mm, baja eficiencia en el uso del agua -esto se da gracias a que los sectores agrícola e industrial están sobrepasados- y conflictos en el abastecimiento. Para el continuo monitoreo y determinar la calidad del agua en la región hidrológica, Nuevo León cuenta con 25 estaciones de monitoreo. Destacando los valores de Índices de Calidad del Agua en el río Pesquería que fluctúan entre 34.0 y 47.7, podemos clasificarlo como contaminado y altamente contaminado en algunas secciones (CNA, 2020; Mireles, 2021).

Los ríos Santa Catarina, La Silla y Pesquería son subafuentes y afluentes del río San Juan, cuya cuenca se ha transformado en la segunda más contaminada del país (Schteingart, M., D'Andrea, L., & García Ortega, R., 2001). A nivel de la subcuenca del río Pesquería, se tienen problemas ambientales recurrentes originados por descargas ilícitas al sistema pluvial, acumulación de residuos sólidos urbanos y escombros en el río, descargas directas de aguas residuales en el río (jabonosas y negras), asentamientos irregulares y el incremento de vulnerabilidad y riesgo a desastre. Estos impactos negativos se deben al uso público urbano, industrial, agrícola y pecuario debido al incremento en la demanda para usos industriales y domésticos.

En el caso del río La Silla, debido a su gran potencial ecológico y social, su rescate y conservación son prioridad ya que proporciona beneficios ecológicos como la absorción de radiación solar, disminución de la temperatura en el verano, mejoramiento de la calidad del aire, sin mencionar que representa un importante corredor biológico para los recursos naturales (Gobierno Municipal de Guadalupe, 2020).

Las descargas de residuos sólidos, la quema de materiales y, sobre todo, la construcción de asentamientos urbanos irregulares son los principales problemas de los ríos del Área Metropolitana de Monterrey (Rodríguez Palacios, 2021).

Planteamiento del problema

Identificar las islas de calor del AMM es necesario para cuantificar su crecimiento y relación con los procesos de urbanización e industrialización. El efecto de las islas de calor urbanas se ve contrarrestado gracias a la acción de cuerpos de agua, haciendo énfasis en el cauce de ríos. Conocer los efectos que la infraestructura verde/azul tienen sobre las ICU dará pie al desarrollo de alternativas que puedan ayudar a contrarrestar el aumento de temperatura y la importancia que éstas tienen como un agente de mitigación en las zonas urbanas e industriales, sin mencionar el impacto positivo que tienen sobre la población.

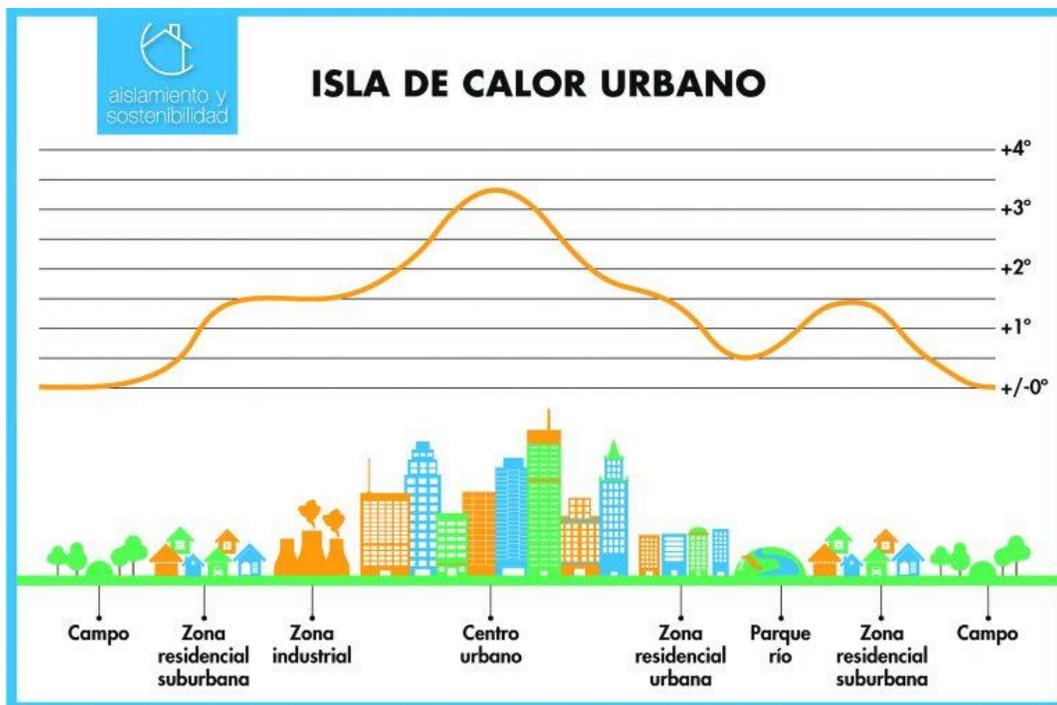
El aumento de las temperaturas en la ciudad encarece la habitabilidad de la vivienda, causando estrés familiar y violencia doméstica, estas condiciones de **impacto social** han sido documentadas por Corral-Verdugo et al. 2014. Además, tienen consecuencias negativas en la salud de los humanos (He, B.J., 2018). Los niños, personas de la tercera edad, grupos de escasos recursos y personas con afecciones respiratorias y cerebrovasculares preexistentes son los más vulnerables a los efectos de las ICU (McMichael, A.J., 2000). En Seúl, las altas temperaturas se asociaron con un incremento en la mortalidad de personas mayores de 65 años (Rivera et al, 2012) y en México, las personas de bajos ingresos y de la tercera edad están en alto riesgo de exposición al calor urbano en la ciudad fronteriza de Juárez (McMichael et al., 2008); mientras que en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), los vecindarios de escasos recursos están expuestos a temperaturas más altas de la superficie terrestre (Chakraborty et al, 2020). Se estima que los índices de mortalidad en el AMM tienen un aumento del 19% por cada 1°C de incremento en temperaturas mayores a los 31°C (Wolf & McGregor, 2013).

Por otro lado, la necesidad de enfriar las viviendas cuando se presentan temperaturas altas representa un **impacto económico** para la población que repercute en la necesidad de aumentar el uso de aire acondicionado, lo cual a su vez se traduce en un fuerte **impacto ambiental** debido a las emisiones de gases

de efecto invernadero como el CO₂ que estos aparatos emiten.

Las transformaciones de la cobertura del suelo urbano son otro factor que produce emisiones de calor antropogénicas a la atmósfera, contribuyendo así a las ICU (Mohan et al., 2020). Tales áreas se encuentran dentro de la capa de dosel urbano -por ejemplo, la capa de la atmósfera en la superficie del suelo o cerca de ella- y tienen temperaturas más cálidas que sus alrededores rurales (Voogt, 2007). (Figura 1).

Figura 1. Efecto de las ICU en diferentes tipos de cubiertas



Fuente: <https://aislamientosostenibilidad.es/islas-de-calor-urbano/>

Las temperaturas más altas son características del centro de la ciudad bajo condiciones de viento en calma y disminuyen con la distancia hacia las áreas suburbanas, rurales y silvestres (Raj, S., et al, 2020). Las islas de calor urbanas se forman debido a cambios en el balance de energía de la superficie (Oke, T., et al, 2017). Su intensidad y magnitud varían según las condiciones climáticas regionales y las características de las construcciones -albedo, emisividad, factor de vista del cielo, flujos de calor antropogénicos- (Jauregui, E. et al 1992; Taha, H., et al 2018)

y se relacionan con los cambios estacionales en la cubierta vegetal y humedad del suelo rural (Kim, J.H., et al, 2016; Park, J. et al, 2017; Li, L., et al, 2020).

El uso de técnicas de teledetección para estudiar las variaciones en los fenómenos de isla de calor urbanas entre diferentes tipos de cobertura es importante para el monitoreo preciso de las ICU y para la identificación objetiva de los cambios espaciotemporales que presenten (Xu, D. & Zhou, D. 2016). Hoy en día, muchos sensores satelitales pueden ser usados para el monitoreo y evaluación de las características de la Tierra. Dentro de los utilizados con mayor frecuencia para el monitoreo de ICU están MODIS, ASTER y Landsat TM, ETM+ y OLI/TIRS (Mirzaei, M., et al, 2020).

Hipótesis

Se demostrará que el efecto térmico de las islas de calor urbanas producto de la urbanización y la actividad industrial, se ve disminuido por la presencia de infraestructura verde/azul y puede ser analizado, evaluado y monitoreado aplicando sensores remotos de observación de la Tierra.

Objetivos del proyecto

General

Demostrar la relación entre la temperatura superficial del suelo y la infraestructura verde/azul y cómo se vincula con el desarrollo urbano del Área Metropolitana de Monterrey durante los últimos 20 años.

Específicos

- Obtener la temperatura superficial del suelo y las zonas climáticas locales del Área Metropolitana de Monterrey para los años 2003, 2013 y 2021.
- Identificar las condiciones de la infraestructura verde/azul del Área Metropolitana de Monterrey y comparar su estado durante los años 2003, 2013 y 2021.
- Analizar cómo la urbanización disminuye el efecto de enfriamiento de los ríos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey.

Marco teórico y conceptual

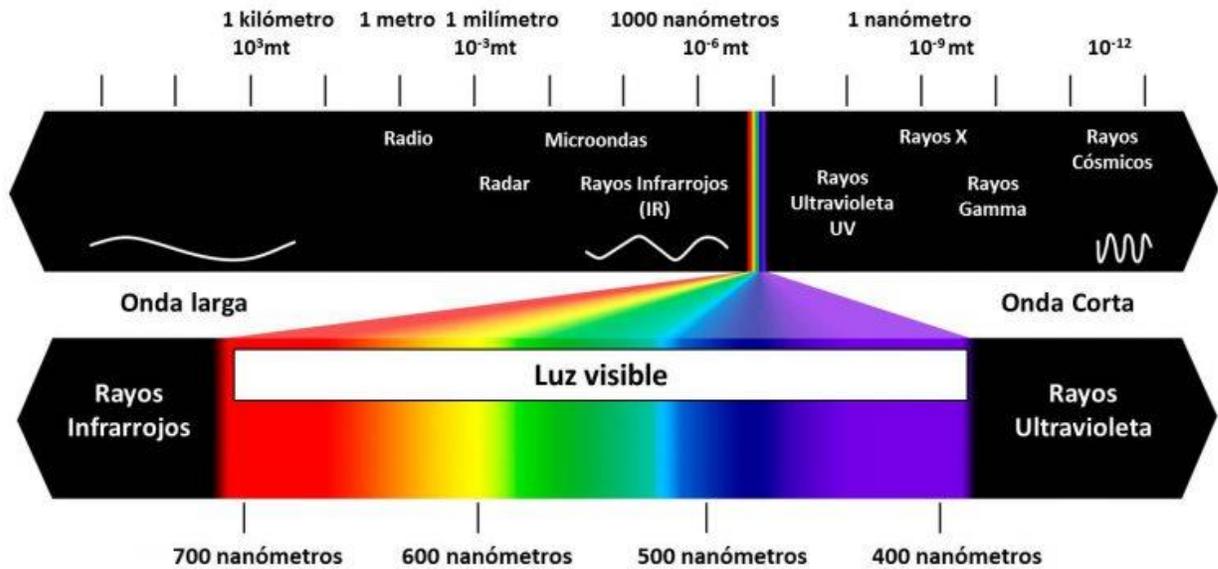
Sensores remotos

Los sensores remotos son instrumentos que captan la información de un objeto a distancia. Son útiles para el análisis de características a escala regional debido a la continuidad de las observaciones (Du et al., 2014). Generalmente empleados desde aeronaves o satélites, los sensores remotos recopilan información meteorológica, oceanográfica, sobre la cubierta vegetal, entre otros por medio de sistemas de detección activos y pasivos (SEGEMAR 2022).

De acuerdo con Kogut (2021), se considera teledetección activa al proceso de teledetección que funciona con su propia fuente de emisión de luz, y se caracterizan por su transmisión de luz u ondas, por lo que determinan distancia, altura, condiciones atmosféricas, etc. A diferencia de los activos, los sensores pasivos dependen de la energía natural que rebota en el objetivo y emplean sensores multiespectrales e hiperespectrales que miden la cantidad recibida con múltiples combinaciones de bandas, las cuales se caracterizan por el número de canales (dos longitudes de onda o más).

Las bandas espectrales corresponden a un grupo de longitudes de ondas del espectro electromagnético. Desde las ondas de longitud corta como los rayos x, pasando por la luz visible hasta las ondas de longitud larga (Gómez, 2020).

Figura 2. Espectro electromagnético

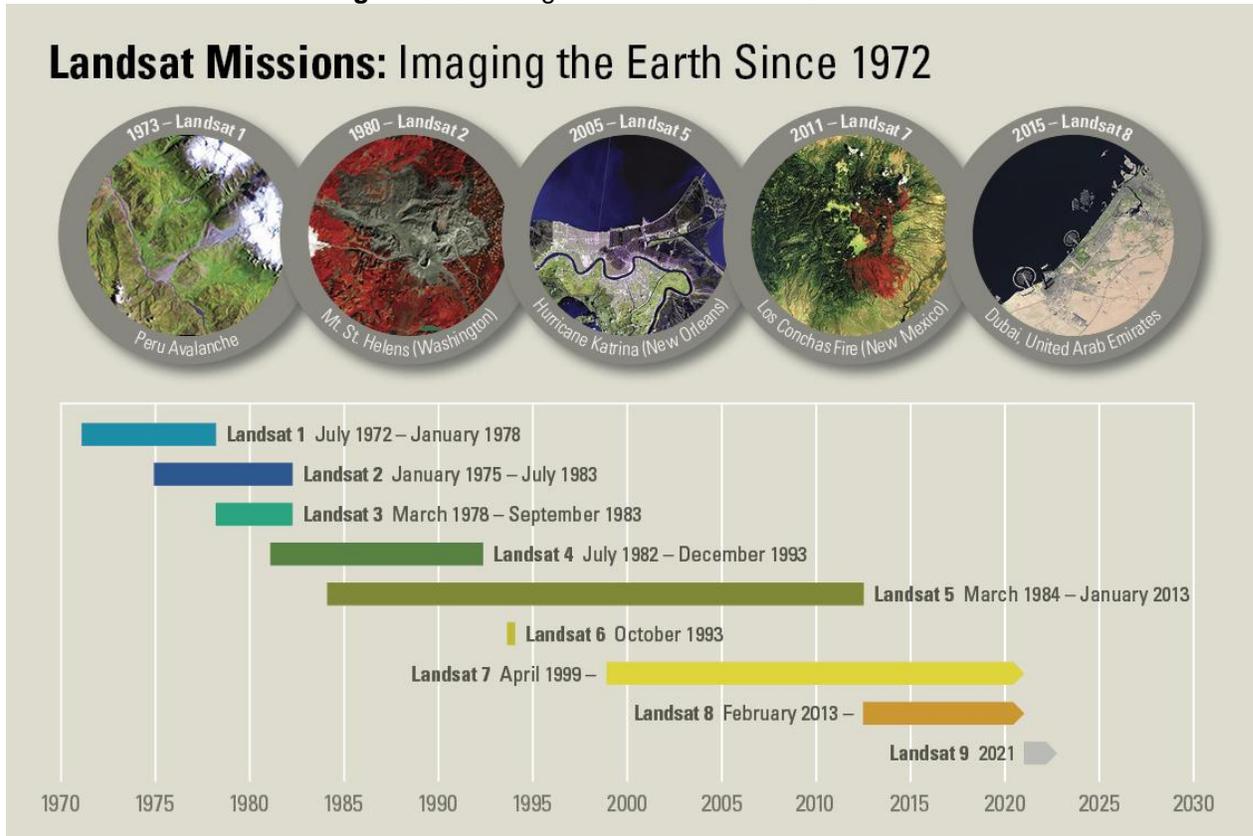


Fuente: <https://ecoscript.org/quesonlossensoresremotos/>

LANDSAT

Las misiones LANDSAT se componen de ocho satélites operativos de observación que utilizan sensores remotos para recolectar datos e imágenes de la Tierra como parte del Programa Nacional de Imágenes Terrestres del Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey; USGS). Desde 1972, han adquirido de manera continua imágenes espaciales de la superficie terrestre.

Figura 3. Cronología de misiones LANDSAT



Fuente: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>

Para efecto de este proyecto, los resultados obtenidos serán comparados con imágenes recopiladas de los satélites **LANDSAT 5 y 8**.

Desarrollado por la NASA, LANDSAT 5 fue lanzado desde la Base Aérea Vandenberg en California en 1984 y orbitó el planeta más de 150 mil veces en un periodo de 28 años, transmitiendo alrededor de 2.5 millones de imágenes de las condiciones de la superficie terrestre del mundo. Ese satélite llevaba sensores Multispectral Scanner (MSS) con cuatro bandas espectrales idénticas a las de LANDSAT 1 y 2, con un intervalo de muestreo terrestre (tamaño del pixel) de 57 x 79 m y Thematic Mapper (TM) con siete bandas espectrales y una banda termal con un intervalo de muestreo de 30 m reflectivo y 120 m térmico.

Tabla 1. Características técnicas LANDSAT 5

Multispectral Scanner (MSS)	Thematic Mapper (TM)
Banda 4 Verde visible (0.5 - 0.6 μm)	Banda 1 Visible (0.45 - 0.52 μm) 30 m
Banda 5 Rojo Visible (0.6 - 0.7 μm)	Banda 2 Visible (0.52 - 0.60 μm) 30 m
Banda 6 Infrarrojo cercano (0.7 - 0.8 μm)	Banda 3 Visible (0.63 - 0.69 μm) 30 m
Banda 7 Infrarrojo cercano (0.8 - 0.11 μm)	Banda 4 Infrarrojo cercano (0.76 - 0.90 μm) 30 m
	Banda 5 Infrarrojo cercano (1.55 - 1.75 μm) 30 m
	Banda 6 Térmica (10.40 - 12.50 μm) 120 ,
	Banda 7 Infrarrojo medio (2.08 - 2.35 μm) 30 m

Fuente: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>

LANDSAT 8, anteriormente Misión de Continuidad de Datos de LANDSAT (LDCM por sus siglas en inglés) ha estado en órbita desde febrero de 2012. Este satélite cuenta con los instrumentos Operational Land Imager (OLI), el cual mide en las porciones visibles, infrarrojas cercano e infrarrojo de onda corta del espectro electromagnético; y Thermal Infrared Sensor (TIRS) que mide la temperatura superficial terrestre en dos bandas térmicas.

Tabla 2. Características técnicas LANDSAT 8

Operational Land Imager (OLI)	Thermal Infrared Sensor (TIRS)
Banda 1 Aerosol costero (0,43 - 0,45 μm) 30 m	Banda 10 TIRS 1 (10.6 - 11.19 μm)) 100 m
Banda 2 Azul (0,450 - 0,51 μm) 30 m	Banda 11 TIRS 2 (11.5 - 12.51 μm) 100 m
Banda 3 Verde (0,53 - 0,59 μm) 30 m	
Banda 4 Rojo (0,64 - 0,67 μm) 30 m	
Banda 5 Infrarrojo cercano (0,85 - 0,88 μm) 30 m	
Banda 6 SWIR 1(1,57 - 1,65 μm) 30 m	
Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm) 30 m	

Banda 8 Pancromático (PAN) (0,50 - 0,68 μm) 15 m	
Banda 9 Cirrus (1,36 - 1,38 μm) 30 m	

Fuente: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>

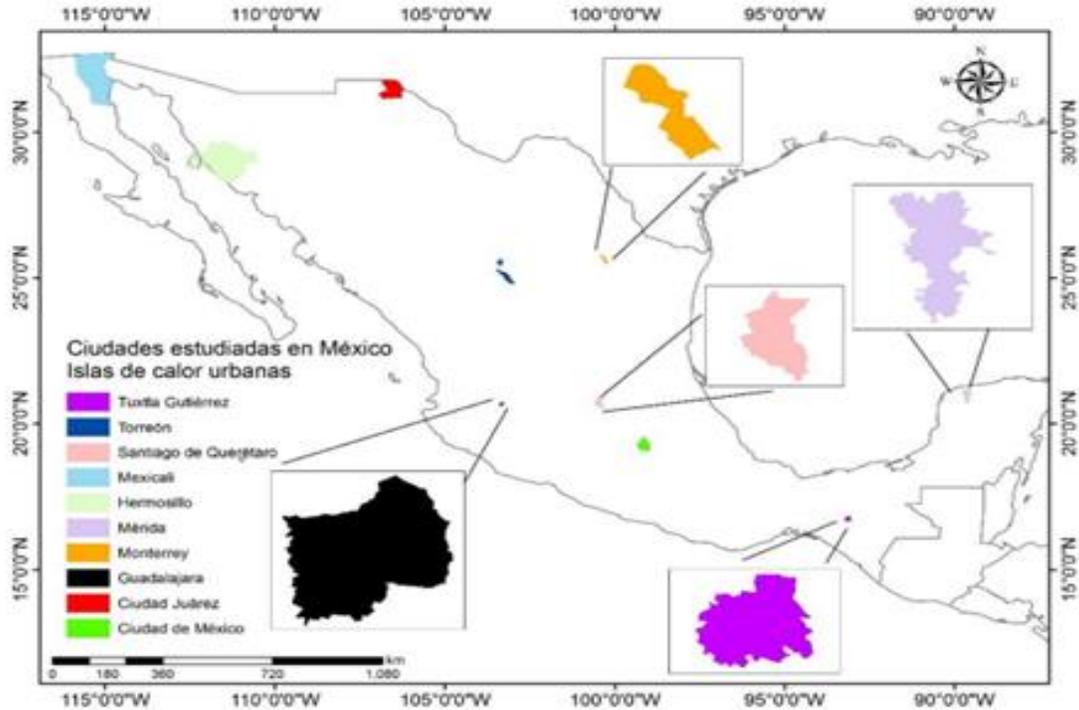
Islas de calor urbanas (ICU)

La diferencia de temperaturas presentes en la ciudad o zonas urbanas y en el campo debido a la urbanización se define como islas de calor urbanas (ICU). Son uno de los problemas de gestión urbana, especialmente en metrópolis, lo cual puede afectar la infraestructura y el bienestar de la ciudadanía (Mirzaei et al., 2020). La presencia de islas de calor en zonas urbanas y suburbanas se relaciona con factores como la densidad poblacional del área en cuestión (Moyer & Hawkins, 2017), el uso de materiales de construcción como concreto y acero que reflejan las temperaturas, la realización de actividades de índole industrial, entre otros; los cuales ocasionan un incremento en la temperatura superficial terrestre.

El efecto de las temperaturas cercanas a la superficie se ha estudiado durante más de 200 años gracias al trabajo sobre el *Clima de Londres* de Luke Howard publicado en 1818; en donde planteó la hipótesis de que la diferencia en temperaturas se debe al calentamiento antropogénico de los edificios, a la falta de vegetación y a las obstrucciones a la ventilación del aire urbano. Esta comparación de temperaturas es una metodología para la evaluación de las islas de calor urbanas que sigue vigente (Stewart & Mills, 2021).

En la República Mexicana se han reportado estudios en Tuxtla Gutiérrez, Torreón, Santiago de Querétaro, Mexicali, Hermosillo, Mérida, Monterrey, Guadalajara, Ciudad Juárez y Ciudad de México, las cuales se representan en la figura 4. Sin embargo, aunque es un fenómeno documentado a escala global, en México ha sido poco estudiado ya que en los últimos 30 años se han publicado 19 artículos científicos al respecto (Manzanilla-Quiñones, 2022).

Figura 4. Publicaciones sobre el estudio de ICU en México



Fuente: Manzanilla-Quiñones, 2022

Las altas temperaturas urbanas traen consigo consecuencias negativas que repercuten en el bienestar de la población y en el ambiente, por lo que encontrar soluciones para aminorar el efecto de las islas de calor urbanas es imperativo para mejorar la calidad de vida de las personas (Mirzaei et al, 2020).

Temperatura superficial del suelo (LST)

La temperatura de la superficie del suelo o Land Surface Temperature (LST) es la temperatura radiactiva de la tierra derivada de la radiación solar (Ansar et al., 2021). Es una mezcla entre las temperaturas de la vegetación y del suelo y es un determinante básico del comportamiento térmico terrestre.

El cambio de las cubiertas naturales del suelo debido a actividades humanas puede llevar a cambios en las capacidades termales, coeficiente de albedo, conductividad de calor y humedad (Mirzaei et al, 2020). La construcción de caminos, edificios y

otras estructuras que reemplazan la vegetación como lo son las áreas urbanas desarrolladas, incrementan la rugosidad superficial, disminuyen las velocidades del viento y promueven el estancamiento del aire, calentando el área urbana. (Moyer & Hawkins, 2017).

Local Climate Zones (LCZ)

Las zonas climáticas locales o Local Climate Zones (LCZ) se refieren a un sistema de clasificación desarrollado por Stewart y Oke debido a que no se tenía un enfoque universal para describir la infraestructura de las ciudades; esto con el propósito ayudar en la estandarización de los métodos de observación y documentación en los estudios de islas de calor urbanas.

Las LCZ son definidas como regiones de cobertura superficial, estructura, material y actividad humana uniformes que abarcan desde cientos de metros hasta varios kilómetros a escala horizontal (Stewart & Oke, 2012). Este sistema está conformado por 17 clases, de las cuales 10 se consideran como urbanas y suponen una gran ventaja en la comparación sistemática de los estudios globales de islas de calor.

El microclima urbano es la diferencia de las condiciones climáticas entre un lugar determinado y otro debido a la influencia de factores ecológicos como la cobertura del suelo, la cual hace referencia a las características del suelo; principalmente si este es permeable o impermeable (Bechtel et al, 2015).

Infraestructura verde/azul (IVA)

La Comisión de Europa (2013) define a la infraestructura azul-verde (IAV) o blue-green infrastructure (BGI) como redes interconectadas planificadas de áreas naturales y seminaturales, las cuales incluyen cuerpos de agua y espacios abiertos verdes que provisionan diferentes servicios ecosistémicos. Diseñada y gestionada para la conservación de la biodiversidad y uso sostenible de los ecosistemas, la IAV

tiene como objetivo la restauración ecológica y mejorar la calidad ambiental del territorio, sin mencionar que ayudan en la mejora de la salud y bienestar y a mitigar los efectos del cambio climático.

Los servicios ecosistémicos se dividen en tres categorías: de regulación, de abastecimiento y culturales, los cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 3. Servicios de los ecosistemas

Servicios de los ecosistemas		
De regulación	De abastecimiento	Culturales
<ul style="list-style-type: none"> ● Calidad del aire ● Purificación de aguas ● Formación y fertilización del suelo ● Polinización ● Dispersión de semillas de plantas silvestres y cultivadas 	<ul style="list-style-type: none"> ● Alimentos silvestres y/o cultivados ● Agua para nuestras actividades ● Madera de bosques naturales y plantaciones forestales ● Medicamentos ● Energías limpias ● Fibras vegetales 	<ul style="list-style-type: none"> ● Disfrute estético del paisaje ● Ocio y esparcimiento ● Conocimiento científico ● Bienestar espiritual e inspiración artística ● Turismo en la naturaleza ● Creación de empleo

Fuente: https://www.euskadi.eus/web01-a2ingdib/es/contenidos/documentacion/cartografia_ecomilenio/es_def/index.shtml

De acuerdo con la literatura, las áreas verdes y los ríos tienen un efecto de frescor en la región, minimizando el efecto de las islas de calor, es por ello que deben ser consideradas como la infraestructura natural de las ciudades. (Jiang et al, 2021). La infraestructura verde/azul, es decir, las áreas verdes y los ríos, tiene un efecto de enfriamiento considerable que mitiga la acción de las ICU, por lo que la rehabilitación y conservación de ríos urbanos es una alternativa para disminuir las temperaturas.

De manera general, los ríos son descritos como corrientes de agua que fluyen desde su nacimiento hasta su desembocadura en otro río, lago o en el mar y puede ser

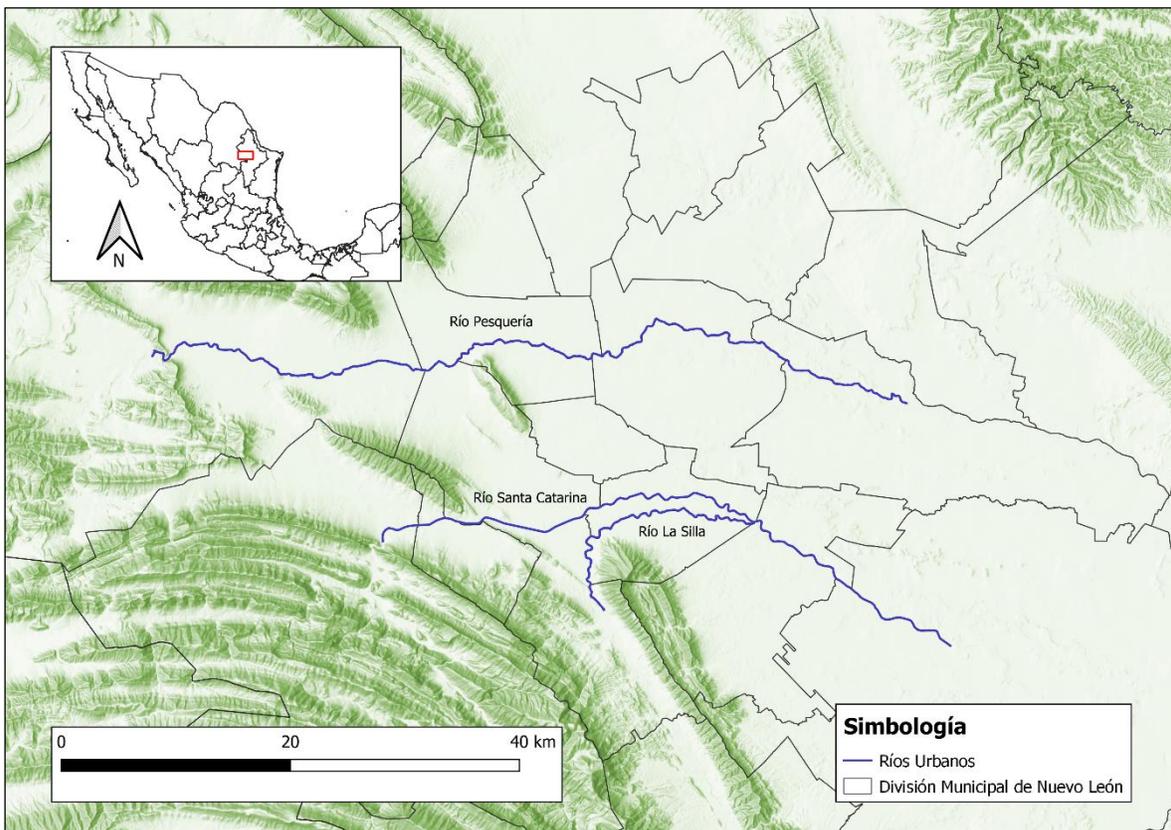
más o menos caudaloso dependiendo de las partes del río (Valdivielso, 2020). Debido a la abundancia de publicaciones en torno a los ríos urbanos, aún no hay una definición única para este concepto. De acuerdo con Durán Vian et al., un tramo de un río debe considerarse como urbano cuando se encuentren usos urbanos en su dominio público hidráulico o sus zonas de protección y/o cuando dicho tramo se encuentre inmerso en una matriz urbana.

Metodología

Área de estudio

Nuevo León forma parte de la región hidrológica número 24 (RH24) Bravo-Conchos, localizada al norte del país, cuyo cauce principal y la frontera entre los Estados Unidos y los Estados Unidos Mexicanos es el río Bravo. En la RH24 Bravo-Conchos se tienen problemas de escasez de agua en las zonas con mayor desarrollo económico y demográfico. El Área Metropolitana se caracteriza por los 3 ríos urbanos que la atraviesan: Pesquería, Santa Catarina y La Silla, siendo estos parte de su infraestructura azul representativa (Figura 5).

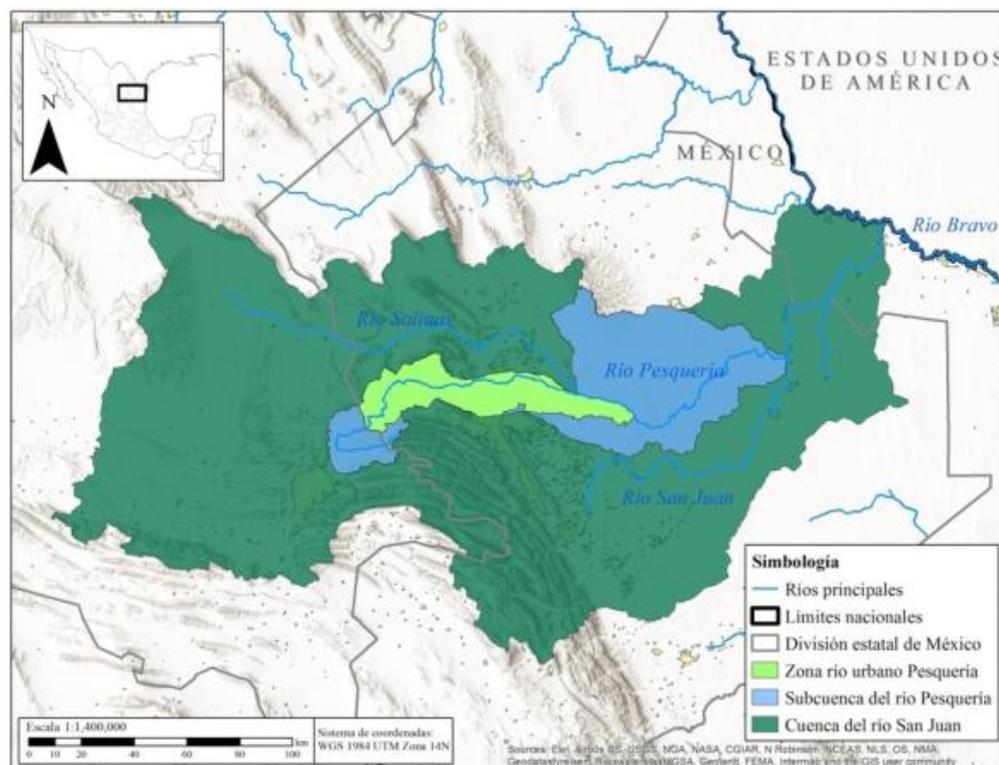
Figura 5. Ríos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey



Fuente: Elaboración propia

Si bien su cuenca abarca una parte del municipio de Saltillo, Coahuila, el río Pesquería nace en el municipio de García, Nuevo León y atraviesa los municipios de García, Monterrey, Escobedo, Apodaca y Pesquería. Los arroyos que conforman este río se originan en el área natural protegida de Cumbres de Monterrey y la Sierra El Fraile y San Miguel, pertenecientes a la región hidrológica-administrativa del río Bravo (Ferreño, 2015). El río Pesquería es un tributario del río San Juan de la subregión Bajo Bravo que pertenece a la RH24 Bravo-Conchos. En la figura 6 se muestra la morfología del río y los límites municipales que cruza el cauce.

Figura 6. Cuenca del río San Juan y subcuenca urbana del río Pesquería



Fuente: <https://remexcu.org/index.php/grupos/conectividad-de-rios/cuencas/cuenca-del-rio-pesqueria>

El río Santa Catarina nace en la sierra de San José, cerca de los límites de Coahuila y atraviesa los municipios de Santiago, Santa Catarina, San Pedro, Monterrey, Guadalupe, Juárez y Cadereyta, teniendo una extensión aproximada de 60 kilómetros lineales. Es un Área Natural Protegida Estatal que a pesar de tener un cauce intermitente, cuenta con vegetación ribereña que se desarrolla a lo largo del curso de aguas naturales (Naturalista México, s.f.)

Por otro lado, el Río La Silla se origina en la zona del Huajuco en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental, forma parte de la región hidrológica-administrativa del río Bravo en la cuenca del Río Bravo-San Juan y recorre una porción de dos subcuencas, la subcuenca El Pinito-Los Angelitos y Alto Santa Catarina 1. Tiene una extensión aproximada de 40 km lineales y 7.44 km pertenecen al Área Natural Protegida (ANP) Nuevo Parque Ecológico La Pastora (Gobierno Municipal de Guadalupe, 2020).

Materiales y métodos

WUDAPT LCZ Generator

Previo a la identificación de las islas de calor urbanas, se clasifica el Área Metropolitana de Monterrey por medio del esquema de zonas climáticas locales **WUDAPT LCZ GENERATOR** desarrollado por Stewart y Oke (2012). Esta metodología se desarrolló para formar parte de un protocolo global para la obtención de información sobre la forma y función de las ciudades (Cai et. al, 2018) y está comprendida por 17 zonas basadas en las propiedades de la superficie -altura y densidad de los edificios y árboles- y la cubierta de la superficie -permeable o impermeable-.

La forma urbana describe las demandas energéticas de la ciudad, las cuales se pueden representar por el flujo de calor antropogénico (Mills et. al, 2015). Para captar estos datos a una escala útil, WUDAPT clasifica en 3 niveles (Figura 7) su recopilación, en donde cada uno se caracteriza por tener una metodología diferente.

Figura 7. Jerarquía de datos WUDAPT

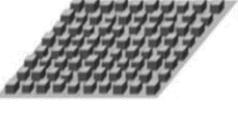
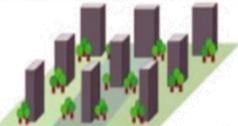
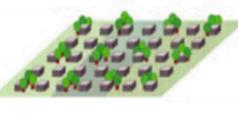


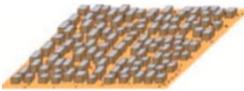
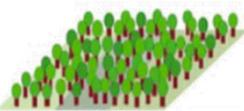
Fuente: Mills et al., 2015

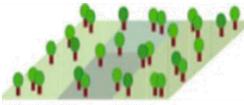
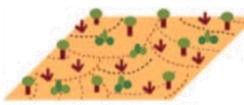
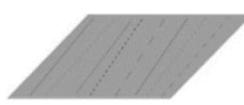
En la Tabla 4 se pueden apreciar los tipos de zonas en que una ciudad puede clasificarse y sus características de acuerdo a la clasificación WUDAPT. Para este caso de estudio, se realizó la clasificación de la mancha urbana del AMM y de los municipios más próximos a ella, haciendo énfasis en las zonas cercanas a los cauces de los ríos urbanos -Pesquería, Santa Catarina y La Silla-, por lo que la información analizada corresponde a la infraestructura ubicada en los municipios de Apodaca, Cadereyta Jiménez, El Carmen, García, San Pedro Garza García, General Escobedo, General Zuazua, Guadalupe, Juárez, Marín, Monterrey, Pesquería, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago.

La clasificación realizada corresponde al nivel 0 de la Jerarquización de datos WUDAPT, ya que los datos recopilados solo proporcionan una descripción básica de la zona urbana en términos de zonas climáticas locales (Mills et al., 2015) y es descrita a detalle en la Figura 8.

Tabla 4. Clases de la metodología de LCZ

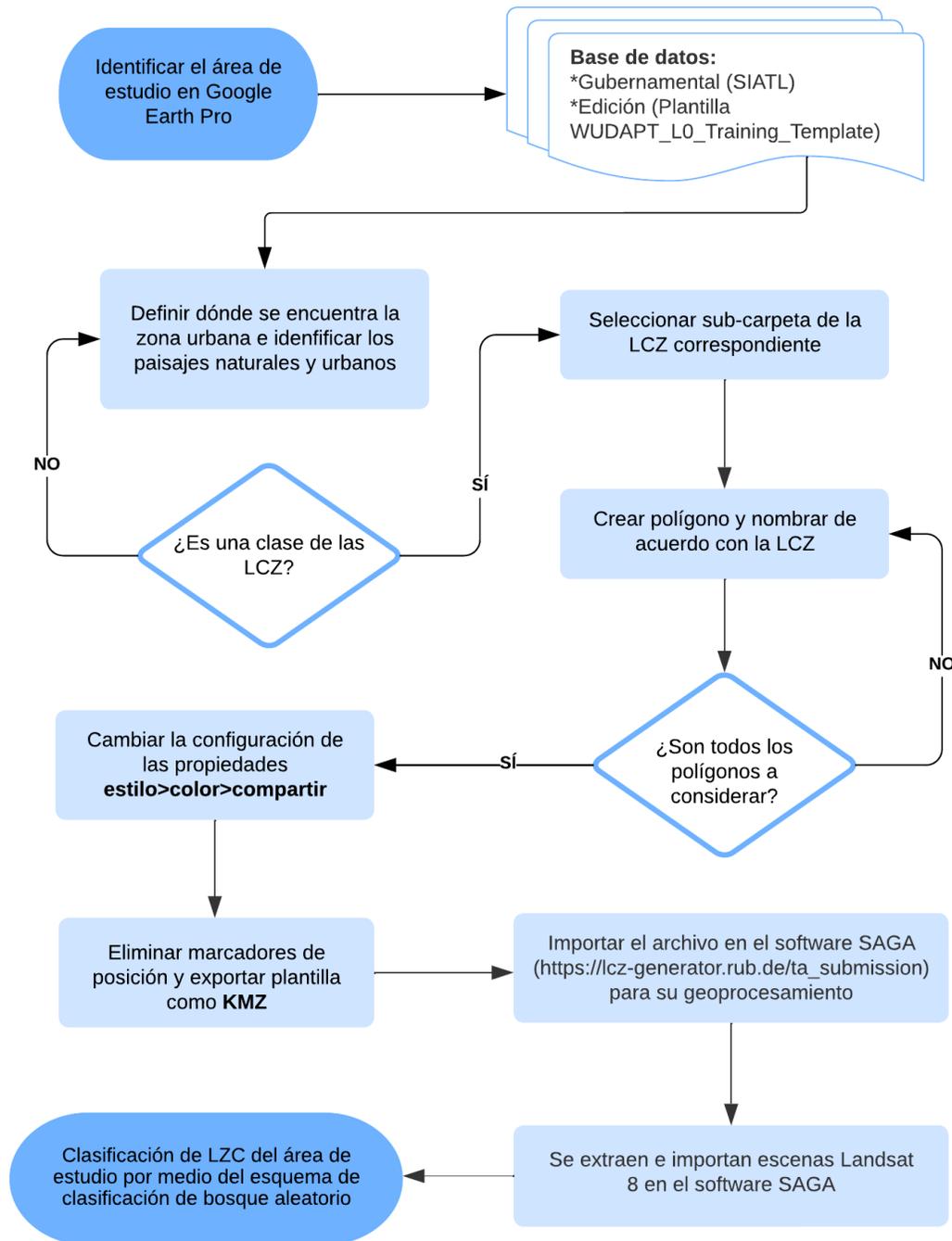
Clase	Descripción	
1.Compacto de elevada altura		<p>Cantidad densa de edificios altos de 10 o más plantas. Visibilidad del cielo significativamente reducida. De acero, concreto y vidrio. Mayormente pavimentado, con pocos o sin árboles. Función: comercial, residencia. Locación: centro, periferia.</p>
2.Compacto de mediana altura		<p>Edificios de 3 a 9 plantas, de cantidad densa o cercanos entre sí. Separados por calles estrechas y patios internos. Uniformes en altura. Visibilidad del cielo significativamente reducida. Materiales pesados. Mayormente pavimentado, con pocos o sin árboles. Función: residencial, comercial, industrial. Locación: centro, periferia.</p>
3.Compacto de poca altura		<p>Densa cantidad de edificios de 1 a 3 plantas, cercanos entre sí. Edificios pequeños y apretadamente apilados a lo largo de calles estrechas, en su mayoría sin alineamiento distinguible. Visibilidad del cielo significativamente reducida. Materiales pesados. Mayormente pavimentado, con pocos o sin árboles. Función: residencial, comercial. Locación: Ciudades viejas o densamente pobladas, pueblos, villas, centro, periferia.</p>
4.Abierto de elevada altura		<p>Arreglo abierto de edificios con altura de 10 pisos y arreglo geométrico. Edificios uniformes en altura, ancho y espacio. Visibilidad del cielo significativamente reducida. Materiales pesados. Mayormente pavimentado, con pocos o sin árboles. Función: residencial. Locación: periferia, ciudades densamente pobladas, ciudades de estilo socialista.</p>
5.Abierto de mediana altura		<p>Arreglo abierto de edificios de 3 a 9 pisos. Visibilidad del cielo ligeramente reducida. Materiales de construcción pesados y paredes y techos gruesos. Árboles dispersos y abundante cobertura de plantas. Función: residencial, institucional, comercial. Locación: periferia.</p>
6.Abierto de poca altura		<p>Arreglo abierto de edificios pequeños de 1 a 3 pisos, separados o juntos en filas, seguido en un patrón de red. Visibilidad del cielo ligeramente reducida. Materiales de construcción variados. Árboles dispersos y abundante cobertura de plantas. Función: residencial, comercial. Locación: Ciudad, periferia, ciudades de cercanías, ciudades rurales.</p>

<p>7.Ligero de poca altura</p>		<p>Densa cantidad de edificios de un solo piso colocados en arreglos compactos (seguido sin forma), muy juntos. Edificios separados por caminos angostos y callejones. Poca infraestructura o infraestructura no consolidada. Visibilidad del cielo ligeramente reducida. Materiales de construcción ligeros, paredes delgadas y techo plano. Pocos o sin árboles. Cobertura de suelo compactada. Población densamente alta. Función: residencial, agricultura. Locación: periferia de grandes ciudades en desarrollo. Regiones metropolitanas extendidas, ciudad interior o pueblos rurales.</p>
<p>8.Grande de poca altura</p>		<p>Arreglo abierto de grandes edificios bajos de 1-3 pisos, separados por extensas superficies pavimentadas. Los edificios se extienden a los lados, no hacia arriba, techos planos. Visibilidad del cielo ligeramente reducida. Materiales de construcción variados. Pocos o sin árboles. Cobertura del suelo mayormente pavimentada. Función: Industria ligera, comercial, centro de transporte. Locación: periferia.</p>
<p>9.Espaciadamente construido</p>		<p>Edificios pequeños o de tamaño mediano muy esparcidos en el paisaje natural. Visibilidad completa del cielo. Materiales de construcción variados. Árboles dispersos y abundante cobertura de plantas. Función: residencial, comercial, institucional, agricultura. Locación: periferia, región metropolitana extendida. Nuevos desarrollos de tracts urbanos. Pueblos rurales, campo ligeramente poblado.</p>
<p>10.Industria pesada</p>		<p>Mezcla altamente irregular de estructuras industriales bajas y medianas. Estructuras espaciadas abiertamente en superficies compactadas. Visibilidad del cielo ligeramente reducida. Materiales de construcción variados. Pocos o sin árboles. Grandes cantidades de desperdicio de calor y contaminantes atmosféricos expulsados de procesos mecánicos y químicos. Función: industrial. Locación: ciudad o campo.</p>
<p>11.Árboles densos</p>		<p>Paisaje altamente arbolado por árboles caducifolios y/o perenifolios. Árboles espaciados abiertamente a través de superficie permeable (plantas bajas). Visibilidad del cielo ligeramente reducida. Pocos o ningún camino o edificio. Función: Bosque natural. Cultivo de árboles, recreación urbana. Locación: ciudad o campo.</p>

12. Árboles dispersos		Paisaje ligeramente arbolado por árboles caducifolios y/o perennifolios. Árboles dispersos a través de suelo permeable. Visibilidad del cielo ligeramente reducida. Pocos o sin caminos o edificios. Función. Bosque natural, cultivo de árboles, recreación urbana. Locación: ciudad o campo.
13. Arbusto o matorral		Arbustos abiertos, matorrales y árboles leñosos en suelo permeable. Completa visibilidad del cielo ligeramente reducida. Poco o sin caminos o edificios. Función: matorral desértico, matorral interior, matorral mediterráneo, cultivo de árboles, agricultura. Locación: ciudad o campo.
14. Plantas bajas		Paisaje sin características de suelo permeable, predominantemente cubierto por plantas bajas. Pocos o sin árboles, caminos o edificios. Visibilidad completa del cielo. Función: pastizales naturales, agricultura, recreación urbana. Locación: ciudad o campo.
15. Roca desnuda / pavimento		Paisaje sin características de suelo permeable, predominantemente de roca, pavimentado o compactado. La cobertura del suelo varía. Pocos o sin árboles, plantas o edificios. Visibilidad completa del cielo. Función: Desierto natural, escudo geológico. Transporte. Locación: ciudad o campo.
16. Suelo desnudo / arena		Paisaje sin características de suelo permeable, predominantemente suelo o arena. Pocos o sin árboles, plantas, caminos o edificios. Visibilidad completa del cielo. Función: desierto natural, agricultura, tierras estériles. Locación: ciudad o campo.
17. Agua		Cuerpos de agua grandes y abiertos como mares, lagos y bahías o pequeños cuerpos de agua como ríos, reservas y lagunas. Pocas o sin características de rugosidad. Visibilidad completa del cielo. Función: sistemas naturales de agua, recreación, transporte, industria. Locación: ciudad o campo.

Fuente: <https://www.mdpi.com/2220-9964/4/1/199/htm> Bechtel, I et al., 2015

Figura 8. Método de clasificación de LCZ



Fuente: Elaboración propia

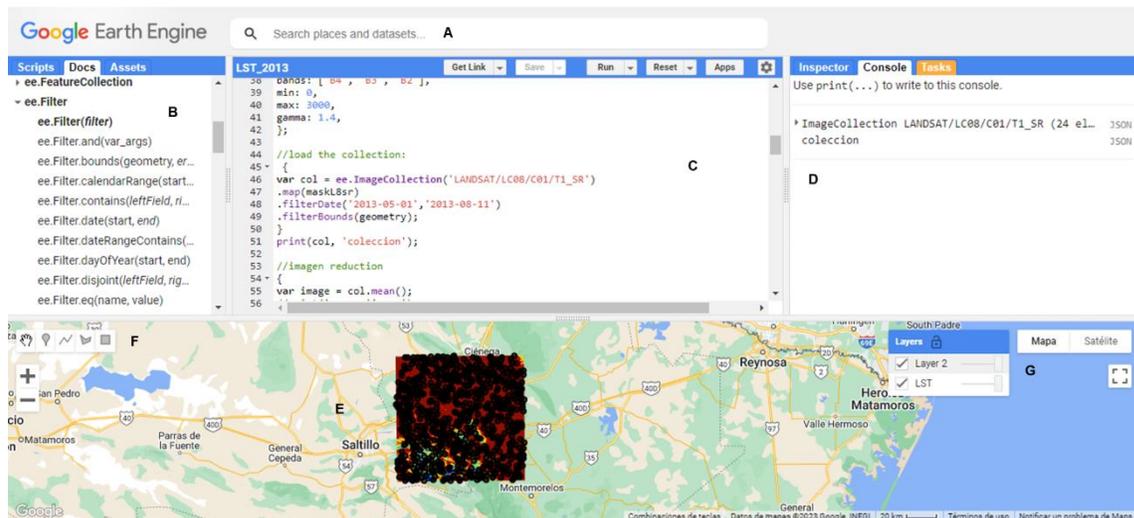
Google Earth Engine (GEE)

El desarrollo de la tecnología satelital y teledetección han proporcionado datos de alta resolución con registros térmicos espacio-temporales continuos para el estudio de fenómenos como las ICU (Lin et al., 2020). Sin embargo, su estudio se ha visto limitado por la capacidad de analizar la información disponible.

Para obtención de las temperaturas superficiales del suelo para los años de estudio propuestos se utilizó la plataforma Google Earth Engine (GEE), la cual permite análisis complejos de información geoespacial (Perilla & Mas, 2020) ya que ofrece imágenes históricas masivas y bases de datos geográficos de sensores como Landsat, Sentinel y MODIS.

De acuerdo con Perilla & Mas, Google Earth Engine se compone de cuatro elementos principales; la infraestructura de Google, el acervo de datos (datasets), API y el Code Editor, los cuales permiten que el usuario sea capaz de procesar información geoespacial.

Figura 9. Infraestructura de Google Earth Engine

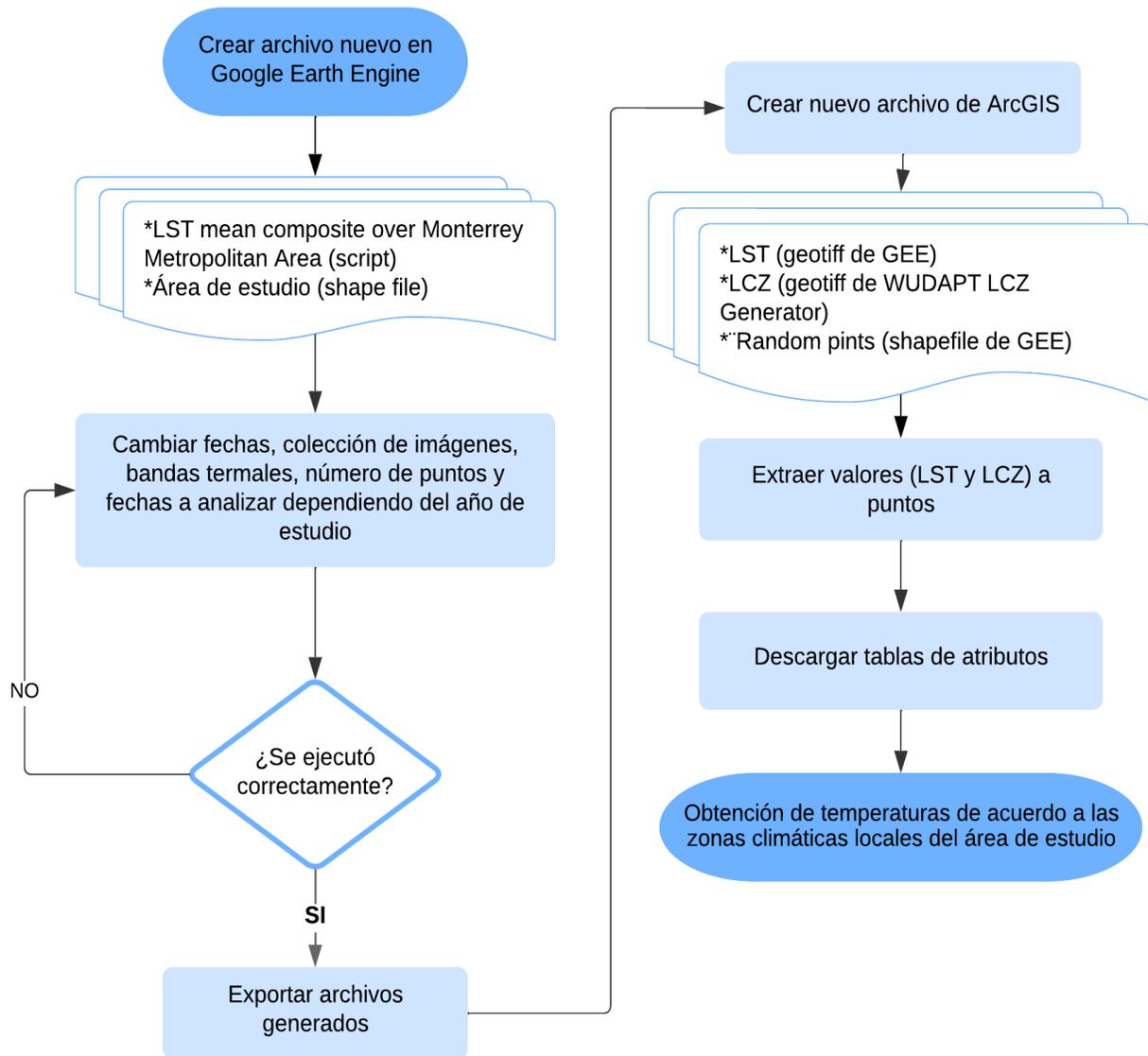


A) Buscador, B) Panel de funciones preestablecidas, C) Panel de programación, D) Consola, E) Panel de visualización, F) Herramientas de dibujo, G) Capas activas en la visualización. Fuente: elaboración propia

La infraestructura de Google Earth Engine contiene los puntos señalados en la figura 9. En el buscador es posible buscar los datasets requeridos, mientras que en el panel de funciones preestablecidas se encuentran comandos y funciones que ayudan a que la programación se desarrolle de una manera más sencilla. En el panel de programación el usuario crea sus algoritmos y en la consola se muestran los resultados usando la función “print”. En el panel de visualización se tiene una vista de los mapas, ráster o vectores que el usuario llamó en su código y las herramientas de dibujo y el panel de capas que se encuentran dentro del panel de visualización ayudan al usuario a seleccionar regiones de interés o modificar las características de visualización de una capa en específico.

Para este caso de estudio se utilizó el script ***LST mean composite over Monterrey Metropolitan Area*** originalmente encontrado en <https://code.earthengine.google.com/6f3cf77c1a23599b92857e4eaa852ad9> y que después fue modificado por F. Yépez en noviembre de 2022. Este script obtiene la LST y puntos aleatorios de un área designada por el usuario de imágenes provenientes de Landsat 8. Debido a que se estarán analizando las ICU del Área Metropolitana, se filtraron los resultados para los meses más calurosos y, siendo los años de estudio 2003, 2013 y 2021, se realizaron modificaciones en la colección de imágenes y en las bandas del satélite para el año 2003, evaluándose así con imágenes provenientes de Landsat 5.

Figura 10. Obtención de LST



Fuente: elaboración propia

Resultados

Clasificación de LCZ

Se realizó la clasificación de las LCZ del Área Metropolitana de Monterrey para los años 2003, 2013 y 2021 en el mes de abril.

En los resultados obtenidos para **2003** se encontró que los tipos de LCZ más representativos de edificaciones son las construcciones compactas y de poca altura, mientras que las zonas con vegetación densa o dispersa son las cubiertas predominantes. Esto quiere decir que se encontraron más áreas tipo **3, A y B**.

Para el año **2013** se vio un aumento en los edificios grandes y de baja altura además de en las industrias (**clases 8 y 10** respectivamente). En el caso de los tipos de cubiertas naturales, al igual que en 2003, se encontraron en mayor medida áreas con vegetación densa o con árboles dispersos (**clases A y B**). Además, hubo un aumento considerable en infraestructura azul, la cual se clasifica como áreas de entrenamiento tipo **G**.

Al igual que en los años 2003 y 2013, para el **2021** se encontraron polígonos de todos los tipos de LCZ, siendo las clases **3, 8 y 9** las más representativas en el caso de los tipos de construcciones. En cambio, las cubiertas terrestres con mayor presencia son las clases **B, D y G**; esto quiere decir que predominan las construcciones compactas de poca altura y los edificios grandes y de baja altura junto con zonas con árboles dispersos o con vegetación de poca altura. Las muestras representativas de agua corresponden a parches de agua encontrados en los cauces de los ríos urbanos de la zona de estudio y a embalses artificiales como el Paseo Santa Lucía y la Presa de La Boca.

Al comparar los resultados obtenidos, se puede observar que aunque en todos los casos predominan las construcciones compactas y bajas, hubo un aumento considerable de edificaciones grandes de baja altura y de industrias pesadas con el pasar de los años, sin mencionar que las áreas densamente pobladas por árboles, disminuyeron considerablemente o fueron reemplazadas por vegetación de baja

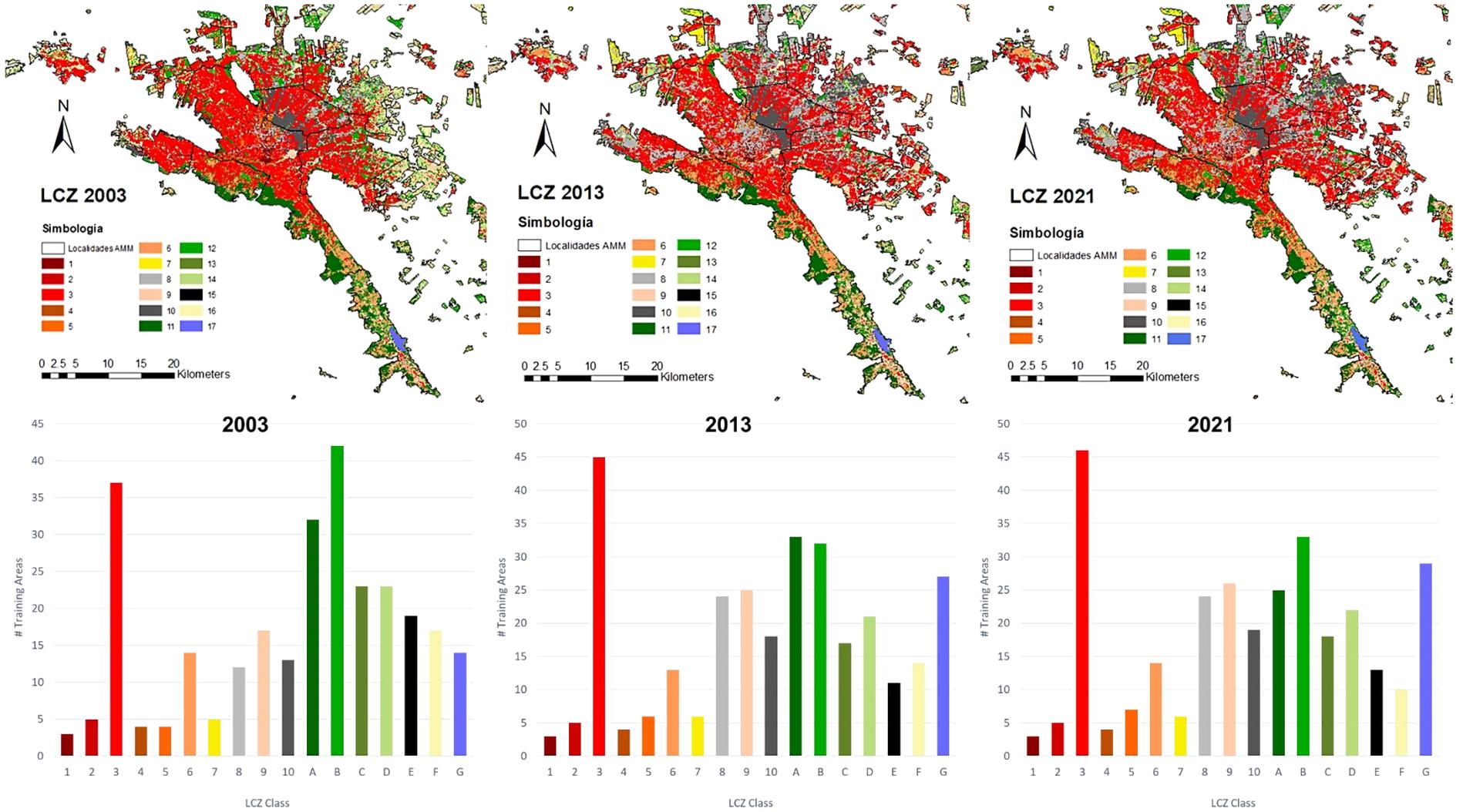
altura, arbustos y matorrales o por parches de suelo sin vegetación presente (Tabla 5).

Tabla 5. Área total de zonas climáticas locales

Tipo	LCZ	2003		2013		2021	
		<i>Km²</i>	%	<i>Km²</i>	%	<i>Km²</i>	%
Construido	1	0.75	0.30	0.93	0.35	0.93	0.33
	2	0.23	0.09	0.26	0.10	0.26	0.09
	3	8.99	3.63	12.73	4,84	15.32	5.52
	4	0.61	0.25	0.61	0.23	1.06	0.38
	5	2.86	1.16	3.88	1.47	4.15	1.49
	6	5.28	2.13	5.12	1.95	5.85	2.11
	7	0.29	0.12	1.90	0.72	2.06	0.74
	8	2.80	1.13	14.96	5.49	18.68	6.73
	9	9.98	4.03	15.80	6.00	18.50	6.66
	10	10.67	4.31	16.79	6.38	24.22	8.73
Natural	11	93.70	37.86	93.50	35.52	91.76	33.05
	12	39.03	15.77	38.35	14.57	35.60	12.82
	13	26.76	10.81	19.44	7.39	17.57	6.33
	14	27.97	11.30	23.49	8.92	26.53	9.55
	15	4.45	1.80	4.56	1.73	4.79	1.72
	16	8.99	3.63	7.40	2.81	5.70	2.05
	17	4.16	1.68	4.03	1.53	4.65	1.67

Fuente: elaboración propia

Figura 11. Zonas climáticas locales del AMM



Tomando en cuenta que los polígonos valorados no solo se encuentran cerca del cauce de los ríos urbanos sino dispersos por toda la mancha urbana, se obtuvieron precisiones generales (Overall accuracy; **OA**) de entre **0.41 a 0.43**, mientras que las precisiones generales de las zonas climáticas locales urbanas (Overall accuracy for the urban LCZ classes only; **OAU**) fueron de **0.49** para los resultados de **2003**, **0.54** para el **2013** y de **0.55** para el **2021**. En el caso de las precisiones generales de las LCZ construidas contra las naturales (Overall accuracy for the built versus natural LCZ classes only; **OABu**) y las precisiones ponderadas (Weighted accuracy; **OAw**) no hubo una diferencia considerable entre los años de estudio, ya que los resultados se encuentran en rangos **0.76 a 0.85** y **0.83 a 0.87** respectivamente.

En la tabla 6 se desglosan las precisiones obtenidas para cada año de estudio.

Tabla 6. Precisiones generales obtenidas

Precisiones Generales Obtenidas			
Precisiones	2003	2013	2021
OA	0.42	0.41	0.43
OAU	0.49	0.54	0.55
OABu	0.76	0.82	0.85
OAw	0.83	0.86	0.87

Fuente: elaboración propia

Los valores obtenidos en las precisiones generales están regidos por el índice kappa (k), el cual evalúa la concordancia o reproducibilidad de instrumentos al representar la proporción de acuerdos observados más allá del azar respecto al máximo acuerdo posible más allá del azar (Abraira, 2001).

Cohen define el índice kappa de la siguiente manera:

$$k = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

Siendo **P_o** la **proporción de acuerdos observados** y **P_e** la **proporción de acuerdos esperados** en la hipótesis de independencia entre los acuerdos.

De acuerdo con Mills et al. (2015), los valores Kappa mayores a 0.60 indican un acuerdo sustancial entre la LCZ prevista y la real; esto indica que las precisiones generales obtenidas y las precisiones generales de las zonas climáticas locales urbanas (**OA y OAu**) tienen un grado de **acuerdo moderado**, mientras que las precisiones generales de las LCZ construidas contra las naturales (**OAbu**) son **sustancial** en el caso del año **2003** y **casi perfectas** para los años **2013 y 2021**. Las precisiones ponderadas (**OAw**) se consideran **casi perfectas** al encontrarse en el rango de 0.80 a 1.0.

En la Tabla 7 se especifican los grados de acuerdo y los rangos a los que están sujetos.

Tabla 7. Interpretación de valores de Kappa

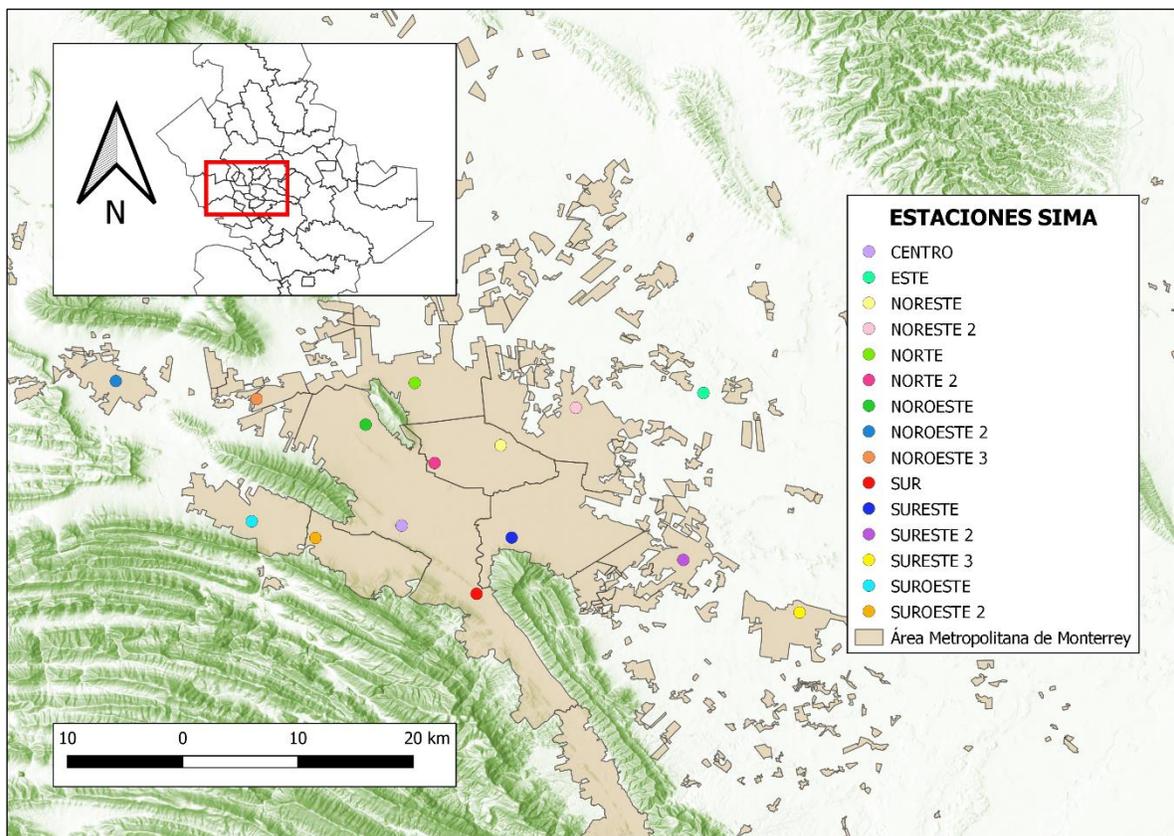
k	Grado de acuerdo
<0.00	Sin acuerdo
0.00-0.20	Insignificante
0.20-0.40	Mediano
0.41-0.60	Moderado
0.61-0.80	Sustancial
0.80-1.00	Casi perfecto

Fuente: Abraira, 2001

Temperatura superficial del suelo (LST)

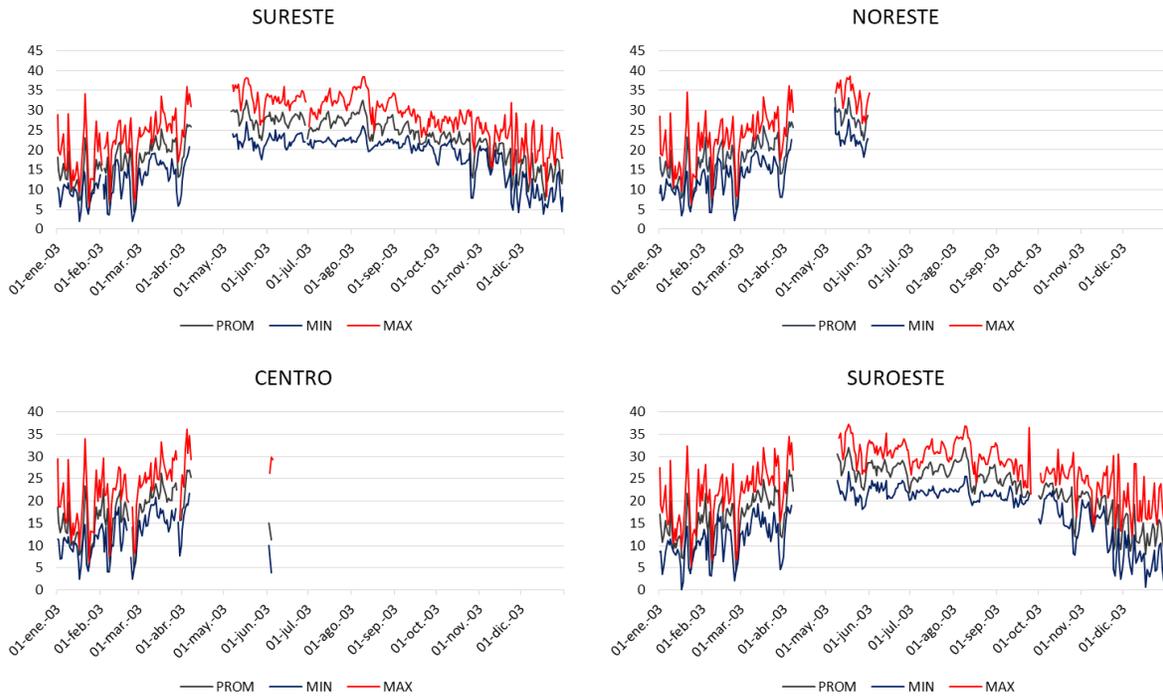
Para la evaluación de las LST de los años de estudio, se analizaron las temperaturas mínimas, máximas y promedio de las estaciones del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (Figura 12) y se determinaron los periodos más calurosos de acuerdo a las temperaturas máximas mensuales; obteniendo así los meses de mayo, junio, julio y agosto como periodo de muestreo (Figuras 13, 14 y 15).

Figura 12. Estaciones meteorológicas del AMM



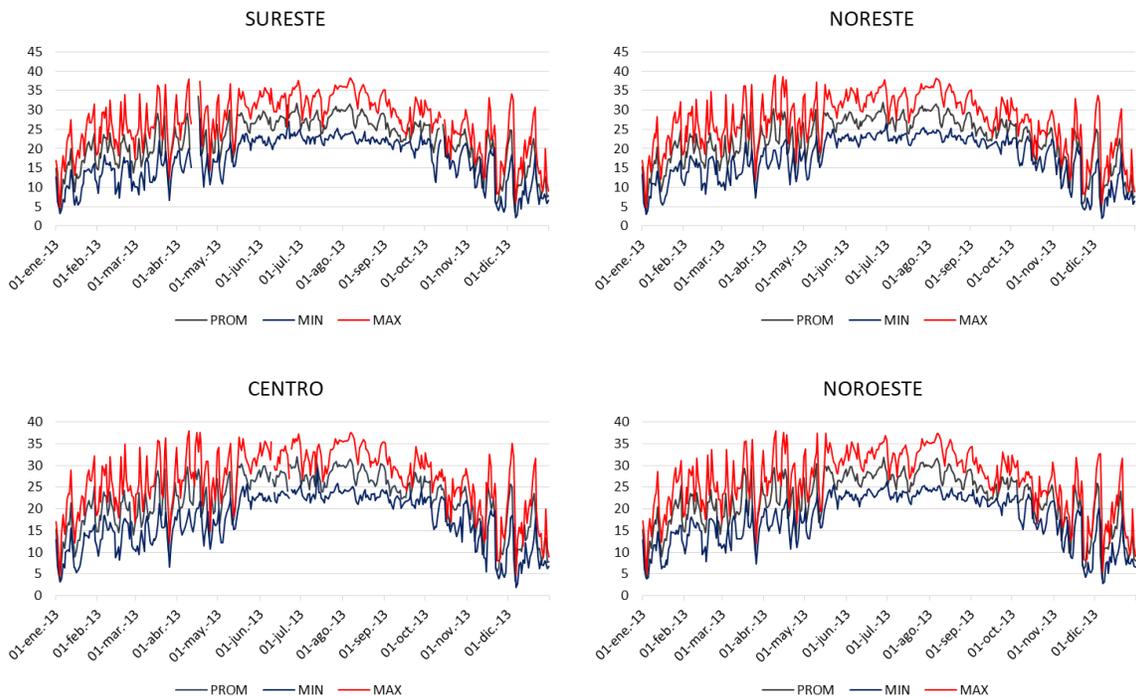
Fuente: elaboración propia

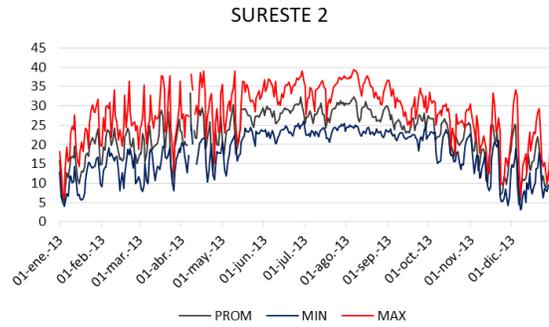
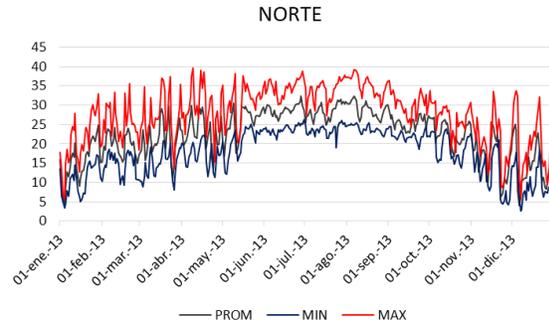
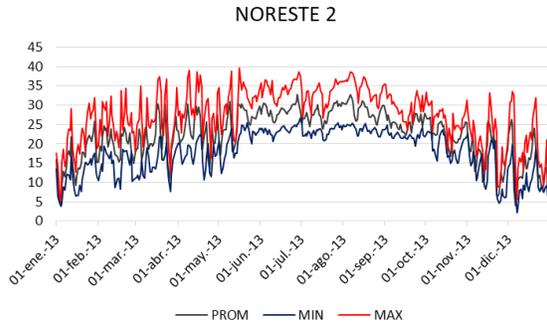
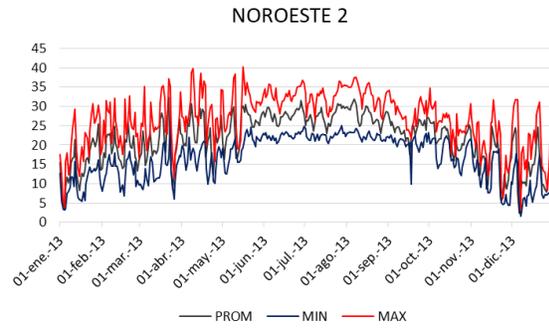
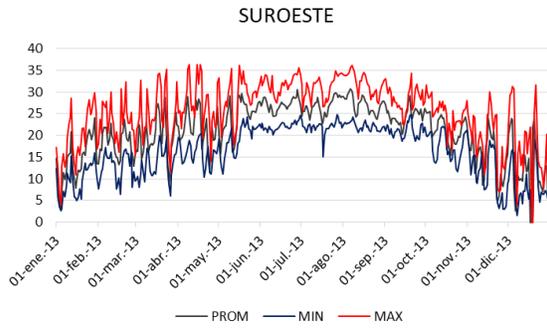
Figura 13. Temperaturas mínimas, máximas y promedio (2003)



Fuente: Estaciones Meteorológicas del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental, N.L. (SIMA)

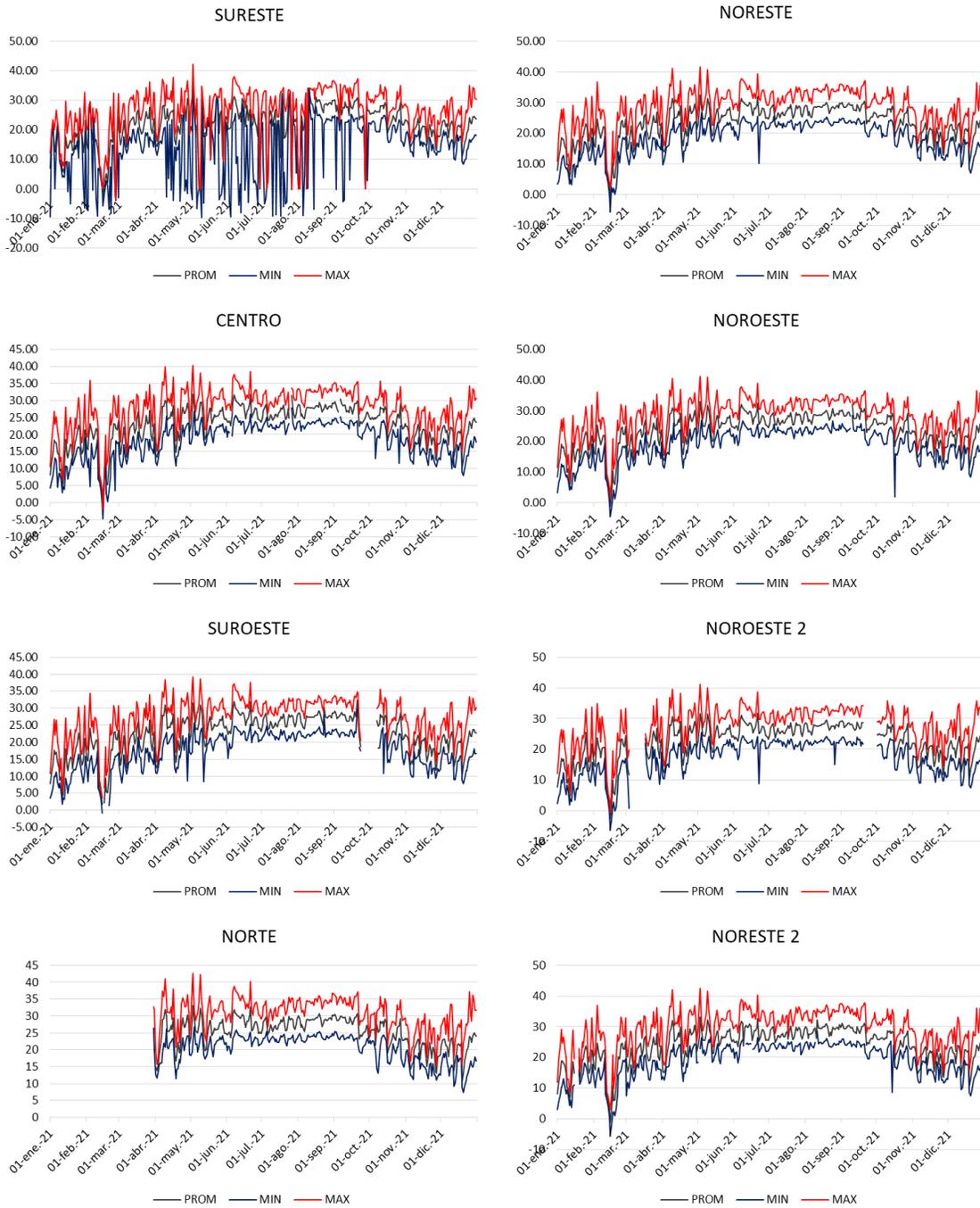
Figura 14. Temperaturas mínimas, máximas y promedio (2013)

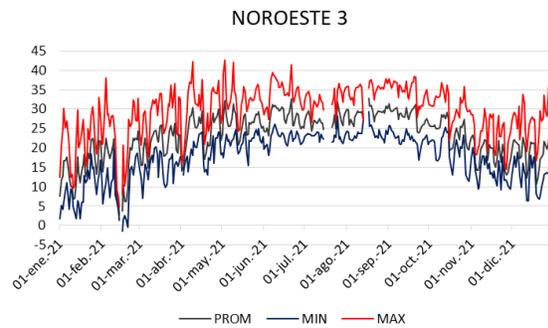
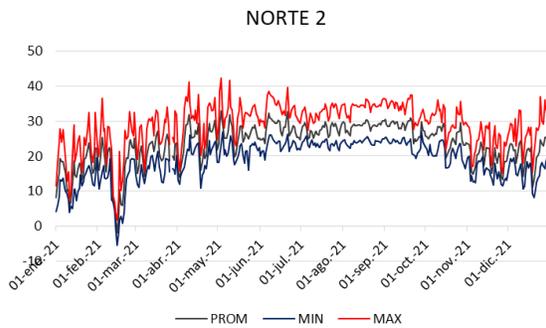
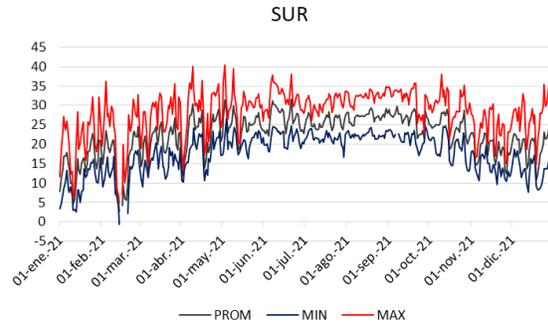
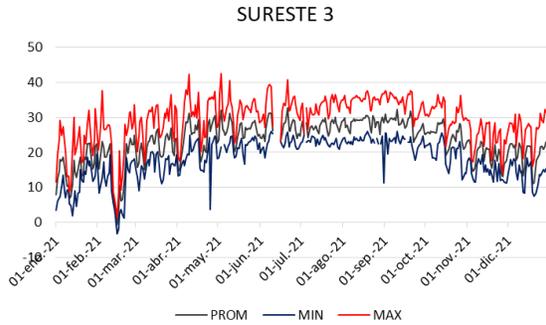
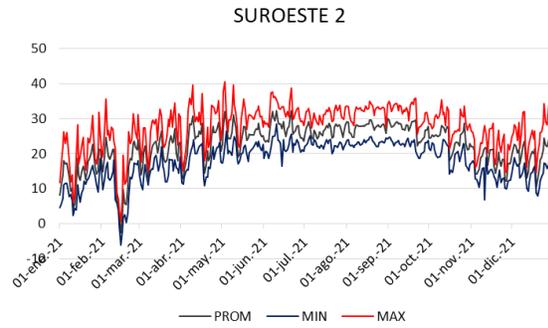
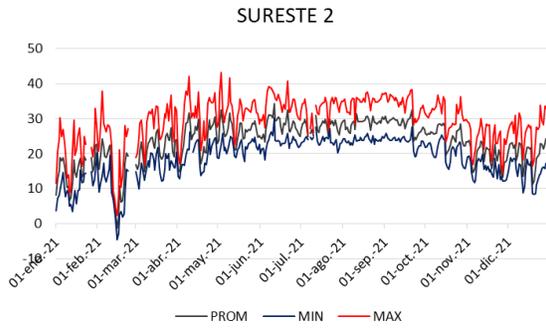




Fuente: Estaciones Meteorológicas del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental, N.L. (SIMA)

Figura 15. Temperaturas mínimas, máximas y promedio (2021)

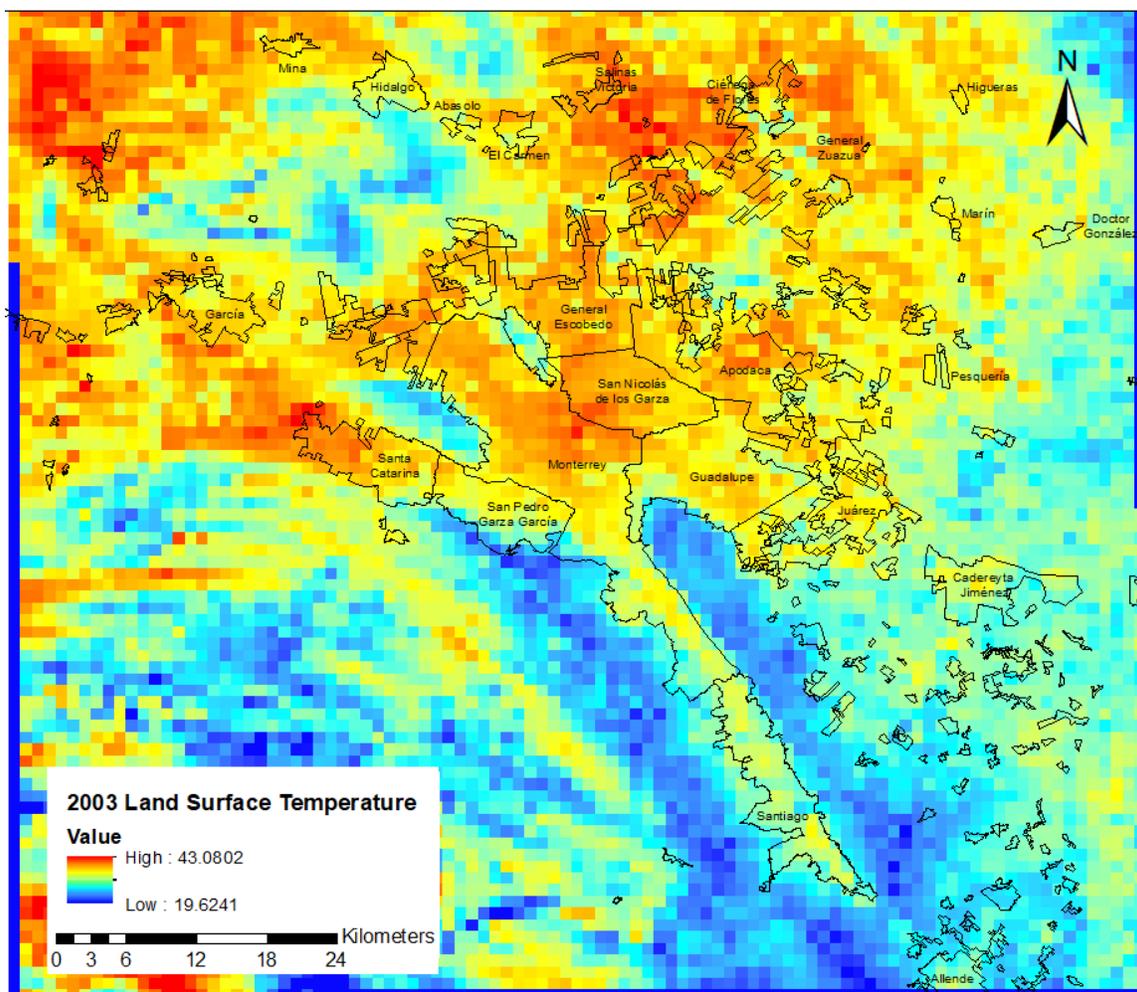




Fuente: Estaciones Meteorológicas del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental, N.L. (SIMA)

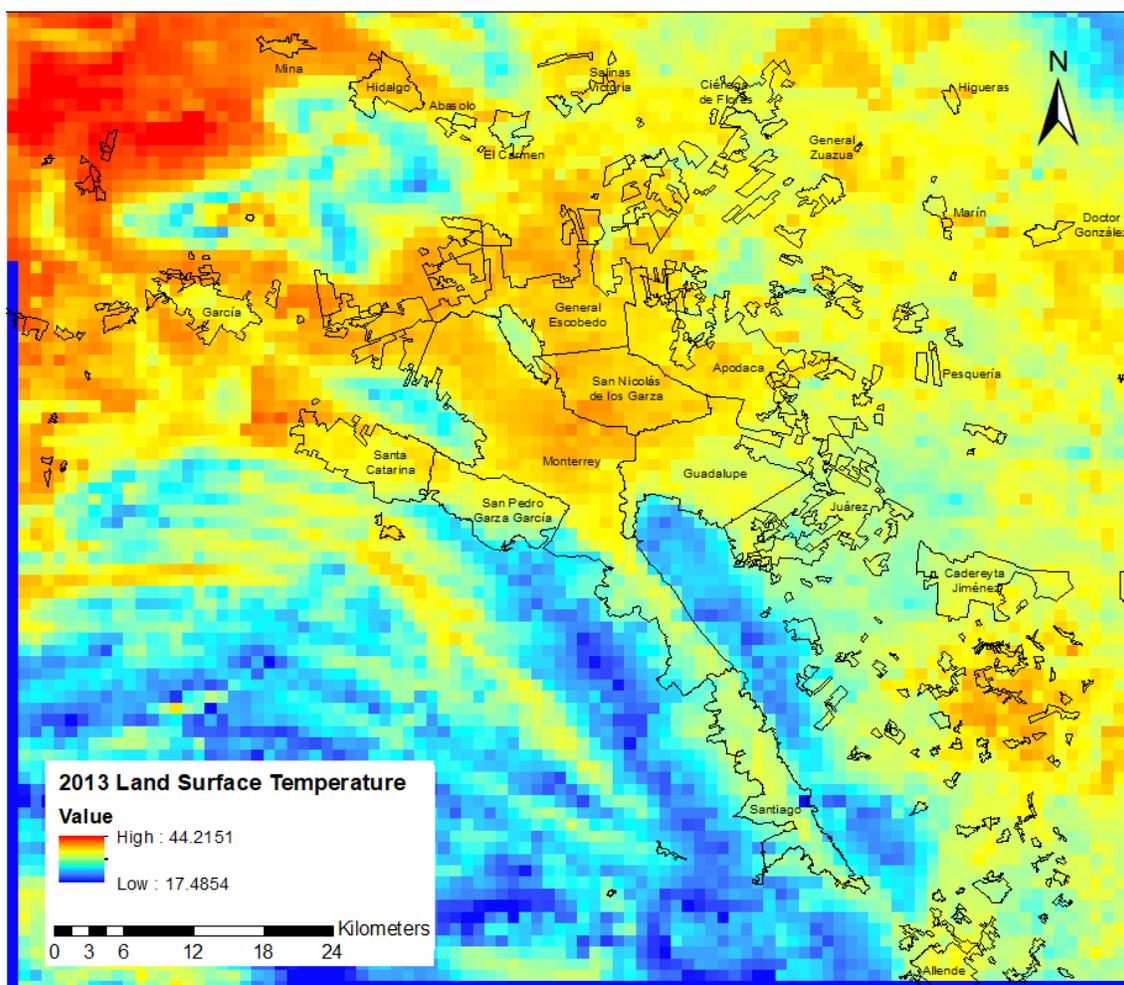
Debido a que Landsat 8 ha recopilado información desde 2013, para el análisis del año 2003 se utilizaron imágenes de Landsat 5. Además, se hicieron cambios en las bandas térmicas para que éstas coincidieran con las características técnicas de Landsat 5.

Figura 16. LST del Área Metropolitana de Monterrey (2003)



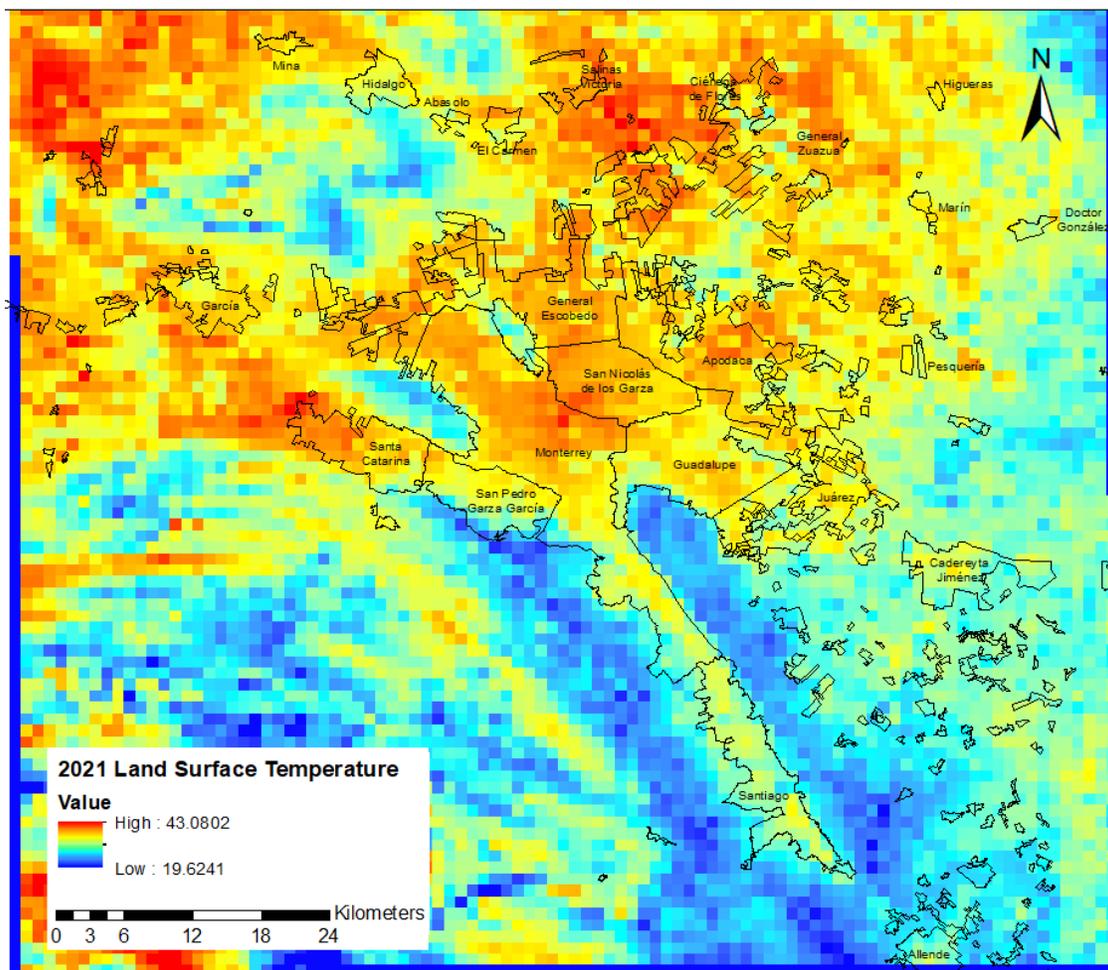
Fuente: elaboración propia

Figura 17. LST del Área Metropolitana de Monterrey (2013)



Fuente: elaboración propia

Figura 18. LST del Área Metropolitana de Monterrey (2021)



Fuente: elaboración propia

Relación de LCZ y LST

Se obtuvieron 800 puntos aleatorios de los cuales se analizaron 755 ya que estos se encuentran dentro del área de los ráster de LST y del de LCZ generado con WUDAPT LCZ Generator respectivamente. Los puntos obtenidos se utilizaron para los 3 años de estudio, obteniendo así las temperaturas promedio para cada zona climática local en un rango de entre 19.62°C y 43°C (Tabla 8).

Tabla 8. Temperaturas promedio de las zonas climáticas locales

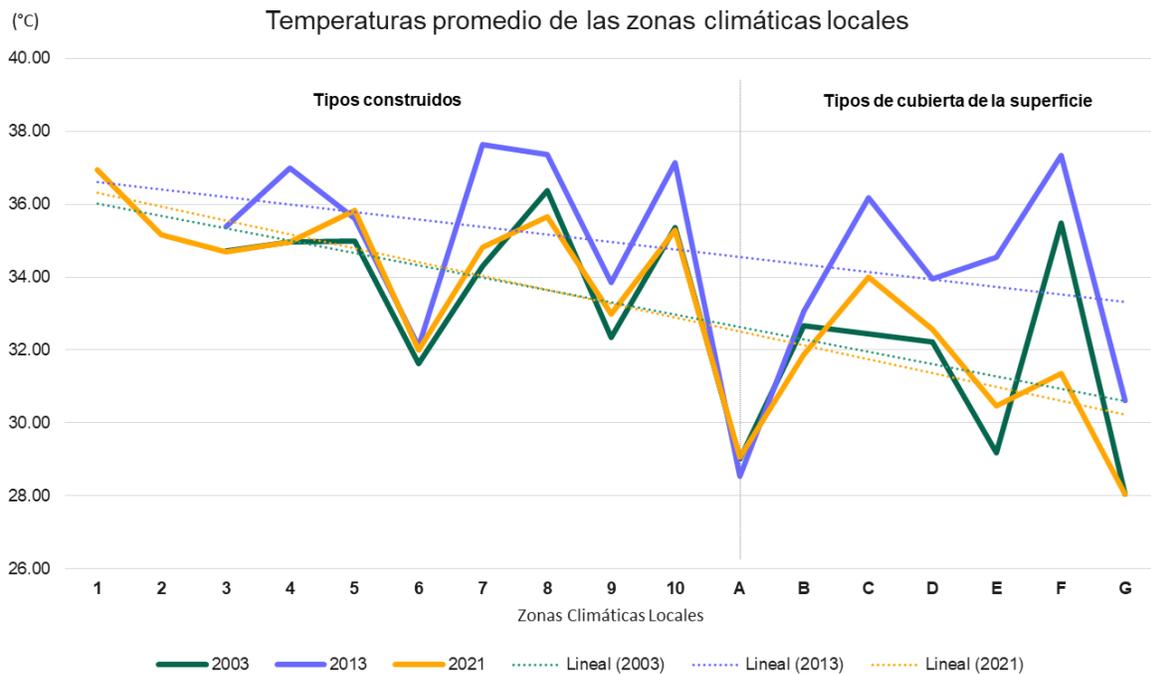
LCZ	Temperatura promedio (°C)		
	2003	2013	2021
1	36.95	37.75	36.95
2	N/A	N/A	35.16
3	34.72	35.39	34.69
4	34.97	37.00	34.97
5	34.98	35.60	35.84
6	31.62	32.11	32.01
7	34.29	37.64	34.81
8	36.37	37.36	35.66
9	32.33	33.85	32.99
10	35.37	37.13	35.28
A	29.02	28.54	29.06
B	32.68	33.06	31.87
C	32.44	36.18	33.99
D	32.22	33.94	32.56
E	29.19	34.55	30.46
F	35.49	37.34	31.36
G	28.05	30.61	28.05

Fuente: elaboración propia

Aunque se registraron polígonos de la LCZ tipo 2 (compacto de mediana altura) para todos los años de estudio, solo se obtuvo la temperatura promedio del 2021 debido a diferencias en la precisión de los ráster de LCZ de WUDAPT y los polígonos generados.

Comparando los resultados obtenidos, se observa que no hay una variación considerable entre los 3 años de estudio y que el periodo de canícula del 2013 fue el más caluroso con temperaturas superiores a los 30°C en la mayoría de las zonas climáticas locales. En general, se puede apreciar que las temperaturas registradas para las zonas construidas son mayores que las de las cubiertas naturales con una diferencia de alrededor de 4°C.

Figura 19. Comparación de temperaturas promedio de las LCZ

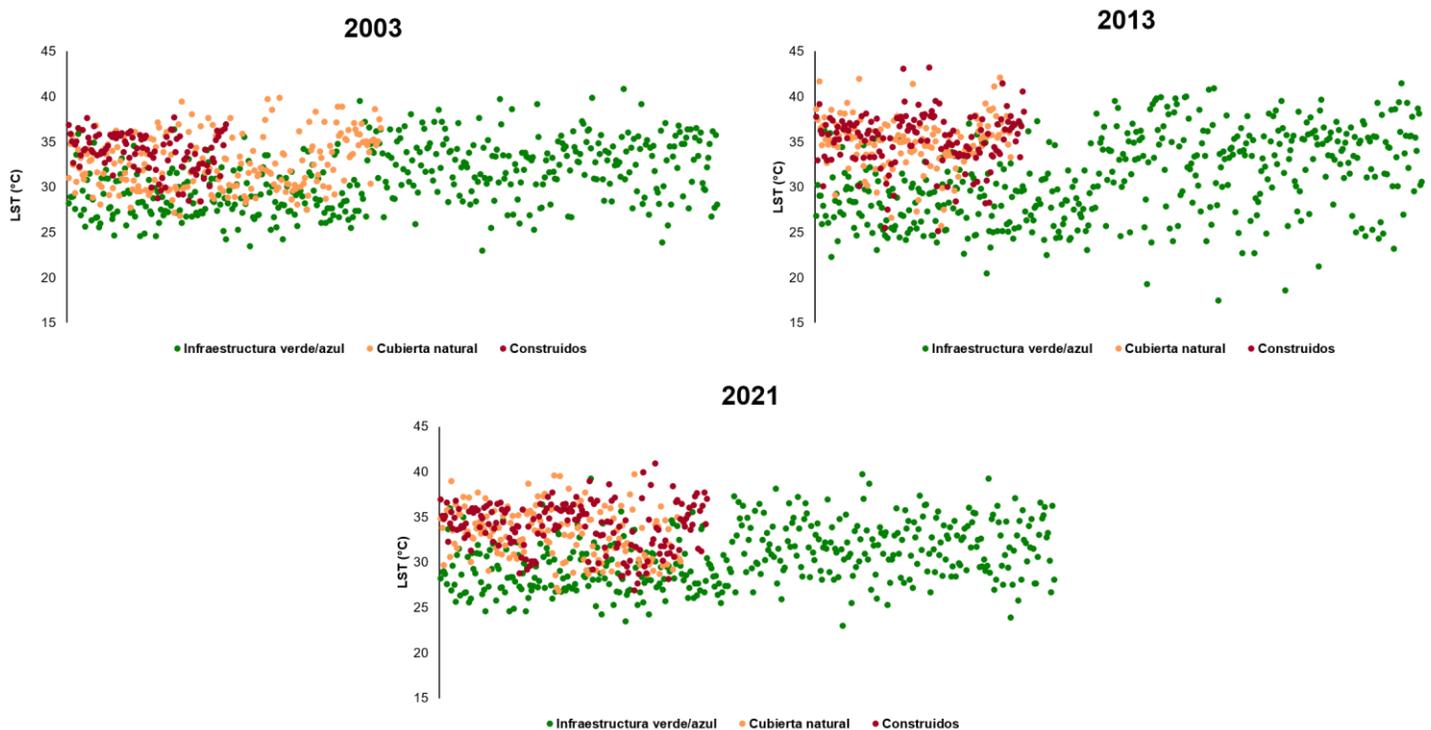


Fuente: elaboración propia

Se evaluaron las temperaturas superficiales del suelo registradas en los puntos aleatorios para los tres años de estudio y se encontró que la intensidad de la temperatura varía dependiendo del tipo de uso de suelos. Al dividir las clases propuestas en la metodología WUDAPT en tres subgrupos (infraestructura verde/azul, cubierta natural y construidos) se puede apreciar una alternancia entre la infraestructura verde/azul y las cubiertas naturales que presentan poca o nula vegetación aun cuando ambos subgrupos se categorizan como tipos de cubierta de la superficie dentro de la clasificación de WUDAPT.

Para los nuevos subgrupos se consideran las clases **1 a 10** como **construidos**, las clases **A, B y G** como **infraestructura verde/azul** y las clases **C a F** como **zonas naturales**. En la figura 20 se puede distinguir que para los tres años de estudio las temperaturas registradas para las cubiertas naturales presentan mayor concordancia con las temperaturas de las zonas construidas.

Figura 20. Temperatura superficial del suelo de los puntos aleatorios



Fuente: elaboración propia

Discusión

El desarrollo de este proyecto ha logrado incrementar la información sobre el uso de suelos del Área Metropolitana de Monterrey e indicar su relación con la temperatura superficial del suelo.

La interrogante de si el efecto térmico de las islas de calor urbanas disminuye por la presencia de infraestructura verde/azul se responde de manera positiva. Esto debido a que los resultados indican que las cubiertas naturales, haciendo énfasis en las áreas con IVA densa, presentan temperaturas inferiores a comparación de las zonas construidas.

La creación de áreas de entrenamiento suficientes que se ajusten a la descripción de la forma y funciones de la zona climática local que representan es esencial para obtener resultados puntuales. De acuerdo con Mills et al 2015, esto es necesario para obtener imágenes de mayor calidad que describan de manera precisa el área de estudio. Es por ello que para esta investigación se hicieron varias modelaciones de las LCZ del Área Metropolitana hasta obtener una imagen meticulosa y, dependiendo del año de estudio se adaptó a los cambios de cubiertas. En el análisis se obtuvieron resultados moderados para las precisiones OA y OAu de los tres años de estudio, y resultados sustanciales o casi perfectos para las OAbu y OAw de acuerdo al índice Kappa.

La relación de la temperatura superficial del suelo con la IVA es descrita en diversos estudios. Cai et al 2018 mencionan que la LST obtenida a partir de imágenes satelitales puede utilizarse para establecer el vínculo con las zonas climáticas locales. Por otro lado, Sun et al 2012 señalan que es usual evaluar el efecto de las islas de calor por medio de la temperatura superficial, ya que se puede extraer fácilmente por medio de percepción remota. Al evaluar las imágenes de uso de suelos generadas con las imágenes térmicas de los tres años de estudio, se observa la conexión existente entre las LCZ con la temperatura superficial del suelo, ya que

existe una diferencia de 4°C entre las temperaturas de las zonas climáticas construidas y las zonas naturales. Además, se observa que las temperaturas registradas en el subgrupo de IVA son menores, corroborando su efecto de enfriamiento.

Algunos resultados de la bibliografía señalan el efecto refrescante y respetuoso con el medio ambiente de la infraestructura verde/azul como una solución al incremento de temperaturas en áreas urbanas densamente pobladas. Haciendo énfasis en los espacios azules, Lin et al 2020 indican que además de ayudar en la reducción de temperatura, la creación, mantenimiento y remodelación de estos espacios reducen los riesgos para la salud de la ciudadanía. Aunque su efecto puede variar debido a factores como el clima y el viento, los recursos hídricos son clave para la mitigación de las ICU y pueden considerarse como islas urbanas frías de acuerdo a Nakayama y Hashimoto, 2011.

La predicción de la relación existente entre la IVA y las islas de calor urbanas fue correctamente informada por los antecedentes y es demostrada en este estudio, ya que los resultados indican temperaturas menores en las zonas con infraestructura verde/azul densa que, en el área de estudio, corresponde a la vegetación presente en los cauces de los ríos urbanos. El análisis de las temperaturas superficiales con respecto a las zonas climáticas locales presentes a lo largo de casi dos décadas ubica las ICU en las zonas industriales del Área Metropolitana de Monterrey. Aunque las clases construidas en general presentan temperaturas elevadas, las edificaciones de poca altura y la industria pesada son más susceptibles a los efectos de las islas de calor por su cercanía con el suelo, el uso de materiales constructivos impermeables que reflejan el calor y por las actividades que se realizan en ellas.

Cabe resaltar que puesto a que los ríos urbanos no cuentan con un cauce continuo durante el año, la restauración y conservación de la vegetación riparia es primordial para prolongar el efecto de enfriamiento que proveen.

Conclusión

Este proyecto tuvo como objetivo demostrar la relación entre la temperatura superficial del suelo y la infraestructura verde/azul y cómo se vincula con el efecto térmico de las islas de calor urbanas mediante el análisis de imágenes satelitales. Se abordó esta premisa de acuerdo a la definición de IVA de Jiang et al 2021; por lo que se destacan los resultados de las áreas verdes y los ríos urbanos del Área Metropolitana de Monterrey.

Las imágenes de los años de estudio se analizaron desde el esquema de clasificación de zonas climáticas locales WUDAPT y las temperaturas superficiales del suelo y los puntos de control aleatorios se obtuvieron por medio de GEE para encontrar las temperaturas promedio dependiendo de la LCZ. Respecto a las limitaciones que tuvo esta investigación, la precisión general de las imágenes de zonas climáticas locales fue moderada para los tres años de estudio, por lo que el refinamiento de las áreas de entrenamiento y de las imágenes de temperatura superficial del suelo proporcionará resultados más exactos.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que un 15.64% de las zonas naturales del AMM han sido reemplazadas por clases construidas -edificaciones compactas de poca altura e industriales mayormente- durante el periodo de estudio. La valoración realizada indica que las LCZ construidas presentan temperaturas 4°C más altas a comparación de las naturales. Además, existe una variación entre las áreas con infraestructura verde/azul densa y las cubiertas naturales con poca o nula vegetación, siendo las primeras las que tienen un efecto refrigerante más intenso al presentar temperaturas menores. Esto prueba que existe una relación entre las zonas climáticas locales (LCZ) y la temperatura superficial del suelo (LST).

Referencias

- Abraira, V. (2001). El índice kappa. SEMERGEN. 27(5), 247-249, DOI: 10.1016/S1138-3593(01)73955-X
- Bechtel, B. & Alexander, P. B. & Böhner, J. & Ching, J. & Conrad, O. & Feddema, J. & Mills, G. & See, L. & Steward, I. (2015). Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. ISPRS International Journal of Geo-Information. 4. 199-219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>.
- Cai, M.; Ren, C.; Xu, Y.; Ka-Lun, K.; Wang, R. (2018). Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature using an improved WUDAPT methodology- A case study of Yangtze River Delta, China. Urban Climate, 24, 485-502. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.010>.
- Cantú Ayala, César, Uvalle Saucedo, José, González Saldívar, Fernando, & Herrera Fernández, Bernal. (2018). Evaluación del grado de conservación de las cuencas hidrográficas de Nuevo León, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(50), 149-173. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.263>
- Castro-López, D., Rodríguez-Lozano, P., Arias-Real, R. & Guerra-Cobián, V., & Prat, N. (2019). The Influence of Riparian Corridor Land Use on the Pesquería River's Macroinvertebrate Community (N.E. Mexico). *Water*, 11(9), 1930. MDPI AG. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/w11091930>
- Chakraborty, T.; Hsu, A.; Manya, D.; Sheriff, G. A spatially explicit surface urban heat island database for the United States: Characterization, uncertainties, and possible applications. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2020, 168, 74–88, doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.07.021.
- Chen, X.-L., Zhao, H.-M., Li, P.-X. & Yin, Z.-Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. Remote Sens. Environ. 2006, 104, 133–146, Recuperado de doi:10.1016/j.rse.2005.11.016

- CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Carmen-Salinas Victoria (1924), Estado de Nuevo León. México.
- Corral-Verdugo, V., Barrón, M., Cuen, A. & Tapia-Fonllem, C. (2011). Habitabilidad de la vivienda, estrés y violencia familiar. *Psycology*, 2(1), 3-14. Recuperado de <https://doi.org/10.1174/217119711794394644>
- Du, L., Zhou, T., Li, M.S. & Gong, D.Y., (2014). Urban heat island effects derived from dense Landsat thermal observations in Nanjing, China. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 137, 7, Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/17/1/012162>
- Durán Vian, F. et al. (2020). ¿Qué es un río urbano? Propuesta metodológica para su delimitación en España. *ACE: Architecture, City and Environment*, 15(44), 9035. DOI:<http://dx.doi.org/10.5821/ace.15.44.9035>
- Everard, M. & Moggridge, H. L. (2012). Rediscovering the value of urban rivers. *Urban Ecosystems*, 15(2), 293–314. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0174-7>
- Ferriño F., Burgos, D. (2015). Delimitación de zonas federales y áreas de amortiguamiento en ríos afectados por el crecimiento urbano como estrategia para prevenir inundaciones. *EPISTEMUS, CIENCIA Y TECNOLOGÍA*, 19, 24-33
- Gobierno Municipal de Guadalupe. (2020). Estudio Previo Justificativo para el establecimiento de un Área Natural Protegida PARQUE URBANO “RÍO LA SILLA” Guadalupe, Nuevo León, México. (pp. 6–15). Guadalupe.
- Gómez López, I. (2020). ¿Qué son los sensores remotos? EcoScript. Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de <https://ecoscript.org/quesonlossensoresremotos/>
- Gosling, S.N., Lowe, J.A. & McGregor, G.R. *et al.* Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. *Climatic Change* 92, 299–341 (2009). Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9441-x>

- Hathway, E. A. & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58(1), 8. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>
- He, B.J. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban Climate*. 2018, 24, 26–33, Recuperado de [doi:10.1016/j.uclim.2018.01.004](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.004)
- Huynen, M-M., Marten, P., Schram, D., Weijenberg, M. P. & Kunst, A.E. (2001). The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environ. Health Perspect*, 109, 463-470. Recuperado de <https://doi.org/10.1289/ehp.01109463>
- Infraestructura Azul-Verde para la adaptación al Cambio Climático: Combinando la Naturaleza y estructuras semi-naturales para la gestión del agua y reducción de riesgos en las Cuencas peruanas. Wetlands International Latinoamérica y el Caribe. (2019). Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de https://lac.wetlands.org/blog/infraestructura-azul-verde-para-la-adaptacion-al-cambio-climatico-combinando-la-naturaleza-y-estructuras-semi-naturales-para-la-gestion-del-agua-y-reduccion-de-riesgos-en-las-cuencas-peruanas/#_ftn1
- Infraestructura Verde-Azul de Bizkaia. Bizkaia.eus. (n.d.). Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de <https://web.bizkaia.eus/es/cambio-climatico/infraestructura-verde-azul#:~:text=La%20infraestructura%20verde%2Dazul%20es,los%20servicios%20de%20los%20ecosistemas.>
- Imhoff, M., Zhang, P., Wolfe, R. & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA, *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 9. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
- Jauregui, E., Godínez, L. & Cruz, F. (1992). Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico. *Atmospheric Environment. Part B*.

Urban Atmosphere, 26(3), 391-396. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(92\)90014-J](https://doi.org/10.1016/0957-1272(92)90014-J)

- Jiang, Y., Huang, J., Shi, T., & Wang, H. (2021). Interaction of Urban Rivers and Green Space Morphology to Mitigate the Urban Heat Island Effect: Case-Based Comparative Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11404. MDPI AG. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph182111404>
- Khan, A.; Chatterjee, S. & Weng, Y.(2021). Characterizing thermal fields and evaluating UHI effects. *Urban Heat Island Modeling for Tropical Climates*. 37-67, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819669-4.00002-7>.
- Kim, J.H., Gu, D., Sohn, W., Kil, S.H., Kim, H. & Lee, D.K. Neighborhood landscape spatial patterns and land surface temperature: An empirical study on single-family residential areas in Austin, Texas. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2016, 13, Recuperado de doi: 10.3390/ijerph13090880.
- Kogut, P. (2021). Teledetección: Tipos y aplicaciones de los sensores Remotos. *EOS Data Analytics*. Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de <https://eos.com/es/blog/teledeteccion/>
- Landsat satellite missions. *Landsat Satellite Missions | U.S. Geological Survey*. (n.d.). Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>
- Lin, Y.; Wang, Z.; Jim, C.Y.; Li, J.; Deng, J.; Liu, J. (2020). Water as an urban heat sink: Blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration, *Journal of Cleaner Production*, 262, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121411>.
- Long Li, Yong Zha & Jiahua Zhang. (2020). Spatial and dynamic perspectives on surface urban heat island and their relationships with vegetation activity in Beijing, China, based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data, *International Journal of Remote Sensing*, 41:3, 882-896, DOI: 10.1080/01431161.2019.1650985

- Manzanilla-Quiñones, U. (2022). Islas de calor urbanas: un fenómeno poco estudiado en México. Desde el Herbario CICY, 14, 178-186, ISSN: 2395-8790
- McMichael, A.J. The urban environment and health in a world of increasing globalization: issues for developing countries. Bull. *World Health Organ.* 2000, 78, 1117–26, DOI: 10.1590/S0042-96862000000900007.
- McMichael, A.J.; Wilkinson, P.; Kovats, R.S.; Pattenden, S.; Hajat, S.; Armstrong, B.; Vajanapoom, N.; Niciu, E.M.; Mahomed, H.; Kingkeow, C.; et al. International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHURM' project. *Int. J. Epidemiol.* 2008, 37, 1121–1131, doi:10.1093/ije/dyn086.
- Mills, Gerald & Bechtel, Benjamin & Ching, Jason & See, Linda & Feddema, Johannes & Foley, Mícheál & Alexander, Paul & O'Connor, Martin. (2015). An Introduction to the WUDAPT project.
- Mireles Soria, D. L. (2021). Elaboración de un modelo multicriterio con base SIG para el manejo integral de ríos urbanos utilizando VANTS y tecnología espectral (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Mirzaei, M., Verrelst, J., Arbabi, M., Shaklabadi, Z., & Lotfizadeh, M. (2020). Urban Heat Island Monitoring and Impacts on Citizen's General Health Status in Isfahan Metropolis: A Remote Sensing and Field Survey Approach. *Remote Sensing*, 12(8), 1350. MDPI AG. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/rs12081350>
- Mohan, M.; Sati, A.P. & Bhati, S. Urban sprawl during five decadal period over National Capital Region of India: Impact on urban heat island and thermal comfort. *Urban Climate.* 2020, 33, 100647, DOI:10.1016/j.uclim.2020.100647.
- Moyer, A. N. & Hawkins, T. W. (2017). River effects on the heat island of a small urban area, *Urban Climate*, 21, 262-277, Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.004>.
- Nakayama, T.; Hashimoto, S. (2011). Analysis of the ability of water resources to reduce the urban heat island in the Tokyo megalopolis.

Environmental Pollution, 159(8-9), 2167-2173. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.11.016>

- Newson, M., Lewin, J., & Raven, P. (2022). River science and flood risk management policy in England. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(1), 105–123. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/03091333211036384>
- Oke, T., Mills, G., Christen A., & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139016476
- Park, J.; Kim, J.H.; Lee, D.K.; Park, C.Y. & Jeong, S.G. The influence of small green space type and structure at the street level on urban heat island mitigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 203-212, DOI: 10.1016/j.ufug.2016.12.005.
- Peng, J.; Liu, Q.; Xu, Z.; Lyu, D.; Du, Y.; Qiao, R.; Wu, J. (2020). How to effectively mitigate urban heat island effect? A perspective of waterbody patch size threshold. *Landscape and Urban Planning*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103873>.
- Perilla, Gabriel Alejandro, & Mas, Jean-François. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones geográficas*, (101), e59929. Epub 02 de octubre de 2020. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- Raj, S., Paul, S. K., Chakraborty, A., & Kuttippurath, J. (2020). Anthropogenic forcing exacerbating the urban heat islands in India. *Journal of environmental management*, 257, 110006. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110006>
- Río Santa Catarina. Naturalista México. (s.f.). Recuperado el 2 de mayo de 2023, de: <https://www.naturalista.mx/places/wikipedia/R%C3%ADo%20Santa%20Catarina>

- Rivera, A. Urban Heat Islands in Monterrey, Mexico Using Remote Sensing Imagery and Geographic Information Systems Analysis, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2012.
- Rodríguez Palacios, E. (2021, July 8). Afecta urbanización función ecológica de los ríos de Monterrey. Vida Universitaria - Universidad Autónoma de Nuevo León. Recuperado el 3 de mayo de 2023, de: <https://vidauniversitaria.uanl.mx/expertos/afecta-el-urbanismo-funcion-ecologica-de-los-rios-de-monterrey/>
- Schteingart, M., D'Andrea, L., & García Ortega, R. (2001). ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY. PROBLEMÁTICA ECOLÓGICA, SERVICIOS URBANOS Y MEDIO AMBIENTE (ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACTUAL). Servicios Urbanos, Gestión Local y Medio Ambiente (pp. 399–413). Colegio de México.
- SEGEMAR.Sensores Remotos. Argentina.gob.ar. (2021). Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de <https://www.argentina.gob.ar/produccion/segemar/geologia-y-recursos-minerales/sensores-remotos>
- Sentinel Overview. Missions - Sentinel Online - Sentinel Online. (n.d.). Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>
- Shi, G., & Ye, P. (2021). Assessment on Temporal and Spatial Variation Analysis of Extreme Temperature Indices: A Case Study of the Yangtze River Basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10936. MDPI AG. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph182010936>
- Stewart, I. D. & Mills, G. (2021). The Urban Heat Island. Elsevier Gezondheidszorg.
- Stewart ID, Oke TR. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull Am Meteorol Soc.* 2012; 93(12):1879-1900. doi:10.1175/BAMS-D-11-00019.1

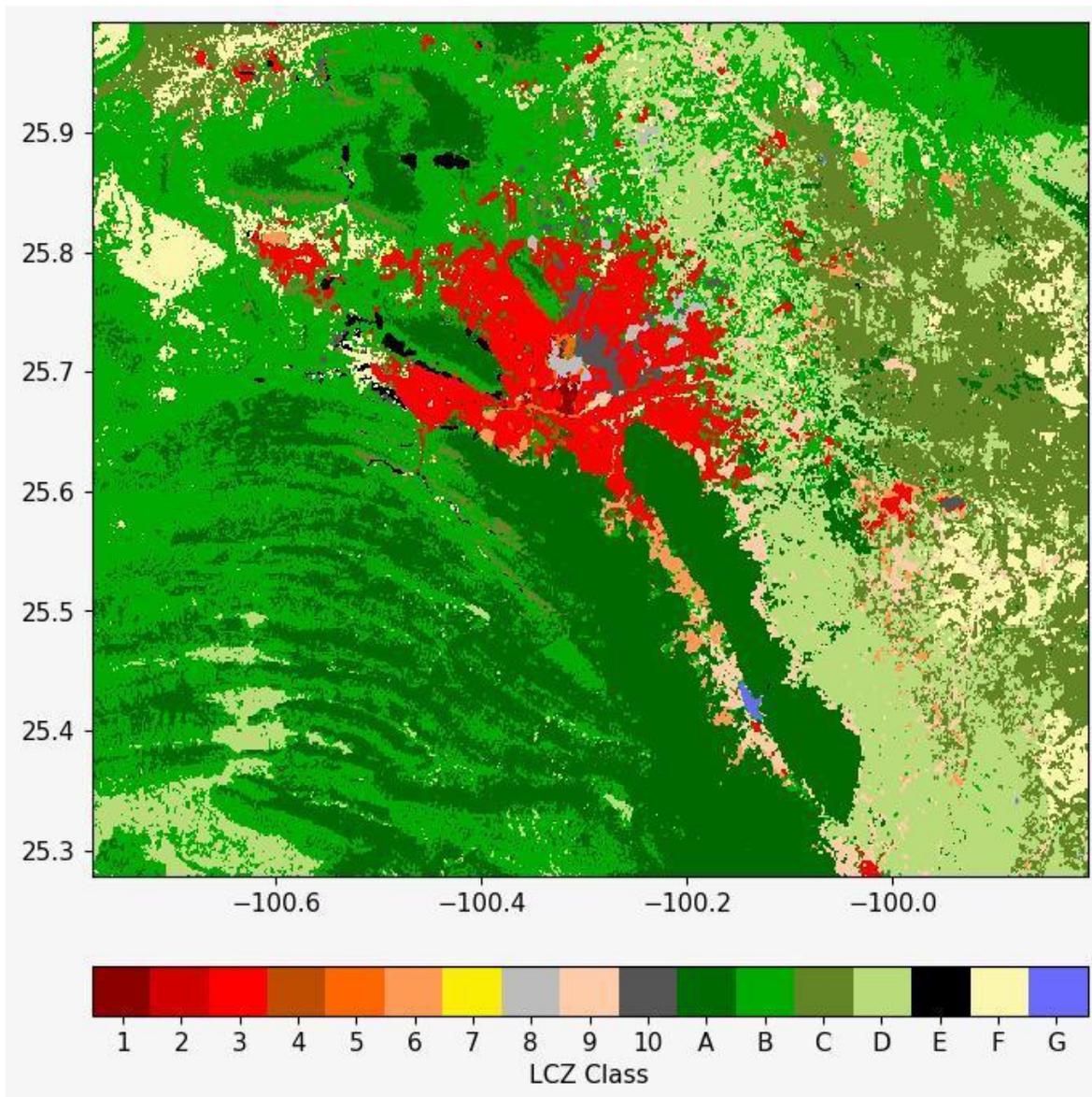
- Sun, R.; Chen, A.; Chen, L.; Lü, Y. (2012). Cooling effects of wetlands in an urban region: The case of Beijing. *Ecological Indicators*, 20, 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.006>.
- Taha, H., Levinson, R., Mohegh, A., Haley, G., Ban-Weiss, G., & Chen, S. (2018). Air-Temperature Response to Neighborhood-Scale Variations in Albedo and Canopy Cover in the Real World: Fine-Resolution Meteorological Modeling and Mobile Temperature Observations in the Los Angeles Climate Archipelago. *Climate*, 6(2). Recuperado de <https://doi.org/10.3390/cli6020053>
- Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A. J., & Li, F. (2010). The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. *International journal of biometeorology*, 54(1), 75–84. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x>
- Valdivielso, A. (2020). ¿Qué es un río? iAqua. Recuperado el 24 de noviembre de 2022, de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-rio>
- Voogt, J. (2007). How Researchers Measure Urban Heat Islands. *Dep. Geogr.*
- Wang, W., Liu, K., Tang, R. & Wang, S. (2019). Remote sensing image-based analysis of the urban heat island effect in Shenzhen, China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 110, 168-175, Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.01.002>
- Wilson, C., Clarke, R., D'Arcy, B. J., Heal, K. V., & Wright, P. W. (2005). Persistent pollutants urban rivers sediment survey: implications for pollution control. *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 51(3-4), 217–224
- Wolf, T.; McGregor, G. The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather Clim. Extrem.* 2013, 1, 59–68, doi:10.1016/j.wace.2013.07.004.
- Xu, D., & Zhou, D. (2016). Research on the Planning Methods of Mitigating Summer Urban Heat Island Effects among Basin Cities——A Case Study at

Xi'an, China, *Procedia Engineering*, 169, 6. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.030>

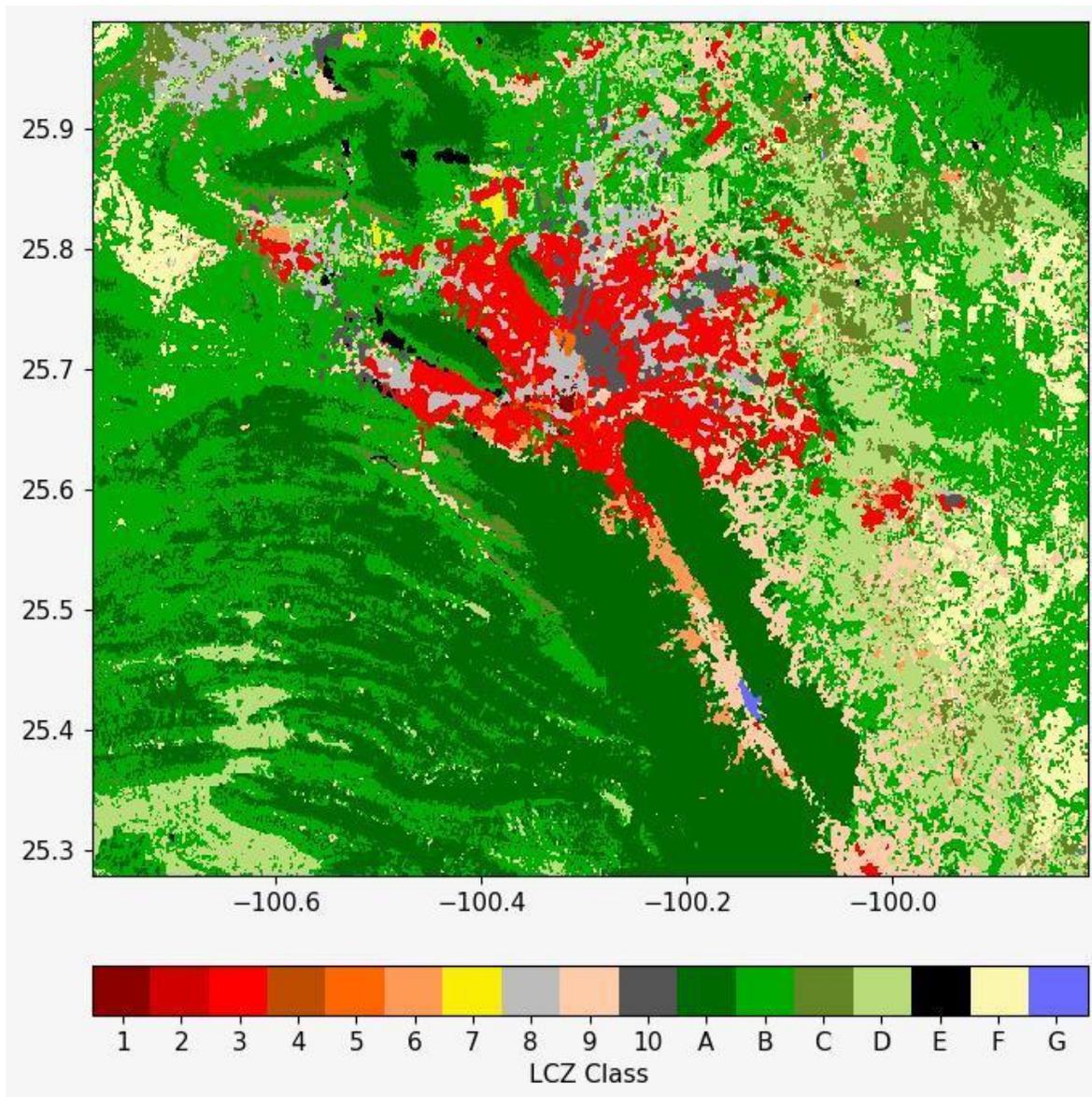
- Yao, R., Wang, L., Gui, X., Zheng, Y., Zhang, H., & Huang, X. (2017). Urbanization Effects on Vegetation and Surface Urban Heat Islands in China's Yangtze River Basin. *Remote Sensing*, 9 (6), 540. MDPI AG. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.3390/rs9060540>

Anexo 2. Zonas climáticas locales sin procesar

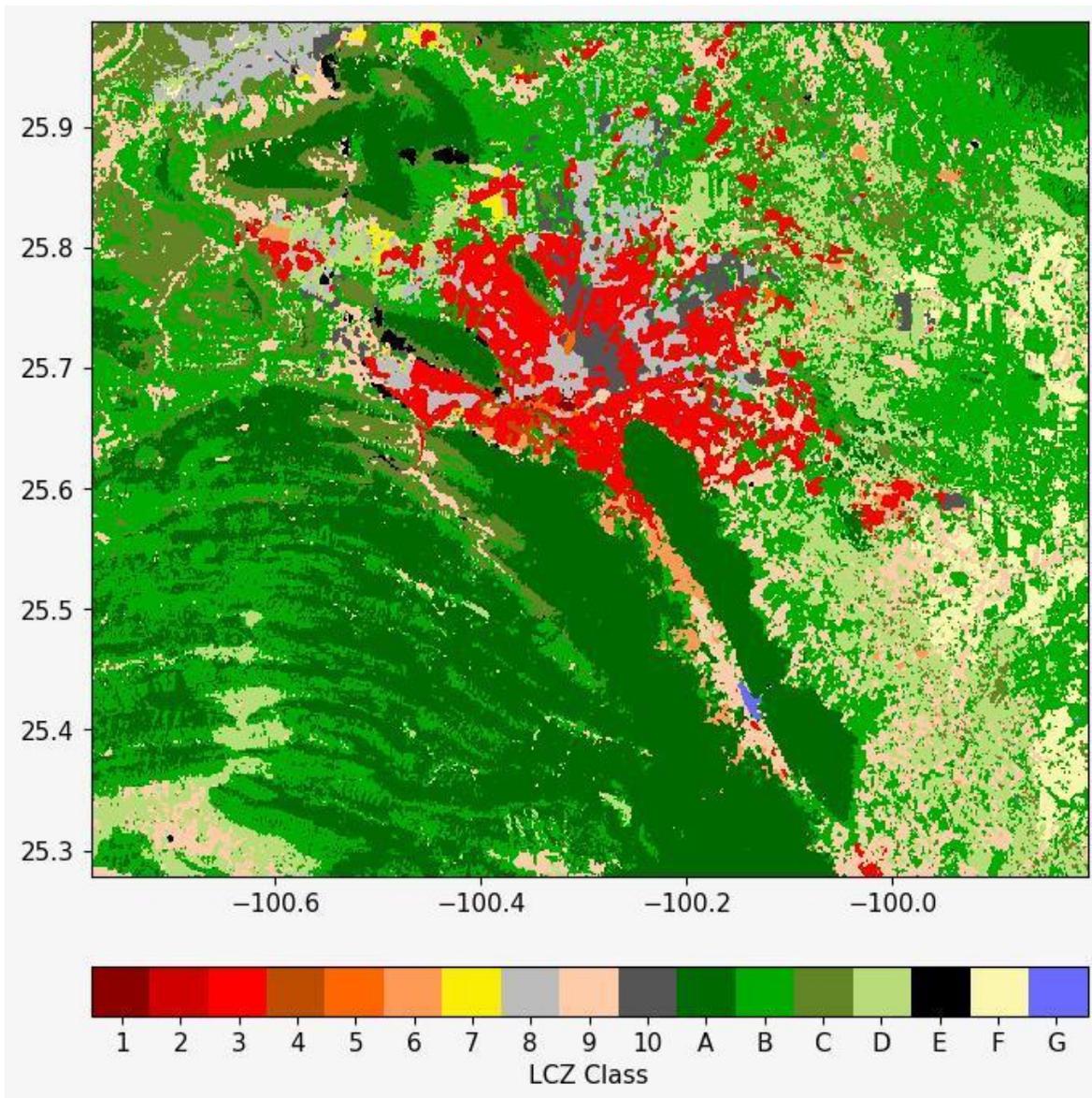
2.1. LCZ para 2003



2.2. LCZ para 2013

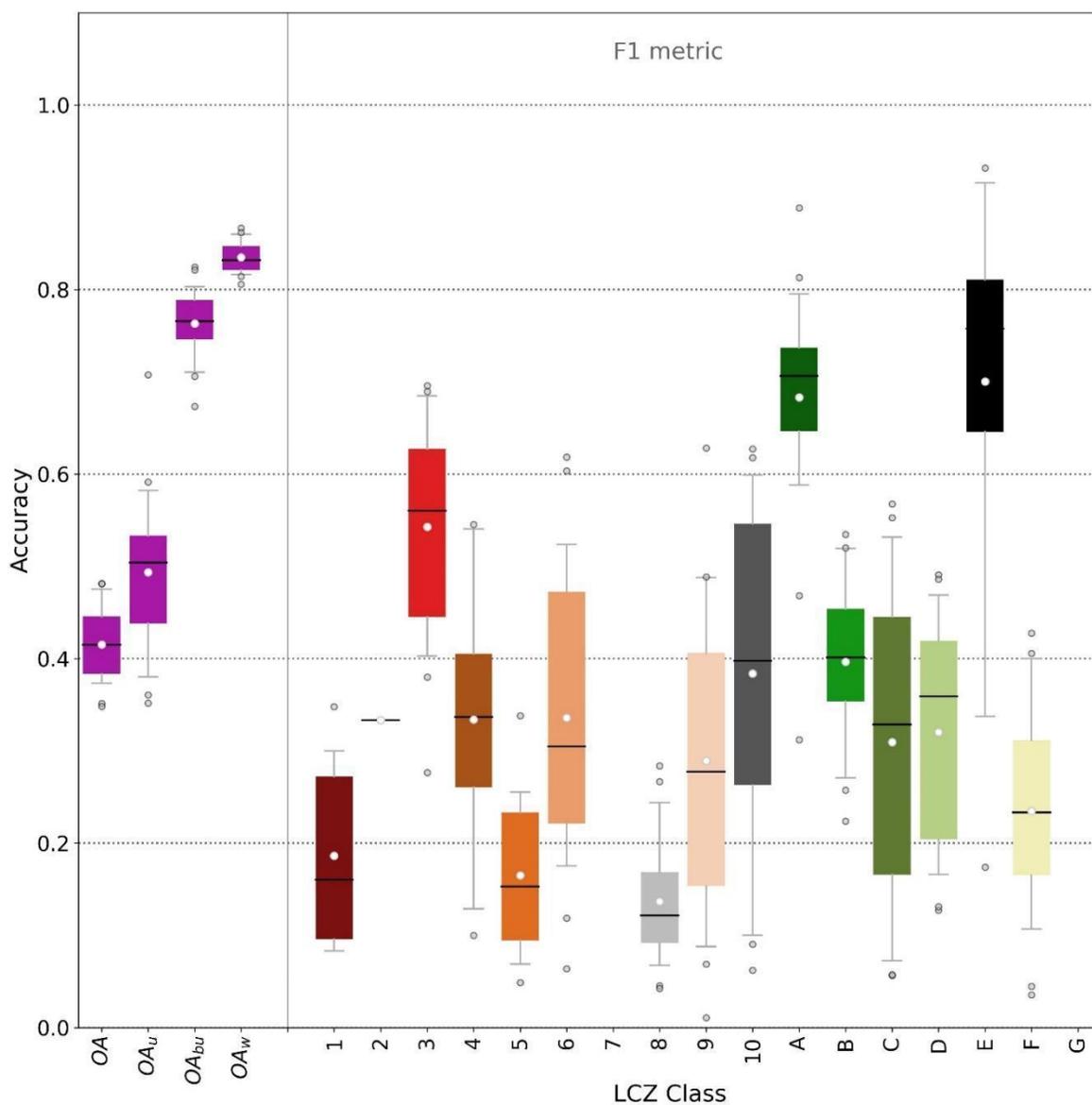


2.3. LCZ para 2021

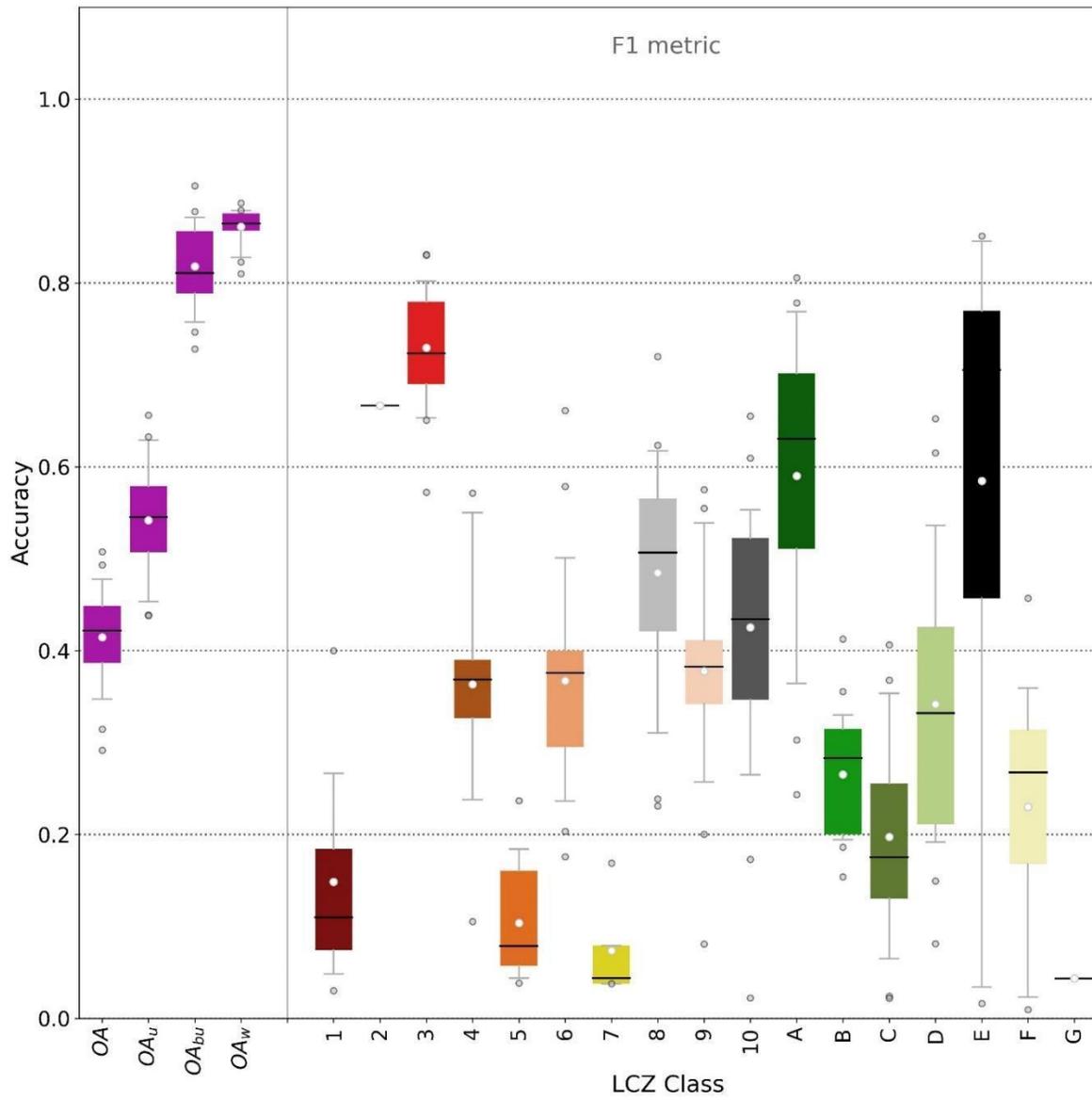


Anexo 3. Precisiones Generales (Overall Accuracy) de las LCZ

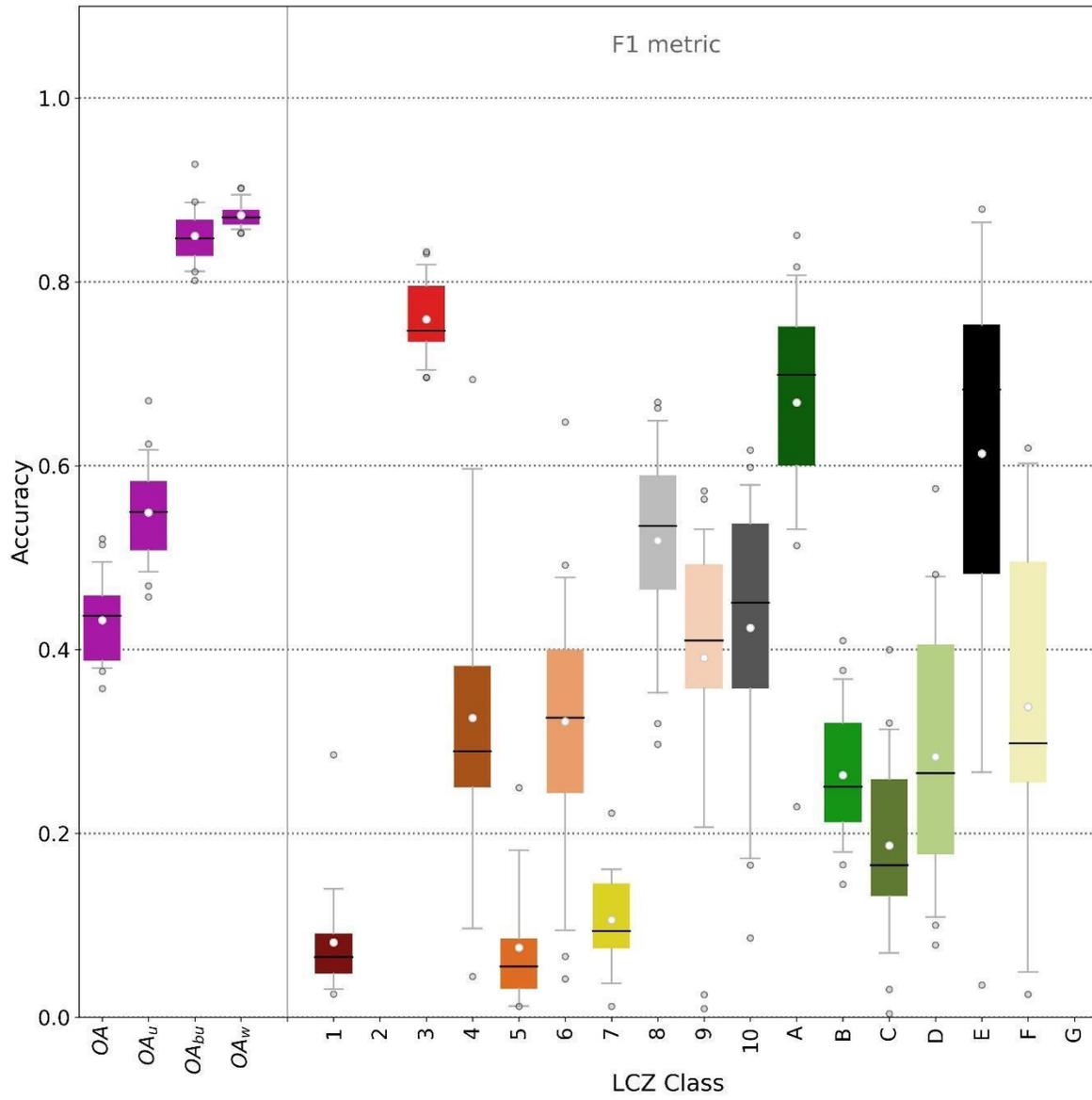
3.1. LCZ Overall Accuracy (2003)



3.2. LCZ Overall Accuracy (2013)



3.3. LCZ Overall Accuracy (2021)



Anexo 4. Scripts para la obtención de LST

4.1. LST para 2003

```
/**
 * LANDSAT 5
 * LST mean composite over Monterrey Metropolitan Area
 * From
https://code.earthengine.google.com/6f3cf77c1a23599b92857e4eaa852ad9
 * Modified by Fabiola Yopez
 * Date: 11/19/22
 *
***/

// *****ROI*****
//Shapefile uploaded into Assets

var geometry = SNG.geometry();

//cloud mask
function maskL8sr(col) {
  // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
  var cloudsBitMask = (1 << 5);
  // Get the pixel QA band.
  var qa = col.select('QA_PIXEL');
  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
  return col.updateMask(mask);
}
```

```

//vis params
var vizParams = {
bands: ['B4', 'B5', 'B3'],
min: 0,
max: 4000,
gamma: [1, 0.9, 1.1]
};

var vizParams2 = {
bands: ['B3', 'B2', 'B1'],
min: 0,
max: 3000,
gamma: 1.4,
};

//load the collection:
{
var col = ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1')
.map(maskL8sr)
.filterDate('2003-05-01','2003-08-11')
.filterBounds(geometry);
}
print(col, 'coleccion');

//imagen reduction
{
var image = col.mean();
print(image, 'image');
Map.addLayer(image, vizParams2);
}

```

```

//median
{
var ndvi = image.normalizedDifference(['B4',
'B3']).rename('NDVI');
var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white',
'green']};
print(ndvi,'ndvi');
Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'ndvi');
}

//select thermal band 10(with brightness tempereature), no calculation
var thermal= image.select('B6').multiply(0.1);
var b6Params = {min: 291.918, max: 302.382, palette: ['blue',
'white', 'green']};
Map.addLayer(thermal, b6Params, 'thermal');

// find the min and max of NDVI
{
var min = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.min(),
geometry: geometry,
scale: 30,
maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
print(min, 'min');
var max = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.max(),
geometry: geometry,
scale: 30,

```

```

maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
print(max, 'max')
}

//fractional vegetation
{
var fv
=(ndvi.subtract(min).divide(max.subtract(min))).pow(ee.Number(2)).rename('FV');
print(fv, 'fv');
Map.addLayer(fv);
}

//Emissivity
var a= ee.Number(0.004);
var b= ee.Number(0.986);
var EM=fv.multiply(a).add(b).rename('EMM');
var imageVisParam3 = {min: 0.9865619146722164, max:0.989699971371314};
Map.addLayer(EM, imageVisParam3,'EMM');

//LST in Celsius Degree bring -273.15
//NB: In Kelvin don't bring -273.15
var LST = thermal.expression(
'(Tb/(1 + (0.00115* (Tb / 1.438))*log(Ep))))', {
'Tb': thermal.select('B6'),
'Ep': EM.select('EMM')
}).rename('LST').clip(SNG);

Map.addLayer(LST, {min: 17.569706944223423, max:39.328077233404645,
palette: [

```

```
'040274', '040281', '0502a3', '0502b8', '0502ce', '0502e6',
'0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef',
'3be285', '3ff38f', '86e26f', '3ae237', 'b5e22e', 'd6e21f',
'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08', 'ff500d',
'ff0000', 'de0101', 'c21301', 'a71001', '911003'
]], 'LST');
```

```
// Create and add the legend title.
```

```
var legendTitle = ui.Label({
  value: 'Land Surface Temperature (LST)',
  style: {
    fontWeight: 'bold',
    fontSize: '18px',
    margin: '0 0 4px 0',
    padding: '0'
  }
});
```

```
// Export to Google Drive
```

```
Export.image.toDrive({
  image: LST,
  description: 'LST',
  fileNamePrefix: 'LST',
  region: geometry,
  scale: 1000,
  crs: 'EPSG:4326',
  skipEmptyTiles: true
});
```

```
//random points 800
```

```
var puntosSNG= ee.FeatureCollection.randomPoints(geometry,800)
```

```
Map.addLayer (puntosSNG);  
Export.table.toAsset({  
  collection:puntosSNG,  
  description:'exportarAssets',  
  assetId:'puntosSNG'  
});
```

```
//random points drive  
Export.table.toDrive({  
  collection: puntosSNG,  
  folder: "estudio_zmm_regionTemp",  
  description: 'exportarDriveCSV',  
  fileNamePrefix: "puntosSNG",  
  fileFormat: "CSV"  
})
```

```
Export.table.toDrive({  
  collection:puntosSNG,  
  folder: "estudio_zmm_regionTemp",  
  description:'exportarDriveSHP',  
  fileNamePrefix: "puntosSNG",  
  fileFormat: "SHP"  
})  
;
```

4.2. LST para 2013

```
/**
 * LANDSAT 8
 * LST mean composite over Monterrey Metropolitan Area
 * From
https://code.earthengine.google.com/6f3cf77c1a23599b92857e4eaa852ad9
 * Modified by Fabiola Yopez
 * Date: 11/19/22
 *
***/

// *****ROI*****
//Shapefile uploaded into Assets

var geometry = SNG.geometry();

//cloud mask
function maskL8sr(col) {
  // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
  var cloudsBitMask = (1 << 5);
  // Get the pixel QA band.
  var qa = col.select('pixel_qa');
  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
  return col.updateMask(mask);
}
```

```

//vis params
var vizParams = {
bands: ['B5', 'B6', 'B4'],
min: 0,
max: 4000,
gamma: [1, 0.9, 1.1]
};

var vizParams2 = {
bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
min: 0,
max: 3000,
gamma: 1.4,
};

//load the collection:
{
var col = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
.map(maskL8sr)
.filterDate('2013-05-01','2013-08-11')
.filterBounds(geometry);
}
print(col, 'coleccion');

//imagen reduction
{
var image = col.mean();
//print(image, 'image');
//Map.addLayer(image, vizParams2);
}

```

```

//median
{
var ndvi = image.normalizedDifference(['B5',
'B4']).rename('NDVI');
var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white',
'green']};
//print(ndvi,'ndvi');
//Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'ndvi');
}

//select thermal band 10(with brightness temperature), no calculation
var thermal= image.select('B10').multiply(0.1);
var b10Params = {min: 291.918, max: 302.382, palette: ['blue',
'white', 'green']};
//Map.addLayer(thermal, b10Params, 'thermal');

// find the min and max of NDVI
{
var min = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.min(),
geometry: geometry,
scale: 30,
maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
//print(min, 'min');
var max = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.max(),
geometry: geometry,
scale: 30,
maxPixels: 1e9

```

```

}).values().get(0));
//print(max, 'max')
}

//fractional vegetation
{
var fv
=(ndvi.subtract(min).divide(max.subtract(min))).pow(ee.Number(2)).rename('FV');
//print(fv, 'fv');
//Map.addLayer(fv);
}

//Emissivity

var a= ee.Number(0.004);
var b= ee.Number(0.986);
var EM=fv.multiply(a).add(b).rename('EMM');
var imageVisParam3 = {min: 0.9865619146722164, max:0.989699971371314};
//Map.addLayer(EM, imageVisParam3,'EMM');

//LST in Celsius Degree bring -273.15
//NB: In Kelvin don't bring -273.15
var LST = thermal.expression(
'(Tb/(1 + (0.00115* (Tb / 1.438))*log(Ep))) - 273.15', {
'Tb': thermal.select('B10'),
'Ep': EM.select('EMM')
}).rename('LST').clip(SNG);

Map.addLayer(LST, {min: 20.569706944223423, max:29.328077233404645,
palette: [

```

```
'040274', '040281', '0502a3', '0502b8', '0502ce', '0502e6',
'0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef',
'3be285', '3ff38f', '86e26f', '3ae237', 'b5e22e', 'd6e21f',
'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08', 'ff500d',
'ff0000', 'de0101', 'c21301', 'a71001', '911003'
]], 'LST');
```

```
// Create and add the legend title.
```

```
var legendTitle = ui.Label({
  value: 'Land Surface Temperature (LST)',
  style: {
    fontWeight: 'bold',
    fontSize: '18px',
    margin: '0 0 4px 0',
    padding: '0'
  }
});
```

```
// Export to Google Drive
```

```
Export.image.toDrive({
  image: LST,
  description: 'LST',
  fileNamePrefix: 'LST',
  region: geometry,
  scale: 1000,
  crs: 'EPSG:4326',
  skipEmptyTiles: true
});
```

```
//random points 800
```

```
var puntosSNG= ee.FeatureCollection.randomPoints(geometry,800)
```

```
Map.addLayer (puntosSNG);  
Export.table.toAsset({  
  collection:puntosSNG,  
  description:'exportarAssets',  
  assetId:'puntosSNG'  
});
```

```
//random points drive  
Export.table.toDrive({  
  collection: puntosSNG,  
  folder: "estudio_zmm_regionTemp",  
  description: 'exportarDriveCSV',  
  fileNamePrefix: "puntosSNG",  
  fileFormat: "CSV"  
})
```

```
Export.table.toDrive({  
  collection:puntosSNG,  
  folder: "estudio_zmm_regionTemp",  
  description:'exportarDriveSHP',  
  fileNamePrefix: "puntosSNG",  
  fileFormat: "SHP"  
})  
;
```

4.3. LST para 2021

```
/**
 * LANDSAT 8
 * LST mean composite over Monterrey Metropolitan Area
 * From
https://code.earthengine.google.com/6f3cf77c1a23599b92857e4eaa852ad9
 * Modified by Fabiola Yopez
 * Date: 11/19/22
 *
***/

// *****ROI*****
//Shapefile uploaded into Assets

var geometry = SNG.geometry();

//cloud mask
function maskL8sr(col) {
  // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
  var cloudsBitMask = (1 << 5);
  // Get the pixel QA band.
  var qa = col.select('pixel_qa');
  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
  return col.updateMask(mask);
}
```

```

//vis params
var vizParams = {
bands: ['B5', 'B6', 'B4'],
min: 0,
max: 4000,
gamma: [1, 0.9, 1.1]
};

var vizParams2 = {
bands: ['B4', 'B3', 'B2'],
min: 0,
max: 3000,
gamma: 1.4,
};

//load the collection:
{
var col = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
.map(maskL8sr)
.filterDate('2021-05-01','2021-08-11')
.filterBounds(geometry);
}
print(col, 'coleccion');

//imagen reduction
{
var image = col.mean();
//print(image, 'image');
//Map.addLayer(image, vizParams2);
}

```

```

//median
{
var ndvi = image.normalizedDifference(['B5',
'B4']).rename('NDVI');
var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white',
'green']};
//print(ndvi,'ndvi');
//Map.addLayer(ndvi, ndviParams, 'ndvi');
}

//select thermal band 10(with brightness temperature), no calculation
var thermal= image.select('B10').multiply(0.1);
var b10Params = {min: 291.918, max: 302.382, palette: ['blue',
'white', 'green']};
//Map.addLayer(thermal, b10Params, 'thermal');

// find the min and max of NDVI
{
var min = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.min(),
geometry: geometry,
scale: 30,
maxPixels: 1e9
}).values().get(0));
//print(min, 'min');
var max = ee.Number(ndvi.reduceRegion({
reducer: ee.Reducer.max(),
geometry: geometry,
scale: 30,
maxPixels: 1e9

```

```

}).values().get(0));
//print(max, 'max')
}

//fractional vegetation
{
var fv
=(ndvi.subtract(min).divide(max.subtract(min))).pow(ee.Number(2)).rename('FV');
//print(fv, 'fv');
//Map.addLayer(fv);
}

//Emissivity

var a= ee.Number(0.004);
var b= ee.Number(0.986);
var EM=fv.multiply(a).add(b).rename('EMM');
var imageVisParam3 = {min: 0.9865619146722164, max:0.989699971371314};
//Map.addLayer(EM, imageVisParam3,'EMM');

//LST in Celsius Degree bring -273.15
//NB: In Kelvin don't bring -273.15
var LST = thermal.expression(
'((Tb/(1 + (0.00115* (Tb / 1.438))*log(Ep))) -273.15)', {
'Tb': thermal.select('B10'),
'Ep': EM.select('EMM')
}).rename('LST').clip(SNG);

Map.addLayer(LST, {min: 20.569706944223423, max:29.328077233404645,
palette: [

```

```
'040274', '040281', '0502a3', '0502b8', '0502ce', '0502e6',  
'0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef',  
'3be285', '3ff38f', '86e26f', '3ae237', 'b5e22e', 'd6e21f',  
'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08', 'ff500d',  
'ff0000', 'de0101', 'c21301', 'a71001', '911003'  
]], 'LST');
```

```
// Create and add the legend title.
```

```
var legendTitle = ui.Label({  
  value: 'Land Surface Temperature (LST)',  
  style: {  
    fontWeight: 'bold',  
    fontSize: '18px',  
    margin: '0 0 4px 0',  
    padding: '0'  
  }  
});
```

```
// Export to Google Drive
```

```
Export.image.toDrive({  
  image: LST,  
  description: 'LST',  
  fileNamePrefix: 'LST',  
  region: geometry,  
  scale: 1000,  
  crs: 'EPSG:4326',  
  skipEmptyTiles: true  
});
```

```
//random points 800
```

```
var puntosSNG= ee.FeatureCollection.randomPoints(geometry,800)
```

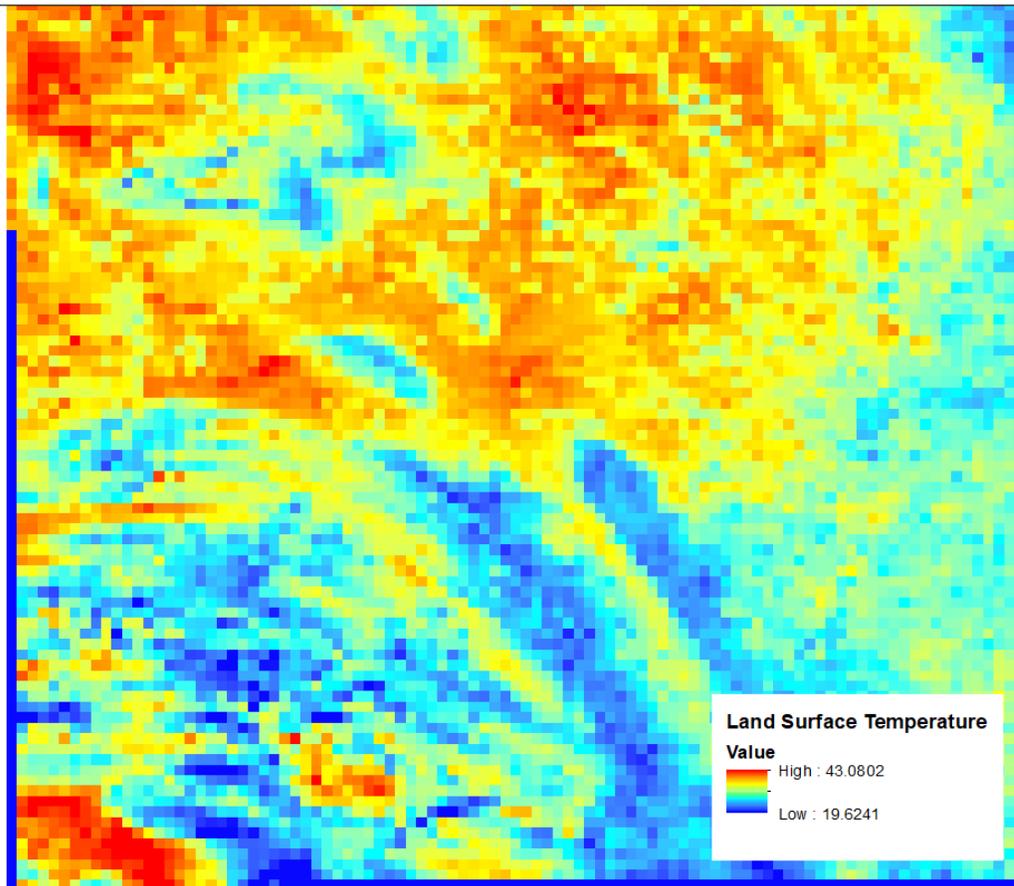
```
Map.addLayer (puntosSNG);  
Export.table.toAsset({  
  collection:puntosSNG,  
  description:'exportarAssets',  
  assetId:'puntosSNG'  
});
```

```
//random points drive  
Export.table.toDrive({  
  collection: puntosSNG,  
  folder: "estudio_zmm_regionTemp",  
  description: 'exportarDriveCSV',  
  fileNamePrefix: "puntosSNG",  
  fileFormat: "CSV"  
})
```

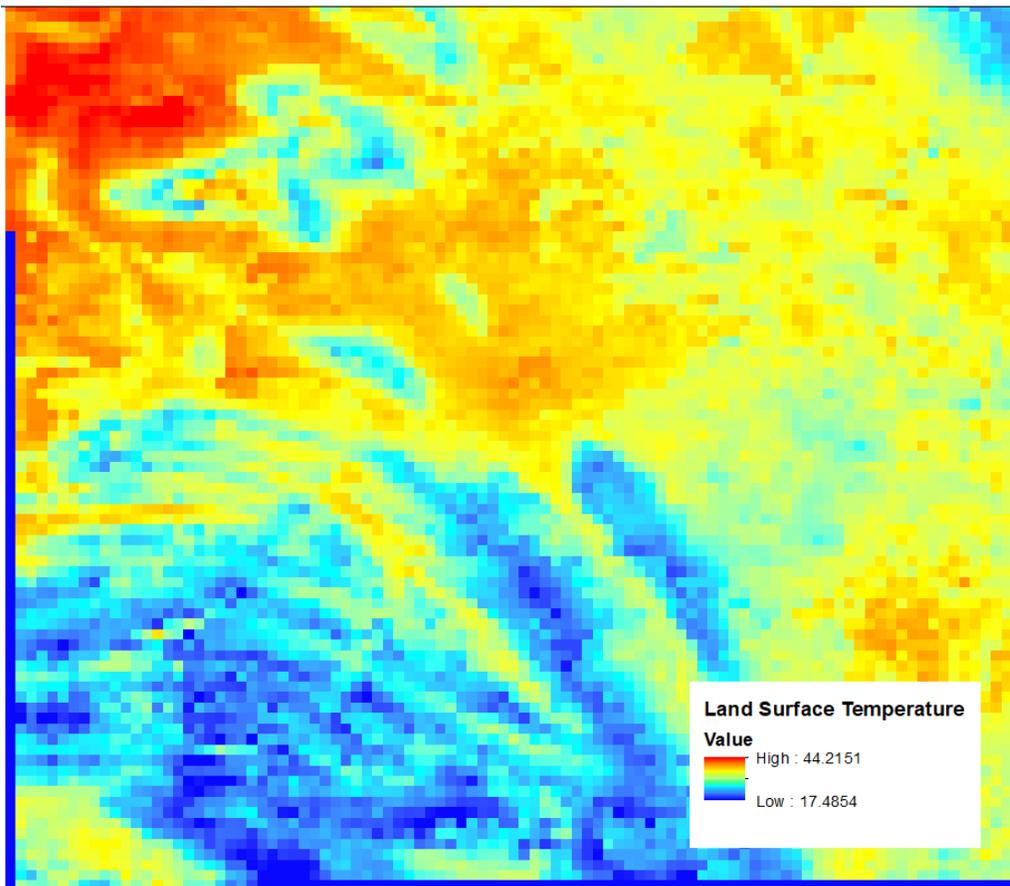
```
Export.table.toDrive({  
  collection:puntosSNG,  
  folder: "estudio_zmm_regionTemp",  
  description:'exportarDriveSHP',  
  fileNamePrefix: "puntosSNG",  
  fileFormat: "SHP"  
})  
;
```

Anexo 5. Temperatura superficial del suelo sin procesar

5.1. LST para 2003



5.2. LST para 2013



5.3. LST para 2021

