

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**ECOSISTEMAS URBANOS: UN SERVICIO AMBIENTAL PARA
EL MUNICIPIO DE MONTERREY**

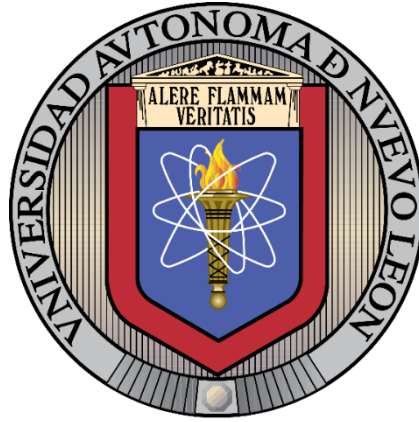
POR

ING. ANA KAREN RIOS LIZCANO

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Diciembre, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**ECOSISTEMAS URBANOS: UN SERVICIO AMBIENTAL PARA
EL MUNICIPIO DE MONTERREY**

POR:

ING. ANA KAREN RIOS LIZCANO

Como requisito para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

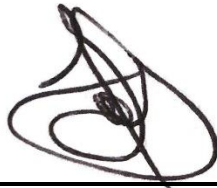
Diciembre, 2019

ECOSISTEMAS URBANOS: UN SERVICIO AMBIENTAL PARA EL MUNICIPIO DE MONTERREY

Aprobación de Tesis



Dr. Javier Jiménez Pérez
Director



Dr. José Israel Yereña Yamallel
Codirector



Dr. Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez
Asesor

Diciembre, 2019

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de estos estudios.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León en especial a la Facultad de Ciencias Forestales, por abrirme las puertas para realizar mis estudios y por todas las facilidades otorgadas durante mi estancia en esta institución.

De manera especial y con gran cariño al Dr. Javier Jiménez Pérez, por la dirección de este trabajo, orientación, apoyo y amistad. Gracias por su comprensión y paciencia, además de la inclusión en su equipo de trabajo, agradeciendo también el haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Israel Yerena, por aceptar estar en mi comité de tesis, por sus consejos y por estar siempre en la mejor disposición y sugerencias para realizar esta investigación.

Al Dr. Gerardo Cuéllar por estar disponible con apoyo y asesoría en las revisiones de este trabajo.

Al M.C. Rufino Sandoval por su orientación y ayuda en esta investigación.

A mis compañeros de laboratorio, personal técnico, docente y administrativo por hacer mi estancia tan agradable.

A Raúl González por su cariño, apoyo y motivación nuevamente en esta parte de mi formación profesional y personal.

A mis amigas, Valeria Valdes, Selena Palomino y Dulce Villanueva que estuvieron presentes en esta etapa y que me motivaron en todo momento.

DEDICATORIA

A Dios por permitirme llegar hasta esta etapa de mi vida profesional y ayudarme a cumplir todas y cada una de las metas que hasta hoy me he propuesto.

A mis padres

Agustín Rios Zamora y Elsa Edith Lizcano Rivera, que representan para mí lo más valioso, por ser mi mayor ejemplo a seguir, por su motivación, confianza, comprensión y apoyo constante e incondicional en cada parte de mi vida. Su amor y paciencia me han hecho ser mejor cada día.

A mis hermanos, Ivonne, Mónica y Rodrigo, por formar parte de mi vida y que por ellos tengo la energía para seguir adelante y ser un buen ejemplo a seguir.

Manifiesto que el presente trabajo de investigación es original, y fue desarrollado para obtener el grado de Maestría en Ciencias Forestales; donde se utiliza la información de otros autores, se otorgan los créditos correspondientes.



Ing. Ana Karen Rios Lizcano

Diciembre de 2019

INDICE

INDICE	I
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VI
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	VII
RESUMEN.....	VIII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	3
JUSTIFICACIÓN.....	5
HIPÓTESIS	6
OBJETIVOS	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
CAPÍTULO I. CAMBIO DE COBERTURA URBANA	8
INTRODUCCIÓN.....	8
ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	10
EXPANSIÓN URBANA	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
ÁREA DE ESTUDIO.....	11
CLIMA Y VEGETACIÓN.....	12
CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES	12
CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA	13
PRUEBA MANN-KENDALL.....	13

SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	14
LANDSAT 2 Y 3.....	14
LANDSAT 4	15
LANDSAT 5	15
LANDSAT 8	16
ANÁLISIS MULTITEMPORAL.....	18
COMPOSICIÓN A COLOR.....	18
INTERPRETACIÓN VISUAL PRELIMINAR.....	19
RESULTADOS	22
IDENTIFICACIÓN DE COBERTURA	23
DISCUSIÓN.....	26
CAPÍTULO II. ISLAS DE CALOR URBANO.....	29
INTRODUCCIÓN.....	29
TIPOS DE ISLAS DE CALOR	31
CARACTERÍSTICAS DE LAS ISLAS DE CALOR URBANA	33
INTENSIDAD	33
CONFIGURACIÓN ESPACIAL	33
LOCALIZACIÓN DEL MÁXIMO TÉRMICO.....	34
EFECTOS DE LA ISLA DE CALOR URBANA	34
ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL	36
MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
SELECCIÓN DE LOS DATOS DE TEMPERATURA ATMOSFÉRICA	38
SELECCIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIAL	39
PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SATELITALES.....	40
RESULTADOS	45
CARACTERIZACIÓN DE ISLAS DE CALOR EN CADA IMAGEN.....	47
ANÁLISIS DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS.....	50

INTERPRETACIÓN DE CORRELACIÓN ENTRE TEMPERATURA SUPERFICIAL Y TEMPERATURA DEL AIRE	51
DISCUSIÓN.....	53
CONCLUSIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla explicativa del sensor MSS Landsat 2 y 3.....	14
Tabla 2. Tabla explicativa del sensor MSS Landsat 4.....	15
Tabla 3. Tabla explicativa del sensor TM Landsat 5.	16
Tabla 4. Tabla de la distribución de las bandas del Landsat 8.	17
Tabla 5. Imágenes satelitales Landsat 2,3,4,5 y 8 utilizadas para generar el NDVI.	18
Tabla 6. Clasificación de superficies por el método de clasificación no supervisada para el área de estudio.	20
Tabla 7. Categorías finales de la clasificación de superficie del área de estudio.	21
Tabla 8. Superficies de cobertura verde urbana y cobertura urbana del área de estudio entre el año 1981 al 2018.	23
Tabla 9. Coordenadas de las estaciones meteorológicas para el análisis de islas de calor disponibles para el área de estudio.	39
Tabla 10. Imágenes Landsat identificadas para el área de estudio.....	39
Tabla 11. Bandas térmicas utilizadas para estimar la TS.....	42
Tabla 12. Constantes de calibración.	43
Tabla 13. Temperaturas superficiales de las imágenes satelitales entre los años 1986 y 2018 del área de estudio.	46
Tabla 14. Interpretación de valores del Coeficiente de Pearson.	52
Tabla 15. Valores de correlaciones entre temperatura superficial y temperatura del aire de las estaciones meteorológicas.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.	11
Figura 2. Combinación de bandas visibles para el color real del área de estudio del año 1981.	19
Figura 3. Representación de la clasificación de superficies por el método de clasificación no supervisada del año 1981 del área de estudio.	20
Figura 4. Shape generado de las clasificaciones de superficies del área de estudio del año 1991.	21
Figura 5. Análisis multitemporal de pérdida de cobertura de los años 1981 al 2018.	22
Figura 6. Clasificación no supervisada de los años 1981 y 2018 del área de estudio.	25
Figura 7. Diagrama del efecto de la isla de calor urbana (ICU).	29
Figura 8. Capas atmosféricas urbanas.	31
Figura 9. Temperaturas superficiales y atmosféricas durante el día y la noche dependiendo de las superficies que están presentes.	32
Figura 10. Incremento en el consumo energético con el incremento en la temperatura.	35
Figura 11. Espectro electromagnético.	37
Figura 12. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas disponibles para el área de estudio.	39
Figura 13. Procedimiento metodológico general para obtener valores de TS con imágenes Landsat.	40
Figura 14. Imagen térmica ajustada al área de estudio, Landsat 8.	41
Figura 15. Temperatura de brillo para el área de estudio, Landsat 8.	42
Figura 16. Cálculo de NDVI para el área de estudio, Landsat 8.	43
Figura 17. Cálculo de proporción de vegetación para el área de estudio, Landsat 8.	44
Figura 18. Cálculo de temperatura superficial, Landsat 8.	45
Figura 19. Temperatura superficial de los años 1986 al 2018.	47

Figura 20. Temperatura superficial de los años 1986 y 2018 del área de estudio.
.....50

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Comportamiento del incremento de la cobertura urbana y el decremento de la cobertura verde urbana del año 1981 al 2018 del área de estudio.24

Gráfico 2. Decremento de cobertura del área verde urbana e incremento de cobertura del área urbana entre el año 1981 al 2018 del área de estudio. .24

Gráfico 3. Comportamiento de la temperatura máxima anual, media histórica y spline de la estación meteorológica Monterrey.....51

Gráfico 4. Comportamiento de la temperatura máxima anual, media histórica y spline de la estación meteorológica Topo Chico.....51

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

ETM+: Enhanced Thematic Mapper +

GEI: Gases de efecto invernadero

ICU: Isla de Calor Urbana

ICES: Indicadores de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSS: Multi-Spectral Scanner

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio

NDBI: Normalized difference built-up index

NDVI: Normalized difference vegetation index

OLI: Operational Land Imager

SIG: Sistemas de Información Geográfica

TM: The Thematic Mapper

TOA: Top of atmosphere

TST: Temperatura de la superficie terrestre

USGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos

RESUMEN

Ubicada al Noreste de México, la ciudad de Monterrey, Nuevo León, en las últimas décadas ha aumentado su superficie urbana, desplazando los ecosistemas verdes urbanos produciendo un impacto climático y ambiental, mejor conocido como “Isla de Calor Urbana” (ICU). En el presente estudio se efectuó un análisis multitemporal del cambio de cobertura con referencia a la cobertura verde urbana entre los años 1981 y 2018, utilizando técnicas de teledetección mediante uso de imágenes de satélite y análisis multitemporal. La metodología consistió en determinar el crecimiento urbano de la zonificación secundaria del municipio de Monterrey, para ello se emplearon imágenes satelitales multiespectrales de Landsat 2, 3, 4, 5 y 8; Se aplicó el método de vectorización visual y la clasificación no supervisada basada en información espectral de la imagen satelital Landsat, así mismo se calcularon las ICU y su aumento en temperatura como su localización con relación a la pérdida de cobertura.

Como resultado del estudio se mostró una pérdida de cobertura verde urbana de 4,928.14 has., dónde en 1981 representaba el 43.5% de la cobertura total del área de estudio y finalmente para el 2018 representa solamente el 20.31% en contraste con la cobertura urbana que representa finalmente el 79.69% del total de la superficie de estudio, determinando una tendencia estadística significativa ($p < 0.05$) para el aumento de infraestructura urbana y pérdida de cobertura vegetal. Los resultados de las ICU a través de imágenes satelitales mostraron un aumento de 12.67°C entre los años 1986 y 2018, con identificación puntual de islas de calor en la zona centro y norte del área de estudio, y las temperaturas más bajas en los extremos, áreas conocidas como suburbanas, determinando las temperaturas máximas con tendencias estadísticas significativas ($p < 0.05$). Finalmente se estableció una relación con la temperatura del aire proveída por las estaciones meteorológicas cerca del área de estudio, determinando *valores p* mayores a 0.05 determinando que no existe una correlación entre la temperatura del aire y la temperatura superficial.

ABSTRACT

Located in Northeast Mexico, the city of Monterrey, Nuevo León, in recent decades has increased its urban area, displacing urban green ecosystems, producing a climate and environmental impact, better known as “Isla de Calor Urbana” (UCI). In the present study, a multitemporal analysis of the coverage change was carried out with reference to urban green coverage between 1981 and 2018, using remote sensing techniques using satellite images and multitemporal analysis. The methodology consists of determining the urban growth of the secondary zoning of the municipality of Monterrey, for this, multispectral satellite images of Landsat 2,3,4,5 and 8 are used; The visual vectorization method and the unsupervised classification based on spectral information from the Landsat satellite image were applied. Likewise, the ICU's and their increase in temperature will be calculated as their location in relation to the loss of coverage.

As a result of the study, a loss of urban green coverage of 4,928.14 ha was lost, where in 1981 it represents 43.5% of the total coverage of the study area and finally for 2018 it represents only 20.31% in contrast to the urban coverage it represents finally, 79.69% of the total study surface, determining a significant statistical trend ($p < 0.05$) for the increase in urban infrastructure and the loss of vegetation cover. The results of the ICUs through satellite images experienced an increase of 12.67 ° C between 1986 and 2018, with specific identification of heat islands in the central and northern zones of the study area, and the lowest temperatures at the extremes, known as suburban areas, determining the maximum temperatures with specific statistical trends ($p < 0.05$). Finally, a relationship was established with the air temperature verified by the meteorological stations near the study area, determining *p values* greater than 0.05, determining that there is no correlation between air temperature and surface temperature.

INTRODUCCIÓN

La máxima expresión de la transformación del medio natural por la acción del humano se alcanza en las ciudades, que sin duda pueden ser consideradas como el medio ambiente más específicamente humano. Con esto se dice que la sustitución de la cubierta vegetal por un sustrato impermeable, la masa compacta de edificios elevados, la generación de polvos o aerosoles y por último la producción de energía antrópica son las causas de esta modificación, que afecta al conjunto de sus condiciones ambientales, pero de manera especial al clima (Cuadrat et. al.,2005).

El constante crecimiento que va incrementando en forma exponencial la población mundial (Meadows y Randers, 1992), el consumo de los recursos no renovables, la contaminación, la tasa de urbanización en países en desarrollo (ICES, 2013) se tornan particularmente críticos en los ámbitos urbanos y requieren el estudio de la morfología urbana actual y previsible en el futuro, que permita establecer pautas de evolución sin obstaculizar el uso pleno de los recursos naturales. Uno de los efectos más evidentes de esta alteración climática inducida por la urbanización es el fenómeno conocido como isla de calor urbana (ICU) o isla térmica. Este fenómeno se caracteriza, principalmente, por la presencia de un ambiente térmico más cálido en zonas urbanas densamente construidas (ciudades), con relación al medio rural que la rodea (Correa et al., 2003). Los espacios verdes cumplen un papel crucial en el bienestar y ayudan a mejorar la cohesión de la comunidad, es por eso la importancia del ambiente para mejorar el bienestar tanto físico como mental de sus comunidades (Merayo et. al., 2016; Perelman, 2016). Por otra parte, las áreas verdes en las ciudades son de gran importancia por los servicios ecosistémicos que suministran, entre estos son el poder reducir la polución del aire y agua, mantener la biodiversidad, mitigar el clima, aumentar el valor de los espacios y disminuir el estrés (Acosta, 2010; Gómez, 2005; Jiang et. al., 2014; MacKerron y Mourato, 2013; Seiferling et. al., 2017).

En este sentido, cubierta forestal y las áreas verdes juegan un importante rol en el mejoramiento de la calidad del ambiente urbano y proveen grandes beneficios

sociales y ambientales que favorecen la calidad de vida en las ciudades. La contribución del arbolado urbano en la mejora del microclima, la calidad del aire y de vida está muy bien documentada (Bernatzky,1982; Rowntree, 1986; McPerson, 1992; Dessi, 2002; Santamouris, 2000), con beneficios como la reducción de isla de calor (Akbari y Konopacki, 2005), la disminución de CO₂, NO₂, O₃, la absorción de contaminantes y la reducción de la polución del aire (McPerson y Simpson, 1998; Nowak et al., 2002; Scudo y Ochoa,2003).

El incremento de la temperatura urbana tiene un efecto directo en las condiciones de confort térmico para la realización de las diferentes actividades humanas tanto en invierno como en verano, además, se favorece el aumento de la contaminación ambiental de dos maneras: directamente, dado que mayores temperaturas urbanas funcionan como catalizador de las reacciones de los gases de combustión presentes en la atmósfera, lo que genera mayor cantidad de smog. También indirectamente, al utilizar equipos acondicionadores (climas, aire acondicionado) en hogares e industria, ya que su funcionamiento requiere de gran cantidad de energía lo que genera una mayor producción de gases de combustión (CO₂, CO, NO_x, SO_x, vapor de agua y metano), los cuales son responsables del calentamiento global o efecto invernadero y de la lluvia ácida (Sarricolea et. al., 2008).

El fenómeno de la ICU tiene un impacto negativo sobre el organismo humano, una medida viable para mitigar este efecto es incrementando la proporción de áreas verdes las cuales aparecen como zonas relativamente frías (en la ciudad) en comparación con las superficies construidas de su entorno (Martínez, 2007).

Los servicios ambientales son cada una de las utilidades que proporciona la naturaleza y pueden expresarse desde un punto de vista económico, existe evidencia que tanto las áreas verdes urbanas como las endémicas, proveen servicios ambientales que general múltiples beneficios a la salud (Wolf, 2012).

En cuanto a los servicios sociales, las áreas verdes ofrecen en el entorno de las ciudades los espacios indispensables y favoritos para la recreación, el juego y esparcimiento y aportan a la ciudad una identidad propia y las hace más agradables para vivir (Larios, 2010).

La importancia de las áreas verdes en las zonas urbanas radica en los beneficios que trae a la misma población residente, efectos que pueden manifestarse en varios ámbitos de carácter social, desde la creación o desarrollo de una conciencia ecológica hasta el sentimiento de seguridad y salud física y mental de los habitantes.

ANTECEDENTES

La falta de áreas verdes dentro de las ciudades densamente pobladas en México es un problema en el cual existen estudios que han emanado de diversas disciplinas, y desde todos esos puntos de vista se advierten sus adversas consecuencias para la vida urbana presente y futura. Sin embargo, las posibilidades de aumentar la superficie dedicada a este uso de suelo son, en estos casos, muy pocas. Esto se debe, entre otros factores, a la presión que el crecimiento poblacional ejerce en la ocupación del suelo urbano.

El estudio de los cambios en la cobertura y el uso del paisaje, y sus efectos sobre el ecosistema, es un campo ampliamente estudiado a nivel mundial. López et. al., (2001) realizaron un estudio en la ciudad y alrededores de la ciudad de Morelia, México, donde se cuantificó el cambio en la cobertura y en el uso de paisaje por 30 años (1960-1990); usando fotografías aéreas y sistemas de información geográfica. El estudio exploró las relaciones entre el crecimiento urbano y el cambio en el paisaje con matrices de Markov, así como la relación entre el crecimiento urbano y el aumento de la población mediante una regresión lineal.

Robinson et. al., (2005), documentó y cuantificó las transformaciones en la cobertura y el uso de la tierra desde el año 1974 hasta 1998 en un área al este de Seattle; mediante SIG se clasificaron y compararon coberturas y tipos de desarrollo, así como cambios al interior del hábitat de los bosques. El estudio mostró que las áreas suburbanas y exurbanas incrementaron drásticamente entre los años estudiados reemplazando y fragmentando las áreas rurales y silvestres.

A nivel nacional, Gómez (2003), realiza un estudio donde se determina la factibilidad técnica y económica de utilizar imágenes de satélite, para analizar la dinámica de crecimiento urbano en Bogotá. Se calculó el crecimiento de la ciudad en los últimos diez años y se identificó un área aproximada de vivienda informal. Los resultados demostraron una alta densidad poblacional en la ciudad, comparativamente con otras grandes ciudades del mundo y se evidenciaron las localidades que más se han expandido durante el periodo de análisis.

Reséndiz (2005) en su tesis "Evaluación del Arbolado Urbano en el Municipio de Monterrey" elabora un diagnóstico de la situación del arbolado urbano del Municipio de Monterrey, N. L., cubriendo los objetivos específicos: determinar la distribución de las áreas verdes de la zona urbana, estimar la cobertura vegetal del arbolado urbano y realizar un inventario de las especies vegetales presentes en el área urbana. Obtuvo como resultado un SIG en el cual determinó que el promedio de área verde por habitante sigue siendo más bajo que el recomendado por la ONU, además de que la densidad y distribución de estas áreas no es uniforme, teniendo mayor densidad en ciertas colonias.

Capelli et. al., (2001) determinaron que, en Temuco, Chile, la isla de calor se generó por las condiciones topográficas y desarrollo de la ciudad. Para determinar y analizar el fenómeno de ICU utilizaron estaciones móviles. Los autores encontraron que la intensidad de la isla calórica (ΔT_{u-r}) fue de 6.3°C y 1.2°C durante el día y la noche, respectivamente. El estudio confirmó la idea que el clima urbano de una ciudad es un mosaico de microclimas que interactúan continuamente y que los cerros que limitan la ciudad tienen gran influencia.

Morales et. al., (2007) analizaron el fenómeno de la isla de calor en la ciudad de Toluca, en el Estado de México. En este estudio mencionan cómo el cambio de uso de suelo y la urbanización afectaron de forma sustancial el clima en la ciudad, teniendo rangos de temperatura elevados en la zona centro y en el aeropuerto, lugares donde se observa muy comúnmente el fenómeno de la ICU.

El estudio realizado por Xiao (2006), en la ribera del Rio Perla, en la ciudad de Shenzhen, al sur de China, muestra como el crecimiento urbanístico y la pérdida de vegetación van asociados a la presencia de las islas de calor, para analizar esta pérdida se tuvo en cuenta no solamente el cálculo del NDVI sino también su relación con diferentes índices como: Índice de Agua de Diferencia Normalizado NDVI, Índice de Construcción de Diferencia Normalizado NDBI, índice Normalizado de Desnudez NDBal.

JUSTIFICACIÓN

El crecimiento urbano acelerado en las ciudades, especialmente de los países en vías de desarrollo, provoca grandes cambios y efectos circundantes en los cambios de uso de suelos, generadas por una expansión rápida y no planificada, basada en la forma espontánea que se ocupa el territorio, ello provoca conflictos de uso de suelo como también aspectos de organización social de las poblaciones que las ocupan.

Los procesos del crecimiento urbano en el Municipio de Monterrey, coincide que las ciudades han experimentado cambios en determinados procesos económicos y sociales en los influyeron en la transformación del espacio urbano.

Las áreas verdes también tienen el potencial para proveer a los ciudadanos beneficios económicos directos a través de la agricultura y forestación urbana. Adicionalmente, la preservación de sistemas de áreas con vegetación puede mejorar la calidad de vida, al prevenir desastres naturales en las poblaciones marginales y proporcionar a la población lugares naturales para salvaguardar la calidad de preciados recursos como el aire y el agua y proveer lugares de recreación (Sorensen et. al., 1998).

El crecimiento del municipio de Monterrey ha sido marcado por sucesivas transformaciones en el período de 1991 a 2018, mostrando una expansión física y notorias desigualdades en zonas y grupos; además de los nuevos usos de suelo promovidos por la construcción de viviendas como también el aumento de un problema en la planificación urbana. Actualmente el Municipio de Monterrey

cuenta con porciones de suelo urbano y rural que son afectados por el proceso de crecimiento poblacional, social, y económico, esto implica una serie de transformaciones de forma negativa y un impacto directo a los beneficios de las áreas verdes.

Este estudio se considera de importancia ya que nos permitirá tener información para la toma de decisiones, en cuanto a planificación urbana del Municipio de Monterrey, además de que permitirá observar los cambios de cobertura, comparando la cobertura original base (1981), a la final (2018) que se ha dado dentro del Municipio, y determinar en cuanto tiempo el crecimiento urbano se hizo notorio a una escala mayor. Por lo tanto, es necesario analizar el crecimiento urbano y sus tendencias, ya que esto nos servirá para una mejor planeación y la tendencia de ocupación del espacio geográfico en el Municipio.

El presente estudio se enmarca a evaluar el crecimiento urbano utilizando las técnicas de evaluación multitemporal con el uso de sistemas de información geográfica.

HIPÓTESIS

Los ecosistemas urbanos tienden a disminuir con la urbanización, lo que origina la creación de islas de calor.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la dinámica de la expansión urbana del Municipio de Monterrey entre los años 1981 y 2018, utilizando técnicas de teledetección mediante uso de imágenes de satélite y análisis multitemporal e identificar las islas de calor.

Objetivos específicos

- Evaluar la eficiencia de método de la clasificación no supervisada en la identificación multitemporal del crecimiento urbano del Municipio de Monterrey en el periodo 1981 – 2018.
- Determinar tendencias estadísticas en los cambios de cobertura verde urbana y cobertura urbana.
- Calcular la temperatura de la superficie e identificar las islas de calor en el área de estudio.
- Identificar tendencias en las temperaturas superficiales obtenidas a través de imágenes satelitales.
- Identificar tendencias en las temperaturas del aire de las estaciones meteorológicas dentro del área de estudio.
- Determinar la correlación entre la temperatura superficial y la temperatura del aire proveniente de las estaciones climáticas.

CAPÍTULO I. CAMBIO DE COBERTURA URBANA

INTRODUCCIÓN

La urbanización es uno de los principales factores antropogénicos que ha causado la reducción de la superficie verde y la sustitución de los hábitats preexistentes en las ciudades (Berkowitz et. al., 2003), (Czech y Krausman 1997, 2000). Son previsible grandes desafíos sociales y ambientales que comprometen seriamente, a corto plazo, la sostenibilidad de los sistemas urbanos y la calidad de vida. La situación demanda una urgente toma de conciencia por parte de diversos actores involucrados en la construcción del territorio y la toma de decisiones que permitan planificar, desarrollar e implementar acciones que mejoren los niveles de sostenibilidad social, económica y ambiental (Jenks, M., 1996; Breheny, M., 1996; Hillman, M., 1996). La presencia de áreas verdes y arboladas indican la calidad ambiental. La optimización de estos beneficios está directamente relacionada con la cobertura, composición, densidad, distribución y estado de salud del arbolado (NSII, 2001; James et. al., 2009). Entre mayor, más densa y saludable sea la cobertura, funcionará mejor y, en consecuencia, aumentarán las probabilidades de que provea de beneficios ecológicos (Köchli y Brang, 2005; Stabler et. al., 2005; Maco y McPherson, 2002; Gómez et. al., 2001; Romero et. al., 2001). Los beneficios o servicios ambientales (Colding et. al., 2006; James et. al., 2009; Tyrväinena et. al., 2007; Tzoulas et. al., 2007) que las áreas verdes generan están ampliamente documentados: disminuyen el consumo de energía eléctrica para el enfriamiento del aire, coadyuvan a los procesos de purificación del aire, permiten un mejor desarrollo del ciclo hidrológico, la permeabilidad del suelo y la calidad del agua y aminoran el ruido (Cerón et. al., 2013; Gidlöf y Öhrström, 2007; McMichael, 1999; Oliveira et. al., 2011; Perry y Nawaz, 2008; Yang et. al., 2005). Una ciudad arbolada contribuye a la biodiversidad, que es un importante indicador de ciudad ecológicamente sostenible. A mayor biodiversidad mayor equilibrio del ecosistema urbano (Colding et. al., 2006; Tzoulas et. al., 2007).

En la actualidad, más de la mitad de la población humana mundial se concentra en zonas urbanas (Grimm et. al., 2000,2008 y 2013) y la región de América Latina es la más urbanizada del mundo, con el 80% de su población en las ciudades y un alto porcentaje de habitantes en barrios urbanos marginales.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una de las principales herramientas para esto ya que permiten identificar áreas verdes con el objetivo de desarrollar planes de manejo y de esta forma proteger las áreas verdes con mayor importancia para crear planes de manejo con el objetivo de proteger áreas verdes importantes para el desarrollo (Unal y Uslu, 2018). En particular, los sensores remotos satelitales han sido utilizados para identificar las áreas verdes en varias ciudades del mundo ya que las características del sensor varían los rangos temporales y la resolución espacial de las imágenes satelitales (Jarchow et. al., 2018; Robinson et. al., 2017). El sensor más utilizado es Landsat siendo el único que permite un tiempo ininterrumpido de más de 30 años con alta resolución y un registro global histórico (Robinson et. al., 2017). Landsat tiene una resolución de 30 m adecuada para realizar estudios de escala local a regional ya que tiene mejor precisión que otros sensores como MODIS (Espectro radiómetro de imágenes de media resolución) en la precisión de áreas heterogéneas con densidades bajas de vegetación (Jarchow et. al., 2018).

Debido al crecimiento sin ninguna planificación inicial, la mayoría de las ciudades latinoamericanas tienen en general un déficit de áreas verdes según los estándares internacionales con valores menores a 9 m² de área verde por habitante (Gómez, 2005; Reyes y Aldunce, 2010).

En tal sentido, es importante reconocer los patrones de crecimiento de ciudades y países, además de las implicaciones que esto sostiene en un nivel inmediato y su relación con el componente social de la ciudad, haciendo énfasis en la necesidad de mecanismos de planificación asertivas que indiquen fórmulas para resolver muchos de los conflictos desencadenantes del crecimiento urbano.

Análisis multitemporal

El análisis multitemporal permite detectar cambios entre diferentes fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre el medio (Chuvieco, 1996).

El análisis multitemporal permite detectar cambios entre diferentes fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre el medio (Sobrino, 2000).

El análisis de tipo espacial que se realiza mediante la comparación de las coberturas interpretadas en dos o más imágenes de satélite o mapas de un mismo lugar en diferentes fechas y permite evaluar los cambios en la situación de las coberturas que han sido clasificadas. Como los meses del año y los años entre si difieren en sus características climáticas, un análisis multitemporal es mucho más amplio que el análisis de una sola imagen (Palacios, 2015).

Expansión urbana

El crecimiento urbano es el aumento físico del tamaño de la ciudad, es decir es el incremento del área urbana o urbanizada, debido a factores como el crecimiento sociodemográfico (aumento de la población que demanda un espacio en la ciudad) y esta a su vez depende del movimiento o crecimiento económico de la ciudad, ya sea en industria, comercio, servicios u otros (en condición de atractivo de la mano de obra y/u oportunidades de superación) (Capel, 1971).

El crecimiento urbano, es una forma de incremento de las áreas de las ciudades y se define como la extensión de superficies metropolitanas dentro de los paisajes rurales adyacentes (Zebisch et. al., 2004; Davis y Henderson, 2003; Ordoñez, 2001), siendo el rápido crecimiento poblacional la condición más determinante en el actual crecimiento urbano acelerado (Zhu, 2002).

El proceso de crecimiento urbano inicia cuando se da un cambio de uso del suelo de rural a urbano, donde lo primero que cambia es el valor del suelo; a medida que la ciudad se expande e incorpora suelo rural al perímetro urbano para futuros desarrollos. En este proceso se crean las áreas suburbanas, que se definen como

las zonas de transición entre el suelo urbano y el rural, y por lo tanto como zonas susceptibles de incorporar al suelo urbano; son también llamadas áreas de expansión o de desarrollo. Dichas áreas están influenciadas por dos factores principales: las expectativas de desarrollo por parte de los propietarios; y la presión para su urbanización por parte del sector formal e informal (Ordoñez, 2001). A medida que el crecimiento urbano continúa es necesario extender la infraestructura de la ciudad: vías de transporte, equipamiento, servicios públicos, entre otros; para satisfacer las necesidades de la población que llega a ocupar estas nuevas áreas (Giraldo, 1999).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La delimitación del área de estudio está dada con base en la zonificación secundaria del Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey y se localiza entre las coordenadas geográficas $25^{\circ} 47'$ y $25^{\circ} 30'$ N y $100^{\circ} 15'$ y $100^{\circ} 23'$ W con una superficie de 22,173.79 has, donde se excluyen las áreas no urbanizables por preservación ecológica, como se muestra en el siguiente mapa (Figura 1).

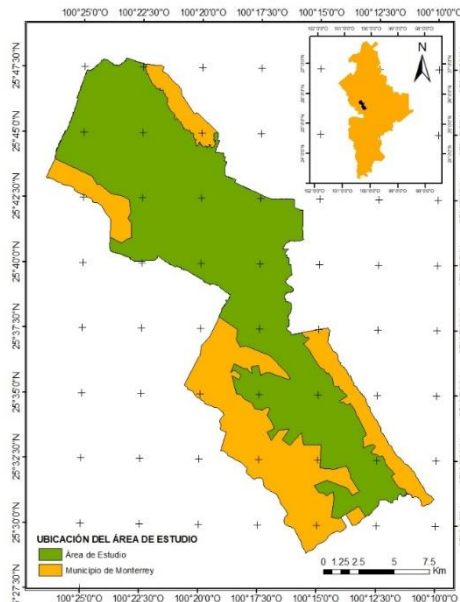


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Elaboración propia.

Clima y vegetación

El clima predominante en el área de estudio corresponde al tipo seco estepario, cálido y extremo, con lluvias irregulares a fines del verano, la temperatura máxima extrema es de 45° C y la mínima extrema de -2° C; la temperatura media en el área urbana es superior a los 22° C (García, 2004).

El área de estudio presenta en un 80% de vegetación no nativa en parques, áreas verdes y domicilios, con una marcada tendencia a revertir dicha situación. Las áreas presentan, casi en su totalidad, vegetación secundaria de impacto como Huizache (*Acacia farnesiana*), Retama (*Pavkiusunia aculeata*), leucanea o domilon (*leucanena sp*) y matorral submontano propio de la región (Alanís y Cervantes, 1995).

La desertificación se presenta en un 15% de las áreas sin urbanizar por pérdida de vegetación y erosión por arrastre de materiales. El manejo de las zonas montañosas es de conservación y preservación de los recursos naturales. Se conserva y recupera el agua de escurrimientos manteniendo cañadas y arroyos en estado natural, favoreciendo la absorción mediante obras de retención y captación de lluvia. En los desarrollos urbanos se controla el crecimiento cuidando que se mantengan en estado natural las zonas con pendientes mayores al 45% y se conserva la flora y fauna nativas. (Dirección de Ecología de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del municipio de Monterrey).

Clasificación de imágenes

La clasificación multiespectral de imágenes satelitales se usa para extraer información temática de manera semiautomática (Riaño, 2002). La clasificación digital obtiene una nueva imagen donde a cada uno de los píxeles de la imagen original se le asigna una clase o leyenda. Esta clasificación puede ser de dos tipos: no supervisada y supervisada (Lillesand et. al., 2014).

La diferencia fundamental entre los dos tipos de clasificación es que en la no supervisada el analista define el número de clases y posteriormente las interpreta. En la supervisada el analista interpreta y selecciona las clases.

Después de una selección de muestras o firmas de entrenamiento, los sistemas clasificadores requieren algoritmos paramétricos (en función de parámetros adicionales al comportamiento de las firmas) y no paramétricos (sólo en función de las firmas) para asignar los píxeles de la imagen a las clases determinadas. Entre estos algoritmos figuran los espacios de características como regla de decisión no paramétrica y la paramétrica de distancias mínimas (Franco y Rodríguez, 2005).

Clasificación no supervisada

Los métodos no supervisados de clasificación digital de coberturas de suelo tienen como principal ventaja el reconocimiento de patrones espectrales de manera autónoma e interactiva, sin sujetarse a un estricto conocimiento del sitio de estudio y permitiendo concentrar la tarea humana en la interpretación más que en la consecución de los resultados (Chuvienco, 2002). El uso de imágenes de satélite “ofrece mayor rapidez y confiabilidad en la generación de cartografía de los recursos naturales y de realización de un mapeo periódico (monitoreo) (Chuvienco, 1985; Buendía et. al., 2002) ya que por ejemplo los satélites Landsat TM y ETM+ tienen cierta periodicidad (ciclo de paso cada 16 días) y están en órbita permanente. Los estudios con fotografías aéreas resultan más onerosos en la relación costo-beneficio con respecto al uso de imágenes de satélite, debido a que éstas últimas permiten realizar estudios en grandes extensiones de cobertura terrestre (Chuvienco, 1985, 2002; Valdez et. al., 2006).

Prueba Mann-Kendall para detectar y cuantificar tendencias monótonas

La prueba de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica que se encarga de evaluar estadísticamente si existe una tendencia monótona positiva o negativa de la variable de interés a lo largo del tiempo.

La hipótesis nula para esta prueba es que no hay una tendencia en la serie de datos. La hipótesis alternativa es que existe una tendencia monótona (en una sola dirección) en los datos. Esta tendencia podrá ser positiva o negativa. La prueba de Mann-Kendall permite explorar estas tendencias calculando el

estadístico S. La prueba de Mann-Kendall se realizó mediante una macro en Microsoft Excel, del Servicio Meteorológico del Finlandia (IMF, 2002).

Sistemas de información geográfica

Para determinar la pérdida de cobertura, se utilizaron imágenes del satélite Landsat 2,3,4, 5 y 8 para el periodo (1981-2018) con una resolución de 30 metros del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

Landsat 2 y 3

Los primeros tres satélites Landsat fueron construidos a partir de una modificación del satélite meteorológico NIMBUS. Tenían una órbita circular, casi polar, sincrónica con el sol, a una altura aproximada de 920 km. Los satélites realizaban una órbita completa alrededor de la Tierra cada 103 minutos y 27 segundos, cubriendo 14 fajas de la superficie terrestre. Cada 18 días ellos pasaban sobre la misma región de la superficie de la tierra.

La resolución espacial en el ERTS-1 y Landsat-2 era de 80x80 m, con tres bandas espectrales (verde, rojo e infrarrojo cercano). En Landsat 3 era de 40x40 m, con una banda espectral (pancromático).

	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (Días)	Resolución radiométrica (Bits)
Sensor MSS	B4: 0.50-0.60 (visible-azul)	79	18	8
	B5: 0.60-0.70 (visible-verde)			
	B6: 0.70-0.80 (visible-roja)			
	B7: 0.80-1.1 (infrarrojo cercano)			

Tabla 1. Tabla explicativa del sensor MSS Landsat 2 y 3. Fuente (USGS, 2013).

Landsat 4

El satélite Landsat 4 orbitaba la Tierra en una órbita casi polar sincrónica al sol, pero volaba a una altitud más baja de 705 km (438 millas), inclinada a 98.2 grados, y rodeaba la Tierra cada 99 minutos. El satélite tuvo un ciclo de repetición de 16 días con un tiempo de cruce ecuatorial: 9:45 am +/- 15 minutos. Aunque el satélite estaba en una órbita más baja, tenía un campo de visión más alto (FOV) para retener el mismo ancho de franja de 185 km (115 millas).

	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (Días)	Resolución radiométrica (Bits)
Sensor MSS	B4: 0.50-0.60 (visible-azul)	79	18	8
	B5: 0.60-0.70 (visible-verde)			
	B6: 0.70-0.80 (visible-roja)			
	B7: 0.80-1.1 (infrarrojo cercano)			

Tabla 2. Tabla explicativa del sensor MSS Landsat 4. Fuente (USGS, 2013).

Landsat 5

El sensor Thematic Mapper (TM), embarcado en el satélite Landsat 5, es un sensor de barrido multispectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y precisión radiométrica en relación con el sensor MSS (Multispectral Scanner System) (Landsat Science, 2014).

Opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo térmico (INEGI, 1999). Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas

del visible e infrarrojo cercano y medio, 120 metros en la banda del infrarrojo térmico y un área de cobertura de 185 x 170 en km.

	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (Días)	Resolución radiométrica (Bits)
Landsat-5 Thematic Mapper (TM)	B1: 0.45-0.52 (visible-azul)	30	16	8
	B2: 0.52-0.60 (visible-verde)	30		
	B3: 0.63-0.69 (visible-rojo)	30		
	B4: 0.76-0.90 (IR cercano)	30		
	B5: 1.55-1.75 (IR medio)	30		
	B6: 10.4-12.5 (IR térmico)	120		
	B7: 2.08-2.35 (IR medio)	30		

Tabla 3. Tabla explicativa del sensor TM Landsat 5. Fuente (USGS, 2013).

Landsat 8

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal InFRared Sensor (TIRS) (USGS, 2015).

Las bandas espectrales del sensor OLI proporcionan una mejora de los instrumentos de las misiones Landsat anteriores, debido a la incorporación de dos nuevas bandas: un canal a la izquierda del azul visible (banda 1), diseñado específicamente para los recursos hídricos e investigación en zonas costeras, y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) para la detección de nubes tipo cirrus (Pons, 2012).

El satélite Landsat 8 presenta once bandas, de las cuales se descargan diez, correspondientes a las siete bandas multispectrales (1-7) con resolución espacial de 30 metros; dos bandas térmicas (10-11) con resolución espacial de

100 metros (reescalada a 30 metros), la banda pancromática (8) con resolución espacial de 15 metros y un área de cobertura de 183 x 170 en Km.

A continuación, se adjunta una tabla (Tabla 4) donde se especifican los valores de distribución de las bandas del Landsat 8:

Sensores	Resolución espectral (μm)	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (Días)	Resolución radiométrica (Bits)
Spectral Band (OLI)	B1: 0.433-0.453 (visible) Aerosol costero	30	16	16
	B2: 0.450-0.515 (visible azul)	30		
	B3: 0.525-0.600 (visible-verde)	30		
	B4: 0.630-0.680 (visible-rojo)	30		
	B5: 0.845-0.885 (R cercano)	30		
	B6: 1.560-1.660 (SWIR 1)	30		
	B7: 2.100-2.300 (SWIR 2)	30		
	B8: 0.500-0.680 (Pancromática)	15		
	B9: 1.360-1.390 (Cirrus)	30		
Spectral Band (TIRS)	B10: 10.30-11.30 Infrarrojo térmico (TIRS) 1	100		
	B11: 11.50-12.50 Infrarrojo térmico (TIRS) 2	100		

Tabla 4. Tabla de la distribución de las bandas del Landsat 8. Fuente (USGS, 2013).

La época del año de las imágenes es verano. Se ha tenido que cambiar de mes en algunos años debido a la presencia de nubes en las imágenes.

A continuación, se muestra una tabla (Tabla 5) con las imágenes utilizadas:

Código	Satélite	Fecha
LM20300421981080AAA04	Landsat 2	21/03/1981
LM30300421982210AAA05	Landsat 3	29/07/1982
LM40280421983112AAA03	Landsat 4	22/04/1983
LM50280421986112AAA03	Landsat 5	22/04/1986
LM50280421987259AAA03	Landsat 5	16/09/1987
LT50280421991174AAA02	Landsat 5	23/06/1991
LT50280421994182XXX02	Landsat 5	01/07/1994
LT50280421998193XXX01	Landsat 5	12/07/1998
LT50280422003159LGS01	Landsat 5	08/06/2003
LT50280422008157EDC00	Landsat 5	05/06/2008
LC80280422013154LGN01	Landsat 8	03/06/2013
LC80280422018200LGN00	Landsat 8	19/07/2018

Tabla 5. Imágenes satelitales Landsat 2,3,4,5 y 8 utilizadas para generar el NDVI. Elaboración propia.

Todas las imágenes han sido descargadas de la página web del USGS.

Análisis multitemporal

Todo el procesamiento de imágenes se realizará en el software ArcMap ver. 10.4.1.

La clasificación y selección de coberturas vegetales y urbanas del área de estudio dentro del Municipio de Monterrey se realizó con base en la interpretación de imágenes de satélite.

El proceso de asignación de coberturas se desarrolla con la herramienta “*Clasificación no supervisada de cluster ISO*” la cual agrupa los píxeles con una misma firma espectral, el resultado de esto corresponde a unidades de diferente tipo de cobertura que debe renombrarse con base en la identificación de combinación de bandas obteniendo el color natural para su identificación y el proceso de fotointerpretación.

Composición a color

Para realizar interpretación visual con fines de mapeo de cobertura de superficies, la clave fundamental es utilizar diversas composiciones a color y realces zonificados. Las composiciones a color se generaron en base a una revisión bibliográfica y en base al reconocimiento del área de estudio. Es así como las principales composiciones para las Imágenes Landsat fueron: una de

color verdadero, una en falso color, pero principalmente la composición como la más recomendada para el mapeo de cobertura de la tierra.

Se cargaron las bandas correspondientes para combinar entre ellas para producir una imagen en color real pues involucra a las tres bandas visibles y se le asigna a cada una de ellas su verdadero color, resultando una combinación que se aproxima a los colores naturales de la escena. Posteriormente se realizó el recorte del área de estudio.



Figura 2. Combinación de bandas visibles para el color real del área de estudio del año 1981.
Elaboración propia.

Interpretación visual preliminar

Para conocer la variación general de la cobertura el área de estudio, se realizó la interpretación de los macro patrones de cobertura. Esta interpretación visual se fundamentó en los estándares de interpretación como son la textura, el tono, y el color.

Posteriormente se realizó la clasificación de superficies, donde las categorías resultantes fueron reagrupadas por medio de la combinación de clases mediante interpretación visual utilizando la herramienta de "*Clasificación no supervisada de cluster ISO*".





Simbología	Tipo de cobertura	Características
	Bosques y áreas seminaturales	Esta comprendido por un grupo de coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo, desarrollado sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales.
	Zonas verdes urbanas	Zonas de vegetación dentro del tejido urbano, incluyendo parques urbanos y cementerios.
	Zonas urbanas	Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada.
	Red vial	Son espacios artificializados con infraestructura de comunicaciones como carreteras, autopistas y vías férreas; se incluye la infraestructura conexas y las instalaciones asociadas tales como: estaciones de servicios, andenes y terraplenes.

Tabla 6. Clasificación de superficies por el método de Clasificación no Supervisada para el área de estudio. Elaboración propia.

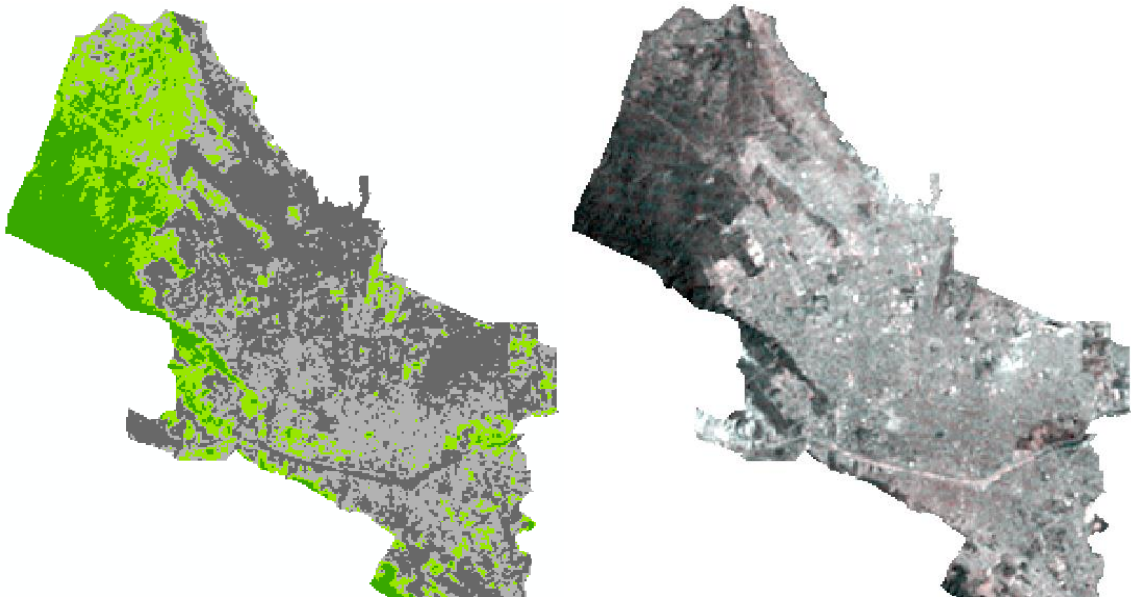


Figura 3. Representación de la clasificación de superficies por el método de Clasificación no Supervisada del año 1981 del área de estudio. Elaboración propia.

Finalmente se establecieron dos categorías para facilitar el manejo de datos; la primera nombrada “Cobertura verde urbana”, resultado de los bosques y áreas seminaturales así como de zonas verdes urbanas, y “Cobertura urbana” resultado de las zonas urbanas y red vial.



Simbología	Tipo de cobertura
	Cobertura verde urbana
	Cobertura urbana

Tabla 7. Categorías finales de la clasificación de superficie del área de estudio. Elaboración propia.

Una vez hechas las clasificaciones, se transformaron los datos a formato vector, utilizando la última capa creada, utilizando la herramienta “*Ráster a polígono*” donde se identificará el nombre de las clases según su valor dentro de la tabla; una vez llena, es importante revisar no tener nada seleccionado y finalmente se procede a disolver esta capa según nuestro campo de Clase, utilizando la herramienta dentro de Geoprocesamiento, “*Dissolver*”, para la obtención de superficies.

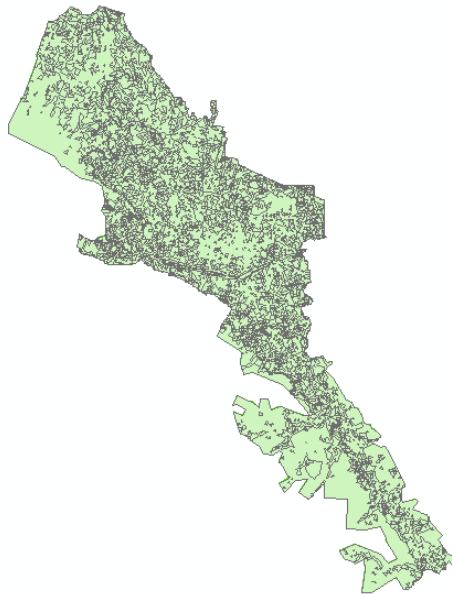


Figura 4. Shape generado de las clasificaciones de superficies del área de estudio del año 1991. Elaboración propia.

El procedimiento anterior se utilizó para todas las imágenes satelitales del año 1981 al 2018 para el área de estudio.

RESULTADOS

Los mapas de cobertura generados para el año 1981 al 2018 nos permitieron analizar la tendencia de cambio que se dio lugar en el área de estudio.

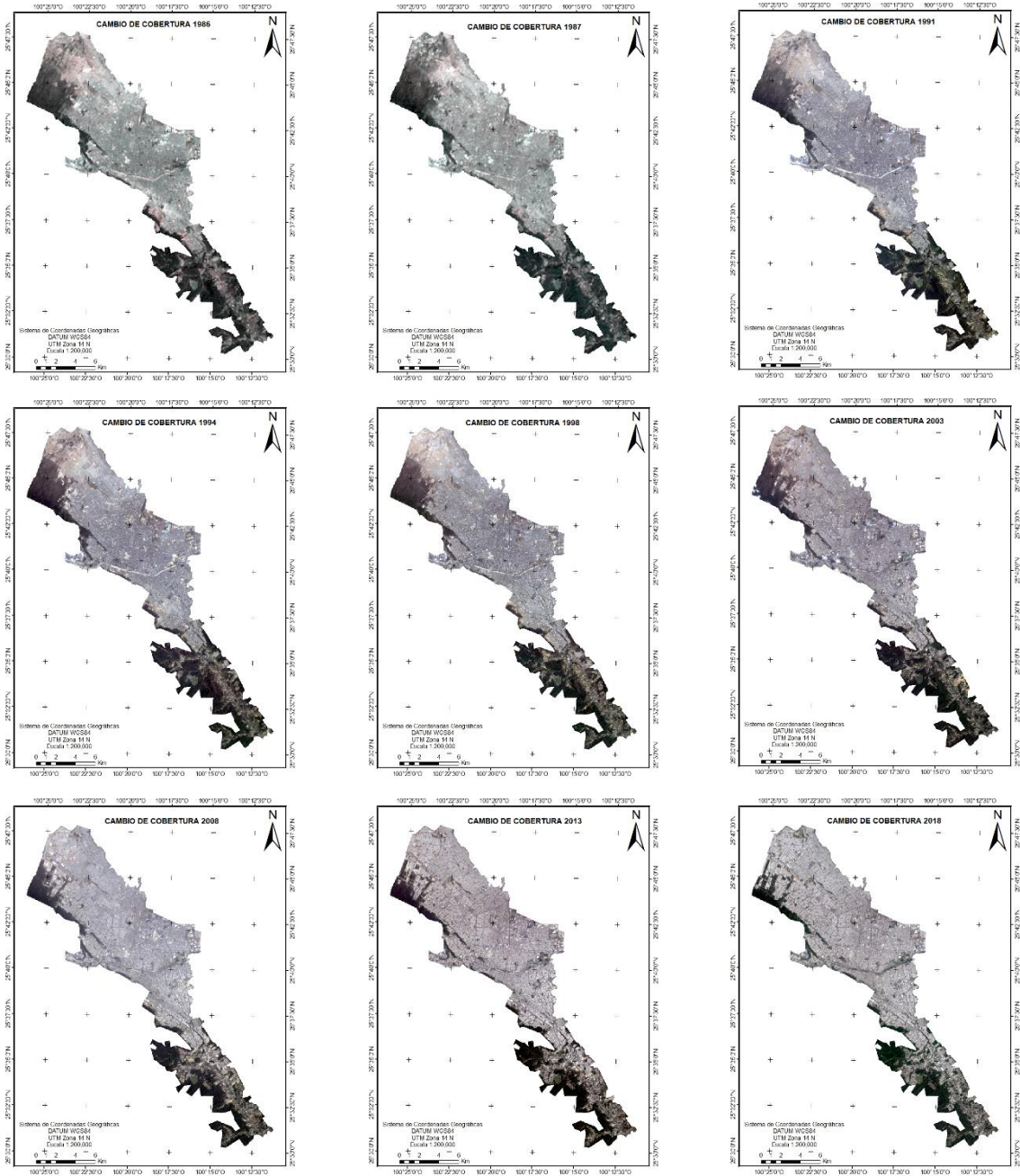


Figura 5. Análisis Multitemporal de pérdida de cobertura de los años 1981 al 2018. Elaboración propia.

Identificación de la cobertura

La tabla 8 presenta los resultados principales respecto al cambio de cobertura del área de estudio de los años 1981 al 2018. La obtención de valores en cuanto a coberturas, se observa una dominancia de cobertura urbana en incremento a través de los años de estudio dónde en 1981 representaba el 57.47% de la superficie total del área de estudio, en contraste con la cobertura verde urbana que representaba el 42.54%. Esta última, en decremento representando solo el 20.31% del total del área de estudio para el año 2018, en contraste con el 79.69% de la cobertura urbana final.

Año	Cobertura verde urbana (has)	%	Cobertura urbana (has)	%
1981	9,431.20	42.53	12,742.59	57.47
1982	9,008.36	40.63	13,165.43	59.37
1983	8,580.56	38.70	13,593.23	61.30
1986	8,365.30	37.73	13,808.49	62.27
1987	8,135.50	36.69	14,038.29	63.31
1991	8,022.66	36.18	14,151.13	63.82
1994	7,996.92	36.06	14,176.87	63.94
1998	7,971.29	35.95	14,202.50	64.05
2003	7,126.85	32.14	15,046.94	67.86
2008	5,885.55	26.54	16,288.24	73.46
2013	4,644.53	20.95	17,529.26	79.05
2018	4,503.06	20.31	17,670.73	79.69

Tabla 8. Superficies de cobertura verde urbana y cobertura urbana del área de estudio entre el año 1981 al 2018. Elaboración propia.

Se afirma que hubo una gran dinámica de cambio en el área de estudio. La clase de cobertura verde urbana fue la más afectada principalmente habilitadas para uso de infraestructura urbana. Los siguientes gráficos (1 y 2) muestran las coberturas en hectáreas y porcentaje en función de las clases determinadas dentro del área de estudio de los años 1981 al 2018.

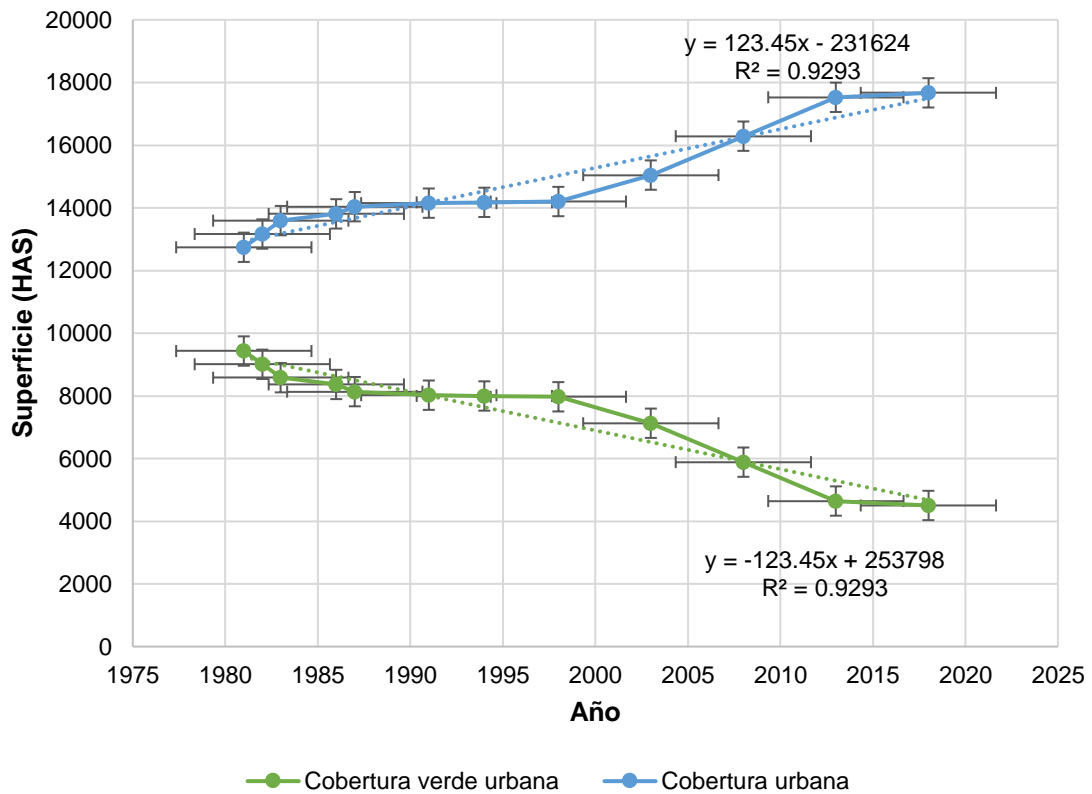


Gráfico 1. Comportamiento del incremento de la cobertura urbana y el decremento de la cobertura verde urbana del año 1981 al 2018 del área de estudio. Elaboración propia.

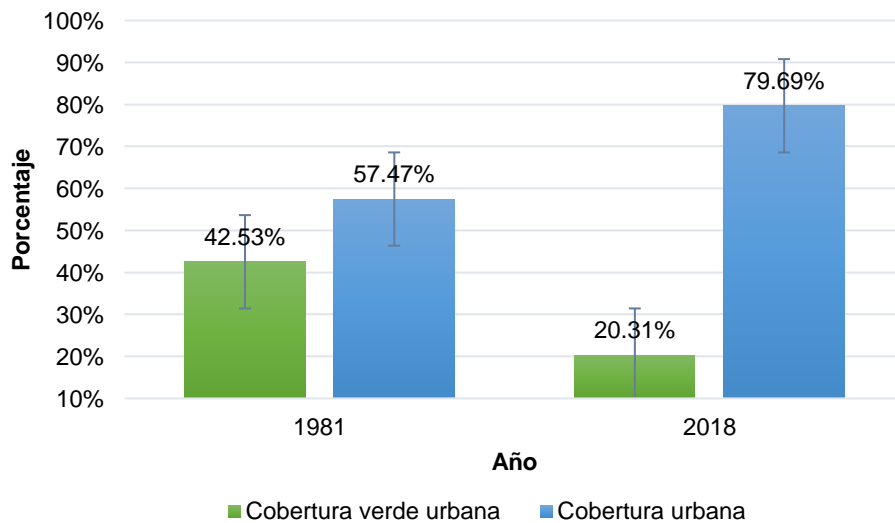


Gráfico 2. Decremento de cobertura del área verde urbana e incremento de cobertura del área urbana entre el año 1981 al 2018 del área de estudio. Elaboración propia.

Los mapas generados a partir de las imágenes nos permiten analizar la tendencia de cambio.

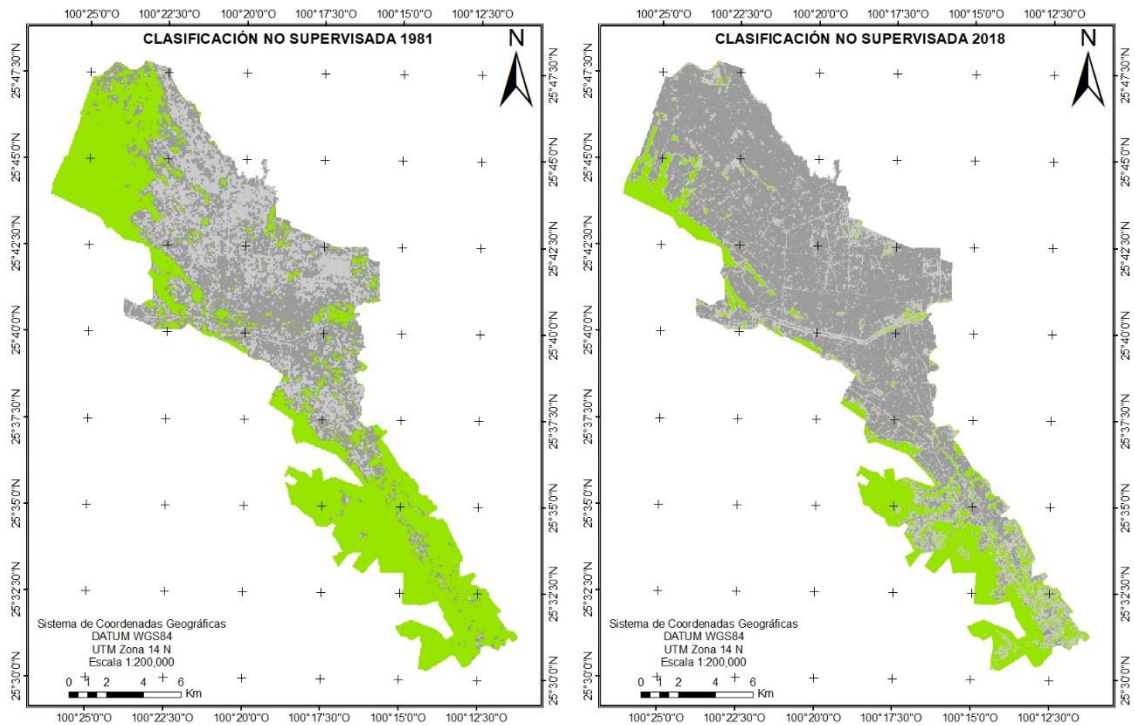


Figura 6. Clasificación no supervisada de los años 1981 y 2018 del área de estudio. Elaboración propia.

El crecimiento urbano se convierte en un fenómeno de gran importancia para el municipio de Monterrey, teniendo en cuenta que el área de crecimiento urbano para el año 1981 es de 12,742 hectáreas y para el año 2018 de 17,671 hectáreas.

Al observar las dos imágenes y comparar las coberturas existentes, haciendo un análisis superficial de ellas, se dice que las coberturas asociadas a la parte natural se han disminuido, esto se debe al incremento el crecimiento urbano, observando una pérdida de vegetación o lo que mejor conocemos como áreas verdes urbanas.

Al hacer el análisis multitemporal con las imágenes de satélite dentro de los años 1981 al 2018, se pude determinar el cambio de cobertura verde urbana que en este caso fue la más afectada, presentando un cambio notable, estimando que

en año 1981 se tenía un 43.5% teniendo una reducción del 22% para el año 2018. Mediante las observaciones de las imágenes satelitales y reconocimiento del área de estudio, se determina que existen muy pocas áreas verdes especialmente en la zona central del área de estudio, misma que ha sido fragmentada debido a la fuerte expansión de cobertura urbana.

Utilizando la prueba no paramétrica Mann-Kendall para los resultados de las coberturas verdes urbanas y coberturas urbanas, se determinó que existe una tendencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$), determinando así un incremento de infraestructura urbana a través de los años, y una reducción de vegetación verde urbana.

La cobertura urbana en el área de estudio analizada a partir de la cobertura nos muestra como estos asentamientos hasta el año 2018 alcanzan grandes superficies con relación a la delimitación del área de estudio (79.6%), llegando a comprobar esto a través del reconocimiento satelital, mostrando cada vez más la expansión hacia las orillas con límites de las áreas no urbanizables por preservación ecológica, dadas por el Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey, de igual manera una expansión hacia las entradas principales de la zona norte y sur del municipio.

DISCUSIÓN

Las clasificaciones basadas en respuestas espectrales habitualmente presentan precisiones bajas debido a que el algoritmo de clasificación no logra discriminar la confusión radiométrica de las coberturas de suelo (Mas y Ramírez, 1996), como en el caso que nos ocupa. Los bajos porcentajes de precisión, provenientes de las clases más representativas del paisaje antrópico, también pueden atribuirse a la continua dinámica de cambio estacional de tipo hídrico y de perturbación antropogénica (López, 1994). Esto promueve la formación de extensos mosaicos paisajísticos con variedad de fases intermedias (Rzedowski, 1986).

La cartografía obtenida permite observar una amplia fragmentación de la mayoría de las clases, mostrando la imagen clasificada con una apariencia confeti, o según el término anglosajón "*salt and pepper*", debido tanto a la propia complejidad del paisaje (Chuvienco, 2002) como a las fuertes y persistentes perturbaciones en la vegetación, que se muestran como respuestas espectrales muy variadas, que causan que los valores digitales de los píxeles de una clase tiendan a confundirse con clases diferentes (Vega et. al., 2008).

González, M. (2000) definió los tipos de vegetación del municipio de San Pedro Garza García, N. L. delimitando su superficie en m², utilizando cartografía y fotografía aérea multitemporal (1879, 1972, 1995, 1998a, 1998b y 1999) analizando del crecimiento urbano en el que se manifestó un crecimiento muy marcado en los años de 1972 y 1995, años en que se marcó una pérdida de vegetación de 166.54 has en el bosque de Encino-Pino sin erosión, apreciando que en 1879 la mancha urbana cubría solamente 209.582 Ha., para el año de 1972 el incremento fue de 1, 225.99 ha., cifra que fue acrecentándose en 1995, pues hubo un crecimiento de 3,431.72 ha. de 1995 a 1999 el aumento fue de 69.380 ha., lo que se ve frenado, por no, contar con área para su expansión y estos resultados podrían compararse con los de este estudio haciendo referencia a la pérdida de cobertura vegetal e incremento de la cobertura urbana, ya que la expansión en el Municipio de Monterrey en determinado momento podría no contar con área para expandirse debido a la zonificación dada por el plan de Desarrollo urbano, donde ese delimitan áreas no urbanizables y por preservación ecológica.

Así mismo se analiza el comportamiento de la vegetación durante los años de estudio mostrando la superficie de la cubierta vegetal expresada en hectáreas. En el año de 1879 había 7,223.127 Ha., para el año de 1999 ha desaparecido 4,515.447 Ha., quedando hasta febrero de 1999 2,707.680 Ha. Mostrado de otra manera los datos obtenidos, se observa que en 1897 el porcentaje de vegetación se estimó en un 97%, en el año de 1972 disminuyó a un 81%, en 1995, fue donde

se marca tajantemente pues disminuyó hasta un 37%, de 1998 a 1999 básicamente ha permanecido constante.

Bernal, et. al., (2010) en su investigación advierten que el modelo de desarrollo basado en la industria y el crecimiento inmobiliario trae efectos inmediatos, en la pérdida de tierra y recursos naturales, como de las escasas reservas territoriales, agrícolas y ecológicas, contaminación del suelo, agua y aire.

Dávila, A. et. al., (2017) en su estudio sobre el proceso de expansión urbana y su impacto en la cobertura y uso de suelo de la zona de presión intermunicipal de Chihuahua, evaluaron la dinámica de cambios de uso del suelo en el periodo 2000-2010 desde la perspectiva del desarrollo urbano sustentable. El cambio más importante y evidente se presentó en la clase de asentamientos humanos con una tasa de cambio de 30.80%, lo que equivale a 8,480.25 ha. En este sentido, el crecimiento de la población ha impactado fuertemente en el aumento de la mancha urbana, el cual ha promovido la construcción de fraccionamientos no planeados en tierras ejidales y de pastizales abiertos.

Otro estudio realizado por Pizarro, P. (2018), los cambios de usos de suelo y los procesos de expansión urbana en la Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso, entre los años 1986 y 2016, haciendo uso de imágenes Landsat y clasificación supervisada. Determinando que la expansión urbana en la Provincia de Los Andes está en pleno desarrollo, con tasas de crecimiento urbano cada vez más altas, por lo tanto, tal como señala Romero et. al., (2007) y Henríquez et. al., (2006a; 2006b), el suelo urbano reemplazará progresivamente a las coberturas vegetales naturales o seminaturales, o como lo evidencia este análisis el uso de suelo urbano reemplazará también al uso de suelo agrícola. A nivel de paisaje el suelo agrícola disminuyó en más de 1.500 hectáreas y los mayores cambios fueron registrados en los últimos 10 años de análisis, entre los años 2006 y 2016, donde alrededor 1.000 de las 1.500 hectáreas fueron pérdidas y cedidas al suelo urbano. La cobertura matorral perdió alrededor de 1.400 hectáreas a lo largo del estudio, sin embargo, están fueron pérdidas progresivamente, y cedidas a suelo urbano, agrícola y sin vegetación.

CAPÍTULO II. ISLAS DE CALOR URBANO

INTRODUCCIÓN

La expansión urbana que experimentan las ciudades está asociada con numerosos problemas ambientales, uno de estos es la Isla de Calor Urbana (ICU). Ésta, está definida como la diferencia de temperatura entre el área urbana y sus alrededores. Asimismo, es el resultado de dos procesos diferentes pero asociados; el primero y más importante, la modificación en la cobertura del suelo como resultado del proceso de urbanización que transforma las superficies con materiales impermeables como el asfalto y el concreto. La segunda, hace referencia a las actividades en la ciudad principalmente el transporte y la industria debido a las emisiones térmicas que contribuyen al calentamiento urbano (Oke, 2009).

El fenómeno isla de calor depende de factores como la latitud, la altura sobre el nivel del mar, la topografía, el tamaño de la ciudad (Wienert y Kuttler, 2005) y la estabilidad atmosférica (Tomlinson, et. al., 2010).



Figura 7. Diagrama del efecto de la Isla de Calor Urbana (ICU). Fuente (Skopje, 2018).

El tema es cada día más importante debido a la tendencia mundial hacia la urbanización y el crecimiento disperso de las ciudades, así como porque la ICU tiene implicaciones directas en la calidad del aire, la salud pública, la gestión energética y en la planeación urbana.

El aumento de temperatura también acelera la velocidad de las reacciones químicas de los procesos de combustión produciendo gases contaminantes que pueden ser dañinos para el hombre, como el ozono O₃ (Streutker, 2003). Todos estos factores y procesos ambientales son importantes para el ordenamiento territorial.

Para determinar el tipo de isla de calor se emplean diferentes modelos y métodos de medición, en el caso de las superficiales se emplean métodos de medición directos o indirectos y modelos numéricos o de estimación empírica. En la mayoría de los casos utilizan métodos de medición indirectos para estimar la temperatura superficial, obtenida con el soporte de mapas térmicos e imágenes radiométricas (Tumini, 2010); Por otro lado, la isla de calor atmosférica se establece por la diferencia de temperatura del aire entre los espacios urbanos y rurales.

El empleo de las bandas térmicas obtenidas desde satélite ha permitido un avance sustancial en la evaluación de la temperatura en la superficie terrestre y ha favorecido la eficiencia en la utilización de datos puntuales como los obtenidos por las estaciones meteorológicas. La información de energía o radiancia emitida y reflejada por la superficie terrestre proporcionada por satélites tales como Landsat, ha sido una de las más utilizadas, (Chuvienco, 1996).

Para las personas que radican en las ciudades y han tenido un proceso de adaptación a la vida citadina resulta muchas veces imperceptible los cambios en su ambiente y clima en el que se encuentran, ya que ha sido de una manera gradual que se han ido modificando las temperaturas o las condiciones atmosféricas dentro de la urbe. Se ha estudiado que las temperaturas son más altas dentro de una ciudad y su alrededor que de zonas rurales aledañas donde el clima se autorregula con mayor rapidez y efectividad que en lugares con construcciones asfálticas y de concreto a diferencia de zonas con suelo natural y mayores áreas verdes.

Así, entre más extensa sea la ciudad mayor será el contraste térmico urbano/rural. A este proceso se le conoce como isla de calor urbana o UHI (Urban Heat Island) (Jáuregui, 2008).

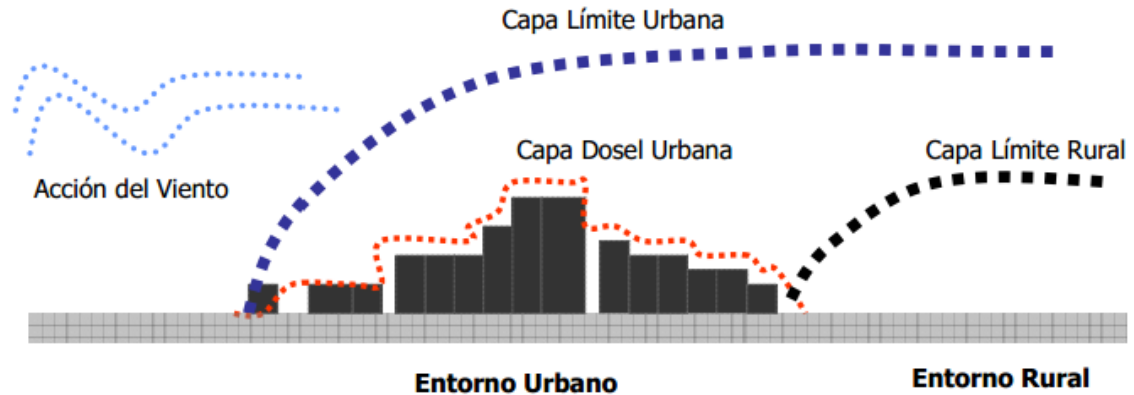


Figura 8. Capas atmosféricas urbanas. Fuente (Eixo Atlántico, 2008).

Tipos de islas de calor

Existen tres tipos de isla de calor urbana (Oke, 1976):

- Isla de calor de la capa de dosel
- Isla de calor de la capa límite
- Isla de calor de superficie

Los primeros dos tipos de isla de calor hacen referencia al calentamiento de la atmósfera urbana que se divide en dos capas, la capa de dosel urbana (urban canopy layer) y la capa límite urbana (urban boundary layer). La primera de estas capas hace alusión a la zona más cercana a las superficies y consiste en el aire atrapado entre las superficies urbanas como edificios y la capa límite que llega hasta 1,5 km sobre la superficie (Figura 9).

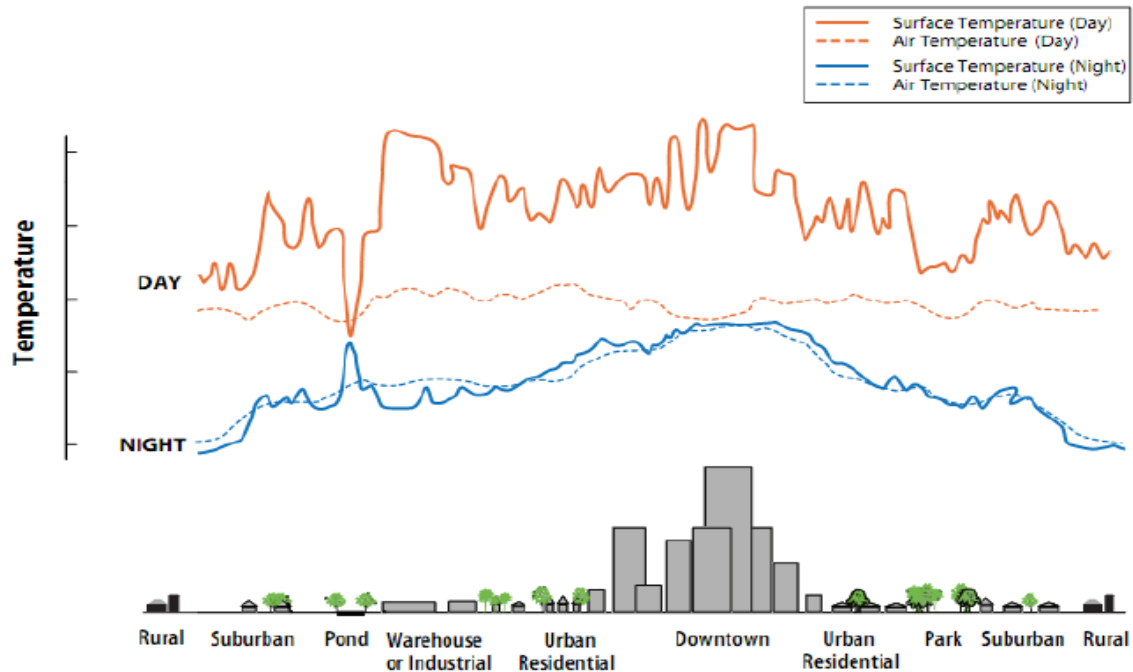


Figura 9. Temperaturas superficiales y atmosféricas durante el día y la noche dependiendo de las superficies que están presentes. Fuente (EPA, 2011).

La isla de calor atmosférica tiene una mayor intensidad desde el atardecer hasta temprano en la mañana, debido a la liberación de calor de la infraestructura urbana (EPA, 2011). La liberación de calor de las superficies duras ocasiona un incremento substancial en la temperatura del aire. Para tener una mayor claridad de como las islas de calor superficiales y atmosféricas se presentan en el día y en la noche, dependiendo del tipo de superficie, se presenta la figura 9. Las temperaturas que aparecen en la imagen no representan ningún valor ni están relacionadas con una medición de algún lugar en específico, son sólo un modelo representativo de la variación de la temperatura del aire y la superficie entre el día y la noche (EPA, 2011). Las líneas de color naranja representan la temperatura durante el día, mientras que las de color azul representan la noche. Por su parte, las líneas discontinuas representan la temperatura del aire mientras las continuas las de la superficie.

Para cuantificar el efecto isla de calor se comparan la temperatura promedio de la zona urbana y la temperatura promedio de las áreas rurales no urbanizadas

circundantes (Memon et. al., 2009). La diferencia entre estas temperaturas (también conocido como índice de isla de calor o UHI) cuantifica el fenómeno.

Características de las islas de calor urbana

Una vez que se ha originado el fenómeno de la isla de calor, éste queda caracterizado por tres parámetros que son: su intensidad, su forma o configuración y la localización del máximo térmico.

Intensidad

La intensidad o magnitud del fenómeno se obtiene mediante la diferencia máxima observada, en un momento determinado, entre la temperatura de un punto del centro de la ciudad y otro de su periferia (Serra, 2007). Esta dependerá, principalmente, de factores temporales (como la hora del día y la estación del año), de factores meteorológicos (como, por ejemplo, la velocidad del viento y la nubosidad) y de factores urbanos como el tamaño de la ciudad, la población, etc. (Serra, 2007). Para las islas de calor urbano superficial (ICU) la estacionalidad de la máxima intensidad de ICU depende de las condiciones propias de localización geográfica del emplazamiento de la ciudad y su entorno (Sarricolea, 2010).

Configuración espacial

Queda reflejada gráficamente mediante la disposición correspondiente de isothermas (Serra, 2007). La forma del fenómeno no depende tanto de las condiciones meteorológicas concretas, como de factores de tipo urbano (Serra, 2007). Así se puede llegar a afirmar que existen tantas formas distintas del fenómeno como morfologías distintas de ciudades (Serra, 2007). La configuración espacial que adquiere la ICUs no es estable y su variabilidad temporal puede ser muy importante, estando relacionados estos cambios con la dinámica atmosférica regional y por determinadas condiciones meteorológicas (Sarricolea 2010).

Localización del máximo térmico

El máximo térmico es la zona donde se concentra el calor. Este está determinado por factores urbanos, por ciertas condiciones meteorológicas, como puedan ser las eólicas, y por la estación del año (Serra, 2007). Los factores urbanos que pueden afectar a la localización del máximo térmico son los mismos que afectan a la configuración (Serra, 2007). En cuanto a las condiciones meteorológicas, según la situación sinóptica y la dirección del viento, la localización del máximo pudiera sufrir un desplazamiento a sotavento del flujo dominante (Serra, 2007).

Efectos de la isla de calor urbana

Las islas de calor afectan el entorno en el que habitamos y al ser humano directamente de varias formas. Algunos de estos impactos son positivos, especialmente en países con estaciones climáticas en donde la temporada de crecimiento de algunas plantas se alarga, pero la mayoría son negativos (EPA, 2011).

Incremento en el consumo energético: el incremento de temperatura en las oficinas, hogares e industrias produce un aumento en el consumo energético debido al uso de sistemas de aire acondicionado (EPA, 2011). Durante el verano, con el incremento de la temperatura, el consumo energético se incrementa considerablemente, aunado a que en muchos lugares del mundo la energía proviene de hidroeléctricas, las cuales, durante la época de sequía, no pueden garantizar la máxima generación teniéndose que utilizar otros medios como las plantas termoeléctricas contribuyendo a la contaminación.

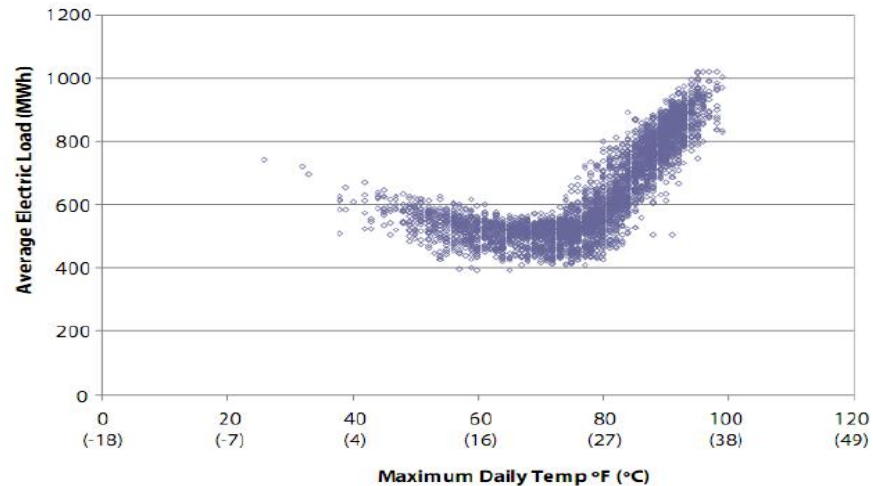


Figura 10. Incremento en el consumo energético con el incremento en la temperatura. Fuente (EPA, 2011).

La figura 10 es un ejemplo de la ciudad de Nueva Orleans, donde se observa que cuando la temperatura aumenta de 20 °C a 35 °C también lo hace el consumo promedio de energía.

Calidad del aire y Gases de Efecto Invernadero (GEI): Al incrementarse el consumo energético, dependiendo de qué tan “limpia” sea la energía de la ciudad, se incrementará la emisión de gases de efecto invernadero y la contaminación atmosférica por la emisión de compuestos como dióxido de azufre (SO₂), óxidos nitrosos (NO_x), material particulado (PM), dióxido de carbono (CO₂) y otros. Estos gases pueden contribuir al calentamiento global, ocasionar lluvia ácida y afectar la salud de las personas de manera directa. Adicionalmente, el incremento en las temperaturas aumenta la formación de ozono al nivel del suelo, el cual se genera cuando los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV's) reaccionan en la presencia de luz solar (Rosenfeld et. al., 1998).

Salud y confort: el incremento en las temperaturas, tanto de día como de noche, puede afectar la salud humana al ocasionar situaciones de estrés, dificultades respiratorias, calambres, cansancio, deshidratación, ataques de calor y hasta muertes. En 1995, en el medio oeste, murieron más de 1.000 personas debido a una oleada de calor (EPA, 2011). En el verano de 2003 una anomalía meteorológica proporcionó las condiciones necesarias para experimentar las

temperaturas más altas y el ambiente más seco que se haya visto desde 1540 en Europa (World Meteorological Organization, 2010). Este evento fue tan intenso que ocasionó la muerte de por lo menos 70.000 personas (Robine, et. al. 2008) y otra gran cantidad de impactos como la pérdida de sembrados evaluados en US\$12,3 billones, US\$1,6 billones en daños ocasionados por incendios forestales, el incremento del precio de la energía a más de US\$ 130 por MWh y el derretimiento de gran parte de los glaciares en los Alpes (Schar y Jendritzky, 2004).

Calidad del agua: las islas de calor contribuyen a la polución térmica del agua, lo que afecta todos los aspectos de la vida acuática, afectando especialmente el metabolismo y la reproducción de las especies acuáticas, en caso de que esta agua llegue a un río, un lago, un humedal o el mar (EPA, 2011).

Estimación de la temperatura superficial

Debido a que los seres humanos no podemos observar la parte del espectro electromagnético que transfiere calor (banda infrarroja), se han creado sofisticados modelos numéricos y físicos, tales como los balances de energía, modelos de laboratorio, simulaciones tridimensionales, modelos Gaussianos, análisis estadísticos y otras simulaciones numéricas para lograr estimar la temperatura superficial (Weng, 2008).

El segmento infrarrojo de la luz tiene una longitud entre los 0.7 a 100 μm , pero para la percepción remota se utilizan tres segmentos de interés que se encuentran en este rango: cercana a la infrarroja (0.7-1.3 μm), infrarroja media (1.3-3.0 μm) e infrarroja lejana (7.0-15 μm), siendo este último segmento el utilizado para detectar la temperatura, por lo que también se le conoce como banda térmica infrarroja (NASA, 2007).

El espectro electromagnético de la luz se presenta en la figura 11. En la imagen se puede ver el segmento visible de la luz en una gama de colores que se encuentran entre los 400 y 700 nm, mientras que la banda infrarroja (infrared) varía aproximadamente entre los 10^{-6} y 10^{-4} metros (1 y 100 μm). Por otro lado, la banda térmica infrarroja, llamada también banda infrarroja larga, se encuentra entre los 8 y 15 μm (NASA, 2007).

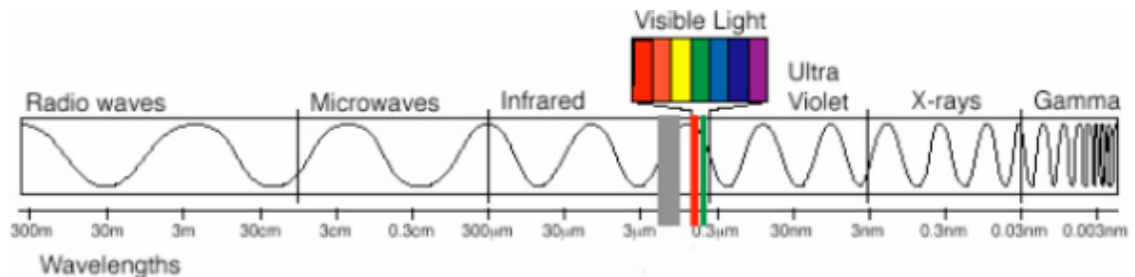


Figura 11. Espectro electromagnético. Fuente (Earth Science Enterprise).

MATERIALES Y MÉTODOS

El procesamiento de imágenes realizado se basa en la propuesta implementada por Sobrino (2001), en el que a través del método de los umbrales del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) se obtiene una estimación de la emisividad y posteriormente un cálculo de la temperatura de la superficie terrestre. El objetivo de esta propuesta de investigación es el diseño de una metodología capaz de identificar áreas con potencial geotérmico mediante información de imágenes Landsat-5 TM y Landsat-8 OLI. Las imágenes satelitales requieren un preprocesamiento especial para la corrección de los datos presentados por diferentes factores tales como variaciones de iluminación en la escena, condiciones atmosféricas y distorsiones radiométricas provocados por el sensor. Dicho procesamiento varía en función del tipo de sensor y los objetivos de investigación.

Desde 2009 se distribuyen gratuitamente imágenes de archivo y actuales de los satélites Landsat-5 TM (Thematic Mapper), Landsat-7 ETM + y Landsat-8 OLI. Aunque resulta difícil encontrar imágenes con cielos despejados y la mayor parte

de las disponibles presentan un considerable porcentaje de nubosidad, algunas de ellas permiten una interpretación confiable de los datos de temperatura.

De acuerdo con (Jones y Vaughan, 2010) la TST derivada de satélites se define como la temperatura de radiación de la superficie observada por los sensores de los satélites. La superficie terrestre se define como la parte superior del follaje en áreas vegetadas o la superficie del suelo en zonas sin vegetación (Wan, 2008). La TST puede ser calculada a partir de las bandas térmicas obtenidas por los sensores TIRS de serie Landsat y MODIS (Pérez y García, 2002; Pérez et al., 2003; Mazari, 2005; Olave et. al., 2008; Cogliati, 2011), para ello primeramente los valores de ND contenidos en los píxeles deben ser convertidos radiancia espectral y seguidamente a temperatura de brillo en grados Kelvin (k) usando para ello la constante térmica suministrada en el archivo de metadatos y aplicándose una corrección por emisividad de la superficie terrestre (Ariza, 2013; USGS, 2013).

Los de datos de Landsat utilizados en el presente trabajo son los del producto L1T, el cual se encuentra radiométrica y geoméricamente corregidos, estos están disponibles en formato GeoTIFF. Consisten en productos de datos L1R con correcciones geométricas sistemáticas aplicadas, utilizando para ello puntos de control terrestre (GCP) o información de posición integrada a bordo para entregar una imagen registrada a una proyección cartográfica UTM, referenciada al elipsoide WGS84.

Selección de los datos de temperatura atmosférica

De acuerdo con el método que se expondrá en el presente estudio, fue necesario recopilar parámetros meteorológicos de dos estaciones disponibles para el área de estudio, los cuales se emplearon como datos referencia para el cálculo de temperatura máxima del aire para identificar tendencias en series de tiempo de datos meteorológicos, obtenidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

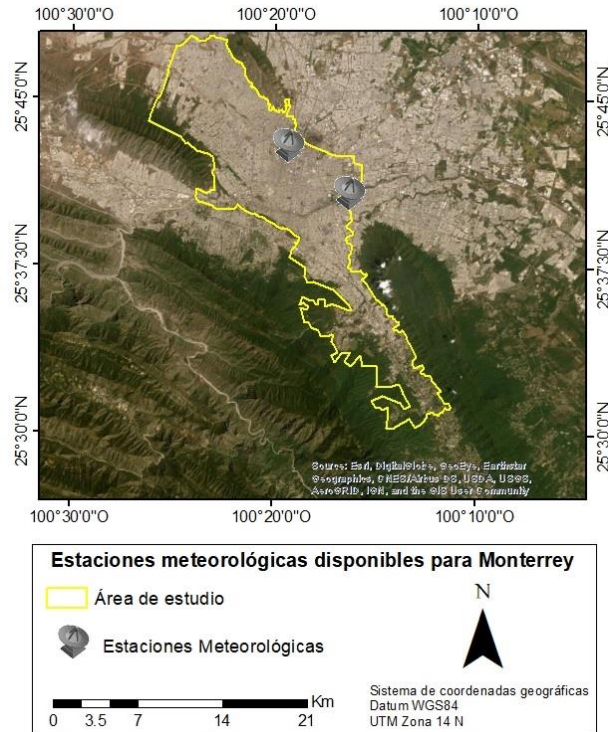


Figura 12. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas disponibles para el área de estudio. Elaboración propia.

Estación	Latitud	Longitud	Ubicación
Topo Chico	25.718056° N	-100.322500° W	Monterrey, N.L.
Monterrey	25.682500° N	-100.266944° W	Monterrey, N.L.

Tabla 9. Coordenadas de las estaciones meteorológicas para el análisis de islas de calor disponibles para el área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

SELECCIÓN DE LA INFORMACIÓN ESPACIAL

Código	Satélite	Fecha
LM50280421986112AAA03	Landsat 5	22/04/1986
LT50280421991174AAA02	Landsat 5	23/06/1991
LT50280421994182XXX02	Landsat 5	01/07/1994
LT50280421998193XXX01	Landsat 5	12/07/1998
LT50280422003159LGS01	Landsat 5	08/06/2003
LT50280422008157EDC00	Landsat 5	05/06/2008
LC80280422013154LGN01	Landsat 8	03/06/2013
LC80280422018200LGN00	Landsat 8	19/07/2018

Tabla 10. Imágenes Landsat identificadas para el área de estudio. Elaboración propia.

En la figura 13, se muestra procedimiento general para obtener valores de TST a partir de imágenes de Landsat. Este procedimiento comprende los procesos de selección de la escena, corrección atmosférica de las bandas, obtención de la temperatura de brillo, obtención del NDVI y de la TST.

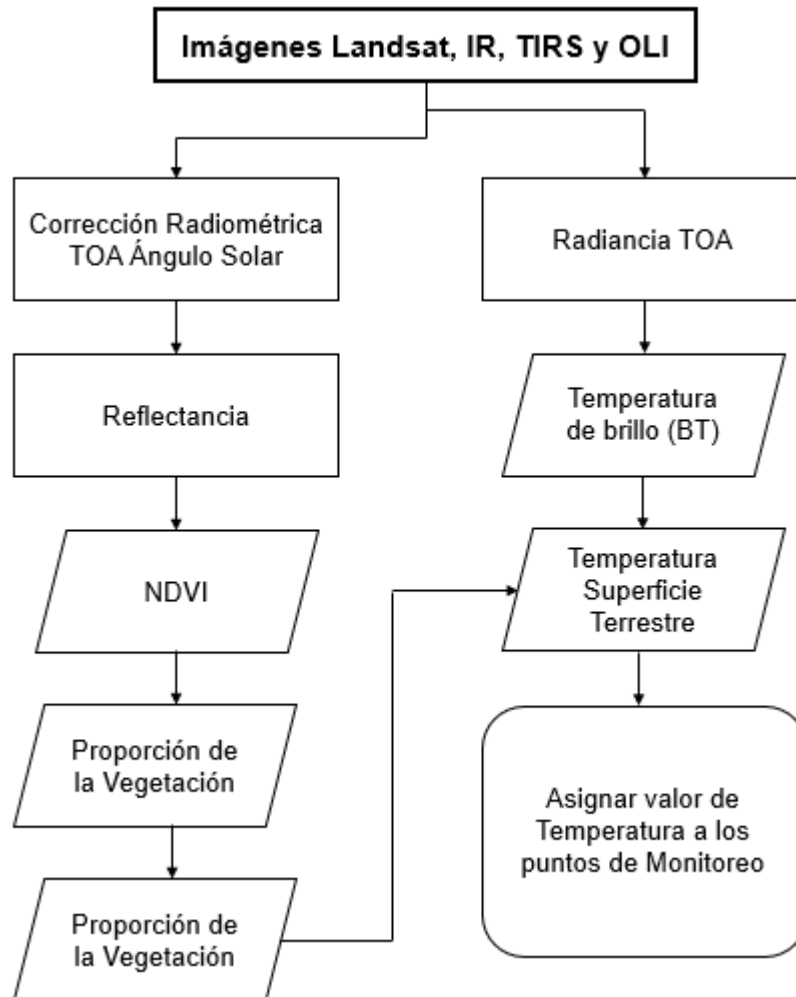


Figura 13. Procedimiento metodológico general para obtener valores de TS con imágenes Landsat. Elaboración propia.

Procesamiento de las imágenes satelitales

La corrección atmosférica se realizó por medio del módulo SCP (*Semi-Automatic Classification Plugin*) del QGIS ver. 3.2.3 aplicando la corrección atmosférica de las bandas correspondientes a utilizar de manera automática mediante el método de corrección atmosférica DOS.

El Plugin SCP realiza una clasificación semiautomática de imágenes satelitales, así como brinda recursos para la libre descarga de imágenes, procesamiento, post procesamiento de clasificaciones; y cálculos ráster (Congedo, 2018).

Una vez corregidas las imágenes del Landsat 5 y 8 se delimitó el área de estudio, dado con base en la zonificación secundaria del Plan de Desarrollo Urbano del Municipio de Monterrey. Todas las imágenes se recortaron utilizando la herramienta “extracción por máscara”, Durante la extracción de las imágenes se definió una resolución espacial de 30 m para todas las bandas, de modo que se facilitaran los cálculos y las correlaciones entre capas de diferente resolución espacial más adelante. La técnica de re-muestreo utilizada para modificar la resolución espacial de las bandas fue la del vecino más cercano, la cual no modifica el valor de las celdas.



Figura 14. Imagen térmica ajustada al área de estudio, Landsat 8. Elaboración propia.

La temperatura superficial (TST) se determinó mediante el cálculo de la temperatura de brillo en el tope de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés) y la emisividad. La temperatura de brillo o temperatura radiante se estimó utilizando la ecuación 1, indicada por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos de América (NASA 2007), la cual se aplicó a las bandas térmicas mostradas en la tabla 11.

Satélite	Banda	Ancho de banda (μm)	Resolución (m)
Landsat 5	6 - Térmica	10.40-12.50	30
Landsat 8	10 – Térmica infrarroja (TIRS 1)	10.60-11.19	100 (30)*

Tabla 11. Bandas térmicas utilizadas para estimar la TS. Fuente (USGS, 2017).

*Las imágenes se entregan remuestreadas con 30 m de resolución.

$$T_r = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)}$$

Ecuación 1. Cálculo para estimar la temperatura de brillo.



Figura 15. Temperatura de brillo para el área de estudio, Landsat 8. Elaboración propia.

donde T_r es la temperatura radiante en grados Kelvin; $K1$ la constante de calibración 1; $K2$ la constante de calibración 2 (tabla 12), y $L\lambda$ la irradiación espectral en la apertura del sensor en $\text{watts}/(\text{m}^2 \times \text{ster} \times \mu\text{m})$.

Satélite	K1 (watts/[m ² × ster × μm])	K2 (watts/[m ² × ster × μm])
Landsat 5	607.76	1260.56
Landsat 8	774.88	1321.07

Tabla 12. Constantes de calibración. Fuente (NASA, 2007; USGS, 2016).

Por su parte, NDVI se calculó con la ecuación 2 (Rouse et. al., 1974):

$$NDVI = \left[\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right]$$

Ecuación 2. Cálculo para estimar el NDVI.



Figura 16. Cálculo de NDVI para el área de estudio, Landsat 8. Elaboración propia.

donde *NIR* es la banda cercana al infrarrojo, *RED* la banda roja. NDVI informa sobre la cantidad y la calidad de la vegetación utilizando la reflexión de la clorofila en la región espectral del infrarrojo cercano (700-1100 nm). NDVI produce valores entre -1 y 1 para cada pixel. Valores cercanos a 1 (0.8 a 0.9) indican la mayor densidad posible de hojas verdes, en tanto que los valores próximos a -1 significan ausencia de vegetación (NASA 2012).

La emisividad se estimó a partir del índice NDVI utilizando un método de umbrales (Sobrino et. al. 1999), como se explica a continuación:

- a) $NDVI < 0.2$ se consideró como suelo sin vegetación en zona urbana; a estos píxeles se les asignó un valor de emisividad de 0.92 (Sobrino et al. 2012).
- b) $NDVI > 0.5$ se consideró como superficie cubierta totalmente con vegetación; estos píxeles fueron calificados con un valor de 0.99 (Sobrino et. al. 2004).
- c) $0.2 \leq NDVI \leq 0.5$ se supuso correspondiente a píxeles con cobertura mixta; la emisividad de estas zonas se calculó mediante la ecuación 3 (Sobrino et. al. 2004).

$$\varepsilon = 0.004 * P_v + 0.986$$

Ecuación 3. Cálculo para estimar la emisividad.

donde ε es la emisividad en píxeles con cobertura mixta y P_v la proporción de vegetación, la cual fue estimada mediante la ecuación 4 (Carlson y Ripley, 1997):

$$P_v = \left[\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right]$$

Ecuación 4. Cálculo para estimar la proporción de vegetación.

donde $NDVI_{min} = 0.2$ y $NDVI_{max} = 0.5$.



Figura 17. Cálculo de proporción de vegetación para el área de estudio, Landsat 8. Elaboración propia.

Finalmente se usó la fórmula de Artis y Carnahan (1982) para convertir la temperatura de brillo a temperatura de superficie (ecuación 5).

$$T_s = \left[\frac{T_r}{1 + \left(\frac{\lambda T_r}{\rho}\right) \ln \varepsilon} \right]$$

Ecuación 5. Cálculo para estimar la temperatura superficial.

donde T_s es la temperatura superficial en grados Kelvin; T_r es la temperatura radiante en grados Kelvin; λ el valor medio del ancho de banda (11.5 μm para los sensores TM y ETM+ y 10.8 μm para el sensor OLI/TIRS); $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$ con base en las constantes de Boltzmann, Planck y la velocidad de la luz, y ε es la emisividad. Finalmente, la temperatura de superficie se transformó a grados centígrados utilizando la relación $C = K - 273.15$.

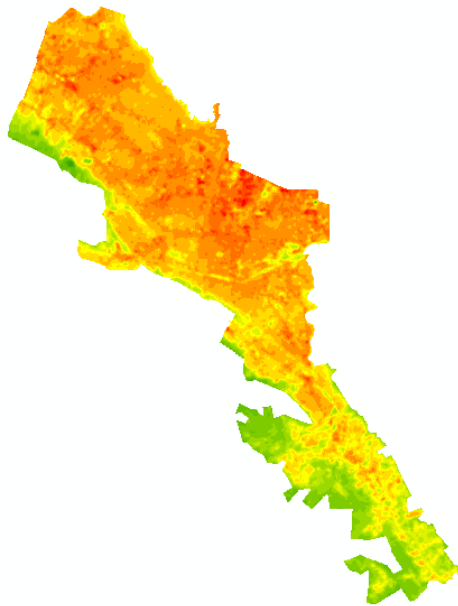


Figura 18. Cálculo de temperatura superficial, Landsat 8. Elaboración propia.

RESULTADOS

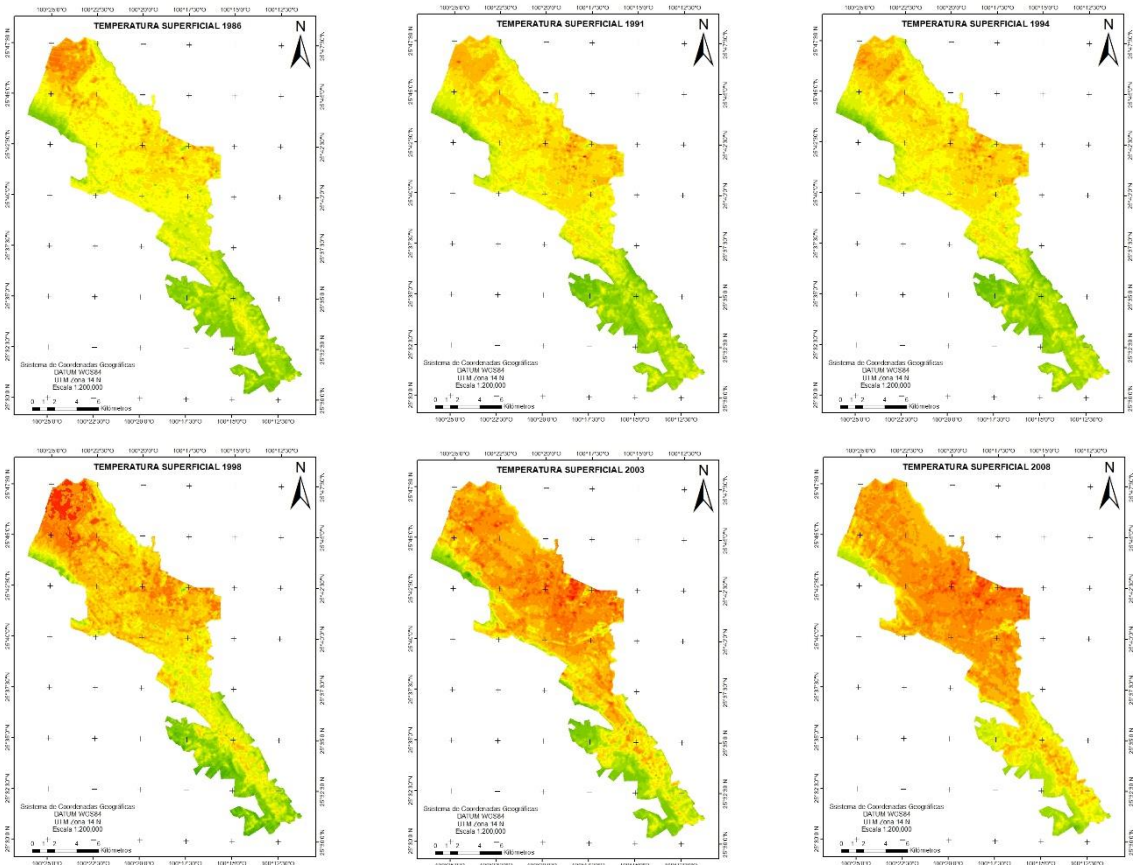
El fenómeno de la isla de calor en Monterrey, como se plantea en la literatura, tiene relación directa con el crecimiento de la ciudad. De acuerdo con Flores (2009), a partir de 1940 se inició en la ciudad de Monterrey la concentración de población y de actividades económicas que la convirtieron en una de las principales ciudades industriales y zonas metropolitanas del país. El dinamismo

industrial que caracteriza a la región y el considerable crecimiento económico que experimentó desde esa época hicieron que la ciudad creciera de manera muy importante a través de los años.

De acuerdo con la tabla 13 se presentan los valores de temperatura superficial terrestre obtenidos para las imágenes satelitales seleccionadas entre los años 1986 y 2018.

Temperatura superficial								
Año	1986	1991	1994	1998	2003	2008	2013	2018
Mes	Abr	Jun	Jul	Jul	Jun	Jun	Jun	Jul
T. Máx.	31.41	35.72	37.28	38.09	38.92	41.62	43.3	45.08

Tabla 13. Temperaturas superficiales de las imágenes satelitales entre los años 1986 y 2018 del área de estudio. Elaboración propia.



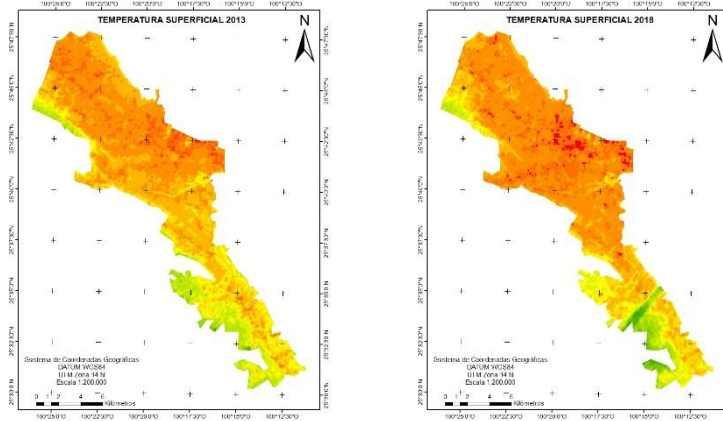


Figura 19. Temperatura superficial de los años 1986 al 2018. Elaboración propia.

Caracterización de islas de calor en cada imagen

Imagen del 22/04/1986

Se registran temperaturas en el rango de 26.89°C mínima a 32.41°C máxima distribuidas de manera simultánea en toda el área de estudio. Se detectaron pequeñas islas de calor con temperaturas de 31.73°C, 32.09°C y 32.41°C en el centro del área de estudio, así como en la parte norte, en contraste con la zona sur, presentando las menores temperaturas oscilando entre los 26.89°C, 27.23 y 27.42°C.

Imagen del 23/06/1991

El registro de temperaturas a través de estas imágenes es de 27.12°C mínima a 35.72°C máxima, distribuidas simultáneamente por toda el área de estudio. Se detectaron nuevamente pequeñas y medianas islas de calor, oscilando entre 32.74°C, 33.65°C y 35.72°C en el centro y norte del área de estudio, y muy poca presencia de estas temperaturas en el sur, que nuevamente las temperaturas más bajas para esta zona van desde los 27.12°C, 28.30°C y 28.92°C.

Imagen del 01/07/1994

El registro de temperatura para estas imágenes es de 28.24°C mínima a 37.28°C máxima, distribuidas simultáneamente por el área de estudio. Como la imagen anterior, se detectaron pequeñas y medianas islas de calor, con temperaturas

entre los 35.81°C, 36.40°C y 36.89°C en la zona centro y sur del área de estudio. Las temperaturas más bajas oscilan entre los 28.24°C, 29.01°C y 29.73°C respectivamente.

Imagen del 12/07/1998

Se registraron temperaturas entre los 29.16°C mínima y 38.09°C máxima nuevamente distribuidas por el área de estudio, presentando mayor cantidad de islas de calor en toda la parte centro, norte y mitad de la zona sur del área de estudio, temperaturas oscilando entre los 37.20°C, 37.88°C y 38.09°C. Finalmente presentándose las temperaturas más bajas en las orillas norte y sur del área de estudio de 29.16°C, 29.72°C y 30.24°C.

Imagen del 08/06/2003

Las temperaturas registradas para esta imagen son de 30.36°C mínima y 38.92°C máxima donde no solo se presenta mayor cantidad de islas de calor, sino que las temperaturas más altas ya se distribuyen uniformemente por la zona centro y norte del área de estudio, con temperaturas de 38.21°C, 38.70°C y 38.92°C, sin embargo en los extremos de la zona sur y norte se presentan las temperaturas más bajas 30.36°C, 30.85°C y 31.20°C

Imagen del 05/06/2008

Para este año se registran temperaturas en el rango de 31.3°C mínima y 41.62°C máxima, donde se distribuyen uniformemente por el área de estudio, presentando islas de calor en las partes centro, norte y sur con oscilaciones entre los 39.85°C, 40.56°C y 41.62°C. Las temperaturas bajas, ya están pasando a ser medias temperaturas ya que superan los treinta grados con datos para los extremos del área de estudio de 31.30°C, 31.72°C y 32.15°C.

Imagen del 03/06/2013

Se registraron temperaturas entre los 31.90°C mínima y 43.3°C máxima distribuidas puntualmente por el área de estudio. Las islas de calor se encuentran presentes en la mayoría de la superficie de la zona centro y norte con

temperaturas de 42.18°C, 42.87°C y 43.32°C. Las temperaturas más bajas, solo se encuentran en los extremos de la zona sur oscilando entre los 31.90°C, 32.57°C y 33.16°C.

Imagen del 19/07/2018

Finalmente, tenemos el análisis de temperatura con 32.70°C mínima y 45.08°C máxima. La distribución de islas de calor como en un principio, se encuentra presente en la parte centro, norte y gran parte del sur, sin embargo, ahora se expande en gran medida por casi toda el área de estudio con temperaturas de 43.76°C, 44.62°C y 45.08°C, y terminado con las temperaturas medias para los extremos de 32.70°C, 33.20°C y 33.61°C.

Utilizando la prueba no paramétrica se analizaron los datos de las temperaturas superficiales obtenidas a través de los cálculos con las imágenes satelitales, detectando tendencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) durante el periodo 1986 y 2018. Los resultados principales muestran un aumento de las temperaturas máximas en los meses de verano, presentando un nivel de confianza del 99,99%.

Finalmente, de manera visual las imágenes de 1986 y 2018 presentan un aumento en la presencia de intensidad de calor, principalmente en la zona centro y norte del área de estudio.

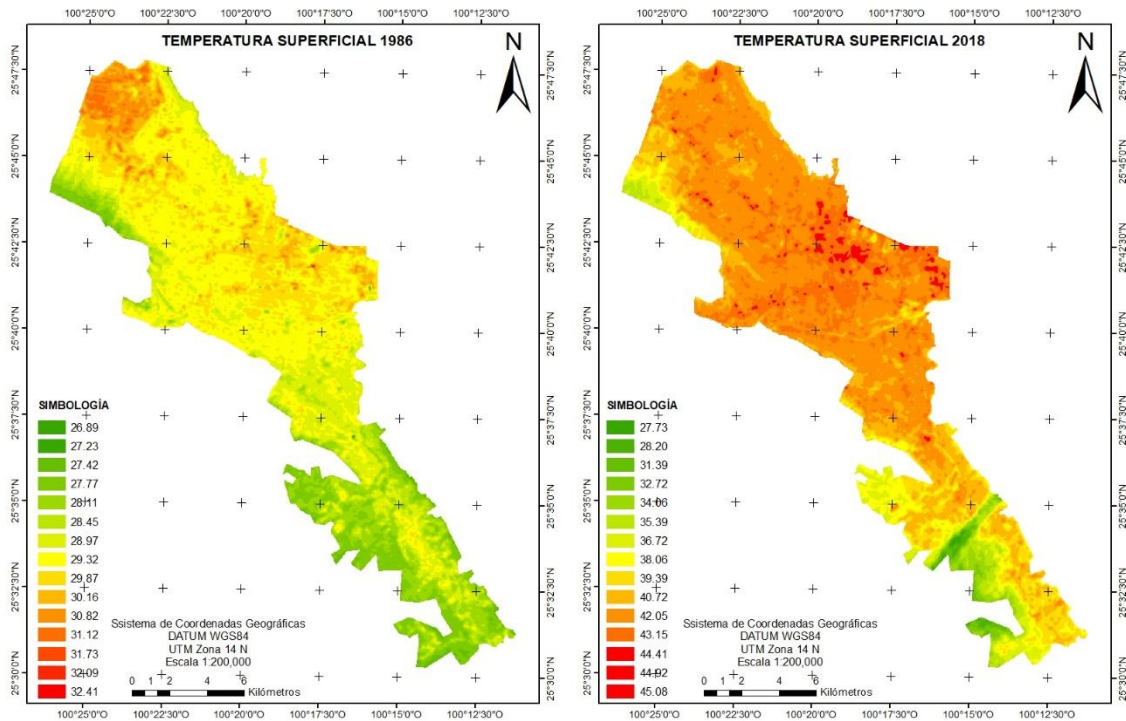


Figura 20. Temperatura superficial de los años 1986 y 2018 del área de estudio. Elaboración propia.

Análisis de las estaciones meteorológicas

De acuerdo con los datos recopilados de las estaciones meteorológicas de Monterrey y Topo chico, su análisis de temperatura del aire se realizó la prueba estadística de Mann-Kendall, resultando sin tendencias significativas ($p > 0.05$) en relación con los años 1986 y 2018, los resultados sugieren que no ha sucedido una modificación climática en lo que respecta a los datos registrados de temperatura del aire. Para estas temperaturas, se observan variaciones también en meses dispersos del año, a parte de los meses de verano.

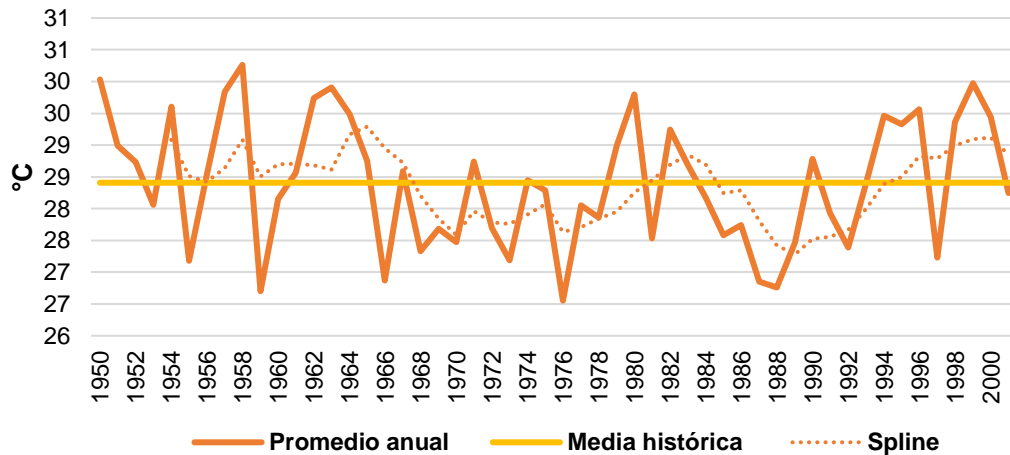


Gráfico 3. Comportamiento de la temperatura máxima anual, media histórica y spline de la estación meteorológica Monterrey.

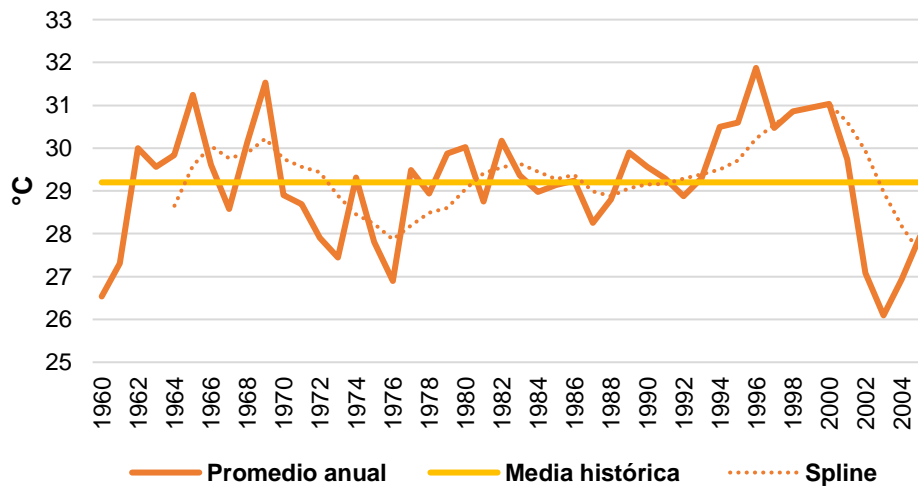


Gráfico 4. Comportamiento de la temperatura máxima anual, media histórica y spline de la estación meteorológica Topo Chico.

Interpretación de correlación entre temperatura superficial y temperatura del aire

Las temperaturas obtenidas por medio del análisis de imágenes satelitales, en contraste con las temperaturas del aire a través de las dos estaciones meteorológicas, fue necesario determinar la normalidad de los datos para utilizar el Coeficiente de Correlación de Pearson. Se utilizó la tabla elaborada por Suárez, (2011) para realizar las interpretaciones correctas.

Valor	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0.9 a -0.99	Correlación negativa muy alta
-0.7 a -0.89	Correlación negativa alta
-0.4 a -0.69	Correlación negativa moderada
-0.2 a -0.39	Correlación negativa baja
-0.01 a -0.19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0.01 a 0.19	Correlación positiva muy baja
0.2 a 0.39	Correlación positiva baja
0.4 a 0.69	Correlación positiva moderada
0.7 a 0.89	Correlación positiva alta
0.9 a 0.99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Tabla 14. Interpretación de valores del Coeficiente de Pearson. Fuente: Suárez, M., (2011)

Se detallan los resultados de las correlaciones en la tabla 15.

Fecha	Estación Meteorológica	Valor Pearson	Valor p	Interpretación
22/04/1986	Monterrey	0.53	0.6429	No existe correlación
	Topo chico			
23/06/1991	Monterrey	0.29	0.5042	No existe correlación
	Topo chico			
01/07/1994	Monterrey	0.31	0.6357	No existe correlación
	Topo chico			
12/07/1998	Monterrey	0.34	0.5982	No existe correlación
	Topo chico			
08/06/2003	Monterrey	-0.16	0.5599	No existe correlación
	Topo chico			
05/06/2008	Monterrey	0.18	0.7234	No existe correlación
	Topo chico			
03/06/2013	Monterrey	0.22	0.4321	No existe correlación
	Topo chico			
19/07/2018	Monterrey	0.40	0.6329	No existe correlación
	Topo chico			

Tabla 15. Valores de correlaciones entre temperatura superficial y temperatura del aire de las estaciones meteorológicas. Elaboración propia.

Dentro de los resultados, el valor menor es de -0.16 en el mes de abril y el valor mayor para el mes de junio de -0.16. De acuerdo con la literatura, al obtener *valores p* mayores a 0.05 de significancia, se determina que no existe correlación entre estas dos variables.

La temperatura superficial terrestre está muy relacionada a las características del suelo, tal como cobertura, humedad, radiación solar; así como a la topografía (Kerchove et. al., 2013). Por otro lado, la temperatura del aire depende de factores meteorológicos como la humedad del aire, presión atmosférica y cambios de radiancia en ondas largas.

Para este estudio se demostró que no existe correlación entre ambas variables, concordando con quien expresa que la temperatura superficial terrestre no puede sustituir a la temperatura del aire, por lo que su correlación no es acertada. Por lo tanto, es necesario profundizar este análisis con datos mensuales de una serie temporal más larga e integrando más estaciones meteorológicas.

DISCUSIÓN

Se determinó que no existe correlación entre la temperatura superficial terrestre y temperatura del aire de las estaciones meteorológicas sin embargo dentro de los resultados, los valores fueron bajos entre ellos para las fechas y estaciones que llegan a coincidir con los resultados de otros estudios como el de Tsou et. al., (2017) donde se habla de una comparación entre los valores de temperatura superficial terrestre y la temperatura media del aire en Shenzhen y Hong Kong, China.

Las temperaturas superficiales máximas alcanzadas de 45°C se asemejan con el estudio por Baño et. al., (2017), dónde analizan las islas de calor urbano en el Distrito Metropolitano de Quito.

Respecto a los bajos valores de correlación entre la temperatura superficial y la temperatura del aire, los resultados muestran semejanza con el estudio de Soberón, V., (2014) donde se obtienen valores débiles para su relación, lo que demuestra la dependencia de la temperatura superficial no únicamente en la temperatura del aire, sino también en otros factores externos no contemplados en este estudio.

La disminución de vegetación urbana es notoria en los últimos años, en el presente estudio se demostró una disminución de cobertura verde urbana de un

22% en promedio desde el año 1986 hasta el 2018, en el estudio de Koerner y Klopatek, (2002), demuestran que los procesos de urbanización se encuentran directamente asociados a los cambios en el suelo, pero más notoriamente tienen un impacto negativo en el clima local, al reducir la humedad y aumentar la temperatura media del ambiente. Al disminuir la vegetación en áreas urbanas se modifica el balance entre respiración y secuestro por fotosíntesis. Más aún, existen indicios que las variaciones de temperatura y humedad influyen en los flujos netos de CO₂.

Otro estudio por Villanueva et. al. (2012), determinan el potencial de mitigación de la Isla de Calor Urbana para un sector de la ciudad de Mexicali (Baja California, México) a través del modelado de la estructura urbana, expresado en usos y cobertura del suelo, así como en edificaciones y en las posibilidades de aplicar, estrategias de mitigación, donde destacan el escenario tendencial de cambio climático local muestra un incremento en la temperatura promedio máxima de verano hasta de 52.8 °C para el año 2080, Camargo y García (2012), este aumento intensificará aún más la ICU, como se demostró en este estudio, la tendencia positiva al aumento, se sugiere considerar estrategias de mitigación al elaborar políticas de desarrollo urbano y actualizar las diferentes normativas que inciden en los procesos de construcción de la ciudad, como parte de las acciones necesarias ante las medidas de control, mitigación y adaptación al cambio climático.

Respecto a lo anterior, Oke (1982), reafirmaba sobre cómo la vegetación es uno de los factores más importantes respecto a su relación con el comportamiento de la temperatura en la ciudad, y más específicamente, que actúa disminuyéndola, cumpliendo un rol fundamental en el control de las islas de calor urbano. Este estudio comprueba que la vegetación en el municipio de Monterrey, es capaz de disminuir hasta en 1°C la temperatura superficial, pudiendo encontrar diferencias notorias con las áreas urbanas adyacentes.

CONCLUSIONES

La continua expansión urbana del municipio de Monterrey, principalmente hacia las zonas norte y sur, han provocado la sustitución de amplia cobertura vegetal por edificaciones y viviendas dando lugar al aumento de temperaturas superficiales, mismo que se comprobó en el estudio al estimar las temperaturas menores en las zonas con predominancia vegetal.

La presente investigación, además de definir cuantitativa y cualitativamente la cobertura del municipio de Monterrey, resalta la influencia del impacto que tiene la sustitución de estas áreas con el aumento de temperatura, manifestándose de manera muy acentuada entre los años 2013 y 2018, demostrando así que no existe una distribución adecuada entre la infraestructura urbana y las áreas de vegetación urbana, así como los materiales de construcción posiblemente no presentan las condiciones apropiadas para disminuir las temperaturas adquiridas por las superficies. Mediante la distribución espacial e identificación de la temperatura superficial se evidencia la presencia de islas de calor principalmente en la zona centro del municipio, misma que en análisis multitemporal a través de los años ha carecido de áreas verdes, de igual forma la zona norte del municipio, además de carecer de estas áreas verdes, a través de los años, la infraestructura urbana ha tenido un fuerte impacto con relación a la temperatura.

En relación con el análisis de correlación entre la temperatura superficial y la temperatura del aire obtenida por las estaciones meteorológicas, estas variables no muestran correlación estadística determinando así para este estudio que no existe correlación entre ambas, y la temperatura del aire no puede sustituir a la temperatura superficial.

De acuerdo con lo anterior, sería importante crear o reforzar modelos de planeación ambiental con soluciones integrales hacia un desarrollo urbano sustentable, así como disciplinar el tema de islas de calor para su reducción y mitigación de este mediante proyectos de reforestación como el empleo de métodos o materiales de construcción para lograr este efecto.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, S. (2010). Revisión de los modelos CITYgreen, como herramientas para la cuantificación de los servicios ecosistémicos prestados por el arbolado urbano de Bogotá.
- Akbari, H., Konopacki, S. (2005). Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*, (33).
- Alanís F., Cervantes B. (1995). Atlas de Monterrey, Gustavo Garza Villarreal, Coordinador: Gobierno del Estado de Nuevo León, Universidad Autónoma de Nuevo León, Instituto de Estudios Urbanos de Nuevo León, El Colegio de México. Pág. 44-49.
- Ariza, A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Pág. 44.
- Artis D., Carnahan W. (1982). Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sens. Environ.* 12(4): Pág. 313-329.
- Baño, D. (2017). Estudio de la Isla de Calor Urbano del Distrito Metropolitano de Quito mediante técnicas de Percepción Remota.
- Berkowitz, A., Nilon, C., Hollweg, K. (2003). The importance of understanding urban ecosystems: Themes.
- Bernatzky, A. (1982). The contribution of trees and green spaces to a town climate. *Energy Build.*
- Breheny, M. (1996). Centrist, Decentrists and Compromisers in the Compact City. E & FN Spon, London.
- Buendía, E., Terrazas, S., Vargas, E. (2002) Aplicación de imágenes de satélite en la cartografía de uso de suelo y vegetación en una región del oriente del valle de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* (8): Pág. 13-19.

- Camargo, A., Garcia, R. (2012). Evaluación de dos Modelos de Reducción de Escala en la Generación de Escenarios de Cambio Climático en el Valle de Mexicali en México. (23)3: Pág. 11-20.
- Capel, H. (1971). Las Dificultades del Analisis Interdisciplinar del Crecimiento Urbano. Revista Geografica., Pág. 124.
- Capelli, A., Piccolo, C., Hernández G. J., Navarrete, G. (2001). La isla de calor estival en Temuco, Chile. Papeles de Geografía. (33): Pág. 49- 60.
- Carlson T., Ripley D. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. Remote Sens. Environ. 62(3): Pág.241-252.
- Cerón, I., Sanyé, E., Solà, J., Montero, J., Ponce, C., Rieradevall, J. (2013). Towards a green sustainable strategy for social neighbourhoods in Latin America: Case from social housing in Merida, Yucatan, Mexico. Habitat International, Elsevier, Cambridge. (38): Pág. 47-56.
- Chuvieco, E. (1985) Aportaciones de la teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo. Anales de Geografía de la Universidad Complutense. (5): Pág. 29-48.
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial (3ra ed.). Madrid: RIALP. S.A., Alacalá.
- Chuvieco, E. (2002) Teledetección Ambiental. Ediciones Ariel. Pág. 586
- Cogliati, M. (2011). Temperatura de superficie en el Valle del Río Neuquén Utilizando Imágenes LANDSAT. Boletín geográfico. (33): Pág. 11-26.
- Colding, J., Lundberg, J., Folke, C. (2006). Incorporating green-area user groups in urban ecosystem management. Ambio: Journal of the Human Environment, Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm. 35(5): Pág. 237-244.
- Congedo, L. (2018). Semi-Automatic Classification Plugin Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.

- Correa E., Flores, S. y Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. Asades. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. 7(2): Pág. 25-31.
- Cuadrat J., Saz M., Serrano V. (2005). Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La Isla de Calor y sus factores condicionantes. Boletín de la A.G.E. (40): Pág. 311-327.
- Czech, B., Krausman, P. (1997). Distribution and causation of species endangerment in the United States. Science. 277(5329): Pág. 1116–1117.
- Czech, B., Krausman, P., Devers, P. (2000). Economic associations among causes of species endangerment in the United States. BioScience. 50(7): Pág. 593–601.
- Davis, J., Henderson, V. (2003). Evidence on the political economy of the urbanization process. Journal of Urban Economics, No. 53, Elsevier.
- Dessi, V. (2002). Comparison between thermal comfort simulation and users behaviour in an open space. AUAE Architectural and Urban Ambient Environment, Nantes.
- Dirección de Ecología de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología del Municipio de Monterrey. Environmental Systems Research Institute.
- EPA. (2011). Urban Heat Island. Washington D.C.
- Flores, O. (2009). Monterrey origen y destino: Monterrey, ciudad internacional 1910-1980. Monterrey, México: Municipio de Monterrey.
- Franco R., Rodríguez J. M. (2005). Análisis multitemporal satelital de los bosques del Carare -Opon, mediante imágenes landsat de 1991 y 2002. Colombia Forestal. (9)(18): Pág. 157-162.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México. Series Libros. Pág. 90.

- Gidlöf, A., Öhrström, E. (2007). Noise and well-being in urban residential environments: The potential role of perceived availability to nearby green areas. *Landscape and Urban Planning*, Elsevier, London. 83(2-3): Pág. 115-126.
- Giraldo, F. (1999). *Ciudad y Crisis. Hacia un nuevo Paradigma?* Bogotá: TM Editores.
- Gómez, F., Tamarit, N., Jabayoles, J. (2001). Green zones, bioclimatics studies and human comfort in the future development of urban planning. *Landscape and Urban Planning*, Elsevier, London. 55(4): Pág. 151-161.
- Gómez, N. (2003). Factibilidad técnica y económica de utilizar imágenes de satélite, para analizar la dinámica de crecimiento urbano en Bogotá. Bogotá D.C.
- Gómez, F. (2005). Las zonas verdes como factor de calidad de vida en ciudades. *Ciudad y Territorio: Estudios Territoriales*. (37): Pág. 417-436.
- Grimm, N., Grove, J., Pickett, S., Redman, C. (2000). Integrated approaches to longterm studies of urban ecological systems. *BioScience*. (50): Pág. 571-84.
- Grimm, N., Foster, D., Groffman, P. (2008). The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Front Ecol. Environ*. (6): Pág. 264-72.
- Grimm, N., Redman, C., Boone, C. (2013). Viewing the urban socioecological system through a sustainability lens: lessons and prospects from the Central Arizona-Phoenix LTER Programme.
- Henriquez, C., Azócar G., Romero, H. (2006a). Monitoring and modelling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International*. (30): Pag. 945–964.

- Henriquez, C., Azócar, G., Aguayo, M. (2006b). Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. (36): Pág. 61-74.
- Hillman, M. (1996). In Favour of the Compact City. *The Compact City: A Sustainable Urban Form?*. Oxford, Spon Press.
- ICES. (2013). *Indicadores de la Iniciativa Ciudades Emergentes y Sostenibles*. Banco Interamericano de Desarrollo.
- IMF (Instituto Meteorológico de Finlandia). (2002). Mann-Kendall Test and Sen's Slope Estimates for the Trend of Annual Data. [Hoja de cálculo de Microsoft Excel].
- INEGI. (1999). *Aspectos técnicos de las imágenes Landsat*. Dirección General de Geografía Y Medio Ambiente de México.
- James, P., Tzoulas, M., Adams, A., Barber, J., Box, J. Breuste., T. Elmqvist M., Frith, C., Gordon, K., Greening, J., Handley, S., Haworth, A., Kazmierczak, M., Johnston, K., Korpela, M., Moretti, J., Niemela, S., Pauleit, M., Roe, J., Sadler, C., Ward, T. (2009). Towards an integrated understanding of green space in the European built environment", *Urban Forestry and Urban Greening Elsevier, Oxford*. 8(2): Pág. 65-75.
- Jarchow, C., Didan, K., Barreto M., Nagler, P., Glenn, E. (2018). Application and comparison of the MODIS-derived enhanced vegetation index to VIIRS, landsat 5 TM and landsat 8 OLI platforms: A case study in the arid colorado river delta, Mexico. *Sensors (Switzerland)*. 18(5).
- Jáuregui, E. (2008). La variabilidad climática en los registros instrumentales de México. *Cambio climático: una visión desde México*. México: Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT. Pág. 279-288.
- Jenks, M., Burton, E., Williams, K. (1996). *Compact Cities and Sustainability: An Introduction to the Compact City*. London, E & FN Spon.

- Jiang, B., Li, D., Larsen, L., Sullivan, W. (2014). A Dose-Response Curve Describing the Relationship Between Urban Tree Cover Density and Self-Reported Stress Recovery. *Environment and Behavior*. 48(4): Pág: 607-629.
- Jones, H., Vaughan, R. (2010). *Remote sensing of vegetation: principles, techniques, and applications*: Oxford university press.
- Kerchove, R., Lhermitte, S., Goossens. (2013). "Spatio-Temporal Variability in Remotely Sensed Land Surface Temperature, and Its Relationship with Physiographic Variables in the Russian Altay Mountains." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. (20): Pág. 4–19.
- Köchli, D., Brang, P. (2005). Simulating effects of forest management on selected public forest goods and services, a case study. *Forest Ecology and Management*, Elsevier, Amsterdam. 209(1-2): Pág. 57-68.
- Koerner B., Klopatek, J. (2002). Anthropogenic and natural CO₂ emission sources in an arid urban environment. *Environmental Pollution*. (116): Pág. 45-51.
- Landsat Science. (2014). Landsat 5. Landsat Science. from <http://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-5-2/>.
- Larios, A. (2010). Recuperación de áreas verdes. *Educación social incluyente, Hekademus*. 3(7): Pág. 47.
- Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman, J. (2014). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- López, E., Bocco, G., Mendoza, M. (2001). Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia. México.
- López, E. (1994) *La vegetación y la flora de la sierra de Tabasco (Municipios de Tacotalpa y Teapa) México*. División Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Pág. 88.

-
- MacKerron, G., Mourato, S. (2013). Happiness is greater in natural environments. *Global Environmental Change*. 23(5): Pág. 992-1000.
- Maco, S., McPherson, G. (2002). Assessing canopy cover over streets and sidewalks in street tree populations. *Journal of Arboriculture*. International Society of Arboriculture, Champaign. 28(6): Pág. 270-276.
- Mas, J., Ramírez, I. (1996). Mejoramiento de las clasificaciones espectrales de cubiertas de suelo por medio de un sistema de información geográfica. *Investigaciones Geográficas*. 4. Número Especial.
- McMichael, A. (1999). Urbanisation and urbanism in industrialised nations, 1850-present: implications for health. Lawrence Schell y Stanley Ulijaszek, *Urbanism, Health and Human Biology in Industrialised Countries*, Cambridge University Press, Cambridge. Pág. 21-45.
- McPherson, G., Simpson, J. (1998). Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. *Atmospheric Environmental: Urban Atmospheres*. 32, 1.
- Martínez, J. (2007). Análisis de la isla de calor en la Ciudad de Puebla (México) en el período diciembre 1998, abril. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosférica Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. Pág. 44.
- Mazari, N. (2005). Correlation between NDVI and surface temperatures using Landsat ETM imagery for San Antonio Area. Pág. 20.
- Meadows, D., Randers, J. (1992). *Beyond the limits*. Earthscan Publications Limited. London.
- Memon, R., Leung, D., Liu, H. (2009). An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*. (94): Pág. 491–500.

- Merayo R., Serrano F., y Marqués S. (2016). Influencia de los espacios verdes urbanos en la salud mental. *Metas de enfermería* 19(9): Pág. 20-26.
- Morales, C., Madrigal, D. y González, L. (2007). Isla de Calor en Toluca, México. Nov.-Feb. Vol. 14. No. 003. *Ciencia Ergosum*. Universidad Autónoma del Estado de México. Pág. 307-317.
- NASA. (2007). *Landsat 7 science data user's handbook*. Manual. National Aeronautics and Space Administration, Houston, EUA. Pág. 186.
- NASA. (2012). *Measuring vegetation (NDVI & EVI)*. National Aeronautics and Space Administration.
- Nowak, J., Stevens, C., Sisinni, M., Lule, J. (2002). Effects of urban tree management and species selection on atmospheric carbon dioxide. *Journal of Arboriculture*. 28, 3.
- NSII (Nacional Statical Institute of Italy). (2001). Environmental sustaninability indicators in urban areas: an italian experiencia. Conference of European Statisticians, 1-4 octubre de 2001, Ottawa.
- Oke, T. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*. 14(4): Pág. 268-277.
- Oke, T., (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. (108): Pág. 1-24.
- Oke, T. (2009). *Boundary layer climates: Second edition*. 2. New York, NY: Routledge. ISBN: 978-0-415-04319-9.
- Olave, S., Santana, A., Butorovic, N., Paola, A. (2008). Thermal variability in the northeastern area of Brunswick Peninsula, Magallanes, Chile, using Landsat data. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*. 36(2): Pág. 5-12.
- Oliveira, S., Andrade, H., Vaz, T. (2011). The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon. *Building and Environment*, Elsevier, Amsterdam. 46(11): Pág. 2186-2194.

- Ordoñez, C. (2001). Crecimiento urbano del borde norte de Bogotá consolidación de la periferia urbana y su articulación con el área de expansión. Desarrollo de una unidad de actualización dentro de un plan parcial en la ciudad norte. Bogota: Tesis Magíster en planeación urbana y regional. Pontificia Universidad Javeriana.
- Palacios, E. (2015). Análisis multitemporal en la cobertura boscosa de la zona norte del departamento de choco. Choco, Colombia.
- Perelman, P. (2016). Percepción del verde urbano en parques de la ciudad de Buenos Aires. *Multequina*. (25): Pág. 13-22.
- Pérez, M., Calle, A., y Casanova, J. (2003). Cálculo de la temperatura superficial a partir de datos Landsat TM. Paper presented at the Teledetección y Desarrollo Regional. X Congreso de Teledetección, Cáceres, España. Pág. 95-98.
- Pérez, M., García, M. (2002). Cartografía térmica del Área metropolitana de Madrid a partir del sensor ETM del LANDSAT 7. Paper presented at the Anales de Geografía de la Universidad Complutense. Pág. 377-386.
- Perry, T., Nawaz, R. (2008). An investigation into the extent and impacts of hard surfacing of domestic gardens in an area of Leeds, United Kingdom. *Landscape and Urban Planning*, Elsevier, London. 86(1): Pág. 1-13.
- Pons, X. (2012). Landsat 8. Novedades y posibilidades. *La misión Landsat*. Pág. 1-16.
- Reséndiz, C. (2005). Evaluación del arbolado Urbano de la Ciudad de Monterrey. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Reyes P., Aldunce, I. (2010). Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile (Distribution, surface area and accessibility of green areas in Santiago de Chile). *Eure*. 6(109): Pág. 89-110.

- Riaño, O. (2002). Consideraciones y métodos para la detección de cambios empleando imágenes de satélite en el municipio de Paipa. *Colombia Forestal*. (7): Pág. 15.
- Robine, J., Siu, C., Le Roy, S., Van, H., Griffiths, C., Michel, J. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies*. (331): Pág. 171–178.
- Robinson L., Joshua P. Newell b, John M. Marzluff. (2005). Twenty-five years of sprawl in the Seattle region: growth management responses and implications for conservation. *Landscape and Urban Planning*. Pág. 51–72.
- Robinson, N., Allred, B., Jones, M., Moreno, A., Kimball, J., Naugle, D., Richardson, D. (2017). A dynamic landsat derived normalized difference vegetation index (NDVI) product for the conterminous United States. *Remote Sensing*. 9(8): Pág. 1-15.
- Romero, R., Toledo, X., Órdenes, F., Vásquez, A. (2001). Ecología urbana y gestión ambiental sustentable de las ciudades intermedias chilenas. *Ambiente y Desarrollo*, XVII (4), Centro de Investigación y Planificación para el Medio Ambiente, Santiago. Pág. 45-51.
- Romero, H., Molina, M., Moscoso, C., Sarricolea, P., Smith, P., Vásquez, A. (2007). Caracterización de los cambios de usos y coberturas de suelos causados por la expansión urbana de Santiago, análisis estadístico de sus factores explicativos e inferencias ambientales. Santiago de Chile, *Movilidad Espacial y Reconfiguración Metropolitana*. Pág. 251-270.
- Rosenfeld, A., Akbari, H., Romm, J., Pomerantz, M. (1998). Cool communities' strategies for heat island mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings*. (28): Pág. 51–62.

- Rouse J., Hass R, Schell J., Deering D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Memorias. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC, EUA. Pág. 309-317.
- Rowntree, A. (1986). Ecology of the urban forest - Introduction to Part II. Urban. Ecology, (9).
- Rzedowski, J. (1986) Vegetación de México. Ediciones Limusa. Pág. 432.
- Santamouris, M. (2000). Energy and Climate in the Urban Built Environment. James and Jamnes, London.
- Sarricolea P., Aliste, E., Castro, P., Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbano nocturno de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. Revista de climatología. (8): Pág. 71-84 ISSN.
- Sarricolea, P., Romero, H. (2010). Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área Metropolitana de Valparaíso, Chile. Arquitectura, Ciudad y Entorno. (14): Pág. 79-96.
- Schar, C., Jendritzky, G. (2004). Nature. Recuperado el 25 de Mayo de 2012.
- Scudo, G. Ocha, M. (2003). Spazi verdi urbani, la vegetazione come strumento di progetto per il comfort ambientale negli spazi abitati. Esselibri, Napoli.
- Seiferling, I., Naik, N., Ratti, C., Proulx, R. (2017). Green streets – Quantifying and mapping urban trees with street-level imagery and computer vision. Landscape and Urban Planning. (165): Pág. 93-101.
- Serra, J. (2007). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Ibiza. Investigaciones Geográficas. (44): Pág. 55-73.
- Skopje, L. (2018). Skopje's First Thermal Map: Are Urban Heat Islands Real? Retrieved.
- Soberón, V. (2014). Islas de calor urbanas en la ciudad de Lima utilizando imágenes satelitales. Pág. 127.

- Sobrinó J., Villa R., Hurtado E., Raissouni N. Simarro J. (1999). Aplicación de la base de datos Pathfinder al estudio del seguimiento de la dinámica de la cobertura terrestre. Memorias. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España. Pág. 37-40.
- Sobrinó, J. (2000). Teledetección. España: Guada Imp.
- Sobrinó, J. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. Remote Sensing of Environment. 75(2): Pág. 256-266.
- Sobrinó J., Jiménez, M., Paolini L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sens. Environ. 90(4): Pág. 434-440.
- Sobrinó J., Oltra, C., Jiménez, J., Julien Y., Soria G., Franch B., Mattar C. (2012). Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). Int. J. Appl. Earth Obs. (18):Pág. 141-147.
- Sorensen M., Barzetti V., Keipi K. y Williams J. (1998). Manejo de las áreas verdes urbanas.
- Stabler, L., Martin, C., Brazel, A. (2005). Microclimates in a desert city were related to land use and vegetation index. Urban Forestry and Urban Greening, Elsevier, Amsterdam. 3(3-4): Pág. 137-147.
- Streutker, D. (2003). Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. Remote Sensing of Environment. (85): Pág. 282-289.
- Suárez, M. (2011). Coeficiente de correlación de Karl Pearson. University of Ibarra.
- Tomlinson, C., Chapman, L., Thornes, J., Baker, C. (2010). Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images.

- Tsou, J., Zhuang, J., Li, Y., Zhang, Y. (2017). Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. *Urban Science*. 1(1): Pág. 10.
- Tumini, I. (2010). Estrategias para la reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. Madrid: Sustainable building conference.
- Tyrväinena, L., Mäkinenb, K., Schipperijnc, J. (2007). Tools for mapping social values of urban woodlands and other green areas. *Landscape and Urban Planning*, Elsevier, London. 79(1): Pág. 5-19.
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczaka, A., Niemelac, J., Jamesa, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, Elsevier, London. (81): Pág. 167-178.
- Unal, M., Uslu, C. (2018). Evaluating and Optimizing Urban Green Spaces for Compact Urban Areas: Cukurova District in. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 7(2): Pág. 1-21.
- USGS. (2013). Landsat 8 Conversion to Radiance, Reflectance and At-Satellite Brightness Temperature Using the USGS Landsat 8 Product.
- USGS. (2015). Landsat 8. Retrieved from <http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>.
- USGS. (2016). Landsat 8 (L8). Data user's handbook. Manual. U.S. Geological Survey, Dakota del Sur, EUA. Pág. 106.
- USGS. (2017). What are the band designations for the Landsat satellites? U.S. Geological Survey.
- Valdez, J., González, M., De los Santos, H. (2006) Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Revista Agrociencia*. 40(3):Pág. 383-394.

- Vega, A., López, J., Manzo, L. (2008) Análisis espectral y visual de la vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el corredor biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*. (67): Pág. 59-75.
- Villanueva, J., Ranfla, A., Quintanilla, A. (2012). *Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS Land-Surface Temperature/Emissivity products. *Remote Sensing of Environment*. (112): Pág. 59-74.
- Weng, Q. (2008). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Pág. 335-344.
- Wienert, U., Kuttler, W. (2005). The dependence of the urban heat island intensity on latitude. A statistical approach. *Meteorologische Zeitschrift*. 14(5): Pág. 677–686.
- Wolf, K., Robbins A. (2012). *Metro Nature, Environmental Health, and Economic Value*. College of the Environmental, University of Washington, Seattle, Washington, USA.
- World Meteorological Organization. (2010). *Prevention Web*.
- Xiao, C. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationships between urban heat island and land use/cover changes. En: Shenzhen. (China): ScienceDirect. Pág. 133-146. ISSN: 0034-4257.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J., Sun, Z. (2005). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry and Urban Greening*, Elsevier, Amsterdam. 3(2): Pág. 65-78.

Zebisch, M., Wechsung, F., Kenneweg, H. (2004). Landscape response functions for biodiversity assessing the impact of land-use changes at the county level. *Landscape and Urban Planning*. (67): Pág. 157– 172.