



El Patujú

Boletín informativo institucional
Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado

N° 29 – Abril 2019



Universidad Autónoma Gabriel René Moreno

Rector
M. Sc. Saúl Rosas
Vicerrector
Abog. Oswaldo Ulloa

Facultad Ciencias Agrícolas

Decano
M. Sc. Eudal Avendaño
Vicedecano
Dr. Bonifacio Mostacedo

Museo Noel Kempff Mercado

Directora Ejecutiva
Dra. Marisol Toledo
Dirección. Av. Irala 565
Tel. 3366574
Santa Cruz, Bolivia
www.museonoelkempff.org
museo@museonoelkempff.org

Boletín El Patujú

Edición y diagramación
Lic. Liliana Soria
Revisión
Dra. Marisol Toledo
Fotografías: © Museo NKM
ISSN 1991-4652

Editorial

La ciudad de los anillos y sus árboles

Actualmente en todo el país existe un desarrollo acelerado pero que va en deterioro de nuestro patrimonio natural. La protección de este patrimonio natural no implica paralizar el desarrollo, ambos pueden ir juntos, se requiere una mejor planificación y sobre todo respeto a los organismos que cumplen funciones esenciales para la vida. Al parecer, la principal valoración y percepción del bosque es que es solo madera; sin embargo la lista de funciones y/o servicios que cumplen las plantas es amplia y varía según la función macro del bosque (ciclo hídrico, absorción de carbono, oxígeno y diversos servicios como polinización, medicina, entre otros) o desde una arborización urbana (purificación del aire, microclima urbano, regulación hídrica, reducción de ruidos, bienestar – parques).

En este contexto, el Museo Noel Kempff ha incursionado en la investigación de la biodiversidad y de su problemática en áreas urbanas y peri-urbanas. Santa Cruz de la Sierra, es una ciudad que crece y se desarrolla de forma imparable hacia una gran Metrópoli, con urbanizaciones que incrementan en los cuatro puntos cardinales de la ciudad, disminuyendo así la cobertura vegetal con su respectivo impacto en el clima. Con este número especial queremos llamar la atención sobre la importancia y la función de la vegetación, la misma que refleja nuestra identidad y legado histórico. Invitamos a que lean esta breve, pero significativa investigación, sobre la relación de la cobertura vegetal y el microclima en nuestra ciudad. El objetivo es brindar información para tomar conciencia de lo que está pasando y el impacto en la calidad de vida en la ciudad de los anillos, si seguimos con este desarrollo acelerado, sin planificación y poco amigable con el medio ambiente.

Marisol Toledo
Directora Ejecutiva



Contenido

Investigación:	Resumen.....	2
La isla de calor	Introducción.....	2
urbana de Santa	Metodología.....	4
Cruz de la Sierra	Conclusiones y recomendaciones.....	14
	Bibliografía.....	15

La isla de calor urbana de Santa Cruz de la Sierra en Bolivia y su relación con la cobertura vegetal

Jan Spickenbom

Resumen

Santa Cruz de la Sierra es una ciudad que cuenta con una isla de calor considerable que está definida por las temperaturas superficiales elevadas de la zona urbana en relación con su entorno peri-urbano y rural. Las temperaturas más altas están en el centro de la ciudad y la diferencia llega a más de 9 °C menos en las zonas mejor conservadas con alta densidad arbórea.

Datos muestran una estrecha correlación entre la temperatura superficial y la cobertura vegetal en la zona metropolitana de Santa Cruz de la Sierra. Cuanto más alta, densa y extensa la vegetación, más fuerte es el efecto de enfriamiento y a la inversa mientras menos vegetación, más alta la temperatura.

La presencia de zonas arbóreas es de alta importancia para la regulación de la temperatura en la zona metropolitana. Considerando el aumento de la temperatura en esta zona es recomendable aumentar la superficie de zonas arbóreas y áreas verdes, así como priorizar su inclusión en la planificación territorial.

Introducción

Las ciudades generan su propio clima por la influencia a parámetros claves meteorológicos como la temperatura del ambiente, la humedad del aire, la radiación, el viento, la calidad del aire y el ruido. Según la Organización Mundial de la Meteorología (WMO) el clima urbano se define como el clima local alterado por las construcciones y emisiones en relación con su entorno natural que lo rodea. El resultado es una isla de calor urbana, la cual está caracterizada por la diferencia de la temperatura entre la ciudad con mayor población y más densidad infraestructural y del entorno rural con temperaturas más bajas (Figura 1). Este efecto es mayor en días calurosos y despejados con velocidades del viento bajas y puede llegar a rangos de hasta 10° C de diferencia entre la zona urbana y la zona rural. Dentro de las zonas urbanas los factores más importantes que generan calor son la geometría y las características térmicas de las construcciones, las características de la radiación de las superficies y la emisión de calor por actividades humanas como el consumo de energía y la quema de combustibles del transporte y de la industria (DWD 2018).

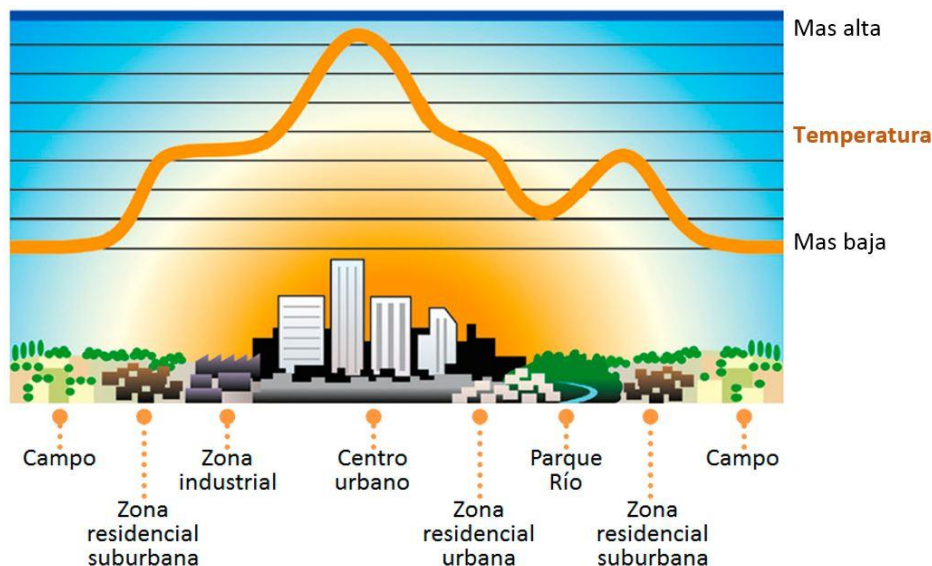


Figura 1. Generalización de la isla de calor de una ciudad, definida por la variación de la temperatura del ambiente entre las diferentes zonas urbanas en relación con usos distintos del suelo. Modificado a base de arquitecturayenergia.cl, 2005.

Las consecuencias son mayor estrés de calor para los seres humanos, lo cual marca un peligro para la salud, especialmente de personas mayores, enfermas y niños. El uso excesivo de aires acondicionados agrava la situación por mayor generación de calor y costos muy elevados por el consumo de energía. El abastecimiento de agua se complica por un mayor déficit hídrico especialmente en sequías más prolongadas relacionadas con el cambio climático global que se suma al efecto de la isla de calor.

Con más de 1,5 millones de habitantes, Santa Cruz de la Sierra es la ciudad con mayor población en Bolivia. En los últimos años se observa una dinámica demográfica muy alta en la zona metropolitana resultando en un crecimiento de la

superficie urbana y aumentando cada vez más la presión a los ecosistemas dentro y fuera de la ciudad. Al año 2018 la mancha urbana ocupa alrededor de 33500 ha de espacio, extendiéndose hacia los municipios vecinos de La Guardia, Porongo, La Bélgica, Warnes y Cotoca, los cuales dentro de pocos años van a formar la zona metropolitana de Santa Cruz, eliminando los espacios verdes entre estos municipios si continúa la dinámica actual del cambio de uso del suelo (Figura 2).

El objetivo de la presente investigación es de determinar las características espaciales de la isla de calor urbana de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra y evaluar su relación con la cobertura vegetal en la zona urbana.

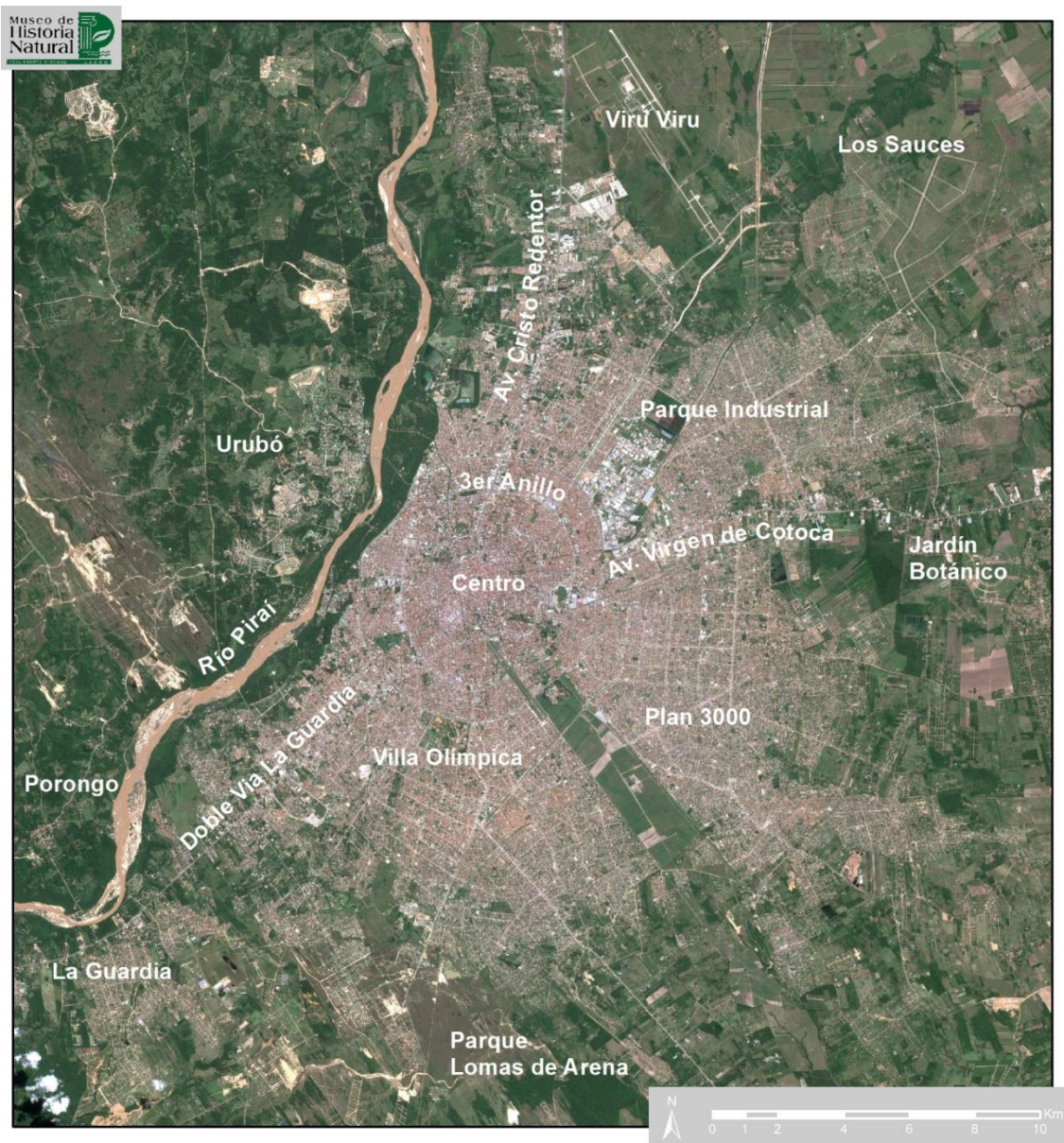


Figura 2. Imagen satelital de Santa Cruz de la Sierra. Sentinel 2 - 18.04.2018, 18:22 GMT.

Metodología

Para evaluar la dimensión e intensidad de la isla de calor de Santa Cruz de la Sierra en relación con la cobertura vegetal y arbórea de la zona metropolitana se ha aplicado un análisis de imágenes satelitales en el programa ArcGIS. La temperatura superficial ha sido calculada a base de una imagen satelital de Landsat 8, mientras la cobertura vegetal fue elaborada a base de una imagen de Sentinel 2 (Tabla 1). Los resultados fueron procesados para la visualización en mapas, seguido por una correlación de los datos al nivel de un perfil sectorial y para las unidades vecinales de Santa Cruz de la Sierra para identificar y evaluar el grado de relación entre la temperatura superficial y la cobertura vegetal. La base del estudio son estas dos imágenes satelitales:

Imagen del satélite Sentinel 2, captada el día

18.04.2018 a las 18:22 GMT (14:22 hora local). La misión Sentinel del European Space Association (ESA) consiste de dos satélites para la observación de la tierra con sensores multiespectrales y una resolución de 10 m a 20 m por pixel, los cuales fueron lanzados en junio 2015 (Sentinel A) y marzo 2017 (Sentinel B) (Sentinel Online – ESA, 2018).

Imagen del satélite Landsat 8, captada el día 23.02.2018 a las 14:16 GMT (10:16 hora local). El satélite Landsat 8 es el último de varias generaciones de satélites Landsat, lanzado en febrero 2013. Su misión es la observación de la tierra a base de varios sensores multiespectrales de 30 m de resolución por pixel, incluyendo bandas termal para la determinación de la temperatura superficial con una resolución de 100 m por pixel (Earth Observing System – NASA, 2018).

Tabla 1. Comparación de bandas multiespectrales de los satélites Sentinel 2A y Landsat 8.

Sentinel 2A			Landsat 8			Tipo de radiación	
Banda	Rango espectral (nm)	Resolución espacial por pixel (m)	Banda	Rango espectral (nm)	Resolución espacial por pixel (m)		
B1	433–453	60	B1	430–450	30	Azul	Luz visible
B2	458–522	10	B2	450–510	30	Azul	
B3	543–577	10	B3	530–590	30	Verde	
B4	650–680	10	B4	640–670	30	Rojo	
			B8	500–680	15	Pancromático	
B5	698–712	20				Rojo	
B6	733–747	20				Rojo	
B7	773–793	20				Infrarrojo cercano (NIR)	
B8	784–899	10				Infrarrojo cercano (NIR)	
B8A	855–875	20	B5	850–880	30	Infrarrojo cercano (NIR)	
B9	935–955	60				Infrarrojo onda corta (SWIR)	
B10	1360–1390	60	B9	1360–1380	30	Infrarrojo onda corta (SWIR)	
B11	1565–1655	20	B6	1570–1650	30	Infrarrojo onda corta (SWIR)	
B12	2100–2280	20	B7	2110–2290	30	Infrarrojo onda corta (SWIR)	
			B10	10600–11190	100	Infrarrojo termal (TIRS)	Luz infrarrojo
			B11	11500–12510	100	Infrarrojo termal (TIRS)	

Cálculo del NDVI a base de Sentinel 2

Vegetación sana y viva refleja luz visible en un espectro de 400 a 700 nm, mientras absorbe la luz infrarrojo entre 700 a 1100 nm. Este efecto se utiliza para estimar el NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index) a base de los datos multiespectrales de imágenes aéreas y satélites y para identificar la presencia de clorofila de plantas sobre la superficie de la tierra y su actividad fotosintética.

Entre un rango de 0 a 1 el NDVI representa áreas sin vegetación hasta zonas con una vegetación muy densa y alta actividad fotosintética. Para el presente estudio el NDVI está aplicado para la identificación de la vegetación existente en la zona urbana de Santa Cruz, determinando la presencia de áreas arbóreas hasta boscosas y diferenciándolas de áreas sin cobertura vegetal considerable.

El cálculo del NDVI para la imagen de Sentinel 2A fue realizado en el programa ArcGIS 10.3 y aplicando la siguiente fórmula (NASA–Earthobservatory, 2018):

$$NDVI = \frac{\text{Infrarojo cercano NIR (Banda 8)} - \text{Rojo visible (Banda 4)}}{\text{Infrarojo cercano NIR (Banda 8)} + \text{Rojo visible (Banda 4)}}$$

Cálculo de la temperatura superficial a base de Landsat 8

Después de su primer lanzamiento del Landsat 1 en 1972 la familia de los satélites Landsat entró a su cuarta generación en 2013 con el Landsat 8. Desde su inicio estos satélites formaron una de las herramientas más importantes para la observación de la superficie de la tierra como los cambios en el uso y la cobertura de los suelos. Su alta resolución de 30 m por pixel y la oferta de varias bandas multiespectrales, incluyendo varias bandas del infrarrojo en la última generación Landsat 8, lo hace ideal para el análisis de características de la vegetación.

Desde el Landsat 4 en 1982 los sensores de los satélites incorporan una banda termal, la cual permite calcular la temperatura de la superficie de la tierra en base de la reflexión solar. El cálculo de la temperatura superficial para la imagen de Landsat fue realizado en el programa ArcGIS 10.3 aplicando las siguientes fórmulas (ESRI–ArcGIS Blog, 2014: Deriving temperature from Landsat 8 thermal bands TIRS):

Conversión de los datos ópticos a radiación espectral a base de la información espacial de la banda 10 y de factores de corrección Radiance Multiplier (RM = 0,0003342) y Radiance Add (RA = 0,1) obtenido de los metadatos del Landsat 8:

$$\text{Radiación} = RM * \text{Banda 10} + RA$$

Cálculo de la temperatura superficial con la radiación y los constantes específicos de la banda 10 para la conversión de datos térmicos K1 = 774,89 y K2 = 1321,08 extraído de los metadatos:

$$\text{Temperatura superficial en } ^\circ\text{C} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{\text{Radiación}} + 1\right)} - 273,15$$

La temperatura superficial representa las características térmicas de diferentes superficies de la tierra determinada a través de la teledetección y de esa forma es distinta a la temperatura del ambiente, la cual se mide con termómetros en una altura de 2 m sobre el suelo.

Estudios anteriores de la isla de calor urbana de otras ciudades muestran que existe una estrecha correlación entre los dos tipos de temperatura (Guan, 2011).

La superficie de la tierra se calienta por la radiación solar en relación con su característica de reflexión (albedo) y su capacidad de absorción del calor. Superficies de color claro tienen un albedo más alto, lo que significa que una gran parte de la radiación entrante está reflejada, mientras superficies oscuras cuentan con un valor de albedo más bajo, menos reflexión y absorben la mayor parte de la radiación. La consecuencia es que las superficies blancas se calientan menos que las superficies negras. Las bandas de infrarrojo termal (TIRS) del satélite Landsat 8 miden la temperatura superficial a través de las características de emisión y reflexión de las distintas superficies de la tierra. Este proceso está relacionado con el contenido de agua que existe en la superficie de la tierra, lo cual es la razón porque la vegetación y cuerpos de agua representan temperaturas más bajas que superficies selladas como asfalto y edificios. La evapotranspiración de agua de la vegetación y cuerpos de agua convierte el flujo de calor solar en un flujo de calor de condensación y frena el calentamiento de las superficies con cobertura vegetal. Especialmente los bosques con altos volúmenes de biomasa y alta actividad fotosintética generan un efecto de enfriamiento con el resultado de temperaturas superficiales más bajas en comparación con superficies sin vegetación.

Los datos del NDVI y de la temperatura superficial están visualizados en los siguientes mapas para la zona metropolitana de Santa Cruz de la Sierra incluyendo valores de puntos representativos de la ciudad y su entorno rural, los cuales representan diferentes grados del uso del suelo desde las zonas con mayor densidad de construcciones en el centro urbano hasta las áreas con mejor estado de conservación natural como el Parque Curichi La Madre, el Jardín Botánico o la zona de los Sauces. Se ha elaborado un perfil de la temperatura superficial en relación con el NDVI del centro de la ciudad hacia la zona rural de Los Sauces en el noreste para demostrar la variación de la temperatura superficial y la relación con la cobertura vegetal.

Dos mapas muestran los promedios del NDVI y de la temperatura superficial para las unidades vecinales (UV) de la zona urbana de Santa Cruz y se ha elaborado una correlación entre temperatura superficial y la cobertura vegetal de cada UV para investigar y evaluar la correlación entre estos valores.

Resultados

La Figura 3 muestra los resultados del cálculo del

NDVI para la zona metropolitana de Santa Cruz de la Sierra. Valores mayor a 0,7 están considerados como bosque (color verde oscuro), valores de 0,6 hasta 0,7 como vegetación arbórea dispersa o de porte medio bajo, como por ejemplo parques (color verde claro), mientras valores menor a 0,6 representan clases de vegetación sin cobertura arbórea de significancia (sin color). Los cuerpos de agua tienen el color azul.

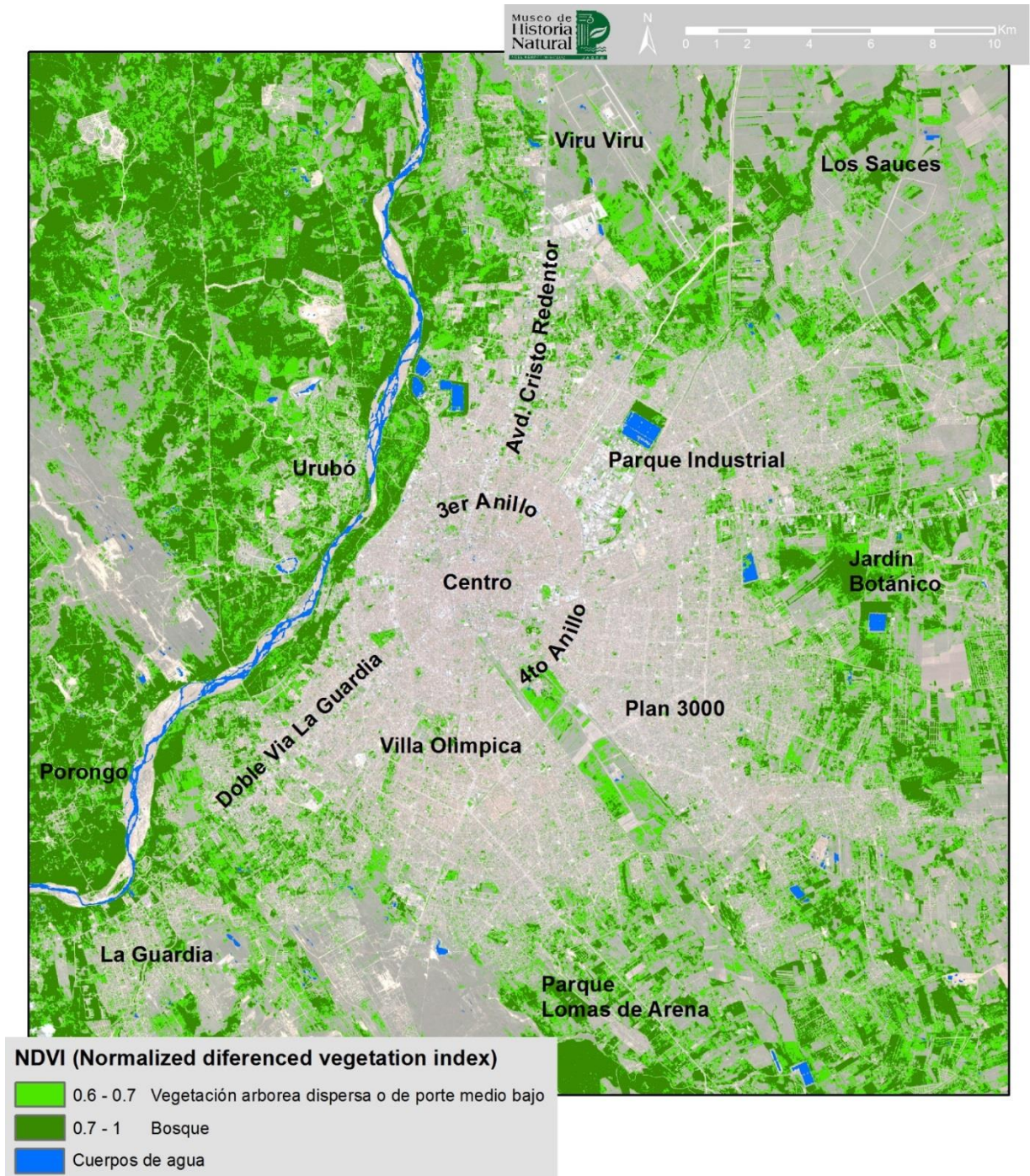


Figura 3. Ubicación de los áreas boscosas en la zona urbana de Santa Cruz de la Sierra. NDVI (Normalized differenced vegetation index) a base de imágenes satelitales Sentinel 2 - 18.04.2018, 18:22 GMT.

La zona urbana y especialmente el centro de la ciudad muestra prácticamente ninguna cobertura boscosa. Las áreas que destacan dentro del cuarto anillo son el club de golf en Las Palmas, el Parque Urbano, las áreas verdes del colegio La Salle, el Zoológico, el club deportivo Polanco y un terreno detrás del Centro de Educación Ambiental de la Gobernación Departamental. Fuera del cuarto anillo las áreas verdes con una cobertura arbórea considerable se encuentran en aumento, pero no hay bosques verdaderos hasta entrar a la zona peri-urbana de la ciudad. Una excepción importante y con una distancia de 4 km el bosque más cercano al centro de la ciudad es el Parque Urbano Ecológico Curichi La Madre con una cobertura boscosa densa y de biodiversidad alta, que forma parte del cordón ecológico en las orillas del Río Piraí, lo cual fue declarado para responder a los impactos de las inundaciones. Más afuera, pero todavía dentro de la zona peri-urbana de la ciudad están localizados los bosques en el Jardín Botánico, en la zona de los Sauces, en el Parque Lomas de Arena y en el municipio de Porongo al otro lado del Río Piraí. Los cuerpos de agua más importantes en la zona metropolitana son el Río Piraí, las lagunas de oxidación, la laguna Guapilo y varias lagunas pequeñas al sur de la ciudad y de las nuevas urbanizaciones en Porongo.

Según datos de Global Forest Watch la zona urbana de Santa Cruz de la Sierra delimitada por las unidades vecinales registradas, ha perdido 980 hectáreas de bosque en el período 2001 a 2017, lo que significa una disminución de la cobertura boscosa de más del 30%. En toda la provincia Andrés Báñez, que incluye el área metropolitana de Santa Cruz de la Sierra y los municipios vecinos la deforestación en el mismo período llega a 55.300 ha, lo que equivale a una disminución del 22% (datos obtenidos del Global Forest Watch, 2018).

Las diferencias de la temperatura superficial

La Figura 4 visualiza la distribución espacial de la temperatura superficial en base de los cálculos realizados con la imagen de Landsat. Debido a que los datos representan un solo momento en un día específico, se ha escogido una día con condiciones regulares y con el cielo despejado al final del verano a las 10:16 de la mañana en hora boliviana

(23.02.2018, 14:16 GMT). El efecto de la isla de calor es más pronunciado en la noche cuando las características térmicas de las superficies y materiales diferentes tienen mayor impacto en la distribución de calor. Como las imágenes satelitales están generadas a base de sensores ópticos que no sirven para levantar datos de noche, se necesitaría los datos de estaciones meteorológicas terrestres en la zona urbana para determinar la isla de calor nocturna. Sin embargo la imagen presente está considerada representativa para muchos días del año por sus condiciones climáticas regulares, que permiten muy bien una evaluación de las características térmicas de las superficies en relación con el uso del suelo presente.

El punto con mayor temperatura superficial de 35,8 °C está ubicado en la zona de la feria del Barrio Lindo con sus galpones grandes de superficies oscuras, mucho movimiento vehicular, alta concentración de gente y escasa presencia de áreas verdes y árboles. El centro de la ciudad muestra temperaturas alrededor de 32 °C con mayor concentración de calor en la zona de Siete Calles. Existen varias zonas que llegan a temperaturas superficiales parecidas por la densidad alta de construcciones y mucho movimiento vehicular como la zona del Mercado Abasto y el cruce del tercer anillo con la avenida hacia el norte. Generalmente se observa que todo el área dentro del primer anillo, marcando el centro de la ciudad, muestra las temperaturas más altas de la zona metropolitana con valores por encima de los 30 °C. Así, el centro marca al núcleo de la isla de calor de Santa Cruz de la Sierra. Sin embargo, hay dos lugares que se pueden considerar islas de frío en el centro urbano. La plaza principal 24 de Septiembre, la que está beneficiada térmicamente por la presencia de árboles grandes y muestra una temperatura de 29 °C y el parque El Arenal, que con su cuerpo de agua muestra una temperatura de aproximadamente 28 °C. Las diferencias de menos 2 °C a menos 3 °C, comparado con el resto del centro urbano, demuestra el efecto de la integración de áreas verdes y parques con dimensiones considerables de al menos una hectárea en la planificación territorial de la ciudad.

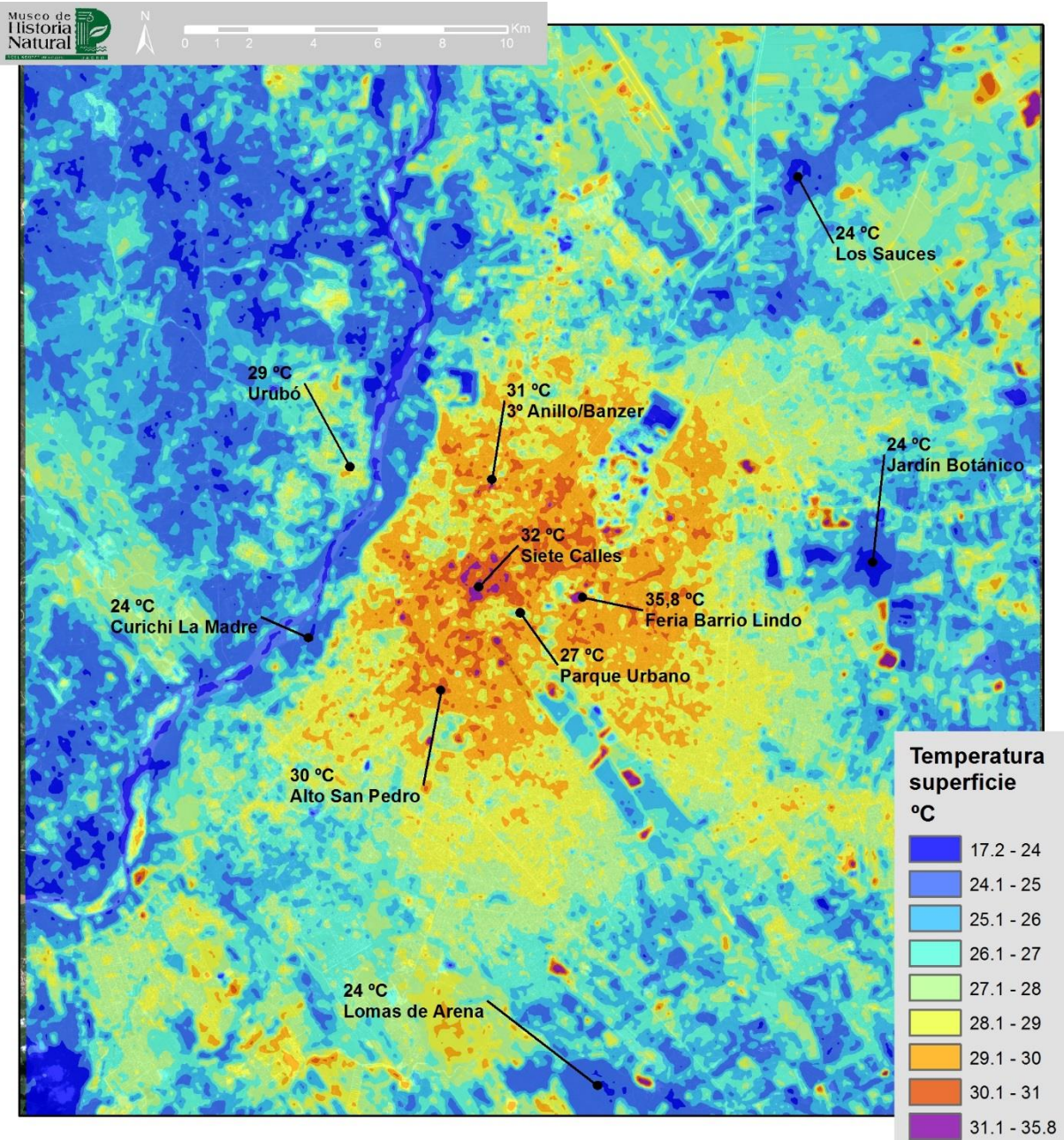


Figura 4. La isla de calor de la zona urbana de Santa Cruz de la Sierra. Temperatura superficial en un día normal de verano a base de imágenes satelitales Landsat 8 - 23.02.2018, 14:16 GMT.

Hasta el cuarto anillo las temperaturas superficiales se mantienen en valores de hasta 29 °C, solo parcialmente fraccionados por pocas zonas más frescas como el club de golf de Las Palmas, el Zoológico, la Villa Olímpica y el campus universitario de la UAGRM.

La Figura 5 muestra las diferencias de las temperaturas superficiales entre el punto referencial del centro en la zona de la Siete Calles con 32 °C y el resto de la zona metropolitana para visualizar la dimensión aproximada de la isla de calor de Santa Cruz de la Sierra. Por un lado destacan las temperaturas altas con diferencias mínimas a la temperatura referencial en los barrios dentro del cuarto anillo y por otro lado las islas de

enfriamiento en la zona urbana como el Parque Curichi La Madre, el Jardín Botánico y más allá en la zona peri-urbana y rural de Los Sauces, el Parque Lomas de Arena y las lagunas de oxidación con 8 °C menos que el centro. La laguna Guapilo aun llega a una diferencia de 9 °C menos que el centro de la ciudad. Todas estas áreas, las cuales sirven como islas de enfriamiento para disminuir la temperatura en el ambiente urbano, tienen en común una cobertura boscosa considerable. En los casos de la laguna Guapilo y las lagunas de oxidación el efecto de la evaporación de agua se suma a los beneficios de la vegetación en temas de enfriamiento de las temperaturas superficiales.

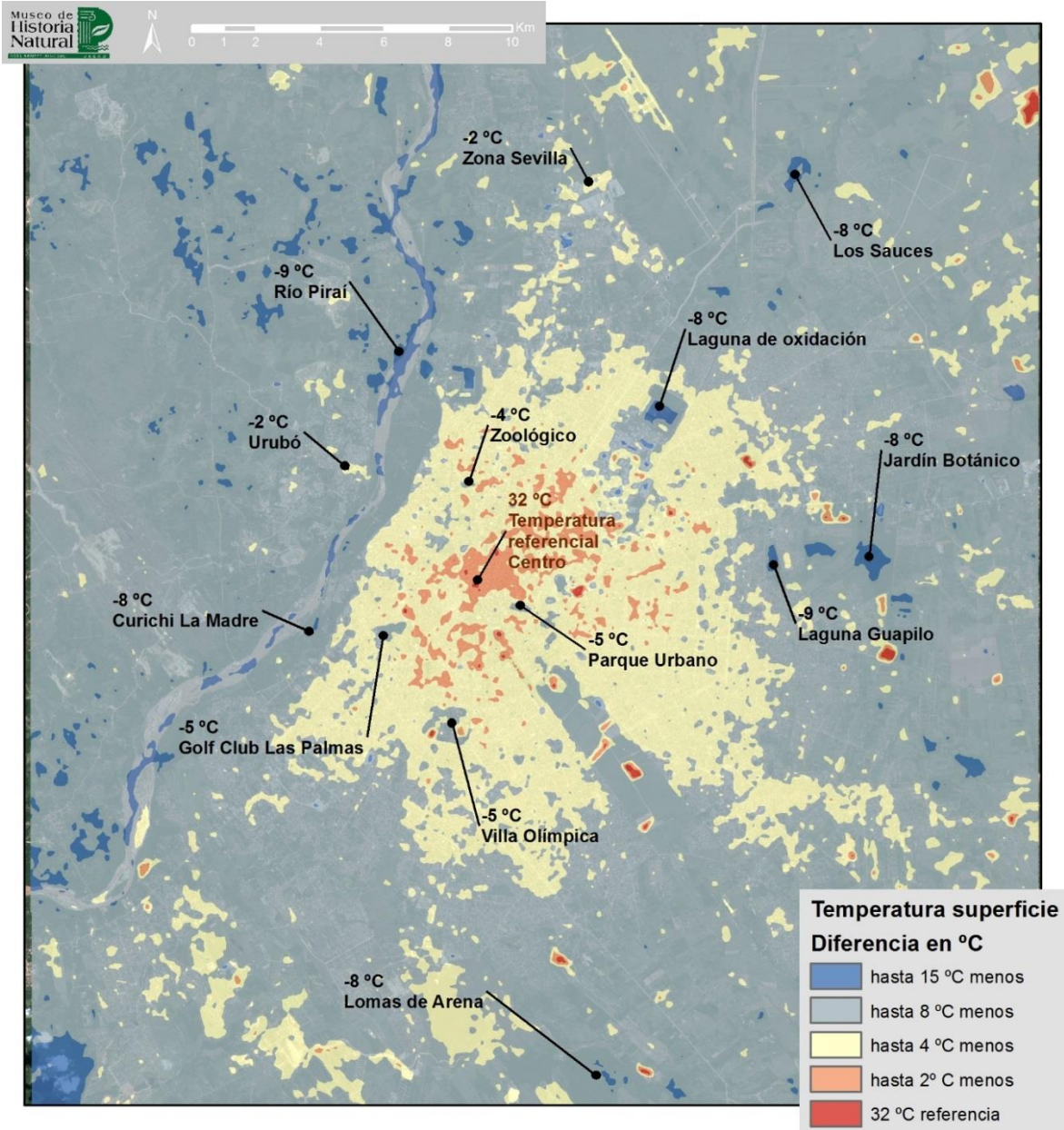


Figura 5. La isla de calor y áreas frías de la zona urbana de Santa Cruz de la Sierra. Diferencia de la temperatura superficial entre el centro como punto de referencia en las zonas urbanas en el entorno a base de imágenes satelitales Landsat 8 - 23.02.2018, 14:16 GMT.

Un efecto interesante se observa en las urbanizaciones más recientes en la zona del Urubó al oeste, Plan 3000 hacia el sureste y la zona Sevilla hacia el norte. Por el cambio del uso del suelo, con construcciones más densas y el aumento de la circulación vehicular, estos lugares ya están creando sus propias islas de calor con solo 2 °C menos de temperatura superficial en comparación con el centro de la ciudad. Para el futuro, en la planificación territorial, será de alta importancia buscar formas para amortiguar el calor en estas zonas, a través de áreas verdes y parques en ubicaciones estratégicas y con dimensiones adecuadas.

La correlación entre la temperatura superficial y el NDVI

Para un análisis más detallado de la relación entre temperatura y el uso del suelo, se ha elaborado un perfil del gradiente de la temperatura superficial y del NDVI por una distancia de 20 km del centro hacia la zona peri-urbana y rural de Los Sauces en el noreste (Figura 6). La Figura 7 muestra al mismo perfil como diagrama con la distancia en kilómetros en la abscisa y con dos ejes de ordenadas (NDVI y temperatura superficial).

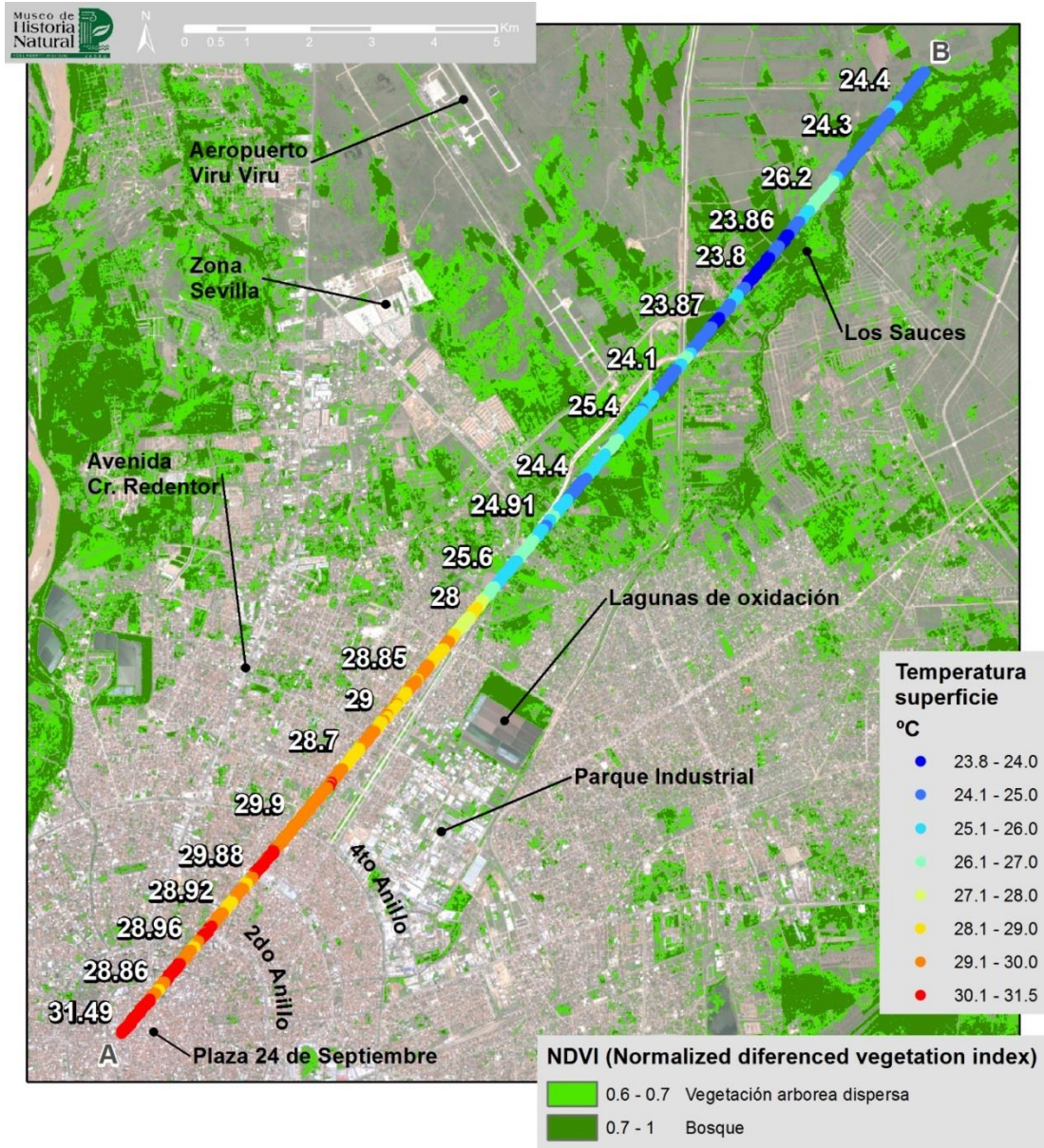


Figura 6. Perfil de temperatura del centro al noreste hasta Los Sauces en Santa Cruz de la Sierra. Temperatura superficial en un día normal de verano a base de imágenes satelitales Landsat 8 - 23.02.2018, 14:16 GMT.

El punto de inicio del perfil en el centro, a cuatro cuadras al oeste de la plaza 24 de septiembre, muestra una temperatura de aproximadamente 31,5 °C, marcando el lugar más caluroso en el trayecto del perfil determinado. Dentro de la zona del segundo anillo la temperatura superficial se mantiene muy alta con valores por encima de los 30 °C, solo el parque El Arenal y el parque entre las Avenidas Alemana y Beni funcionan como pequeñas y aisladas islas frescas con temperaturas superficiales de 1,5 hasta 2 °C menos que el punto inicial. Hasta el quinto anillo, a una distancia de aproximadamente 5 km, la temperatura superficial se mantiene en un rango de 29 °C a 30 °C con pocas diferencias en comparación con el centro de la ciudad por la densidad de construcciones de los

barrios y la ausencia general de áreas verdes con presencia significativa de árboles. Entre el quinto y octavo anillo los barrios están contruidos un poco más abiertos con áreas verdes más dispersas, pero sin cobertura boscosa todavía, lo que resulta en temperaturas superficiales todavía altas entre 28 °C y 29 °C. A una distancia de aproximadamente 9 km del centro de la ciudad ocurre un descenso significativo de la temperatura superficial a 26 °C, lo que marca la zona transicional entre la zona urbana y la zona peri-urbana, con mayor densidad de vegetación considerable, urbanizaciones más abiertas y menos densas. Al mismo momento, el NDVI aumenta parcialmente a valores mayores a 0,7 indicando la presencia de zonas boscosas que ayudan a controlar la temperatura de esa zona.

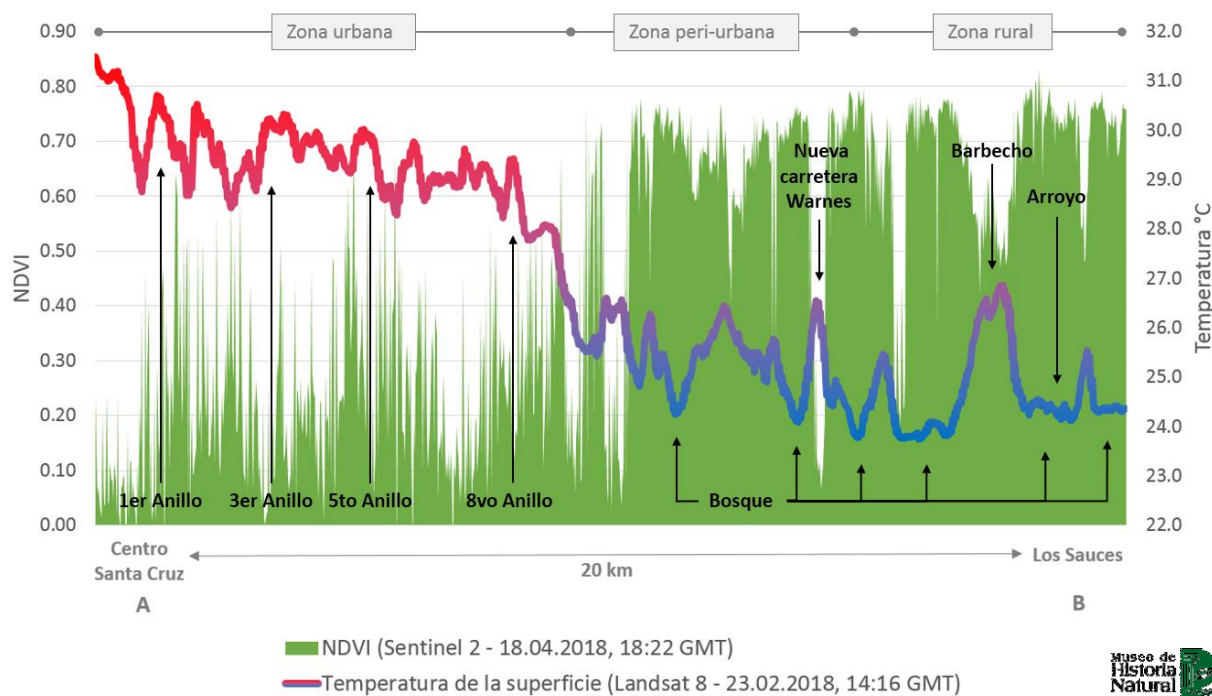


Figura 7. Comparación del perfil de la temperatura superficial y del NDVI del centro al noreste hasta Los Sauces en Santa Cruz de la Sierra y transición de las zonas de influencia urbana.

La zona peri-urbana llega aproximadamente hasta el km 15 del perfil con vegetación densa y zonas arbóreas, fraccionadas por barbechos, uso agropecuario y nuevas construcciones infraestructurales como la carretera hacia Warnes que conectará las urbanizaciones planificadas entre Santa Cruz de la Sierra y el parque industrial en Warnes. En aquellas interrupciones de la vegetación la temperatura superficial en distancias muy cortas sube como 3 °C en comparación con el entorno directo con mayor cobertura arbórea, la cual generalmente en esa zona mantiene la temperatura como 7 °C por debajo de las temperaturas superficiales del centro de la ciudad. A partir del km 15 del perfil la estructura del uso del suelo cambia otra vez al entrar a la zona rural de Los Sauces.

Bosques de diferentes densidades, incluyendo un bosque ribereño en las orillas del arroyo Los Sauces determinan los lugares más frescos en la zona metropolitana de Santa Cruz de la Sierra, con temperaturas superficiales por debajo de los 24 °C, lo que marca un gradiente significativo de la temperatura superficial de menos 8 °C en relación con el centro de la ciudad. Esa área ya forma parte de la zona rural alrededor de la ciudad, con baja densidad poblacional y la presencia de un uso agropecuario mixto, bosques dispersos y drenajes

naturales de aguas superficiales.

La regresión de los datos del NDVI y de la temperatura superficial en el trayecto del perfil muestran una buena correlación con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,6462$, lo que indica una relación significativa entre el uso del suelo y la temperatura. Se observa la tendencia de una separación de la nube de valores en dos secciones (Figura 8). Una en la parte superior en la izquierda, que muestra una aglomeración de temperaturas superficiales altas y NDVI bajo, representando mayormente la zona céntrica de la ciudad. La otra sección de valores se concentra al lado inferior a la derecha y muestra temperaturas superficiales más bajas y de NDVI más altos, lo que demuestra las características de la zona peri-urbana y rural. En la Figura 8 se observan algunas desviaciones de la línea de tendencia con bajas temperaturas y NDVI bajas y a la inversa. Aunque parece paradójico, se puede explicar que esas alteraciones ocurren por una influencia de la vegetación a zonas más amplias que solo el lugar específico donde se ha levantado la información. Eso puede significar que las áreas arbóreas regulan la temperatura no solo en el lugar donde están ubicadas, sino también hasta cierta distancia en su entorno.

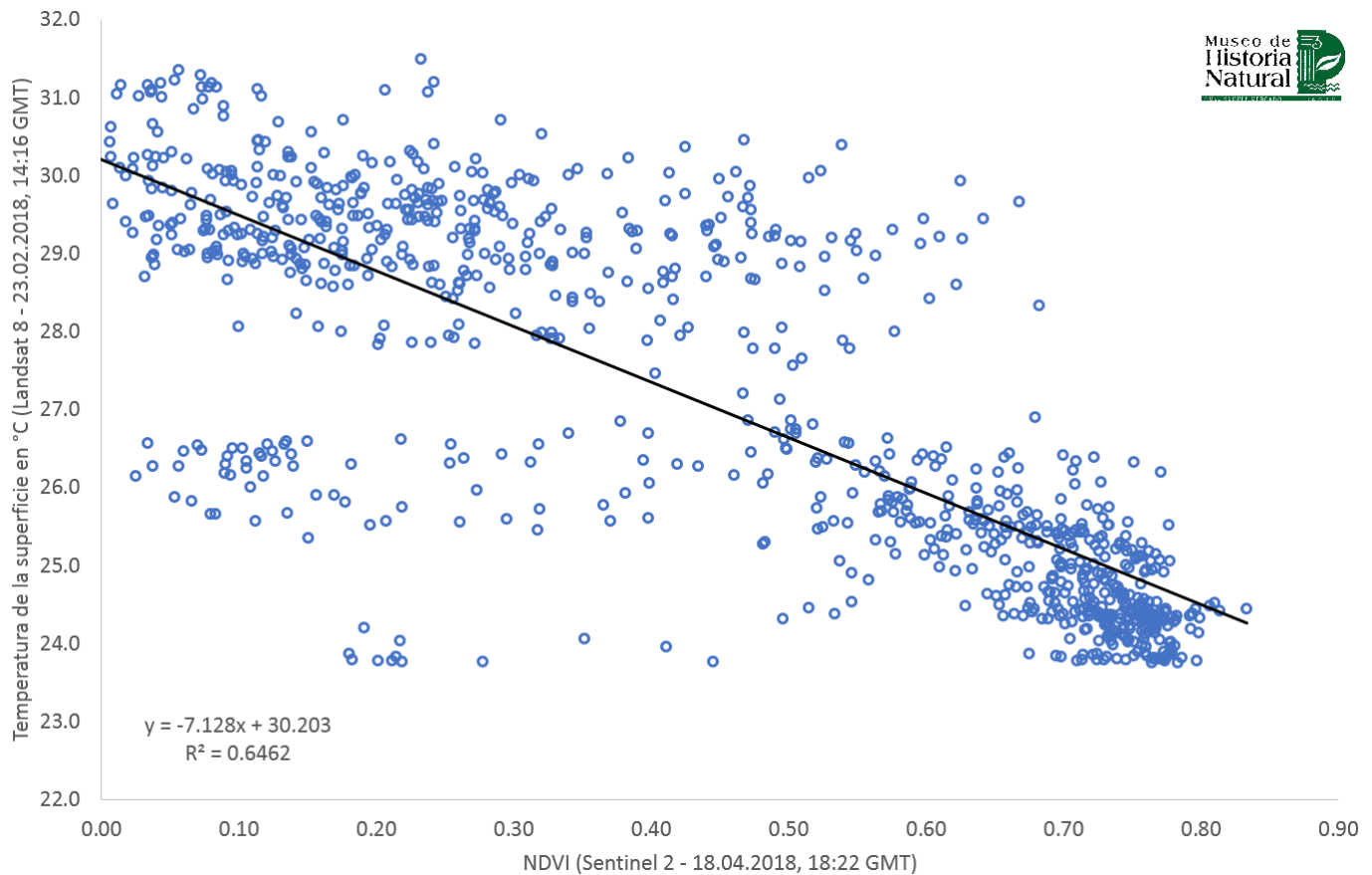


Figura 8. Regresión del NDVI (Normalized differenced vegetation index) y de la temperatura superficial en la línea del perfil del centro hacia la zona de Los Sauces en Santa Cruz de la Sierra.

La correlación entre la temperatura superficial y el NDVI a través de promedios por unidades vecinales

En la Figura 9 se puede observar los promedios del NDVI y los promedios de la temperatura superficial por unidad vecinal (UV) de la zona urbana de Santa Cruz de la Sierra. Evidentemente, la zona central muestra los valores más bajos de NDVI y en relación con esto al mismo momento las temperaturas superficiales más altas. Hasta el segundo anillo solo la UV del Parque Urbano destaca como isla de enfriamiento, por su mayor valor de NDVI, resultado de una mayor presencia de árboles. Al lado oeste de la ciudad, la zona más calurosa se mantiene aproximadamente hasta el cuarto anillo, mientras hacia el este la zona de mayor concentración de calor por UV llega hasta el séptimo anillo de la avenida Virgen de Cotoca,

por la alta densidad de construcciones y la ausencia de áreas arbóreas de dimensiones suficientes.

En conformidad con los mapas de análisis anteriores, las zonas más destacadas por menor concentración de calor son las UVs con mayor cobertura arbórea como el parque Curichi La Madre, el Cordón Ecológico, la zona de Los Sauces y el Jardín Botánico. Existen varias UVs que están beneficiadas por sus amplias áreas verdes y arborizadas como el Zoológico, el club de Golf de Las Palmas y la Villa Olímpica. El rango del NDVI es de casi 0, representando la ausencia de vegetación hasta 0,74 en las UVs más boscosas, y la temperatura superficial demuestra una diferencia de 6,4 °C entre las UVs del centro con un promedio de hasta 30,6 °C y la UV del Jardín Botánico con un promedio de 24,2 °C.

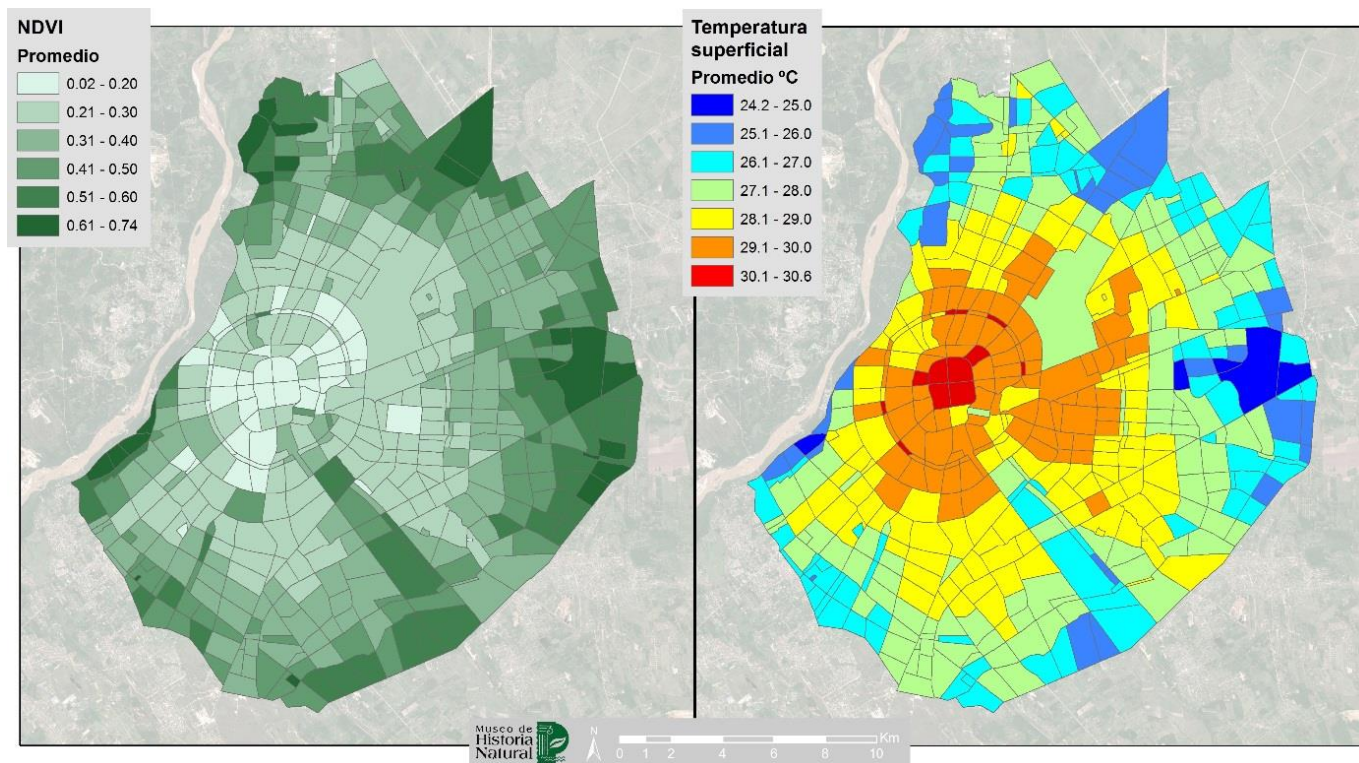


Figura 9. Promedios por unidad vecinal (UV) del NDVI (Normalized differenced vegetation index) y de la temperatura superficial en Santa Cruz de la Sierra.

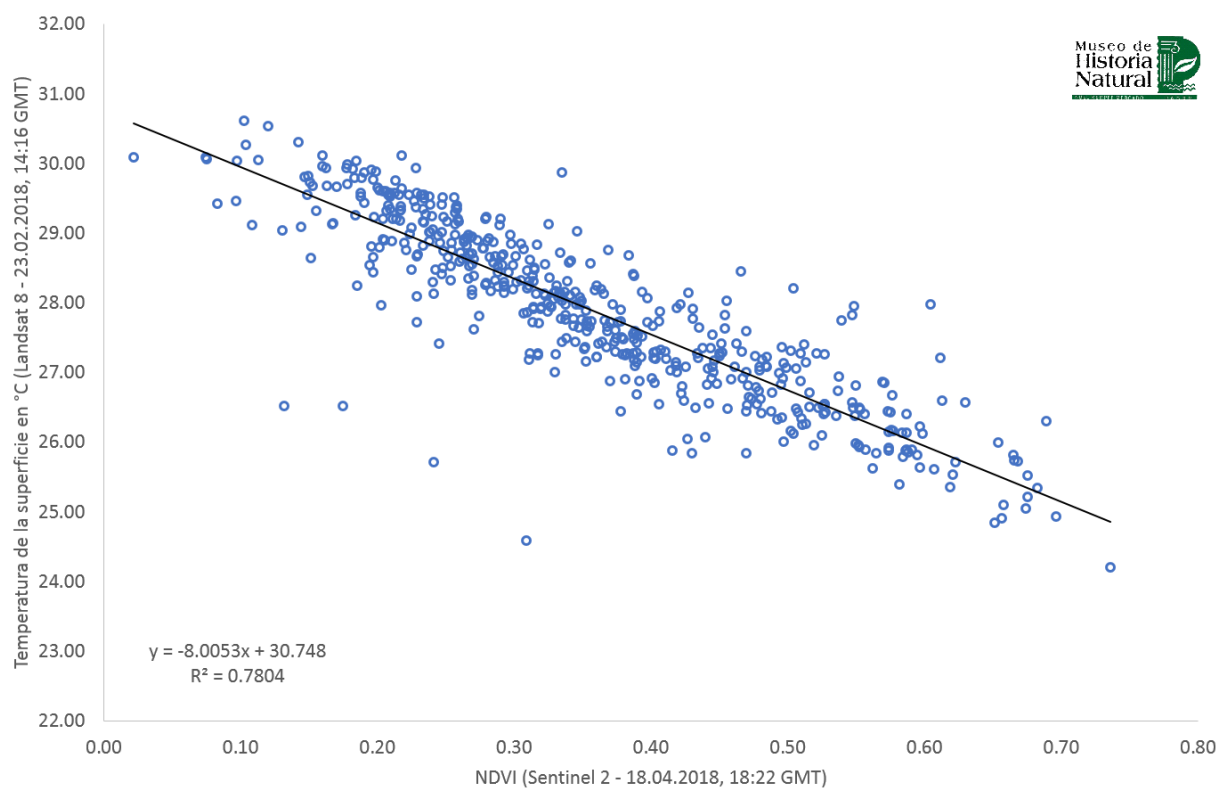


Figura 10. Regresión de los promedios por UV de NDVI (Normalized differenced vegetation index) y de la temperatura superficial en Santa Cruz de la Sierra.

La Figura 10 visualiza el grado de correlación ($R^2 = 0,7804$) entre los promedios por UV de la temperatura superficial y del NDVI, un valor que muestra una fuerte relación entre los dos datos. Eso significa que cuanto más alto es el promedio del NDVI, más baja es la temperatura superficial por UV. Aplicando la fórmula de la regresión ($NDVI = -8,0053 * TEMPERATURA + 30,748$) el aumento de 0,1 del valor de NDVI por cada UV representa la disminución de la temperatura superficial en 0,8 °C.

Conclusión y recomendaciones

El análisis de las temperaturas superficiales y la relación con la cobertura vegetal comprueba la presencia de la isla de calor en Santa Cruz de la Sierra a base de imágenes satélites y permite evaluar con alta certeza sus características espaciales. Además, la correlación del NDVI con las temperaturas superficiales determina una relación estrecha y significativa para la planificación sostenible del uso del suelo en la zona metropolitana de Santa Cruz de la Sierra.

El cambio climático global ya ha causado un incremento de la temperatura de más de 1 °C al nivel global en comparación con el nivel preindustrial (IPCC 2018), y para Bolivia está pronosticado un aumento de 3 °C al año 2050 y de más de 5 °C al año 2100 (Spickenbom, 2015). Por eso, es de alta importancia que la relación entre la temperatura superficial y la cobertura vegetal sea considerada para la elaboración de herramientas de planificación territorial como medida de adaptación. Esta investigación muestra que el

aumento de zonas arbóreas y áreas verdes en la ciudad sirve para regular la temperatura, disminuir el estrés de calor y amortiguar los impactos del cambio actual en el clima.

El efecto de la isla de calor es mayor en la noche cuando no entra radiación solar y las temperaturas están definidas por las características térmicas de las diferentes superficies en relación con el uso del suelo. Como no es posible observar este efecto de noche con sensores ópticos de los satélites es importante realizar un análisis de datos de las temperaturas ambientales medidos por equipos meteorológicos tradicionales. En este sentido, se recomienda la instalación de estaciones meteorológicas, en lugares estratégicos de la zona metropolitana de Santa Cruz de la Sierra para medir la temperatura máxima, mínima y promedio en una altura de 2 m sobre el suelo de forma automática y continua con una resolución temporal de por lo menos un dato por hora.

Para verificar y complementar los resultados del presente estudio se recomienda realizar investigaciones adicionales analizando las temperaturas y sus diferencias dentro de la zona metropolitana de Santa Cruz de la Sierra con otras imágenes satelitales y con una amplia variación temporal, considerando las variaciones estacionales de la temperatura.

Agradecimientos

El autor agradece las revisiones y comentarios de Marisol Toledo, Miguel Angel Jerez, Kathia Rivero y Liliana Soria.

Bibliografía

ESA–Sentinel Online, 2018: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Informaciones y base de datos de la misión Sentinel de la European Space Association ESA.

ESRI–ArcGis Blog, 2014: Deriving temperature from Landsat 8 thermal bands (TIRS) <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/analytics/deriving-temperature-from-landsat-8-thermal-bands-tirs>

Global Forest Watch, 2018: Online platform providing data and tools for monitoring forests. <https://www.globalforestwatch.org>. Washington, USA.

Guan, K., 2011: Surface and ambient air temperatures associated with different ground material: a case study at the University of California, Berkeley.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S.

Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)). World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 p.

Matzarakis, A., 2013: Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. Gefahrenstoffe – Reinhaltung der Luft 73, 115-118.

NASA, earthobservatory, 2000: Measuring Vegetation (NDVI & EVI), https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php

Schlegel, I., Kossmann, Dr. M, Matzarakis, A. 2017: Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Wärmebelastung in Stuttgart als Grundlage zur Anpassung an den Klimawandel. Deutscher Wetterdienst DWD, Abteilung fuer Klima- und Umweltberatung. Freiburg.

Spickenbom, J., 2015: Análisis de las condiciones climáticas actuales y futuras en cuencas hidrográficas seleccionadas para el Programa de Desarrollo Agropecuario Sustentable (PROAGRO III). Fundación Amigos de la Naturaleza. Santa Cruz de la Sierra. Bolivia.

United States Geological Survey, Department of the Interior USGS, 2018: Landsat Surface Temperature (ST) Product Guide. Version 2. EROS, Sioux Falls, South Dakota.

Sobre el museo

El Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado es uno de los centros de investigación básica y aplicada para la conservación de la biodiversidad de Bolivia. Es parte de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma Gabriel René Moreno, la institución académica pública más grande de la región. Su misión es contribuir al conocimiento, conservación y manejo sostenible de la biodiversidad en beneficio de la sociedad. Su visión es ser una institución referencial a nivel nacional e internacional en la conservación y manejo de la biodiversidad, con alta incidencia en políticas regionales y nacionales.

Sobre el autor

Jan Spickenbom nació en Hannover en Alemania el año 1976 y es un geógrafo por pasión especializado en hidrogeografía y climatología. Después de graduarse de la Universidad Leibniz de Hannover en 2006 trabajó como consultor científico en la planificación de energía eólica por seis años en la empresa GeoNet manejando proyectos de energía eólica en varios países. Luego en 2012 se formó experto integrado de la Cooperación Alemana (GIZ) en la Fundación Amigos de la Naturaleza en Bolivia asesorando en temas transversales de cambio climático y adaptación. Actualmente es consultor independiente e investigador asociado del Museo de Historia Natural Noel Kempff Mercado donde se encarga del diseño de proyectos y de la investigación espacial de procesos ecosistémicos integrales para fortalecer el desarrollo sostenible.