



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE ARQUITECTURA, URBANISMO Y GEOGRAFÍA

DEPARTAMENTO DE GEGRAFÍA



**VEGETACION Y CONTROL DEL MICROCLIMA URBANO:
MODELOS Y PATRONES ESPACIALES DE LA MITIGACIÓN DE
TEMPERATURAS EN BARRIOS DEL GRAN CONCEPCIÓN**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓGRAFA

POR: CLAUDIA ANDREA FUENTES VERGARA

PROFESOR GUÍA: FRANCISCO JAVIER DE LA BARRERA MELGAREJO

Agosto, 2021

Concepción, Chile

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.





La Geografía debe cumplir, también, un servicio mucho más importante.

*Debe enseñarnos, desde nuestra más tierna infancia,
que todos somos hermanos, cualquiera que sea nuestra nacionalidad.*

*En estos tiempos de guerras, de vanaglorias nacionales,
de odios y rivalidades entre naciones hábilmente alimentados por gentes que
persiguen sus propios y egoístas intereses, personales o de clase,
la geografía debe ser un medio para disipar estos prejuicios
y crear otros sentimientos más dignos y humanos.*

Piotr Kropotkin

AGRADECIMIENTOS

Agradecer principalmente a mis padres, familia y amigas por todo el apoyo incondicional que sentí durante todo este proceso. A mis compañeras y compañeros de facultad, de los cuales me llevo gratos recuerdos sobre todo fuera de la sala de clases.

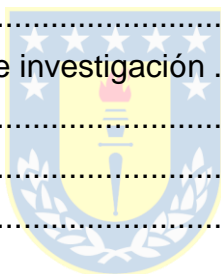
A mis profesores guías, Dr. Francisco de la Barrera y Benedita Santos Ph.D. por su ayuda y disposición a guiarme mediante sus conocimientos y consejos. A PAISUR, en especial a Sergio González y Javiera Pérez por su colaboración y ayuda con relación a los programas utilizados. Por último, al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS) por su contribución a esta investigación.



Índice de Contenidos

1.	INTRODUCCIÓN	11
1.1	Planteamiento del problema	15
1.2	Hipótesis	18
1.3	Objetivo General	19
1.4	Objetivos Específicos.....	19
2.	MARCO TEÓRICO	19
2.1	Clima urbano y su relación con la urbanización	19
2.1.1	Desarrollo de la superficie urbana en el Área Metropolitana de Concepción.....	21
2.2	Fenómenos y efectos de la isla de calor urbana (ICU)	22
2.2.1	Características de la isla de calor	24
2.2.2	Impactos sociales atribuidos al fenómeno ICU	26
2.2.3	Impactos físicos y energéticos atribuidos al fenómeno ICU	27
2.3	La vegetación en la ciudad y sus beneficios en el confort térmico urbano.....	29
2.3.1	Factores que definen y determinan los espacios verdes en una dimensión local en la ciudad	32
2.3.2	Influencia de la vegetación urbana sobre la temperatura y humedad del aire	34
2.4	Medidas de planificación y mitigación de las Islas de Calor Urbana en el AMC	34
3.	METODOLOGÍA	36
3.1	Descripción y delimitación del área de interés	37
3.1.1	Zonas para el estudio a escala local.....	37
3.2	Datos y programas utilizados para la identificación de la isla de calor y la temperatura superficial.....	42
3.2.1	Procesamiento de imágenes	42
3.2.2	Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ..	42
3.2.3	Método de interpolación espacial	44
3.3	Modelación de temperatura superficial con vegetación actual y simulaciones de incremento en ENVI-met	45
3.3.1	Caracterización del sistema de referencia espacial	52
3.3.2	Ingreso de variables climáticas.....	53
3.3.3	Configuración del dominio, tipo y ejecución de modelos.....	54
3.3.4	Contraste con sensores de temperatura <i>in situ</i>	55

4.	RESULTADOS.....	56
4.1	Isla de calor y su relación con la vegetación urbana	56
4.1.1	Distribución de la temperatura superficial en Concepción	59
4.1.2	Distribución de la vegetación y su relación con las temperaturas superficiales.....	61
4.2	Distribución de la temperatura superficial en base a modelación en ENVI-met	66
4.2.1	Temperatura superficial actual y potencial en sector Víctor Lamas con Rengo	66
4.2.2	Temperatura superficial actual y potencial en sector Víctor Lamas con Salas	70
4.2.3	Temperatura superficial actual y potencial en población Aurora de Chile	74
4.2.4	Temperatura superficial actual y potencial en calle Arturo Prat con Av. los Carrera.....	78
4.3	Datos de sensores e interpolación espacial	82
5.	DISCUSIÓN	87
5.1	Aportes al conocimiento e investigación	91
5.2	Limitaciones.....	92
6.	CONCLUSIÓN	94
7.	BIBLIOGRAFÍA	96



Índice de Figuras

Figura 1.	Esquema de la Isla de Calor	25
Figura 2.	Mapa de ubicación del área de estudio	39
Figura 3.	Ubicación de sensores en sector Parque Ecuador.....	45
Figura 4.	Ventana de herramienta Manage Projects and Workspaces con opciones de configuración a ser completadas para la generación de nuevo proyecto	47
Figura 5.	Ventana de funciones del programa ENVI-met.	47
Figura 6.	Ventana de crear o cambiar la configuración de ubicación/tamaño/orientación del modelo	48
Figura 7.	Ventana ENVI-guide con las opciones de configuración a ser completadas y el resumen de los factores seleccionados	49
Figura 8.	Ejecución de la simulación numérica en ENVI-met 4.4.6.	51
Figura 9.	Visualización 2D del modelo de arborización en subherramienta Leonardo	52
Figura 10.	Resultados de las temperaturas máximas de los años 2017-2021	58

Figura 11. Variación de las superficies de Cobertura y Uso de Suelo en hectáreas, datos del año 2017 y 2021 de clasificación NDVI	62
Figura 12. Índices NDVI de los años 2017 y 2021 del centro de Concepción	64
Figura 13. Características de escenario base visualizada en GEP y ENVI-met 4.4.6 del sector Víctor Lamas con Rengo	67
Figura 14. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.	68
Figura 15. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en sector Víctor Lamas con Rengo	69
Figura 16. Características de escenario base visualizada en GEP Y ENVI-met 4.4.6 en Víctor Lamas con Salas	71
Figura 17. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.	72
Figura 18. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en Víctor Lamas con Salas....	73
Figura 19. Características de escenario base visualizada en GEP Y ENVI-met 4.4.6 en Aurora de Chile	75
Figura 20. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.	76
Figura 21. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en Aurora de Chile	77
Figura 22. Características de escenario base visualizada en GEP Y ENVI-met 4.4.6 en calle Arturo Prat y Av. los Carrera	79
Figura 23. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.	80
Figura 24. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en calle Arturo Prat y Av. los Carrera	81
Figura 25. Interpolación de temperaturas promedio del día 28 de enero de 2017 en sector Parque Ecuador	85
Figura 26. Gráfica de resultados de temperatura y humedad relativa en el monitoreo del sensor 4 en Parque Ecuador	86

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de las islas de calor urbanas de superficie y atmosféricas	26
Tabla 2. Descripción de las zonas seleccionadas en la ciudad de Concepción	40
Tabla 3. Expresión matemática en Landsat 8	43
Tabla 4. Rangos NDVI	43
Tabla 5. Parámetros de entrada para la simulación en ENVI-met	54
Tabla 6. Cantidad de especies con relación a su escenario base	55

Tabla 7. Identificación de coberturas en el centro de Concepción.....	61
Tabla 8. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14:00 hrs. 28 de enero, 2017.....	70
Tabla 9. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14:00 hrs. 28 de enero, 2017.....	73
Tabla 10. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14:00 hrs. 28 de enero, 2017.....	78
Tabla 11. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14.00 hrs. 28 de enero, 2017.....	82



RESUMEN

La problemática socioambiental y climática de las ciudades ha generado el desarrollo de productos que permiten simular los efectos y consecuencias del crecimiento urbano. Es de conocimiento general el impacto que sobrellevan las ciudades a causa de las condiciones ambientales, uno de ellos el fenómeno de isla de calor urbana (ICU) producida principalmente por la falta de vegetación y la organización de los elementos estructurales de la ciudad. Se combinaron procesos de teledetección remota y análisis de vegetación para un estudio geoespacial. Además, con el objetivo de determinar y comparar los beneficios del incremento de la vegetación urbana en la regulación de temperaturas a una escala local, fueron analizados 16 escenarios en 4 áreas distintas de Concepción, en la cual se modifican sus porcentajes de vegetación y se simula la temperatura potencial del aire en el ambiente urbano para demostrar la existencia de diferencias térmicas ante la presencia de una mayor arborización con respecto a un caso base. Los escenarios fueron simulados con un modelo de alta resolución microclimática; ENVI-met. Ante la situación planteada y entre los escenarios arbolados y no arbolados, los resultados revelaron que existe una diferencia de temperatura de 0,5°C en el área con mayor porcentaje de vegetación, mientras que el área con menor vegetación se encontró con una diferencia de 1°C, demostrando de esta forma que el incremento de vegetación mejora el comportamiento térmico de la ciudad, por lo cual se le reconoce como un servicio ecosistémico que contribuye ante los efectos negativos derivados del cambio climático.

Palabras clave: espacios verdes, isla de calor, ENVI-met, simulación, NDVI

ABSTRACT

The environmental and climatic problems of cities have generated the development of products that allow simulating the effects and consequences of urban growth. The impact that cities bear due to environmental conditions is generally known, one of them the phenomenon of urban heat island (IHU) produced or increased mainly by the lack of vegetation and the organization of the structural elements of the city. Remote sensing and vegetation analysis (NDVI) processes were combined for more accurate spatial analysis. In order to determine and compare the benefits that the increase in green infrastructure brings with it for the regulation of temperatures at a local scale, 16 scenarios were analyzed in 4 different areas of the city of Concepción, in which their percentages of vegetation are modified. and the potential air temperature in the urban environment is simulated to demonstrate the existence of thermal differences in the presence of greater arborization with respect to a base case. The scenarios were simulated with a high resolution microclimatic model; ENVI-met. Given the situation, the results indicate that there is a temperature difference of 0.5°C between wooded and non-wooded places in the area with the highest percentage of vegetation, while the area with less vegetation was found with a difference of 1°C, thus demonstrating that the increase in vegetation improves the thermal behavior of the city, thus reducing the air temperatures of the neighborhoods.

Keywords: green spaces, urban vegetation, urban heat island, ENVI-met, NDVI

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático y los efectos crecientes de la urbanización están suponiendo una serie de amenazas acerca de los comportamientos climáticos urbanos que se reflejan en perturbaciones térmicas en las ciudades. Bajo esto, las ciudades y áreas periféricas consumen una gran parte del suministro energético a nivel mundial y son responsables del 80% de las emisiones de Gases de Efectos Invernadero (GEI). Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y probablemente esta cifra aumente a más de dos tercios para 2030 (ONU-Habitat, 2019). La atmósfera urbana presenta rasgos claramente diferenciados del resto del territorio, especialmente por lo que respecta a las temperaturas y la composición del aire: las primeras, se modifican debido a todos los procesos energéticos que se producen en el interior de la ciudad y que comprenden los flujos de radiación, asociados al calor latente y sensible, así como los flujos de calor almacenado en el suelo, los edificios y el generado por el hombre y sus actividades; por otro lado, la composición del aire se modifica debido a las emisiones de contaminantes procedentes de los focos de calor domésticos, industriales y al tráfico rodado (Fernández, 2009).

La transformación del espacio natural sobre el que se asienta la ciudad ha ido extendiéndose a raíz de procesos e impactos por sobre todo económicos que han generado un aumento en la expansión urbana y un acelerado crecimiento de su población. La alteración del medio urbano sobre el territorio ha dado como resultado una serie de cambios radicales en las estructuras del uso del suelo (Weber y Puissant 2003; Li et al., 2013; Xu et al., 2015), destrucción de los ecosistemas naturales (Tao et al., 2013; Linard et al., 2013), cambio de microclimas superficiales

(Romero et al., 2006), entre otros. La modificación del clima analizada a escala local requiere un mayor detalle y fineza en su análisis, Bertrand (1972) declara que el análisis local o geofacie¹ cubre superficies de algunos miles de km², dando pie al estudio de fenómenos como la Isla de Calor Urbana (ICU) la cual se define como el “exceso de calor generado en un ambiente urbano por efecto de la acción antrópica” (Capelli de Steffens et al., 1997) en contraste con su periferia. Por lo general, la isla de calor urbana se incrementa en verano (Klysiak y Fortuniak, 1999; Morris et al., 2001), y su intensidad resulta superior durante la noche (Unwin, 1980; Schmidlin, 1989; Jauregui, 1997). Algunos autores indican que es más intensa en verano (Eliasson, 1994; Klysiak y Fortuniak, 1999; Kolokotroni y Giridharan, 2008), y otros en invierno (Moreno, 1994; Montavez et al., 2000; Liu et al., 2007) e incluso en otoño (Alonso et al., 2003). También existen autores que señalan bi-estacionalidad de la máxima intensidad de la ICU: estaciones de otoño y verano (Yagüe et al., 1991; Gedzelman et al., 2003) y otoño e invierno (Kim y Baik, 2002). Esto demuestra que los resultados dependerán y están principalmente conectados con las condiciones que presente la localización geográfica del lugar de estudio.

Cada vez son más los estudios e investigaciones que abordan el problema de la Isla de Calor Urbana alrededor del mundo, en estos se puede observar el clima como el más impactado por este fenómeno. Tal es el ejemplo del estudio de Arellano y Roca (2018) en la ciudad de Sant Cugat Vallès, provincia de Barcelona, en el cual se demuestra la relación que existe entre el comportamiento climático y el tipo de

¹ Término utilizado para la división y clasificación del espacio geográfico en función de su componente escalar.

diseño de los espacios públicos y espacios verdes, ofreciendo un mejor rendimiento térmico en sectores con un área menor construida, mayor proporción de espacios públicos y abiertos y un mayor porcentaje de superficie permeable. Otras investigaciones también establecen otros efectos a causa de las ICU en la ciudad, tal como lo expone Corrales y Brenes (2019), en el que exhiben un aumento en los efectos sobre la salud debido al aumento en las temperaturas promedio (Huang et al., 2011) presentando de esta forma a poblaciones vulnerables a una morbilidad adicional relacionada con el calor, incluido el estrés por calor, las enfermedades cardiovasculares y enfermedades renales. Las condiciones ambientales modificadas también influyen en el nivel socioeconómico de la población, pues de acuerdo con lo analizado por Romero et al. (2010) en distintas zonas de Santiago de Chile, los sectores residenciales con mayores ingresos presentan temperaturas menores, pues cuentan con una densidad de vivienda más baja y, por consecuencia, los espacios verdes existentes son más numerosos; caso contrario sucede con las áreas con una densidad alta que presentan temperaturas más elevadas (Flores et al., 2018).

Varios de los aportes investigativos relacionados con la mitigación o reducción del efecto de la ICU son los espacios verdes, ya que una de las formas de contrarrestar los efectos que producen las ICU tienen que ver con la presencia de la vegetación urbana, la cual posee un rol muy importante en el clima de la ciudad, debido a su superficie permeable, pues posee la capacidad de absorber energía radiante a través de la transpiración, el área donde se encuentran es más fría y húmeda que sus alrededores (OIKOS, 2019), permitiendo procesos tales como la precipitación y

evapotranspiración que generan un efecto más fresco dentro del espacio verde y su alrededor, generando de esta forma una Isla de Frescor Urbano (IFU), que radica en un efecto de enfriamiento en dicha área por la presencia o cercanía de espacios verdes. Por todo esto, la regulación de la temperatura es uno de los servicios ecosistémicos más relevantes que proveen las coberturas vegetales urbanas (McPhearson, 2011). La presencia de estas superficies es esencial para la mitigación y regulación de estas islas de calor, tal como señala Yuan y Bauer (2007) y la importancia de la composición de los grandes espacios verdes, los cuales aparecen como zonas relativamente frías en comparación con las superficies construidas de su entorno. Es destacable la función que tienen estos espacios como ecosistemas, ya que inciden de forma positiva en el ambiente, el bienestar humano y la economía urbana (Rente, Krishnamurthy, & Juhani, 1997). Por este motivo, existe la necesidad de formular nuevas políticas que permitan un desarrollo sostenible que, en conjunto a diversos factores, prioricen los espacios verdes como un elemento esencial para la calidad de vida de las personas y el control y mitigación que efectúan ante los efectos del cambio climático, “destacando la necesidad de definir estándares para proyectos de infraestructura verde en parques urbanos y revalorizar el espacio público con vegetación urbana” tal como expuso el Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación (MICITEC) en las actividades del Comité Científico COP25.

Es así, que el crecimiento latente de las ciudades amplía las áreas urbanas, reemplazando funciones y servicios ambientales generados por los paisajes de coberturas naturales y seminaturales preexistentes, lo que genera modificaciones

importantes en los ecosistemas, en ocasiones irreversibles (Smith y Romero, 2009). Es por esto, que la finalidad de esta investigación parte por evaluar los efectos de la vegetación urbana en la mitigación a escala local en la ciudad de Concepción, a través de comparaciones entre un escenario base y escenarios simulados.

1.1 Planteamiento del problema

América Latina ha experimentado un proceso de urbanización tan rápido que ha sido calificado de explosión urbana, y como resultado es hoy la región en desarrollo más urbanizada del mundo. Su población total ha sido estimada en 623 millones de personas, de las cuales un porcentaje de 79,5% habita en zonas urbanas (CEPAL, 2017). En Chile ocurre una situación similar a la escala continental. Según cifras del último Censo de Población y Vivienda de 2017 el 87,8% se encuentra viviendo en zonas urbanas (INE, 2017) siendo el Área Metropolitana de Concepción (AMC) una de las más urbanizadas del país después de Santiago de Chile.

Las transformaciones del uso de suelo han provocado la impermeabilización de este bajo la pavimentación y asfalto, impidiendo procesos que detalla Romero (2017), especifica que “las construcciones se realizan destruyendo las cubiertas verdes (agrícolas, forestales o naturales), lo que elimina el efecto de sombra y especialmente el consumo de calor por parte de la cubierta vegetal, que procede mediante el proceso de evapotranspiración, es decir, que las plantas y árboles sustraen desde la atmósfera para transferir el agua del suelo, captada por sus raíces, hacia las capas de aire que las rodean”. Es así como, a través del tiempo, las cubiertas verdes han sido reemplazadas por la actividad inmobiliaria en la ciudad, perdiendo consigo una gran cantidad de espacios verdes. Los edificios,

calzadas y cubierta vegetal presentan un comportamiento desigual con respecto a la insolación, determinando así una diferenciación espacial en las pérdidas y ganancias de calor (Capelli de Steffens et al., 1986). Esto ha generado que la temperatura del aire en la ciudad se vea alterada al igual que la circulación de los vientos, siendo este último importante por ser un condicionante para el bienestar térmico de los espacios urbanos. A esto, se agrega un incremento del consumo energético debido a la alta demanda de refrigeración que ocurre principalmente en los edificios de la ciudad y que aportan a la intensidad de las ICU, produciéndose variaciones en las temperaturas que al mismo tiempo influyen negativamente en la calidad de vida de las personas ya que la temperatura del aire en las ciudades, respecto al entorno rural, puede elevarse entre 2 a 8°C (Oke, 1987). Es por esto necesario entender la importancia de una alta presencia de espacios verdes en la ciudad, ya que, el efecto de Isla de Calor Urbana generalmente ocurre durante el día, cuando las superficies impermeables urbanas absorben más luz solar que las áreas vegetadas circundantes. Los árboles, los pastos y otra vegetación naturalmente enfrían el aire como un subproducto de la fotosíntesis, según Corrales y Brenes, (2019). Los espacios verdes ayudan a mejorar la calidad del aire asimilando un importante porcentaje de CO₂, generando oxígeno, permiten regular la temperatura ambiental y contribuyen a evitar la erosión de los suelos; además son un elemento ornamental que proporciona goce visual y por ende una mejor calidad de vida (Rodríguez, 2002). En los climas templados como el mediterráneo, el efecto de las olas de calor, la sequía, y las lluvias torrenciales, tienen un impacto muy importante, especialmente en los periodos de verano, afectando las condiciones de habitabilidad de las ciudades y la salud de sus ocupantes. Por esta

razón, tanto los nuevos desarrollos urbanos como las actuaciones de rehabilitación urbana están llamado a incorporar mecanismos capaces de mantener las condiciones de confort y seguridad por medio de la recuperación del equilibrio con su entorno natural (Saiz, 2015).

Cabe destacar que la presencia de superficies verdes como también la presencia de espejos de agua son parte fundamental para mitigar la presencia de estas islas de calor, más aún cuando las recomendaciones realizadas por la OMS, para construir ciudades saludables apuntan a que debe existir una buena disponibilidad, accesibilidad, calidad y seguridad de estas. Las características de los espacios verdes urbanos asociados a los beneficios para la salud según datos de la OMS tienen que ver con el acceso a grandes espacios públicos abiertos y la asociación con el aumento de la caminata recreativa (Sugiyama et al., 2010). Se revela que atributos como la seguridad, mantenimiento y proximidad al hogar de un espacio verde, son también importantes para apoyar la actividad física al aire libre (McCormack et al., 2010). Según Ahern (2011), uno de los principales atributos de la infraestructura verde es su multifuncionalidad, entendida como la capacidad de realizar varias funciones y brindar diversos beneficios en una misma área espacial. Los estudios sobre los espacios verdes y salud han utilizado una gran variedad de medidas e indicadores. Mediante una simulación por intermedio del programa ENVI-met, el cual permite tener un enfoque integral de los efectos que producen los espacios abiertos vegetados (Stocco, S., Cantón, A., Correa, E., 2018) se pretenden evaluar posibles escenarios que modifican la configuración morfológica y material con respecto a un caso base, generando de esta forma conocimiento en torno al

comportamiento térmico y ambiental a partir del incremento de vegetación a través de un arbolado en espacios tanto públicos como residenciales, las cuales a futuro podrían ser incorporadas al planeamiento urbano, permitiendo a diseñadores y planificadores contar con información para la toma de decisiones, mejorando las condiciones del microclima urbano del centro de Concepción.

1.2 Hipótesis

Considerando que: a) la cantidad y el tipo de vegetación juegan un papel importante en la forma en que la urbanización cambia la temperatura (Corrales y Brenes, 2019 y que; b) el aumento de áreas arboladas reduce el impacto ambiental que genera el proceso de urbanización regulando la temperatura, conservando energía, agua y mejorando la calidad del aire (Wong y Yu, 2005; Capelli de Steffens *et al.*, 2005), es que los espacios verdes son cada vez mas importantes como espacios de regulación ante el aumento de las temperaturas superficiales del aire y las altas tasas de urbanización que presenta la ciudad.

Por lo tanto, la investigación intenta demostrar que el aumento de la vegetación urbana incide en los efectos del fenómeno de isla de calor, y que factores como cantidad, distribución y diseño del espacio público determinan el grado de enfriamiento, influyendo al mismo tiempo en el bienestar social de la población.

1.3 Objetivo General

Analizar los efectos de la vegetación urbana en la mitigación de la temperatura a escala local en la ciudad de Concepción, a través de una comparación entre un escenario actual y escenarios simulados.

1.4 Objetivos Específicos

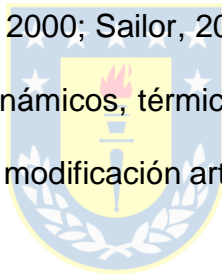
1. Espacializar el fenómeno de Isla de Calor Urbana en Concepción y describir el impacto de la presencia o ausencia de vegetación.
2. Caracterizar localmente el comportamiento de las temperaturas del aire para el año 2017 a través de parámetros meteorológicos y sistemas de información geográfica (SIG).
3. Evaluar las capacidades de simulación microclimática del programa ENVI-met 4.4.6 respecto al efecto de condiciones urbanas actuales y escenarios simulados de incremento en la vegetación sobre la temperatura local, permitiendo reportar la importancia de la vegetación urbana para mitigar la isla de calor.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Clima urbano y su relación con la urbanización

Urge la necesidad de capacidad de adaptación ante los efectos del cambio climático. Si bien el problema de cambio climático es global, las raíces son eminentemente locales, al intervenir diferentes elementos que constituyen el medio ambiente urbano, que se explican como un conjunto numeroso de relaciones entre

componentes naturales y sociales que se establecen al interior de las ciudades (Romero et al., 2010). El ejemplo más drástico de este proceso es la urbanización, la cual consiste en transformar y reemplazar los ecosistemas naturales por elementos artificiales como edificaciones y vías (Foley et al., 2005; Ellis y Ramankutty, 2008). Estas transformaciones, sumadas a las elevadas densidades poblacionales, generan unas condiciones ambientales particulares que afectan la calidad de vida de los habitantes urbanos (Patz et al., 2005; Basara et al., 2010). Otros autores destacan también la relación entre el incremento de áreas urbanizadas y la disminución de la humedad del suelo, con la consiguiente repercusión en el balance de radiación e intensidad del microclima urbano (Park, 1986; Unger, 1996; Carlson et al. 2000; Sailor, 2002). La urbanización provoca una alteración de los procesos aerodinámicos, térmicos e hidrográficos que ocurren en la atmósfera local generando una modificación artificial del clima, denominado clima urbano (Lombardo, 1997).



El clima urbano es el cambio local del clima regional que generan las ciudades y se define en términos de comparación con su entorno rural y es a partir de las diferencias que se registran con este que podemos caracterizar el comportamiento de la ciudad, aunque cada ciudad conserve las condiciones climáticas características de la región en la que se asiente. Sin embargo, en una misma ciudad encontramos una gran diversidad de matices (Tumini, 2012). Eso es consecuencia de la heterogeneidad en la morfología y estructuras de los espacios construidos, que nos lleva a un análisis a escala local que corresponden a pequeños espacios y edificios (Cárdenas, 2010).

2.1.1 Desarrollo de la superficie urbana en el Área Metropolitana de Concepción

Resulta evidente que en las últimas décadas se han producido cambios significativos en los esquemas de asentamiento de la población en el planeta. Lo que primero se advierte es que se trata de un fenómeno general, por lo que es mundial y por otra parte observamos que es un proceso bastante acelerado, explosivo, muchas veces incontrolado y que al sostenerse en el tiempo termina por constituirse en un gigantismo urbano generando megaciudades (Ramírez y Pertile, 2013).

El proceso de urbanización se encuentra actualmente en pleno desarrollo en el Área Metropolitana de Concepción (AMC), donde el crecimiento de la ciudad que la conforma ha ido reemplazando, cada vez en mayor medida, las funciones y servicios ambientales prestados por los paisajes formados por coberturas naturales y seminaturales preexistentes, provocando modificaciones que en algunos casos son irreversibles para los ecosistemas que las experimentan (Smith y Romero, 2009). El desarrollo del AMC ha estado condicionado principalmente por los siguientes factores:

- a) Desarrollo de la industria: esto hizo que, en una primera etapa de metropolización, se trasladara gran parte de la población a los 121 centros urbanos, en procesos migratorios sucesivos, que transformaron sustancialmente la morfología urbana, pasando de núcleos dispersos y auto centrados y de estos a una gran área metropolitana con un núcleo conurbado (Concepción-Talcahuano) y anillos concéntricos de ciudades satélites.

- b) Elementos geográficos: el borde costero, que ha permitido la creación de puertos; el relieve, principalmente la presencia de la Cordillera de la Costa, que ha condicionado los asentamientos y privilegiado en este periodo la ocupación en los valles y sectores bajos; y la fuerte presencia del río Bío-Bío que divide esta área metropolitana.
- c) Estructura vial: trama sobre la cual se fue extendiendo la ciudad, con sus líneas ferroviarias y de tranvías y posteriormente todas las importantes autopistas y carreteras o “rutas”, generadoras de crecimiento urbano y actualmente de conurbación en todos los sentidos (Bustamante et al., 2009).

2.2 Fenómenos y efectos de la isla de calor urbana (ICU)

El término isla de calor urbana (ICU) apareció por primera vez en la literatura meteorológica en un estudio de Gordon Manley en 1958. Sin embargo, el primer descubrimiento de ICU puede nombrarse por Luke Howard en 1820, cuando reconoció la existencia de una diferencia térmica entre las noches y los días de Londres (Landsberg, 1981). Son numerosos los trabajos realizados sobre la isla de calor urbana, fundamentalmente en el hemisferio Norte (ej., Chandler, 1968; Munn, 1968, Oke and Hannel, 1968; Landsberg, 1981). Es importante destacar el aporte de T. R. Oke, ya que diseña los primeros modelos explicativos de la intensidad de las ICU basados en los tamaños poblacionales de las ciudades (Oke T. R., 1973). Señala que la actividad del hombre en la ciudad se manifiesta de manera consciente en el espacio, lo que se define como morfología urbana, y de manera inadvertida, a través de los efectos que se derivan del espacio construido sobre la ecología de paisajes, hidrología y clima urbano. Este fenómeno conocido como isla de calor es

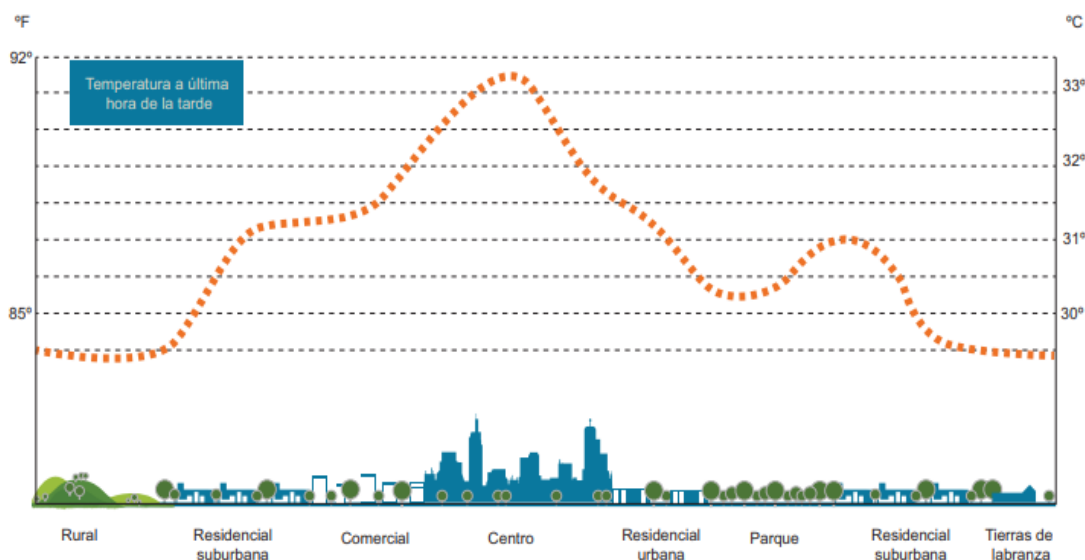
producto principalmente de las características de los materiales empleados para la construcción de las ciudades, los cuales no permiten la evapotranspiración y absorben y retienen mayores cantidades de calor que la vegetación y otras coberturas naturales (Grimmond, 2007; Rizwan et al., 2008). Respecto a la intensidad y la forma espacial de la isla de calor urbana, en cada ciudad se trata de un problema multifactorial que está íntimamente relacionada con sus controles superficiales y atmosféricos como lo son el tamaño, morfología, actividades al interior de la ciudad, densidad poblacional, etcétera, por lo que cada urbe determina su desarrollo de manera diferente; por ejemplo, los espacios verdes, como los parques, son superficies relativamente frías comparados con las áreas construidas de sus alrededores (Oke, 1995), mientras que la geometría urbana y las condiciones meteorológicas han revelado mayores intensidades con noches despejadas y viento en calma (Romero et al., 2008; Fung et al., 2009,). A su vez, la configuración espacial de las ciudades y la contaminación generada por las actividades antrópicas diarias, incrementan el consumo de energía invertida para el enfriamiento de edificaciones, la demanda de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto invernadero (Santamouris et al., 2015). Según Oke (1987) la manera de analizar el espacio atmosférico de las ciudades se estratifica en una composición vertical compuesta por 3 escalas que consisten en; la meso escala, la escala local y la escala de dosel urbano, conocida como Urban Canopy Layer (UCL) y que representa el estrato de circulación de las personas. Es en la meso escala y la escala local es donde se realizan los análisis y estudios de las islas de calor urbano.

2.2.1 Características de la isla de calor

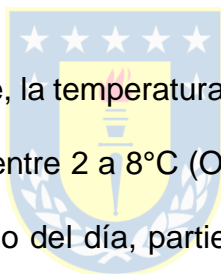
Según Gartland (2008) hay un conjunto de patrones que se suelen repetir en todas las ciudades donde se producen las islas de calor, los cuales de forma muy concisa y somera pueden resumirse en:

1. Se caracterizan por ser espacios con temperaturas más altas que sus entornos más próximos (ámbitos periurbanos con densidades más bajas), pero con distintos patrones de comportamiento según la parte del día que se considere. Normalmente, en la puesta de sol se alcanza las mayores diferencias térmicas.
2. La temperatura del aire suele estar condicionada por el calor de las superficies urbanas, es decir, por aquellos ámbitos de la ciudad donde los materiales empleados tienen valores de albedo inferiores a elementos naturales, es decir absorben más radiación que la que reflejan. Estas diferencias de temperatura se acentúan cuando las condiciones del tiempo son de vientos en calma y cielos despejados.
3. Cuanto mayor grado de desarrollo urbano y menor presencia de vegetación, mayor tamaño e intensidad de la isla de calor.
4. Este fenómeno suele generar la aparición de inversiones térmicas entorno a los 2 km de altitud sobre las ciudades, provocando la concentración de contaminantes e impidiendo su dispersión (Gálvez, 2013).

Figura 1. Esquema de la Isla de Calor



Fuente: Elaborado sobre la base de T. Oke y otros, "The energy balance of centro México City during the dry season", Atmospheric Environment, vol. 33, N° 24-25, Amsterdam, Elsevier, 1999.



Como se menciona anteriormente, la temperatura del aire en las ciudades, respecto al entorno rural, puede elevarse entre 2 a 8°C (Oke, 1987). La intensidad de la isla de calor aumenta en el transcurso del día, partiendo desde la salida del sol hasta un máximo que se registra unas pocas horas después de la puesta del sol y las horas previas a la madrugada. Generalmente durante las primeras horas del día la intensidad del calor urbano es bastante débil, y a veces negativa (es decir, puede que exista una isla de frescor) en algunas partes de la ciudad, como consecuencia de que los edificios altos proveen de sombras extensas, así como debido a los materiales de construcción (Peña, 2008; Voogt y Oke, 2003). 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 planificación urbana (Villanueva et al., 2013).

Los efectos de las islas de calor han sido estudiados desde los años 80 como en el caso de Brasil y China, en donde se ha demostrado que la existencia de estas intensifica el efecto de las olas de calor en el verano, lo que expone a las poblaciones locales a condiciones térmicas extremas (Ogashawara et al, 2012). La identificación de estas islas térmicas permite desarrollar medidas de adaptación en sitios puntuales de la ciudad (Córdova-Sáez, 2010), así mismo, se ha encontrado que la extensión de las islas de calor está altamente relacionada a factores económicos, vinculados con la pobreza, alta concentración demográfica y de zonas industriales (Ogashawara et al, 2012).

Tabla 1. Características de las islas de calor urbanas de superficie y atmosféricas

Características	Isla de calor urbana de superficie (ICUs)	Isla de calor urbana atmosférica (ICU)
Desarrollo Temporal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presente en el día como en la noche ▪ Mas intensa en los días de verano 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pequeña o inexistente durante el día ▪ Mas intensa en las noches de invierno
Condiciones para el Desarrollo de la Máxima Intensidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor variación espacio-temporal ▪ Día: 10 a 15°C ▪ Noche: 5 a 10°C 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escasa variación espacio-temporal ▪ Día: -1 a 3°C ▪ Noche: 7 a 12°C
Método típico para su Estudio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mediciones indirectas ▪ Sensores remotos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mediciones directas ▪ Estaciones meteorológicas fijas y transectos móviles
Representación Gráfica Típica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Imagen térmica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mapa de isotermas ▪ Imagen térmica

Fuente: Sarricolea & Romero, 2010 en base a EPA.

2.2.2 Impactos sociales atribuidos al fenómeno ICU

El aumento de la temperatura en los espacios urbanos ha generado efectos directos que repercuten tanto de modo positivo como el cotidiano de las personas: debido a

que el aumento en la intensidad de una ICU puede empeorar los impactos de las olas de calor cuando ambos fenómenos coinciden, estos pueden llegar a generar un aumento de molestias generales como el agotamiento, problemas respiratorios, insolación o calambres e incluso la mortalidad relacionada con el calor, afectando principalmente en la salud de niños y niñas junto a la población adulto mayor. La influencia de las altas temperaturas sobre la mortalidad es un hecho demostrado por numerosos estudios (García y Alberdi, 2004; Fischer et al., 2004). Tal es el caso que se registró en la ola de calor del verano del año 2003, donde se registraron más de 70.000 muertes extra en Europa según datos de la OMS.

Los impactos y riesgos de la ICU no se distribuyen uniformemente entre la población urbana. Ejemplo de ello es la ciudad Santiago de Chile, altamente segregada y desigual respecto de las condiciones socioeconómicas de los hogares, el acceso a servicios e infraestructura urbana y también del porcentaje de cobertura vegetal o zonas verdes. Respecto de esto último, estudios recientes indican que las comunas de mayores ingresos son las que poseen mayor superficie de áreas verdes por habitante, lo que no solo tiene impactos positivos en la configuración del paisaje y las oportunidades para realizar actividades al aire libre, sino que las áreas verdes ayudan también a regular la temperatura de las ciudades, limitando las islas de calor y reduciendo los efectos de esta, que se hacen cada vez más frecuentes en la zona central del país (Urquiza, 2017).

2.2.3 Impactos físicos y energéticos atribuidos al fenómeno ICU

Los gases de efecto invernadero (GEI) son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. En la atmósfera de la Tierra los principales GEI son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃). Hay además en la atmósfera una serie de GEI creados íntegramente por el ser humano como los halocarbonos, (IDEAM, 2014). Más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y probablemente esta cifra aumente a más de dos terceras partes para 2030. Las ciudades consumen una gran parte del suministro energético mundial y son responsables de aproximadamente el 70% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero derivadas de la energía, que absorben el calor y provocan el calentamiento de la Tierra (Habitat, 2019). Las temperaturas altas generan un aumento de los niveles de ozono; contaminantes del aire que agravan las enfermedades cardiovasculares y respiratorias (OMS, 2018); aumento de la demanda de energía para fines de refrigeración los cuales contribuyen al aumento de devolver mayores cantidades de GEI a la atmósfera, favoreciendo aún más al cambio climático (Santamouris et al., 2015). Las ciudades son las principales consumidoras de energía y las principales emisoras de gases contaminantes a la atmósfera. El transporte, la calefacción, la iluminación y los aparatos de aire acondicionado consumen más del 50% de la energía en ciudades como Nueva York, Londres y Tokio (UN-Habitat, 2008). Las previsiones apuntan a un aumento del consumo de electricidad para refrigeración en verano, al tiempo que disminuirá la demanda de calefacción en ciertas partes del globo. La magnitud de estos efectos

dependerá de la zona climática donde se ubique la ciudad, de las condiciones socioeconómicas y de otros factores difícilmente cuantificables, pero existe un amplio consenso en considerar que la demanda de energía es la categoría más afectada por el cambio climático en las ciudades (Fernández, 2009).

2.3 La vegetación en la ciudad y sus beneficios en el confort térmico urbano

Los espacios verdes son y han sido de gran importancia desde las primeras aglomeraciones de la civilización, ya sea para la regulación de la temperatura o mejorar la calidad del aire. Además, el desarrollo de redes coherentes de espacios verdes que proporcionan múltiples beneficios ecológicos, económicos y sociales permitirá mitigar el aumento del estrés por calor (Zölcha et al., 2016).

En este sentido, Stewart y Oke (2009) proponen áreas homogéneas desde el punto de vista térmico y de diseño urbano, las cuales son, en parte, responsables de la distribución de las temperaturas urbanas. Actualmente, la Organización Mundial de la Salud, propone que las ciudades deban tener 9 m² de áreas verdes por habitante. Sin embargo, este parámetro no considera factores como la accesibilidad a ellas, ni su distribución entre los grupos socioeconómicos (Reyes y Figueroa, 2010), ni mucho menos las características geográficas de las ciudades para mantener las buenas condiciones de estas áreas verdes. El estándar de área verde que ha fijado el Consejo Nacional de Desarrollo (CNDU) por habitante es de 10 m² y alcanzar esta meta será un gran desafío para la política pública.

Por otra parte, la infraestructura verde urbana tiene por objetivo mejorar la capacidad de la naturaleza para generar bienes y servicios ecosistémicos en la

ciudad, siendo la biodiversidad un eje fundamental. Los beneficios otorgados permiten fomentar una mejor calidad de vida y bienestar humano, mejoran la biodiversidad, aumentan la protección contra los efectos del cambio climático y se despliega un enfoque integrado de desarrollo, que promueve un uso sustentable y planificado del territorio (Unión Europea, 2014).

La construcción de las nuevas urbes es una de las actividades que más ha contribuido a la pérdida y destrucción progresiva de los bosques y la vegetación arbórea nativa. Cada vez hay menos espacio en la ciudad para plantar árboles, éste se reduce a los separadores de las grandes avenidas, los jardines privados (en los casos en donde este espacio existe); los parques y el andén que separa las edificaciones de la vía; por estas razones en las ciudades se presenta un deterioro de las condiciones microclimáticas (Jiménez, 2008, p.50). La mayoría de los estudios de campo apoyan el argumento de que la falta de vegetación en la ciudad tendría como resultado una elevada temperatura del aire durante el día (Duarte et al., 2015), y se ha confirmado que dotar de vegetación a zonas urbanas densamente pobladas puede reducir el efecto de isla de calor producido por la concentración de los pavimentos y el concreto (ONU Hábitat, 2014). Es así como un aumento de áreas arboladas reduce el impacto ambiental que genera el proceso de urbanización regulando la temperatura, conservando energía, agua y mejorando la calidad del aire (Wong y Yu, 2005; Capelli de Steffens et al., 2005). Por ello, la vegetación está relacionada con la temperatura de superficie terrestre y la temperatura del aire ya que cuando se modifica la cobertura vegetal hay una reducción de la mitigación del calor solar (Dimoudi y Nikolopoulou, 2003; Oltra-Carrió et al., 2010). La temperatura del aire a nivel superficial, definida entre 1 y 2 m sobre la superficie del suelo, es

una magnitud clave a nivel climático y meteorológico y permite cuantificar los procesos de intercambio a nivel superficial (Kustas et al., 2003; Cristóbal et al., 2005; Sánchez et al., 2009). La temperatura del aire, en relación con la temperatura de la superficie del suelo, tiene un papel esencial en la escala del confort humano. Es la temperatura que perciben las personas, y en relación con la cual el intercambio de energía interactúa con el medio ambiente urbano (Arellano y Roca, 2018).

Según Voogt y Oke (2003) actualmente existen tres metodologías para el estudio de las variaciones térmicas en las ciudades:

- a) la medición con estaciones fijas, utilizadas normalmente para la comparación urbano – rural (Todhunter, 1996; Alonso García et al., 2004).
- b) el método de los transectos, con instrumentos/sensores térmicos sobre automóviles (Bello Fuentes, 1995).
- c) y la utilización de las bandas térmicas de las imágenes satelitales (Ferrer-Vidal y Solé-Sugrañes, 1995; Dan et al., 2010).

Las metodologías de transectos e imágenes satelitales son utilizadas para conocer la distribución espacial de las temperaturas al interior de las ciudades. La diferencia entre ellas es que la primera mide la temperatura del aire, mientras que las imágenes satelitales muestran las temperaturas de las superficies. A pesar de ello ambas han permitido la asociación de comportamientos térmicos a determinadas coberturas de suelo, principalmente el efecto regulador térmico de áreas verdes (Weng et al., 2004).

2.3.1 Factores que definen y determinan los espacios verdes en una dimensión local en la ciudad

En Chile existen variadas definiciones de lo que es un espacio verde. Es así, que la definición oficial del término se encuentra en el Artículo 1.1.2 de la Ordenanza General de la Ley de Urbanismo y Construcción (OGUC) que la define como “superficie de terreno destinada preferentemente al esparcimiento o circulación peatonal, conformada generalmente por especies vegetales y otros elementos complementarios”. La Política Regional de Áreas Verdes, Región Metropolitana, define espacio verde como “superficie abierta, natural o artificial, de dominio público o privado, donde la vegetación juega un rol importante. Está orientada al uso y goce colectivo, y protegida por los instrumentos de planificación territorial. Así mismo, genera beneficios sociales, ambientales, económicos y de ordenamiento territorial y puede cumplir diversas funciones dependiendo de su localización, tamaño, densidad vegetal, programa arquitectónico y objetivo para la que fue planificada. Se incluyen dentro de la categoría de espacio verde los parques, las plazas, las áreas deportivas, los cementerios parque, áreas residuales tratadas, rotondas, enlaces, bandejones, jardines públicos, bordes de río, áreas silvestres protegidas y, en definitiva, todo espacio con presencia de cobertura vegetal (Gobierno Regional Metropolitano de Santiago, 2012. p. 51). En gran medida la falta de precisión para definir un estándar relativamente confiable y de mayor aceptación en el campo del análisis ambiental y territorial se debe a que la condición y calificación de "área verde" encubre una gran variedad de situaciones no comparables, no sólo entre las diversas mediciones y estudios realizados sobre este

problema, sino que también entre las diferentes escalas (regional, intercomunal, comunal, vecinal) y unidades de planeamiento territorial entre sí (Gámez, 2005).

El tamaño y distribución de plazas, parques y áreas verdes tiene implicancias geográficas y sociales. Los espacios verdes de gran tamaño contribuyen más efectivamente a la regulación de las inundaciones ocasionadas por la acumulación de aguas lluvias, ya que mantienen una alta permeabilidad del suelo y su capacidad de infiltración (Sorensen et al., 1998). La cobertura vegetal en los parques situados en las laderas de los cerros contribuye a la retención del suelo y disminuye el riesgo de procesos de remoción en masa (Romero & Vásquez, 2005). La contribución de la vegetación a la regulación de la temperatura urbana ha sido demostrada en diversas ciudades (Sorensen et al., 1998; Jenerette et al., 2007), así como la capacidad de capturar partículas y renovar el aire (Hough, 1998; Hernández, 2007). Desde el punto de vista social, un mayor tamaño de los espacios verdes (y de los espacios públicos en general) permite la realización de diversas actividades y con ello facilita la presencia simultánea de distintos grupos (Tahvanainen et al., 2001; Chiesura, 2004; Mäkinen y Tyrväinen, 2008; Sugiyamay Ward-Thompson, 2008). Existe una relación directa entre el tamaño y área de servicio de los espacios verdes. Los espacios verdes de mayor tamaño pueden encontrarse en menor número y más alejadas, en cambio las plazas o pequeñas áreas que se encuentran al interior de los barrios debieran encontrarse a una distancia tal que se pueda acceder en un tiempo no superior a 10 o 15 minutos de caminata (Colesy, 2000; Handley et al., 2003).

2.3.2 Influencia de la vegetación urbana sobre la temperatura y humedad del aire

Los principales efectos reportados de la vegetación sobre la temperatura y la humedad son la reducción de la temperatura ambiente y el aumento en la humedad del aire (Oke T., 1988). Esto debido al efecto de sombra que producen los árboles de gran tamaño y el proceso de evapotranspiración (proceso de evaporación del agua que transpiran las plantas) que generan estas superficies vegetadas. Otra pequeña contribución se debe a la humedad del suelo. Sin embargo, en elementos vegetales aislados no es muy significativo, ya que desaparece rápidamente debido a los movimientos del aire, ya sea por viento o convección (Saiz, 2015). Un estudio similar se realizó en la ciudad de Sant Cugat, entre Parc Central y Coll Favà en donde el mejor comportamiento térmico se debió al diseño de los espacios públicos, en donde factores como la morfología y diseño, la selección de la vegetación y de los materiales tuvieron especial relevancia en la resiliencia al cambio climático y en la resistencia a los eventos de olas de calor (Arellano y Roca, 2018). Oke (1988) reportó en mediciones hechas en distintas ciudades, diferencias de temperatura ambiente de más de 5°C entre parques urbanos y las zonas edificadas circundantes.

2.4 Medidas de planificación y mitigación de las Islas de Calor Urbana en el AMC

La mayor parte de las dificultades asociadas a la implementación de áreas verdes derivan de problemas al nivel de la gestión y la planificación inicial de las iniciativas de inversión (estudios, programas y proyectos), momento en el cual es necesario tomar decisiones adecuadas desde el punto de vista económico, urbano, social y

ambiental. El que existan factores ambientales y urbanos que están influenciando los comportamientos térmicos de la ciudad constituyen antecedentes valiosos de considerar en su planificación y gestión ambiental y proporcionan argumentos que permitirían definir acuerdos, y formular e implementar políticas públicas urbanas que aseguren la sustentabilidad ambiental (Smith y Romero, 2016). Los desafíos y las oportunidades del cambio climático en el futuro, a largo, mediano y corto plazo, están reconocidos como elementos fundamentales en la planificación estratégica para el siglo XXI (Barton, 2006), y la forma de abarcarlos y planificar es a través de la mitigación y la adaptación.

Los instrumentos de planificación existentes en el país permiten la creación de espacios verdes y espacios públicos que puedan contribuir a la adopción del enfoque de infraestructura verde, sin embargo, ello está sujeto a las restricciones presupuestarias que enfrenta la mayor parte de la gestión local municipal. Esto queda reflejado por ejemplo en las urbes más grandes del país (Valparaíso, Santiago y Concepción), en dónde los patrones de segregación urbana son evidentes teniendo así una relación entre condición socioeconómica y morfología urbana, tamaños de predios, porcentaje de ocupación de suelos y superficie de áreas verdes (Reyes, 2015). Los espacios verdes, en específico las públicas, a las cuales tiene libre acceso la población, enfrentan una realidad de deficiencia en cantidad y calidad. Así lo expresan diferentes estudios relativos a las ciudades chilenas (Reyes y Figueroa, 2010; Reyes et al., 2012; Fundación Mi Parque, 2011; Dascal, 1993 y 1994). Los climas urbanos se corresponden, en general, con los rasgos del paisaje que caracterizan una estructura social heterogénea y segregada. Los esfuerzos que se puedan emprender para enfrentar los cambios climáticos en

las ciudades implican necesariamente intervenciones destinadas a mejorar la equidad social entre sus habitantes, que no pueden seguir estando ausentes de los procesos de planificación y adopción de decisiones bajo los conceptos de sustentabilidad ambiental que hoy son reclamados con insistencia (Romero et al., 2010).

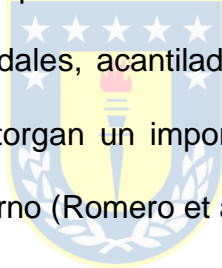
3. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación está basada en promover el uso de vegetación urbana como herramienta para mitigar las altas temperaturas que se originan en la ciudad producto de la creciente urbanización que supone una serie de amenazas microclimáticas. De la Barrera y Reyes (2021) presentan 4 mecanismos a través de los cuales la infraestructura verde (parques urbanos, cubierta de árboles, techos y sistemas verdes verticales) permite mitigar el calor y ayudar a decrecer las temperaturas mediante el enfriamiento por evapotranspiración, regulación de la velocidad del viento, entre otros. Este estudio pretende evidenciar uno de los cuatro mecanismos, el cual consiste en la cubierta arbolada que a través de una simulación en ENVI-met representan los efectos en la ciudad y las consecuencias en las temperaturas del aire.

El proceso metodológico incluyó 3 etapas: 1) descripción y delimitación del área de interés; 2) datos y programas utilizados para la identificación de la isla de calor y la temperatura superficial; 3) modelación de temperatura superficial con vegetación actual y simulaciones de incremento en ENVI-met.

3.1 Descripción y delimitación del área de interés

La ciudad de Concepción (-36,8° y -73,1°) es parte de las 10 comunas que conforman el Gran Concepción, su población está compuesta por 223.574 habitantes según datos del censo del año 2017 y posee una variación del 3,3% en comparación al censo del año 2002. Presenta a nivel comunal, una superficie de 221,6 km². Su clima se destaca por ser mediterráneo y se caracteriza por estaciones marcadas, donde el invierno es templado cálido con lluvias invernales y el verano es cálido y seco. La morfología urbana del Gran Concepción se ha caracterizado por una ocupación dispersa de su territorio, el área de emplazamiento del Gran Concepción se caracteriza por la presencia de la cordillera de Nahuelbuta, el río Bío-Bío, el borde costero, humedales, acantilados, lagunas y cerros islas. Estas características del territorio le otorgan un importante grado de complejidad a la relación entre la ciudad y su entorno (Romero et al., 2006).



3.1.1 Zonas para el estudio a escala local

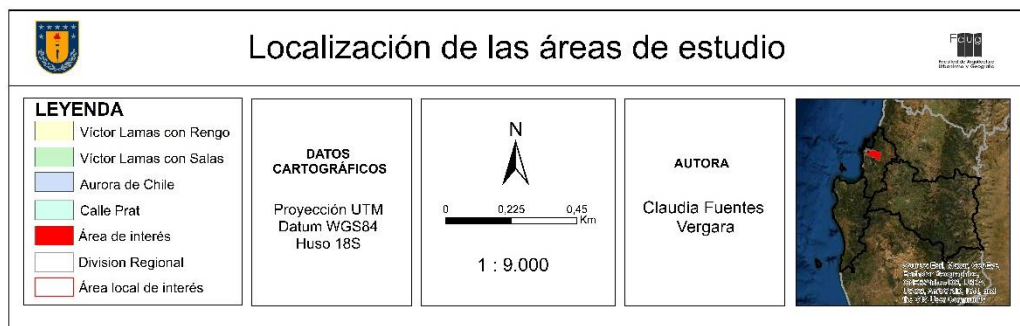
Se consideró realizar un estudio a una escala menor que comprendiese sectores cercanos al Parque Ecuador, considerado pulmón verde de la ciudad. Estos se presentan en la Figura 2 y son:

- 1) Víctor Lamas con Rengo
- 2) Víctor Lamas con Serrano
- 3) Nueva Aurora
- 4) Arturo Prat con Av. Los Carrera

Estas zonas ofrecen diferentes posibilidades debido a su variedad de elementos, como la cercanía o lejanía que poseen al centro de la ciudad, distancia a ejes viales principales y densidad de áreas verdes que poseen a su alrededor. El monitoreo térmico se llevó a cabo en la temporada de verano. Los datos utilizados corresponden al día 28 de enero de 2017. Se instalaron 8 sensores de estación fija en distintos puntos cercanos a Parque Ecuador, siendo el sensor N°4 el más cercano a una de las áreas de interés, donde se recogieron variables de temperatura (Ta) y humedad relativa (HR) del aire cada dos minutos. Se registraron temperaturas máximas de 26,5°C y mínimas de 15,6°C por parte de este sensor.



Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Para la selección del área de estudio, se adoptaron los siguientes criterios: a) que algunas zonas estén establecidas en elevadas temperaturas del suelo (Sandoval, 2014) y b) que posean un área aproximada de 0,8 ha y un mínimo de 50 metros, ya

que, según Kurbán y Cúnsulo (2015), estas son las medidas mínimas sugeridas para que puedan modificarse las condiciones higrotérmicas del entorno urbano (Salas y Herrera, 2017). Se realizó una observación directa de las áreas a estudiar por medio de la cual se zonificó a partir de criterios tales como las condiciones de vegetación y morfología urbana; especies arbóreas, herbáceas, los tipos de material que cubren el suelo y altura de edificaciones (Tabla 2). Se seleccionaron 4 zonas que entran en las categorías de espacio verde, área medianamente intervenida y área totalmente intervenida.

Tabla 2. Descripción de las zonas seleccionadas en la ciudad de Concepción

Zona	Descripción
Víctor Lamas con Rengo	<p>Av. Chacabuco consta de 5 edificios y casas construidas principalmente de concreto. Son fachadas sin balcón que no cuentan con ningún área verde. Gran cantidad de árboles urbanos de gran altura en esta avenida. 2 dos áreas de estacionamiento.</p> <p>Calle Rengo se ubica el colegio Republica de Brasil, dos edificios de más de 5 pisos en el cual solo uno predomina con fachada verde. Casas y comercios de 2 pisos son lo que caracteriza esta calle. Posee una gran superficie de concreto en sus calles.</p> <p>Lincoyán un edificio de 10 pisos, el resto son casas y negocios de dos pisos con una construcción de concreto principalmente. Casas con patio en el que predominan áreas verdes. Existen arboles urbanos de gran altura. Posee una gran superficie de concreto en sus calles.</p> <p>Víctor Lamas variedad de construcciones que no superan los 4 pisos, en donde predomina una gran cantidad de infraestructura verde.</p>
Víctor Lamas con Salas	<p>Víctor Lamas presencia de una automotora y un par de casas que poseen antejardín y que cuentan con infraestructura verde.</p> <p>Calle Serrano las construcciones consisten en un supermercado y un banco. Todo de concreto.</p> <p>Av. Chacabuco se encuentran dos edificios de gran altura junto a un estacionamiento perteneciente al supermercado.</p> <p>Calle Salas edificio de gran altura, un pequeño estacionamiento y unas cuantas casas de 1-2 pisos.</p>
Aurora de Chile	<p>16 edificios y 6 manzanas con casas en una superficie de 3 hectáreas. Alto déficit de infraestructura verde. La infraestructura verde se conforma mayormente de especies herbáceas.</p>
Calle Arturo Prat con Av. los Carrera	<p>Una manzana completa se encuentra ocupada por un supermercado y a su lado se encuentra un sector compuesto por altos edificios y un terreno baldío.</p>

Fuente: elaboración propia.

Para ver que estrategias resultan más efectivas en la disminución de las temperaturas urbanas en diferentes contextos, se seleccionaron diferentes tipologías urbanas en la que se incluyen porcentaje y densidad de vegetación, tamaño y ubicación. El área de Z1 (-36,8°, -73,1°) y Z2 (-36,8°, -73,1°) con 2,6 y 1,7 hectáreas cada una, son áreas similares que cuentan con una ocupación horizontal de media densidad catalogada de uso residencial. Ambas poseen un alto porcentaje de vegetación, en la que predominan especies arbóreas de gran altura tanto urbano como residencial. La materialidad de los techos varía entre metálicos, oscuros y rojizos. Se destaca una alta superficie destinada a estacionamientos. Por otra parte, Z3 (-36,8°, -73,1°) tiene 3 ha y se destaca por poseer una ocupación horizontal de alta densidad clasificada como residencial. En esta área el porcentaje de vegetación es mínima y las superficies de pavimento y estacionamientos recalcan en el paisaje. Por último, Z4 (-36,8°, -73,1°) posee 4 ha y una ocupación media mixta residencial y comercial, donde la cantidad de vegetación es mínima, en el que predominan un par de especies arbóreas de baja altura. En este caso, se encuentra un área comercial de gran tamaño que se expresa con un techo de material oscuro, caso opuesto de los edificios cercanos a este, que cuentan con techos de material claro. El trazado de calles y su materialidad se compone principalmente de asfalto y tierra desnuda.

3.2 Datos y programas utilizados para la identificación de la isla de calor y la temperatura superficial

3.2.1 Procesamiento de imágenes

Mediante las tecnologías de teledetección, el procesamiento de las imágenes satelitales se realizó mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE) la cual entrega acceso libre a datos Landsat, en este caso *Landsat 8 Tier 1 and real time data Raw Scenes* del año 2017 y 2021 en periodo estival, evaluando las temperaturas máximas de la ciudad a través de la temperatura superficial terrestre (TST).

El cálculo de la reflectancia TOA de los años 2017 y 2021 se realizó a través del Google Earth Engine que cuenta con un espacio de trabajo (*Code Editor*) en el cual se puede ir agregando tantos datos (Landsat 5, 7 y 8) como cálculos (TOA). Así mismo, se eligió un tipo de visualización a tres bandas RGB (SWIR, NIR y R), y seguidamente se procedió a descargar los mosaicos en formato ráster (GeoTiff) (Palacios et al., 2019) bajo la herramienta *Task*.

3.2.2 Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

Se aplica en ArcGIS 10.4.1 la ecuación para realizar el cálculo del NDVI con el objetivo de cuantificar la vegetación presente en los años de interés. Este índice es un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia de dos partes del espectro electromagnético. Es utilizado para determinar la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación (Trujillo, 2012). Las imágenes satelitales se obtuvieron gratuitamente a través de la plataforma del Servicio Geológico de los Estados

Unidos (USGS)² a través del sensor Landsat OLI 8. El cálculo NDVI involucra el uso de una fórmula bajo la combinación de dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED).

Tabla 3. Expresión matemática en Landsat 8

$$NDVI = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}$$

Fuente: elaboración propia.

Se llevó a cabo una reclasificación con rangos según el método de Agüero (2014) el cual permitió una representación de ciertas superficies en el territorio. Para la investigación se cuenta con 5 rangos, los dos primeros se representan por cubiertas superficiales e impermeables, mientras que los rangos con valores entre 0,2 y 1 se conforman por cubiertas vegetales que se representan principalmente a través de especies herbáceas y arbóreas. La ecuación arroja como resultado valores entre -1 y 1. Los valores cercanos a 1 indican vegetación sana, aquellas por encima de 0 representan tierra o vegetación con muy baja capacidad fotosintética y los valores por debajo de cero y muy cercanos a -1 representan cuerpos que no tienen la capacidad de reflejar la onda cercana al infrarrojo y al mismo tiempo absorber la luz roja, lo que significa ausencia de vegetación (Cifuentes, 2017).

Tabla 4. Rangos NDVI

Valor de Rango	Descripción
0 (-1 – 0)	Agua o cubiertas superficiales
1 (0 – 0,2)	Suelo desnudo
2 (0,2 – 0,4)	Vegetación dispersa

² <https://earthexplorer.usgs.gov/>

3 (0,4 – 0,6)	Vegetación abundante
4 (0,6 – 1)	Vegetación muy densa

Fuente: Agüero, 2014

3.2.3 Método de interpolación espacial

Con el objetivo de establecer patrones en la distribución de temperaturas, se realizó el procesamiento de la información almacenada de los 8 sensores instalados en el sector de Parque Ecuador. Los registros parten del día 27 de enero a las 08:30 finalizando el 30 de enero a las 09:50 de la mañana del año 2017. Se selecciona el día 28 por poseer datos significativos y al mismo tiempo disponer una fecha que coincide con las variables climáticas del programa ENVI-met.

De estos 8 sensores instalados, se escoge el sensor 3 (S3), 4 (S4) y 5 (S5), esto porque son los más cercanos que se encuentran del sector Víctor Lamas con Rengo y que como se visualiza en la Figura 3, se delimita de color verde. Estos registros se exportan al programa Excel para un posterior análisis. Se crea una tabla con datos en conjunto a coordenadas UTM de cada estación. Además, se utilizan los valores de humedad relativa entregados por el sensor 4.

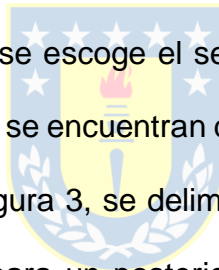


Figura 3. Ubicación de sensores en sector Parque Ecuador



Fuente: elaboración propia

Se seleccionaron rangos de horarios en donde la temperatura se encontraba en su mínima (02:00-06:00 hrs), máxima (14:00-19:00 hrs) y posterior disminución (20:00-00:00 hrs), realizando así una interpolación mediante el método IDW, obteniendo 3 mapas que representan las temperaturas correspondientes a los horarios antes mencionados. El IDW es un método de interpolación espacial determinista, que supone que los puntos más próximos a la muestra son más parecidos entre sí, de tal forma que existe una relación lineal de similitud entre un punto de valor conocido y sus vecinos (Castro et al., 2018).

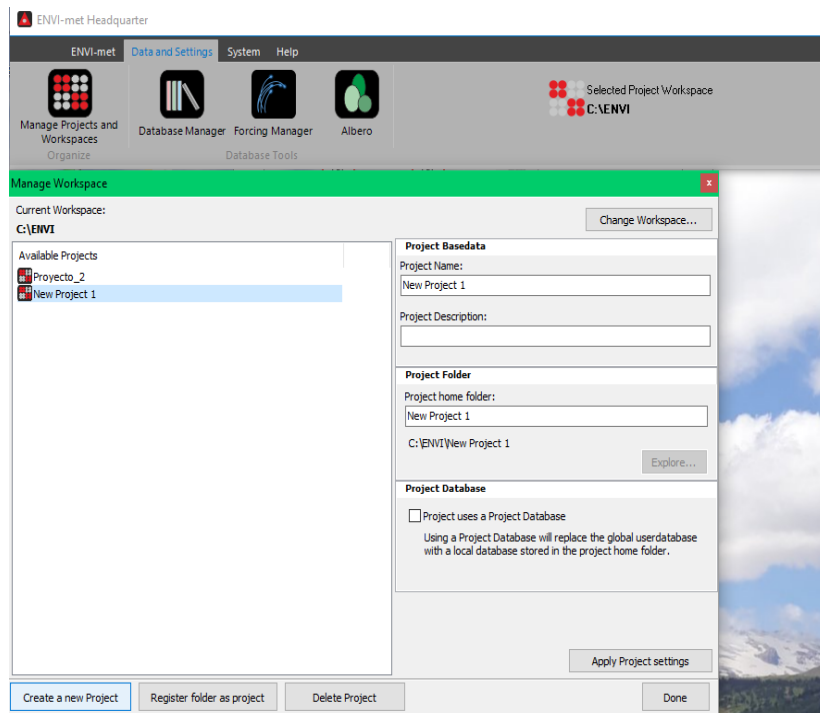
3.3 Modelación de temperatura superficial con vegetación actual y simulaciones de incremento en ENVI-met

Para realizar la simulación computacional se utilizó la herramienta ENVI-met 4.4.6, programa de acceso gratuito, desarrollado por Michael Bruse en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz, Alemania. Es un modelo computacional

tridimensional que trabaja a escala de microclima urbano, diseñado para simular las interacciones entre el aire y la superficie del entorno urbano con una resolución típica de 0,5 a 10 metros en el espacio y cada 10 segundos en tiempo. ENVI-met está basado en las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y la termodinámica. El modelo incluye la simulación de: flujos alrededor y entre edificios; procesos de intercambio de calor y vapor de las superficies de suelo y paredes; turbulencia; parámetros de la vegetación; bioclimatología; y dispersión de contaminantes (Bruse, 2006).

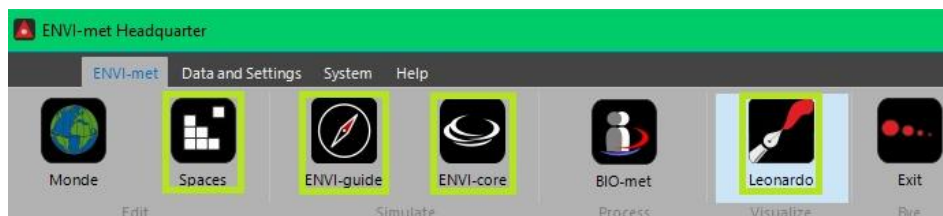
El esquema de construcción de ENVI-met se compone de un modelo núcleo de tres dimensiones 3D (que incluye submodelos: atmosféricos, de vegetación y suelo), y un modelo de bordes en una dimensión 1D. La tarea del modelo en 3D es simular todos los procesos dentro del modelo que contiene el área actual (Alchapar y Correa, 2016). En primer lugar, para definir y organizar el espacio de trabajo, se crea un nuevo proyecto en *Manage Projects and Workspaces* para luego dirigirse a la subherramienta *Spaces* para iniciar la digitalización y construir los modelos.

Figura 4. Ventana de herramienta *Manage Projects and Workspaces* con opciones de configuración a ser completadas para la generación de nuevo proyecto



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Ventana de funciones del programa ENVI-met.

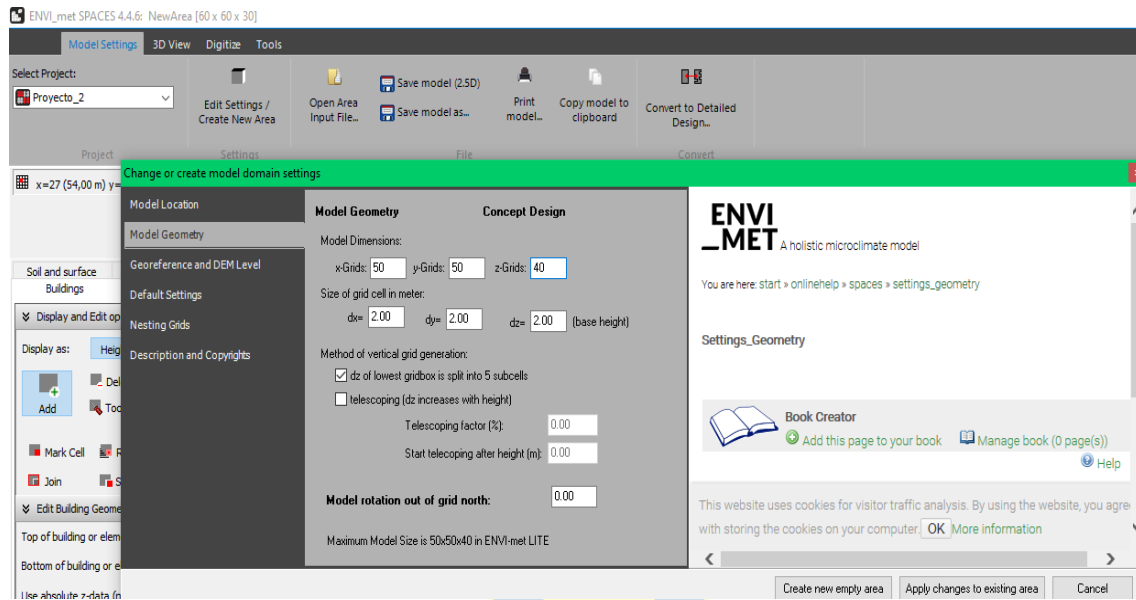


Fuente: elaboración propia.

La versión LITE de ENVI-met posee un límite en el tamaño de grillas que corresponde a un máximo de 50 x 50 x 40 (x, y, z) y una resolución espacial que va entre 0,5 m y 10 m. Para cambiar la configuración del modelo, se dirige a *Edit Settings/Create New Area* donde se pueden determinar datos, tales como;

localización, georreferenciación y geometría del modelo, en este último es preciso definir la rotación del área del modelo, tal como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Ventana de crear o cambiar la configuración de ubicación/tamaño/orientación del modelo



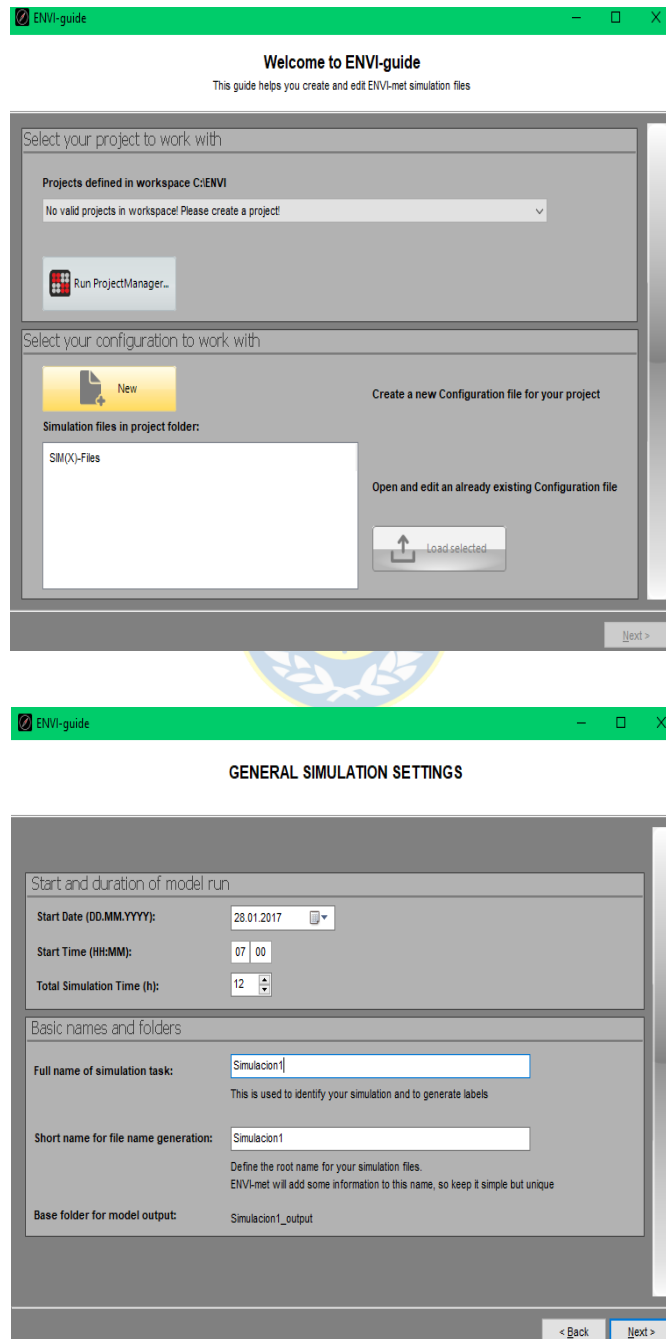
Fuente: elaboración propia.

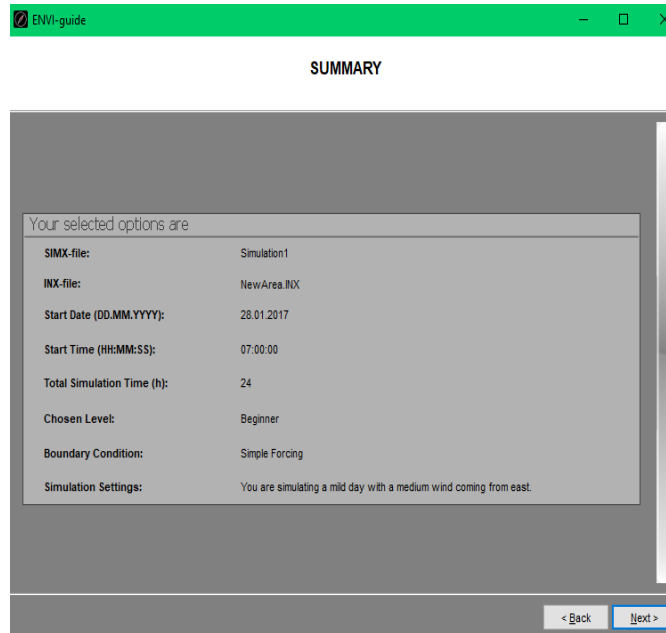
Para comenzar la digitalización, se opta por ingresar una imagen (*bitmap*) de fondo previamente definida con formato .BMP para reconocer las diferentes tipologías que presenta el área de interés. Se cuenta con diferentes tipos de capas, en este caso se utilizaron; edificios, vegetación (plantas simples y 3D), suelo y superficie. Terminada esta etapa, el modelo es guardado con extensión .INX.

A continuación, se realiza un ajuste meteorológico en *ENVI-guide*. Primero que todo, se selecciona el proyecto antes creado para luego establecer un nuevo archivo de configuración en donde se seleccionan atributos como el comienzo y la hora para iniciar el modelo. Luego, se selecciona el archivo del área creada anteriormente en

Spaces donde se escogen datos de temperatura, dirección y velocidad del viento para finalmente guardar como extensión .SIMX y dar comienzo a la simulación.

Figura 7. Ventana ENVI-guide con las opciones de configuración a ser completadas y el resumen de los factores seleccionados

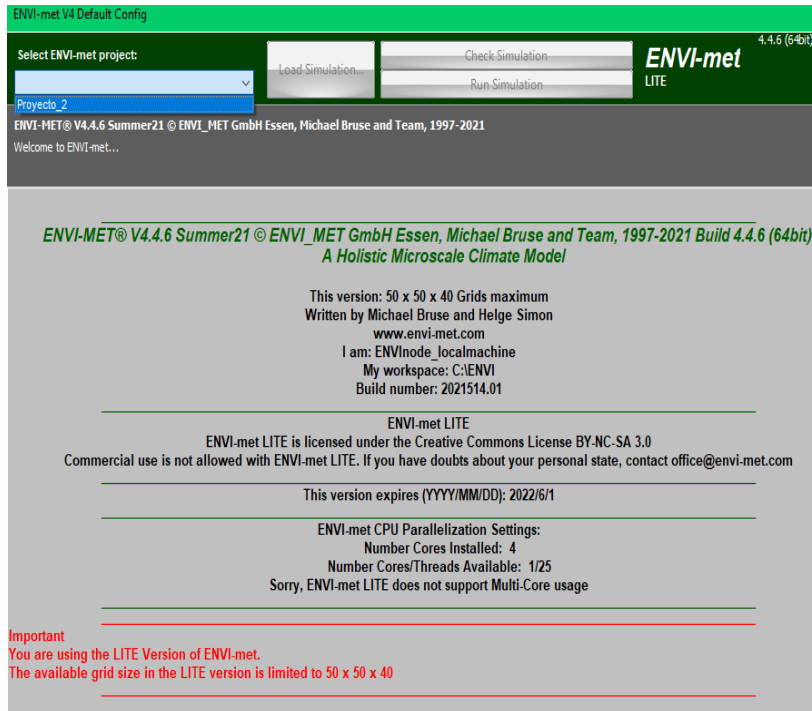




Fuente: elaboración propia.

Para dar paso a la simulación, se escoge la subherramienta *ENVI-core* donde se selecciona nuevamente el proyecto con el que estamos trabajando desde un comienzo y luego “cargar la simulación” realizada en *ENVI-guide* a través del archivo con formato SIMX. Seguidamente, se selecciona el *Check Simulation* para verificar si hay algún error en el modelo. Finalmente, se emplea el *Run Simulation* para dar comienzo a la simulación. El tiempo de espera dependerá del tamaño y la complejidad del modelo.

Figura 8. Ejecución de la simulación numérica en ENVI-met 4.4.6.

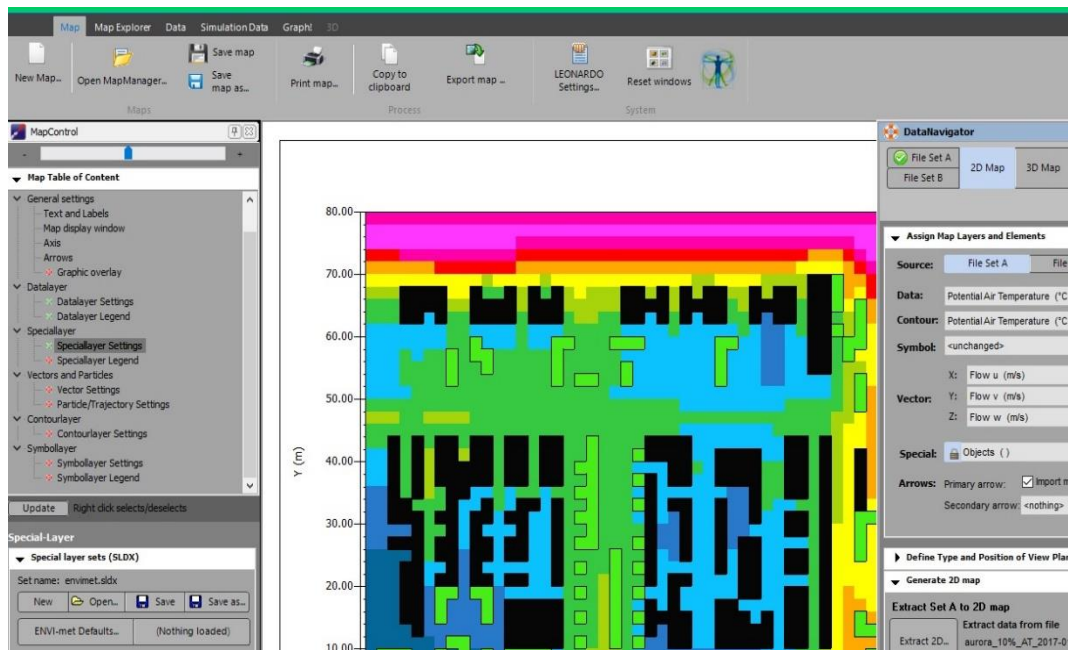


Fuente: elaboración propia.

Para visualizar los datos calculados se emplea *Leonardo* el cual posee dos tipos de mapas; 2D y 3D. El primero cuenta con cuatro capas principales, que para estos resultados se utilizó *Data Layer* el cual demuestra diversas variables microclimáticas a través de un mapa. En las representaciones 3D se pueden mostrar las capas *Data Layer*, *Special Layer*, *Vector Layer* y *Particle*. Para la visualización de los datos de salida, los resultados se expresan a partir de capas en mapas 2D. A través de la subherramienta *Show DataNavigator* se extraen datos de archivos con extensión EDX., previamente procesados en ENVI-core, seleccionando en este caso la carpeta *Atmosphere* de las 14:00 hrs, esto porque se encuentra entre las horas de mayor radiación solar. Posteriormente, se seleccionaron capas y elementos que para esta investigación consistió en *Potencial Air Temperature* (°C). En el sector izquierdo, tal como se muestra en la figura 9, se encuentra la tabla de contenido,

donde se pueden configurar los elementos del mapa según lo que se desea demostrar. Luego de la configuración de las características del mapa en la misma plataforma, se exporta en formato .BMP para la comparación con los demás resultados.

Figura 9. Visualización 2D del modelo de arborización en subherramienta Leonardo



Fuente: elaboración propia.

3.3.1 Caracterización del sistema de referencia espacial

- a) El diseño del espacio físico fue realizado en la versión LITE de ENVI-met, donde el área de los casos se construyó en una cuadrícula de 50, 40, 30 (x, y, z) y resolución de área de 2 x 2 x 2m. La digitalización se realizó a través de la herramienta *Spaces*, el cual permite el reconocimiento del terreno por medio de diferentes tipos de pixeles, que en este caso contó con; altura de edificios, tipo de suelo y vegetación.

- b) Para el sector de Víctor Lamas con Rengo, el cual se ubica frente a Parque Ecuador, la cuadrícula se rotó -20 para coincidir con el norte. El área se compone aproximadamente de 71,5% de terreno asfaltado y un 28,5% corresponde a edificaciones. La vegetación arbórea prima con un 96,1% y la herbácea con un 3,9%.
- c) En Víctor Lamas con Salas, ubicado a un costado del Parque Ecuador, la cuadrícula se rotó -30. El área se compone aproximadamente de 74,7% de concreto y asfalto y un 25,3% corresponde a la presencia de casas y edificios. En cuanto a la vegetación, de su total, un 92,4% se compone de especies arbóreas y un 7,6% corresponde a especies herbáceas.
- d) En población La Aurora, sector periurbano, la cuadrícula se rotó -15 para coincidir con su norte. Este lugar posee 68,1% de superficie entre concreto y pavimento, un 14,9% de suelo arcilloso y un 17,1% de casas y edificios. Su vegetación arbórea está compuesta de tan solo un 12%, mientras que las especies herbáceas predominan con una presencia de 88%.
- e) Seguidamente, calle Arturo Prat con Av. los Carrera, identificada como zona comercial, se rotó -30. Posee un 38,7% de concreto y un 61,4% de inmuebles. La presencia de vegetación es tan solo de un 5,6%, de ese total 57,3% corresponde a especies arbóreas y un 42,7% pertenece a especies herbáceas.

3.3.2 Ingreso de variables climáticas

- a) Medición de datos microclimáticos mediante el uso de sensores fijos en diferentes puntos de la ciudad, recogiendo datos tales como; temperatura del

aire, y humedad relativa del aire, las cuales se llevaron a cabo en periodo estival, en días estables sin ocurrencia de precipitaciones. Los datos de velocidad y dirección del viento a 13 metros de altura se recogieron desde la Dirección Meteorológica de Chile (estación Carriel Sur) aproximadamente a 6 km de las 5 áreas de interés de la ciudad de Concepción. Los datos meteorológicos de entrada para las simulaciones en ENVI-met se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de entrada para la simulación en ENVI-met

Configuración de variables	Clima actual
Fecha de inicio	28/01/2017
Hora de inicio	14:00
Tiempo total de simulación	1 hora
Temperatura	
Temperatura máxima	28°C
Temperatura mínima	16°C
Condiciones del viento	4.5 m/s
Dirección del viento	0°

Fuente: elaboración propia.

3.3.3 Configuración del dominio, tipo y ejecución de modelos

El tipo de vegetación en estos escenarios consistió principalmente en especies arbóreas y herbáceas, esto porque son infraestructuras verdes que inciden en las temperaturas dentro de la ciudad. Se presentan cuatro tipos de escenarios; 1) Vegetación actual: consiste en la arborización real de las zonas de interés tal y como se observa en imágenes del programa Google Earth Pro (GEP).

2) Incremento de vegetación al 20%: en cuyo caso se aumenta la cobertura vegetal para ver los efectos e influencia de especies tanto herbáceas como arbóreas.

3) Incremento de vegetación al 35%: ídem al anterior.

4) Sin vegetación: se eliminó toda presencia de infraestructura verde de este modelo para un mejor análisis de la influencia que estos últimos poseen en el confort de la población.

En resumen, se aplican 16 modelos, con 4 sectores y 4 situaciones para cada uno, una real (o escenario base) y 3 simulaciones. En la tabla 6, se detalla la cantidad y porcentaje de especies presentes en la Vegetación Actual y luego la cantidad aplicada en superficie no construida para posterior simulación.

Tabla 6. Cantidad de especies con relación a su escenario base

Sectores / Modelos	Vegetación actual (escenario base)		Incremento de vegetación al 20%	Incremento de vegetación al 35%	Sin vegetación
	Cantidad	Porcentaje			
Víctor Lamas con Rengo	152	10,6%	286	501	0
Víctor Lamas con Salas	76	5,1%	299	523	0
Población Aurora de Chile	138	8,3%	332	581	0
Arturo Prat con Av. Los Carrera	75	5,6%	268	469	0

Fuente: elaboración propia.

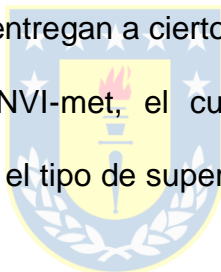
3.3.4 Contraste con sensores de temperatura *in situ*

Todos estos escenarios fueron simulados para la 14:00 horas del día 28 de enero de 2017, dado que esto permite contrastar los resultados con sensores localizados *in situ*.

La simulación general permite ajustes simples a través de la subherramienta *Beginner* de la temperatura mínima y máxima del aire y la velocidad y dirección del viento. Estos datos fueron extraídos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC)

y agregados a la simulación para posteriormente ser ejecutados en un tiempo concreto que para este caso consistió a las 14:00 horas, esto porque se encuentra dentro de un rango horario donde la incidencia perpendicular de los rayos solares es mayor.

Para entender la conducta climática y su contexto en la ciudad, se contrasta con los resultados obtenidos de los sensores de temperatura *in situ* específicamente para la zona ubicada frente al Parque Ecuador logrando de esta forma determinar el comportamiento local en cuanto a las temperaturas potencial del aire y viento para establecer patrones en la configuración del territorio que permitan contribuir a un mayor entendimiento de las condiciones microclimáticas y el confort que ciertas características y condicionantes entregan a ciertos sectores a través de escenarios modelados por el programa ENVI-met, el cual también además de recoger parámetros atmosféricos, incluye el tipo de superficie y vegetación para un estudio más acabado.



4. RESULTADOS

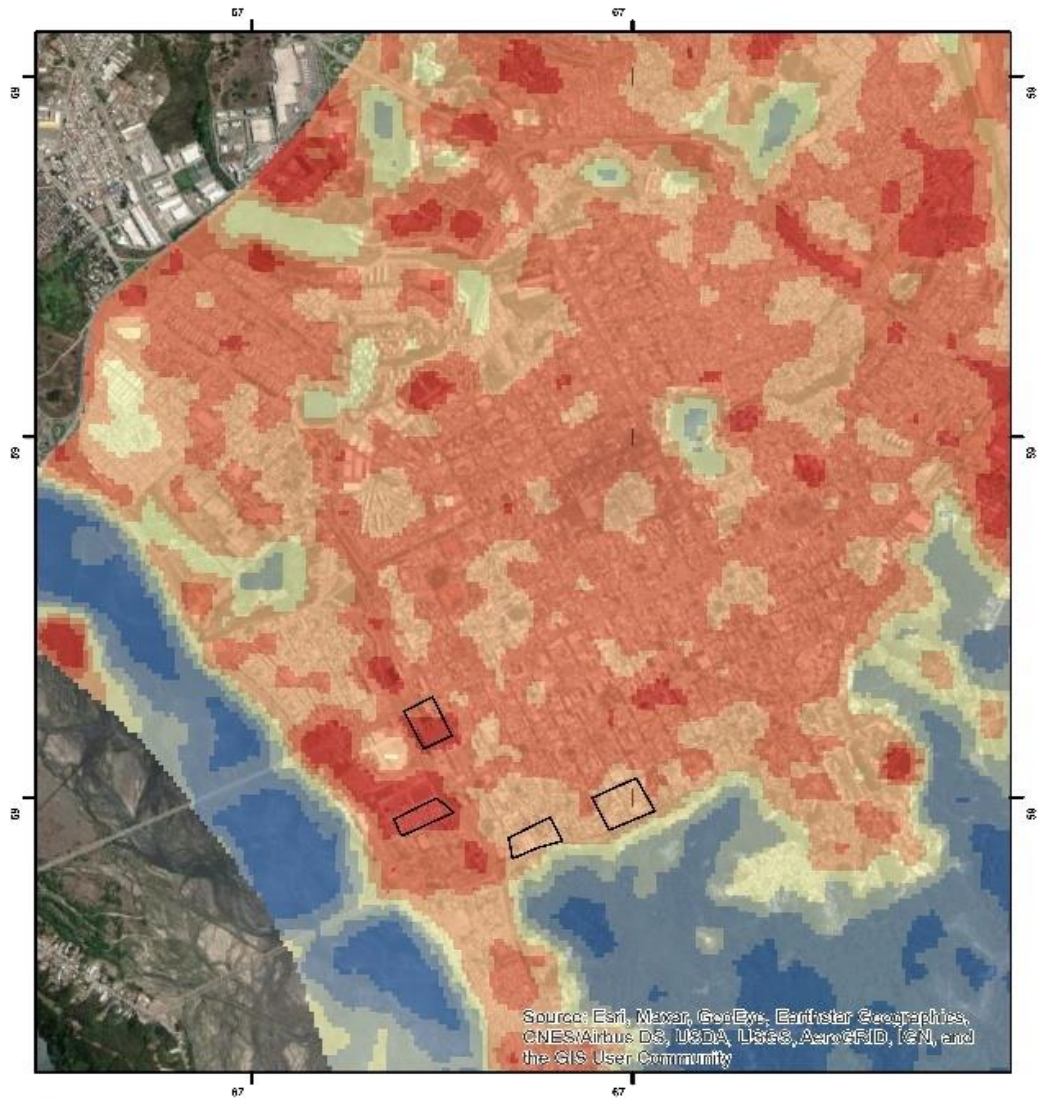
4.1 Isla de calor y su relación con la vegetación urbana

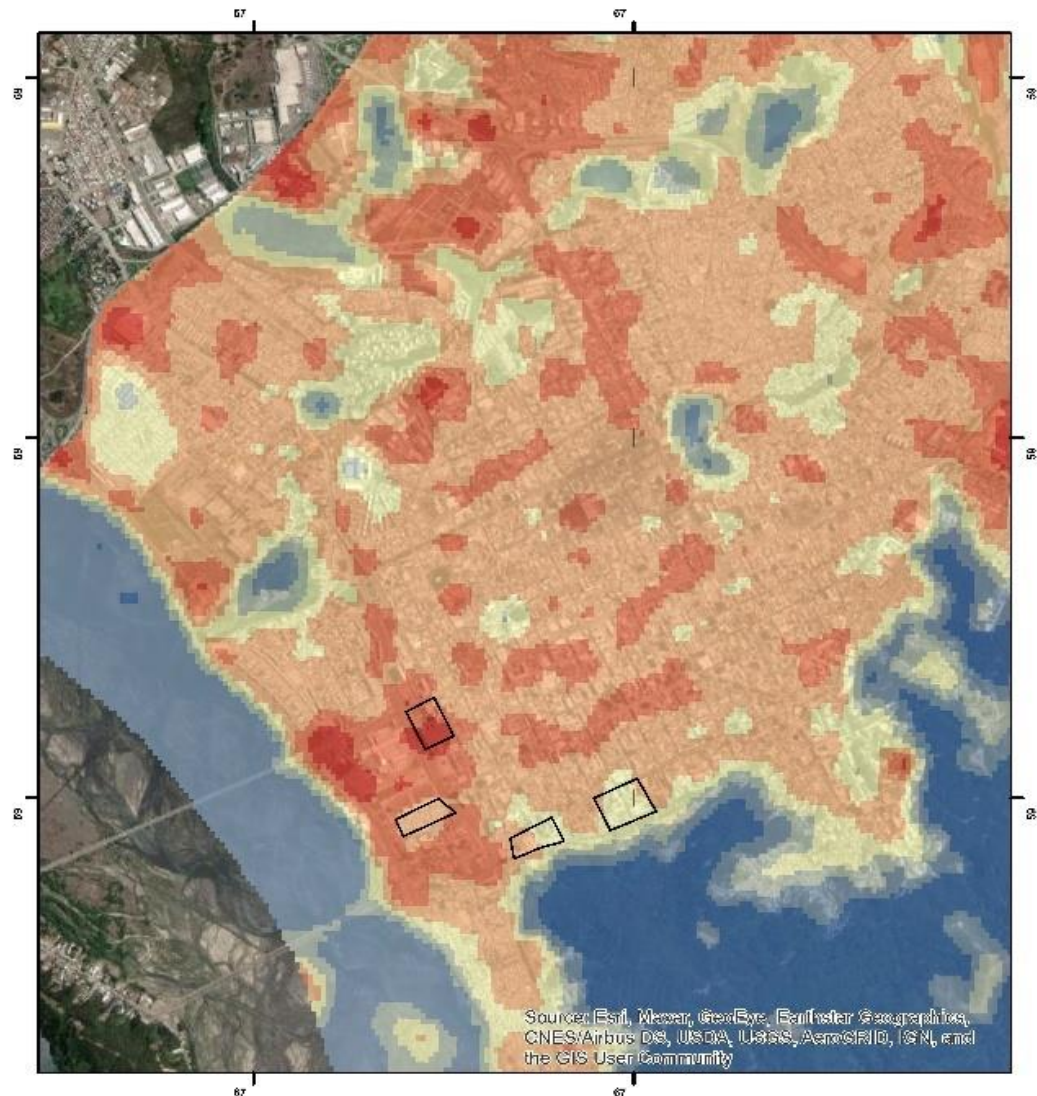
La identificación de la temperatura superficial terrestre (TST) con imágenes satelitales permitió identificar la distribución espacial y estimación de la isla de calor urbana con las zonas con mayor y menor temperatura que demuestra cómo se está dado el fenómeno climático en el centro de Concepción (ver figura 10); se destacan las zonas cercanas al río Biobío como las áreas de más altas temperaturas superficiales; así mismo, Avenida Costanera posee un alto flujo vehicular y áreas

comerciales con extensas superficies de estacionamientos u/o superficies impermeabilizadas con escasas áreas verdes. La información analizada corresponde a temperaturas máximas en un periodo entendido entre el 15 de diciembre de 2016 y el 31 de enero de 2017; y el 15 de diciembre hasta el 31 de enero de 2021.



Figura 10. Resultados de las temperaturas máximas de los años 2017-2021





Fuente: elaboración propia

4.1.1 Distribución de la temperatura superficial en Concepción

Respecto a su configuración, la isla térmica en ambas fechas no muestra una forma concéntrica, como suele presentarse generalmente. Por el contrario, se configura a

partir de la morfología urbana, en la cual sectores como estacionamientos o techumbres metálicas son las que registran las más altas temperaturas. Los resultados de las imágenes satelitales concluyen que las temperaturas máximas se alcanzaron para el año 2017 con 39,7°C, mientras que la temperatura máxima alcanzada para el año 2021 fue de 37,8°C.

Por otra parte, las más bajas temperaturas que fluctúan entre los 19,4°C y 18,9°C respectivamente se presentan en gran densidad cercanos a calle Víctor Lamas, donde son el Parque Ecuador y cerro Caracol los que resultan ser un estabilizador térmico. Se visualizan puntos de frescor que son principalmente cuerpos de agua (lagunas) de la ciudad y sectores con grandes superficies de áreas verdes como es el caso del cementerio general de Concepción. Finalmente, los sectores céntricos de la ciudad (sectores con alta actividad económica y social) presentan temperaturas que varían para el año 2017 entre los 26,2°C y 30°C. Así mismo, para el año 2021 los valores aumentan aproximadamente en 1°C en comparación al año 2017, con valores que van entre los 27,3°C y 31,4°C

La localización de las áreas que generan las islas de calor y frescor permiten identificar lugares para proponer escenarios de infraestructura verde con el objetivo de establecer si la tecnología de arbolado urbano favorece un comportamiento óptimo para el enfriamiento urbano. El cuerpo de agua que se encuentra a un costado del centro de Concepción (río Biobío) mantiene las temperaturas con poca variación e incluso no ayuda a aminorar el fenómeno, por lo que es preciso enfocarse a una menor escala en cuanto a la infraestructura verde y el efecto que esta tiene en la regulación térmica a nivel de barrio. De esta manera la intensidad

máxima de la isla de calor identificada, es decir la diferencia entre la temperatura máxima y mínima a una misma hora, oscila entre los 32,3°C y 31,5°C para el año 2017 y los 32,9°C y 32°C para el año 2021.

4.1.2 Distribución de la vegetación y su relación con las temperaturas superficiales

Para complementar el análisis se procedió adicionalmente el uso del índice normalizado de vegetación (NDVI) el cual permite definir y visualizar áreas con vegetación en el mapa. Los valores altos indican zonas con cobertura vegetal y que se asocian con aquellas localidades en donde la temperatura superficial es mucho menor en comparación a las áreas urbanizadas.

Según los resultados, se identificaron 3 categorías sobre el tipo de cobertura en la ciudad.

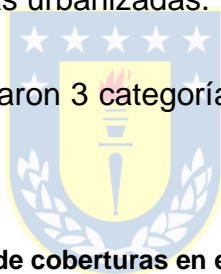


Tabla 7. Identificación de coberturas en el centro de Concepción

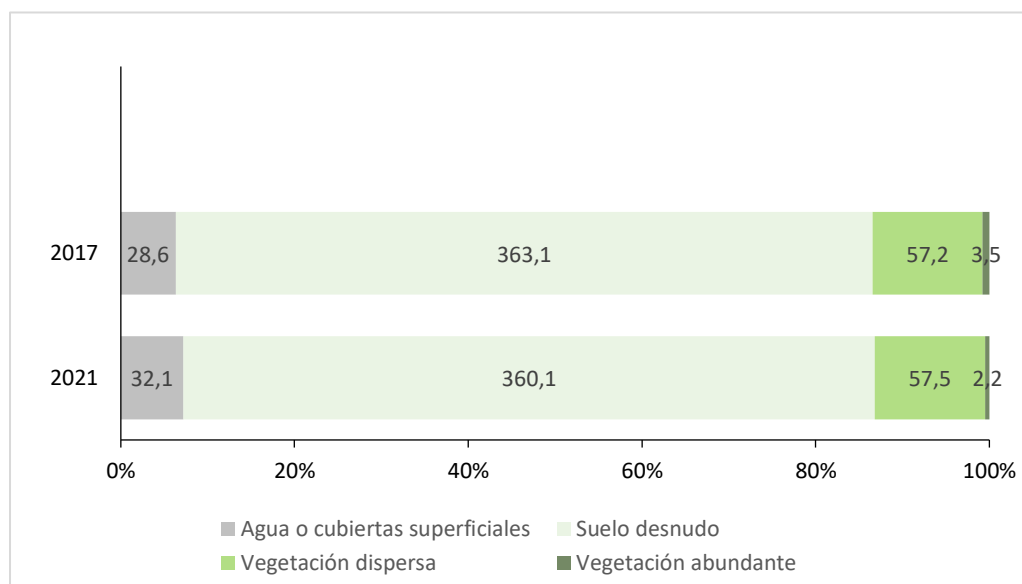
Categorías	Coberturas
Agua o superficies impermeables	Río Bio-Bío
	Lagunas
Mobiliario urbano	Edificaciones
	Pavimento
	Suelo desnudo
Vegetación	Césped
	Especies herbáceas
	Especies arbustivas
	Especies arbóreas

Fuente: elaboración propia

Así mismo, al comparar los años 2017 y 2021, los resultados indican que las unidades no han variado significativamente en 4 años, pero se evidencia que las cubiertas compuestas por agua o superficies impermeables han aumentado su porcentaje y que, por el contrario, cubiertas de mobiliario urbano y vegetación han disminuido en el tiempo.

De las 5 clases descritas bajo la clasificación de Agüero (2014) se encuentran presentes solo cuatro, ya que no se obtuvo superficies de “Vegetación densa” en el área de estudio en ninguna de las dos fechas de interés.

Figura 11. Variación de las superficies de Cobertura y Uso de Suelo en hectáreas, datos del año 2017 y 2021 de clasificación NDVI



Fuente: elaboración propia

Reduciendo el área de estudio a un nivel local donde están insertas las cuatro zonas de interés, para el año 2017 las áreas de “Agua o cubiertas superficiales” constaban de 28,6 ha que aumentaron a 32,1 ha para el año 2021. El “Suelo desnudo” es la categoría que cuenta con mayor superficie con 363,1 ha a su haber y que tuvo una

variación negativa de tan solo 0,82%. En tanto, la “Vegetación dispersa” no varió significativamente, contando para el año 2021 con 57,5 ha. Finalmente, la “Vegetación abundante” con 3,5 ha posee una disminución importante con una variación de 38,46% en tan solo cuatro años.

Según los resultados del NDVI, los sectores más altos de vigorosidad se asocian con cuerpos de agua, las cuales ejercen una influencia respecto a la distribución espacial de la cobertura vegetal, como es el caso de la influencia de las lagunas, que poseen a su alrededor una cantidad importante de vegetación. Los menores rangos de vigorosidad, donde los valores se describen como suelo desnudo y vegetación dispersa se relacionan con los sectores más céntricos de la ciudad en donde son pocas las concentraciones de vegetación debido a la estructura urbana y densidad constructiva, en el que predomina una impermeabilización junto a un sellado de grandes superficies de suelo.

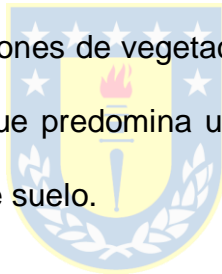
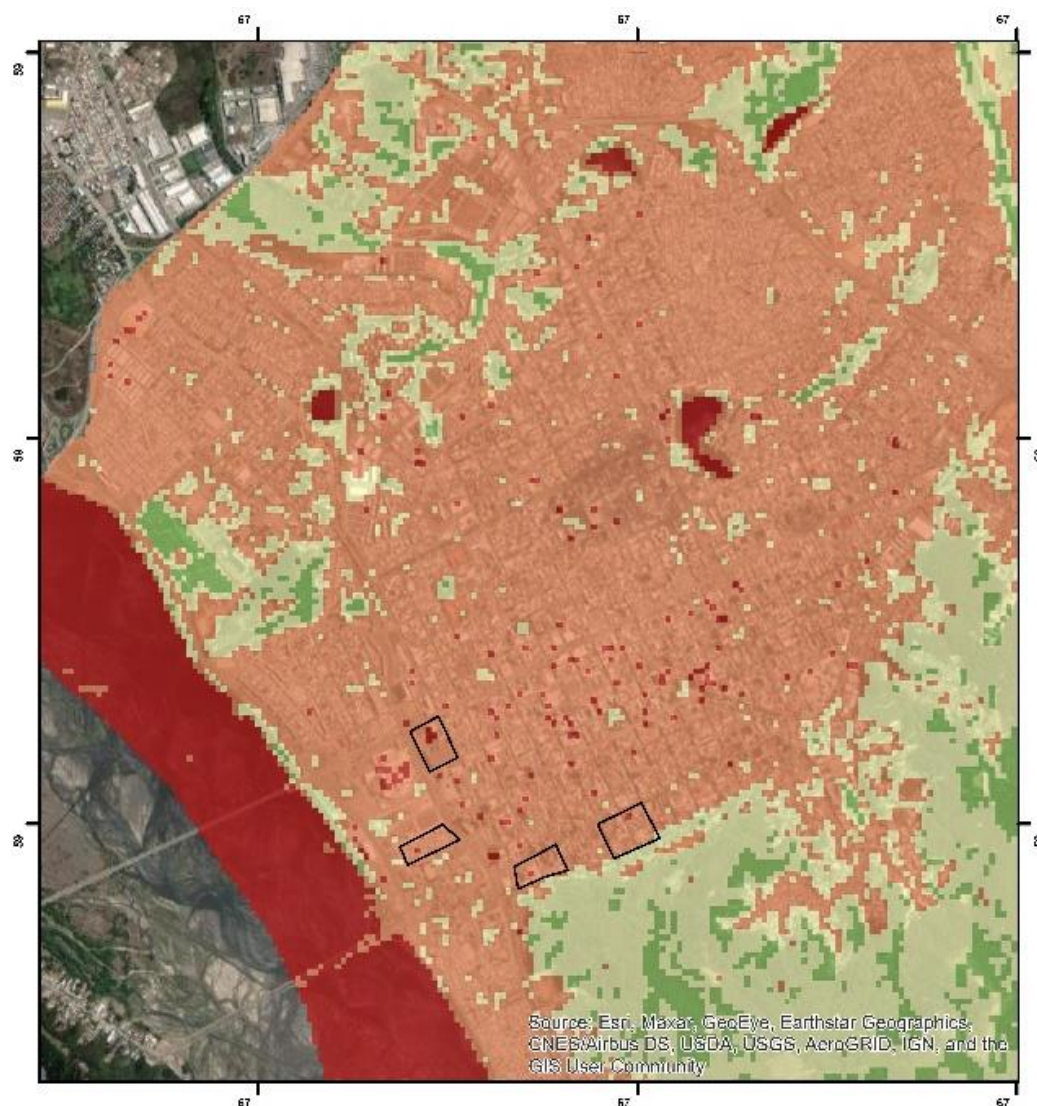
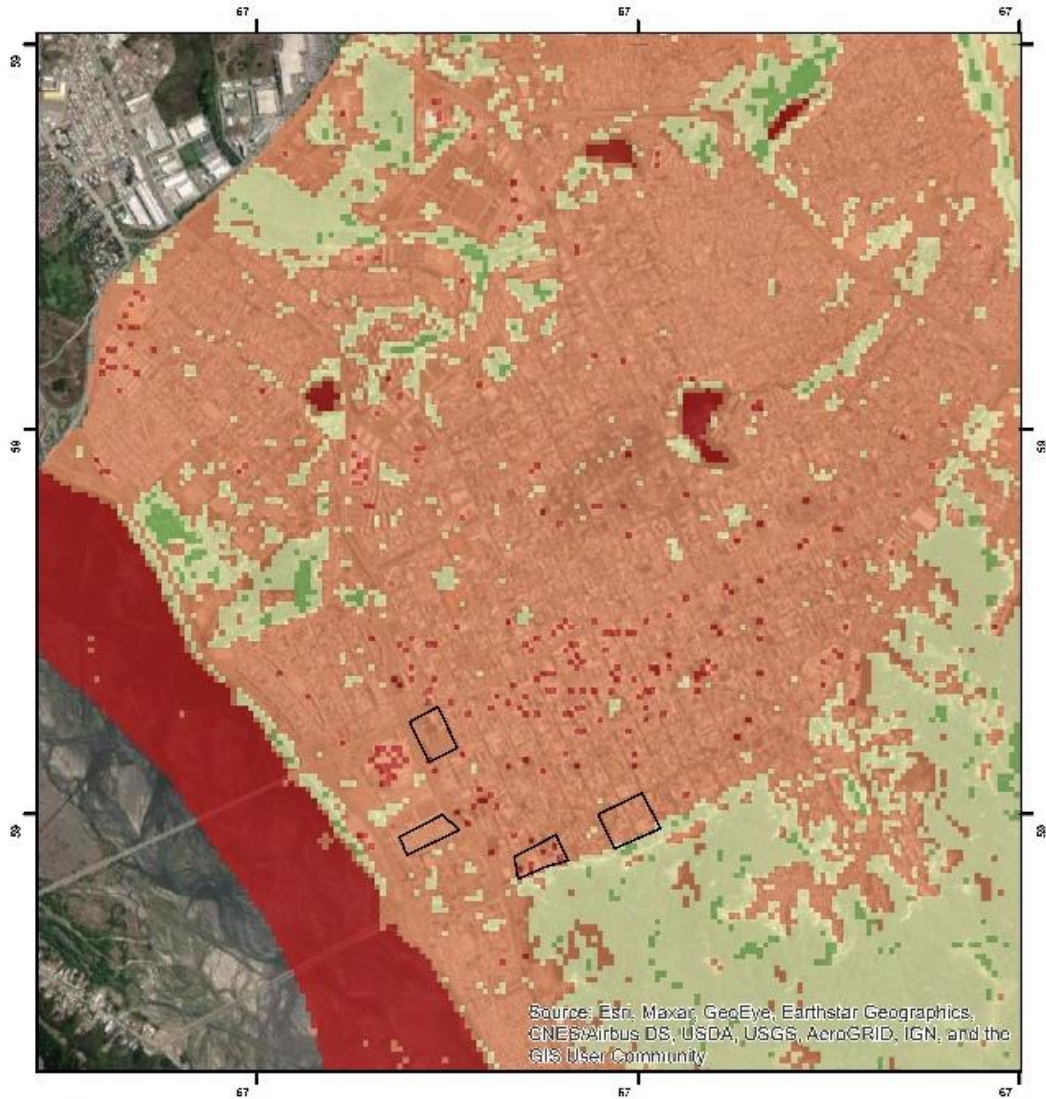


Figura 12. Índices NDVI de los años 2017 y 2021 del centro de Concepción





 Resultados del índice NDVI en la ciudad de Concepción, año 2021 			
<p>RANGOS</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 - Cuencas superficiales 1 - Suelo desnudo 2 - Vegetación dispersa 3 - Vegetación abundante 4 - Vegetación densa 	<p>DATOS CARTOGRÁFICOS</p> <p>Proyección UTM Datum WGS84 Huso 18S</p>	<p>AUTORA</p> <p>Claudia Fuentes Vergara</p> <p>0 0,1 0,2 Km 1:35.000</p>	 <p>Source: Esri, Maxar, GeoEye,</p>

Fuente: elaboración propia

4.2 Distribución de la temperatura superficial en base a modelación en ENVI-met

Para esta simulación se representó una arborización real de las áreas de interés, tal y como se observa en GEP, definido como escenario base. La modelación de temperaturas se realizó en temporada estival con datos proporcionados por sensores *in situ* e información entregada por la estación meteorológica Carriel Sur el día 28 de enero del año 2017.

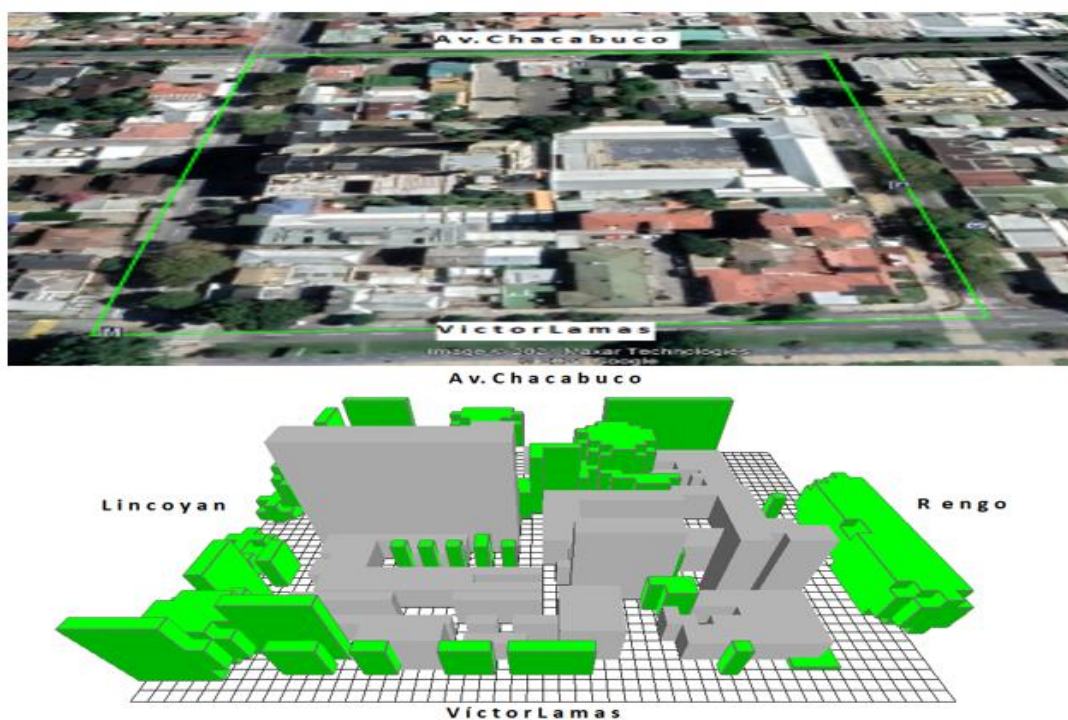
Se realizó la simulación de 16 escenarios con vegetación actual, sin vegetación y una arborización al 20% y 35% que modifican parámetros morfológicos y vegetación tanto urbana como residencial con una digitalización de infraestructura verde normal y 3D. Estos escenarios fueron arborizados con especies arbóreas que van de los 5 a 20 m y especies herbáceas que se componen de una altura de 50 cm.

4.2.1 Temperatura superficial actual y potencial en sector Víctor Lamas con Rengo

Para este sector, además de los escenarios simulados de temperatura del aire, se localizan sensores dentro y cerca del área de interés, que registraron la temperatura y humedad del ambiente durante los días 27, 28, 29 y 30 de enero del año 2017. Para la investigación, los datos de interés radican en el día 28 de enero junto a 8 sensores, 3 de ellos ubicados dentro del área estudiada, ubicados; S3) en árbol al interior de Parque Ecuador, S4) en árbol que da a calle Lincoyán y S5) Avenida Chacabuco, enredadera frente a sucursales movistar y UDLA. Se observa que hay diferencias en la densidad de arborización entre algunas calles. Entre avenida Chacabuco y calle Lincoyán se observa una arborización urbana de gran densidad

y altura, lo contrario a lo presentado en calles Víctor Lamas y Rengo, ya que, la arborización urbana disminuye en los parámetros mencionados, lo cual queda demostrado en la figura 13. La superficie total de infraestructura verde que posee este sector es de un 10,6%.

Figura 13. Características de escenario base visualizada en GEP y ENVI-met 4.4.6 del sector Víctor Lamas con Rengo

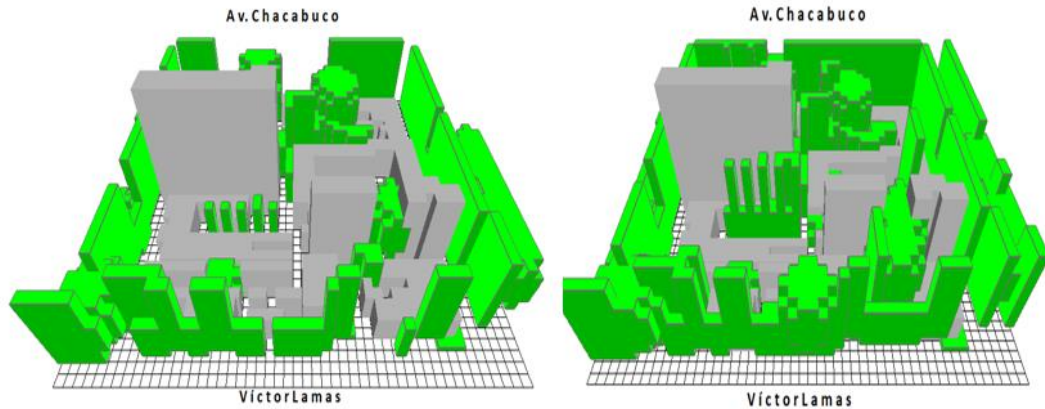


Fuente: elaboración propia

4.2.1.1 Simulación de escenarios con incremento de vegetación al 20% y al 35%

Estos escenarios fueron arborizados completamente. El arbolado fue localizado mayormente en sectores urbanos y se componen de especies arbóreas en 2D y 3D, que varían entre los 5, 10, 15 y 20 m junto a una especie herbácea con una altura de 50 cm.

Figura 14. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.



Fuente: elaboración propia

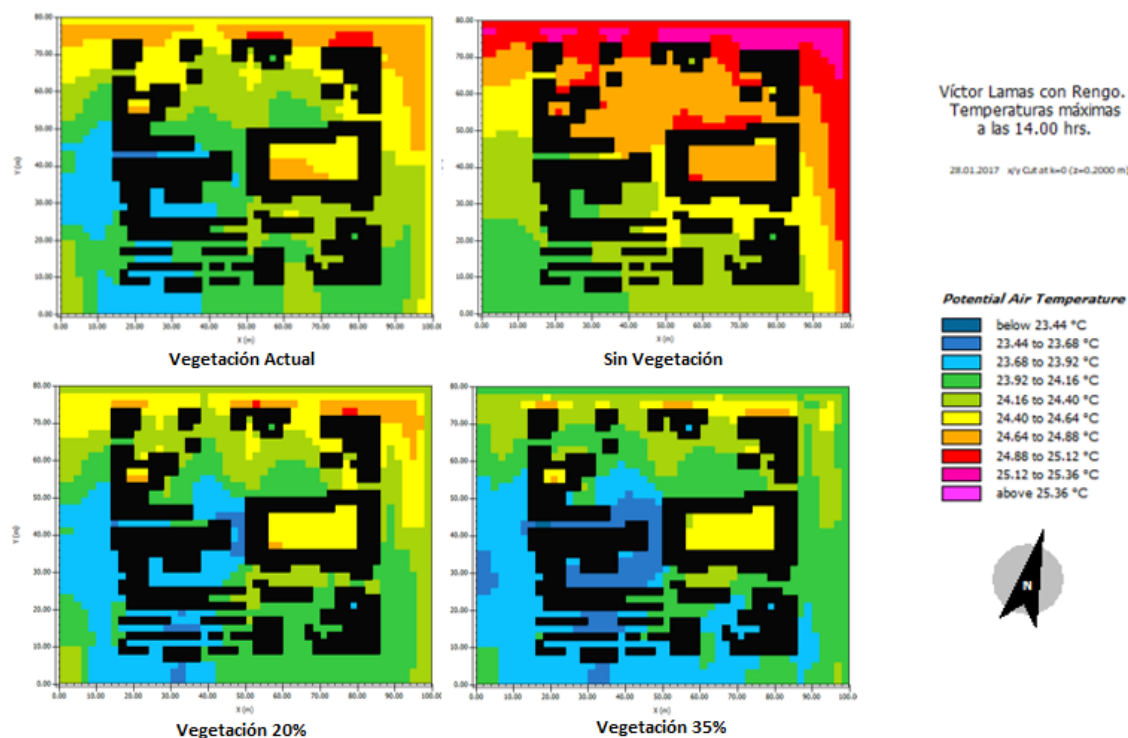
4.2.1.2 Temperatura potencial del aire en diferentes escenarios de vegetación

En la modelación de “Vegetación Actual”, las temperaturas se encuentran en un mínimo de 23,6°C y una máxima de 25°C. Las temperaturas en general se distribuyen de manera uniforme dentro de la zona residencial, ya que este sector presenta una gran variedad de infraestructura verde a su haber y edificaciones de gran altura. Las altas temperaturas pertenecen a un mínimo porcentaje en el sector norte, el cual corresponde a una concurrida avenida de la ciudad. Por otra parte, en la simulación de “Sin Vegetación” se genera una superficie mucho mayor de altas temperaturas en el sector noreste, que se extiende por sectores de redes viales, donde se alcanzan máximas de 25,3°C. No se hacen presentes rangos de mínimas temperaturas.

Ahora, las temperaturas en la simulación de vegetación a un 20% (V20%) cuentan con una mínima de 23,6°C y máxima de 25°C. La vegetación se incrementó tanto

urbana como residencialmente, lo cual se demuestra en el sector oeste del mapa, donde el rango de menor temperatura que se encuentra entre los $<23,4^{\circ}\text{C}$ y $23,9^{\circ}\text{C}$ se expandió en comparación a la “Vegetación Actual”. Las temperaturas máximas disminuyen a un 0,2%. Por último, la vegetación a un 35% (V35%) tiene como resultado mínimas de $23,4^{\circ}\text{C}$ y máximas de $24,8^{\circ}\text{C}$. En cuanto a los rangos de temperatura, las máximas temperaturas desaparecen y se extienden por más de la mitad del área de estudio temperaturas que varían entre los $23,9^{\circ}\text{C}$ y $24,6^{\circ}\text{C}$.

Figura 15. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en sector Víctor Lamas con Rengo



Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14:00 hrs. 28 de enero, 2017

Arborización (%)	Vegetación Actual	Vegetación con 20% de arborización	Vegetación con 35% de arborización	Sin Vegetación
Rangos de T°				
<23,4°C – 23,9°C	13,8%	22,6%	34,2%	0%
23,9°C – 24,6°C	73,6%	77,2%	64,8%	60,9%
24,6°C - >25,3°C	1,1%	0,2%	0%	39,1%

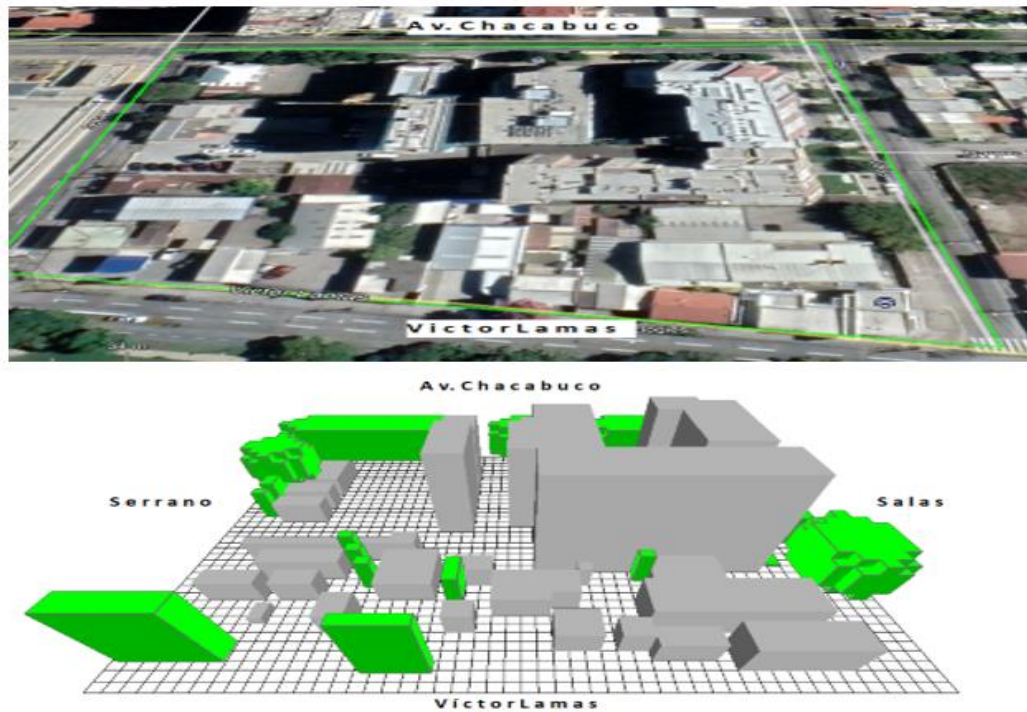
Fuente: elaboración propia

Las diferencias entre los resultados de las temperaturas que poseen las simulaciones de V20% y V35% desglosan un aumento de las bajas temperaturas y una reducción de las altas. La variación que se obtuvo de un escenario con rangos entre <23,4°C y 23,9°C fue positiva con un aumento de 11,6%. En cambio, con el rango medio, los resultados de la variación disminuyeron un 12,4%. La presencia de las altas temperaturas en la V20% (siendo estas de por sí reducidas) disminuyen hasta desaparecer en el modelo de V35%.

4.2.2 Temperatura superficial actual y potencial en sector Víctor Lamas con Salas

Esta área se caracteriza por poseer una edificación de gran altura, la cual deja superficies en permanente sombra a lo largo del día. La vegetación urbana se encuentra con una gran presencia de especies arbóreas con una altura total de al menos 10 metros. En cuanto a la arborización residencial, esta disminuye en densidad y altura. Se destaca una gran superficie destinada a estacionamientos para automóviles. La superficie total de vegetación en el escenario base consta de un 5,1%.

Figura 16. Características de escenario base visualizada en GEP Y ENVI-met 4.4.6 en Víctor Lamas con Salas

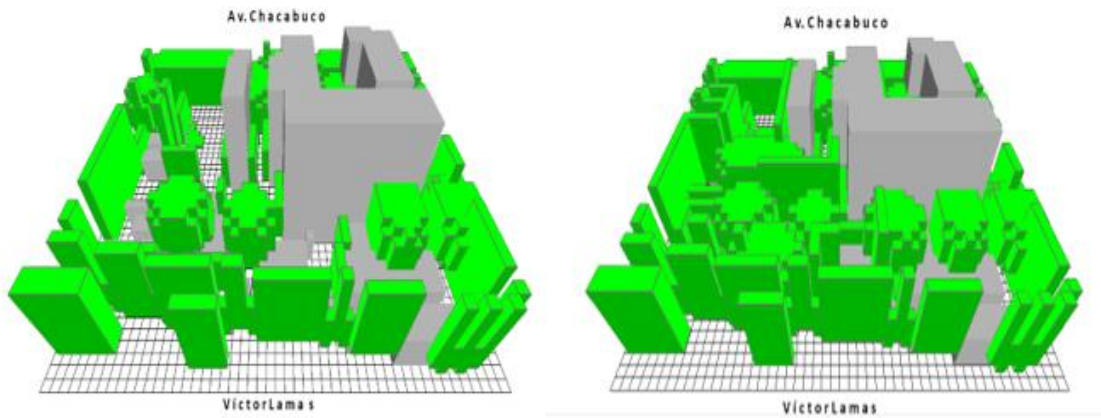


Fuente: elaboración propia

4.2.2.1 Simulación de escenarios con incremento de vegetación al 20% y al 35%

Estos escenarios fueron arborizados completamente. El arbolado fue localizado mayormente en sectores urbanos y se componen de especies arbóreas en 2D y 3D, que varían entre los 5, 10, 15 y 20 m junto a una especie herbácea con una altura de 50 cm.

Figura 17. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.

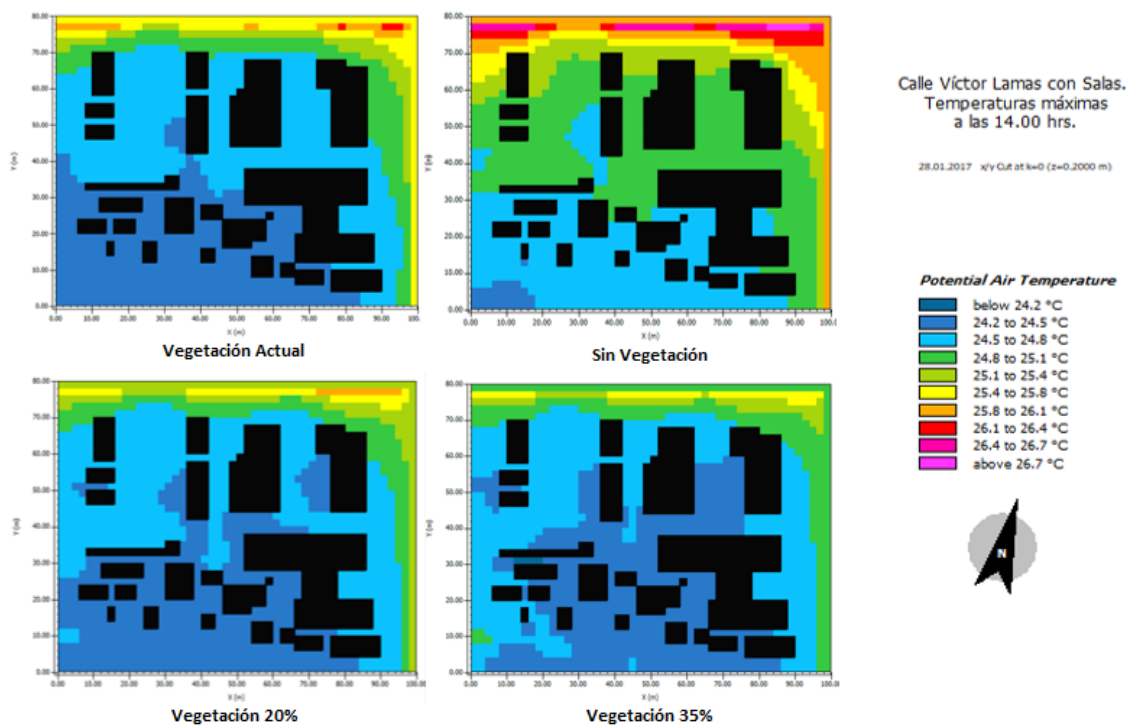


Fuente: elaboración propia

4.2.2.2 Temperatura potencial del aire en diferentes escenarios de vegetación

En la “Vegetación Actual” las temperaturas se hallan con un 24,5°C la mínima y 26,7°C la máxima. La temperatura en esta área no varía a grandes rasgos debido a la gran altura de los edificios que componen el sector y la cantidad de vegetación que se desenvuelve urbana y residencialmente. Los valores logran variar ante un escenario “Sin Vegetación”, donde las altas temperaturas se desprenden de sectores por donde existe una alta dinámica vial, contando con una presencia de un 9,3%. Para los tres siguientes escenarios, las temperaturas mínimas son las que predominan en el paisaje con valores por sobre el 70% y aumentando a medida que se digitaliza mayor arborización. Por otra parte, a medida que estos valores aumentan, las temperaturas medias disminuyen.

Figura 18. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en Víctor Lamas con Salas



Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14:00 hrs. 28 de enero, 2017

Arborización (%)	Vegetación Actual	Vegetación con 20% de arborización	Vegetación con 35% de arborización	Sin Vegetación
Rangos de T°				
<24,2°C – 24,8°C	71,3%	76,4%	82,3%	32,4%
24,8°C – 25,8°C	26,8%	22,8%	17,7%	58,3%
25,8°C - >26,7°C	0,3%	0,8%	0%	9,3%

Fuente: elaboración propia.

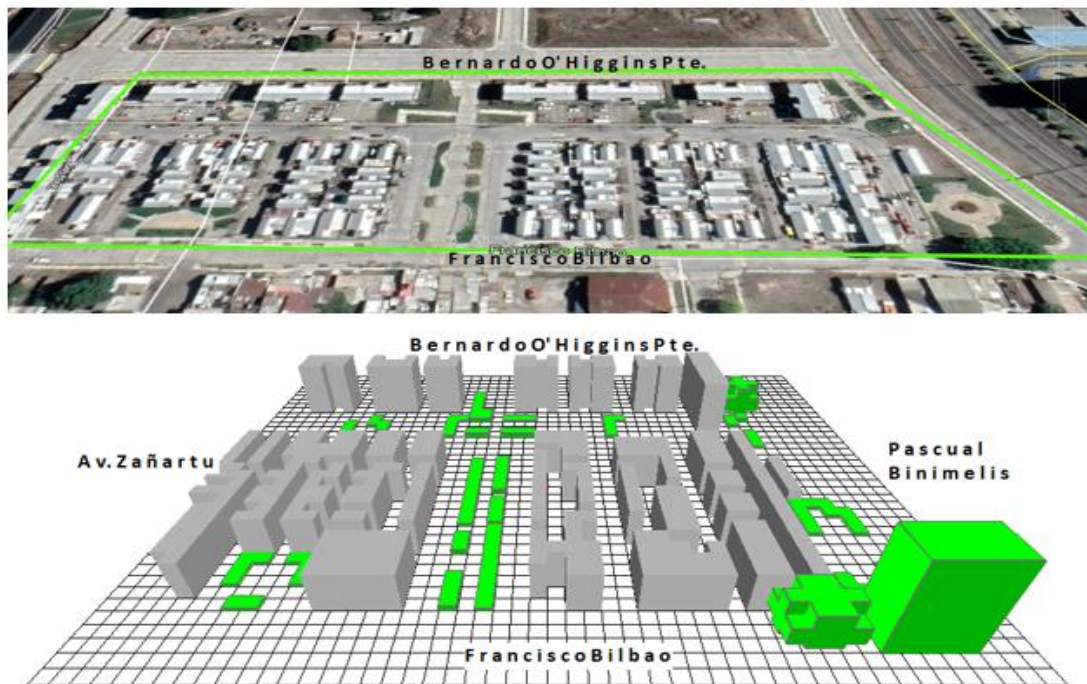
En cuanto a la comparación de los modelos de V20% y V35%, las temperaturas que corresponden al rango entre <24,2°C y 24,8°C aumentan a medida que los modelos de vegetación poseen mayor arborización. Al contar esta zona de por si como un área de frescor, las altas temperaturas que poseían una presencia de tan solo 0,3%

originalmente disminuyen hasta 0% en el modelo V35%. Al pasar de una arborización de V20% a V35%, las temperaturas mínimas tienen un aumento de un 5,9% y las temperaturas medias descienden en un 5,1%. Las superficies más frescas en estas dos simulaciones poseen mayor presencia dentro de las áreas residenciales, esto puede deberse a la presencia de edificios de gran altura que entregan durante las horas solares una cantidad considerable de sombra.

4.2.3 Temperatura superficial actual y potencial en población Aurora de Chile

La figura 19 muestra la visualización en GEP y modelo 3D del escenario con la vegetación actual con la que se encuentra la población Aurora de Chile. En calle Francisco Bilbao se observan solo dos especies arbóreas de gran altura, evidenciando la falta de una infraestructura verde acorde al tamaño del área residencial. Se advierte un mayor nivel de áreas verdes relacionada a especies herbáceas, las cuales no otorgan un mayor aporte a la regulación de temperaturas. La superficie total en “Vegetación Actual” consta de un 8,3%.

Figura 19. Características de escenario base visualizada en GEP Y ENVI-met 4.4.6 en Aurora de Chile

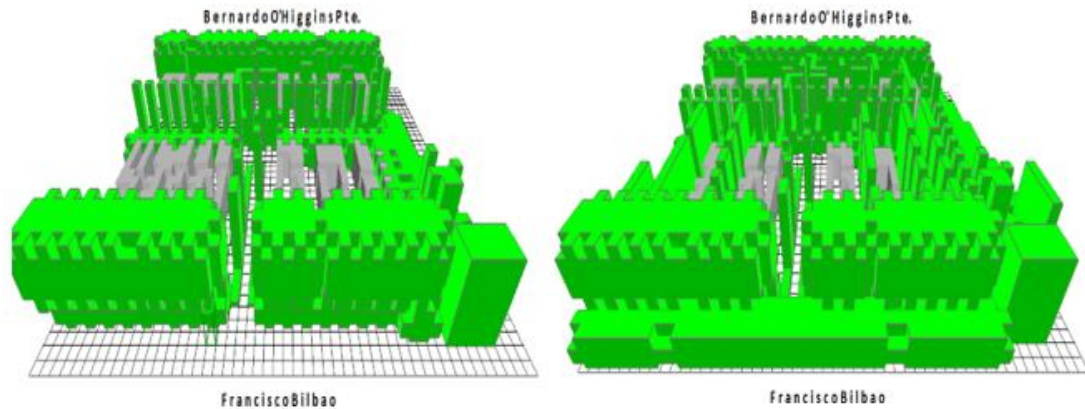


Fuente: elaboración propia

4.2.3.1 Simulación de escenarios con incremento de vegetación al 20% y al 35%

En estos modelos fue arborizado hipotéticamente el área de estudio con diferentes tipos de vegetación (digitalizado en 2D y 3D), entre ellas se encuentran: arboles de 10, 15 y 20 metros y a un menor nivel el uso de especies herbáceas de 50cm.

Figura 20. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.



Fuente: elaboración propia

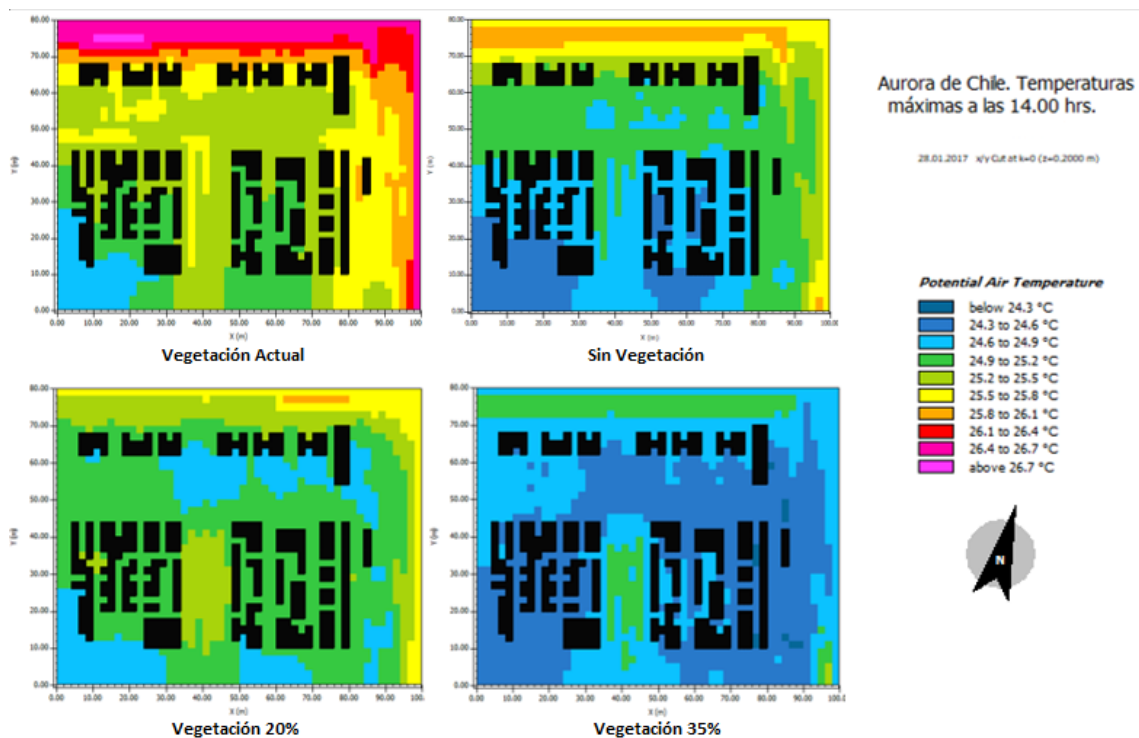
4.2.3.2 Temperatura potencial del aire en diferentes escenarios de vegetación

En la modelación de la “Vegetación Actual”, las temperaturas se encuentran entre 24,7°C la mínima y 26,7°C la máxima. A pesar de la poca vegetación, el porcentaje de temperaturas que predomina en población Aurora se mantiene dentro de un rango medio que varía entre los 24,9°C y 25,8°C localizadas dentro del área residencial con un 65,5%. En la simulación de “Sin Vegetación” la temperatura mínima desciende a 24,4°C y la máxima aumenta a un 26,1°C.

En el modelo V20%, las temperaturas fluctúan en 24,6°C la mínima y 25,8°C la máxima a las 14.00 hrs. La vegetación se circunscribió en sectores cercanos a edificaciones y zona de recreación, lo que se demuestra en los resultados en donde hay una disminución en el sector sur del barrio. El comportamiento de las temperaturas con el porcentaje de V20% muestra una distribución de pixeles donde las temperaturas se siguen manteniendo con mayor proporción entre los 24,9°C y

25,8°C el cual incluso aumenta un 14,1% en comparación a la “Vegetación Actual”. Se destaca la disminución de altas temperaturas de las calles principales del sector al contar con un mayor número de arborización urbana. Finalmente, la simulación V35% deja temperaturas mínimas y máximas de 24,3°C y 25,3°C, valores más bajos registrados de los 4 escenarios. En cuanto a la distribución de pixeles, las temperaturas cambian drásticamente, ya que, al implementar una gran cantidad de arborización, las altas temperaturas salen de escenario y surge con un 87% las temperaturas mínimas que se encuentran entre valores <25°C y 25,5°C.

Figura 21. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en Aurora de Chile



Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14:00 hrs. 28 de enero, 2017

Arborización (%)	Vegetación Actual	Vegetación con 20% de arborización	Vegetación con 35% de arborización	Sin Vegetación
Rangos de T°				
<24,3°C – 24,9°C	6,1%	19,9%	87,8%	37%
24,9°C – 25,8°C	65,5%	79,6%	12,2%	56,6%
25,8°C - >26,7°C	28,3%	0,5%	0%	6,4%

Fuente: elaboración propia

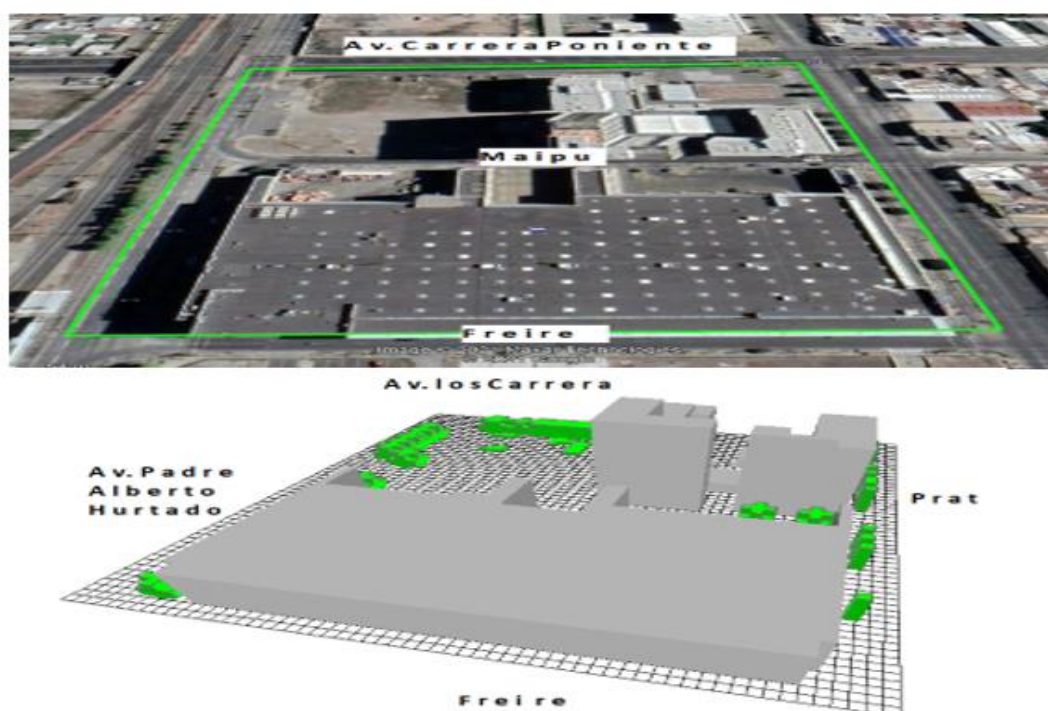
Las diferencias entre temperaturas potencial del aire a las 14.00 hrs que poseen los modelos de V20% y V35% indican un aumento de las superficies a las que corresponden las bajas temperaturas. Las variaciones de las temperaturas que van entre los <24,3°C y 24,9°C tuvieron una diferenciación positiva de 67,9% que se logra evidenciar dentro del barrio, a través de sectores constituidos de asfalto o materiales oscuros, logrando así disminuir su temperatura gracias a la presencia de vegetación en ella. En cuanto a las altas temperaturas, los dos últimos rangos disminuyen considerablemente, con una variación negativa que se demuestra en la tabla 10. Por último, se logra disminuir las temperaturas en el sector de recreación (en el sector sureste) bajo el escenario de “Vegetación Actual”, el cual se encontraba por sobre los 25°C.

4.2.4 Temperatura superficial actual y potencial en calle Arturo Prat con Av. los Carrera

Esta área se caracteriza por la presencia de una gran edificación perteneciente al comercio y otras que se caracterizan por su gran altura. A diferencia de las otras tres zonas, entre calle Arturo Prat y Av. los Carrera existen sectores abandonados

con una cubierta vegetal compuesto solo de vegetación herbácea e incluso terrenos baldíos. Además, posee una alta congestión vehicular, generando una problemática de contaminación lo cual eleva los niveles de CO₂ en la atmosfera, condición que asegura Hernández (2019) es propicia para el desarrollo de una isla de calor. La “Vegetación Actual” cuenta con 5,6% de infraestructura verde en este sector.

Figura 22. Características de escenario base visualizada en GEP Y ENVI-met 4.4.6 en calle Arturo Prat y Av. los Carrera

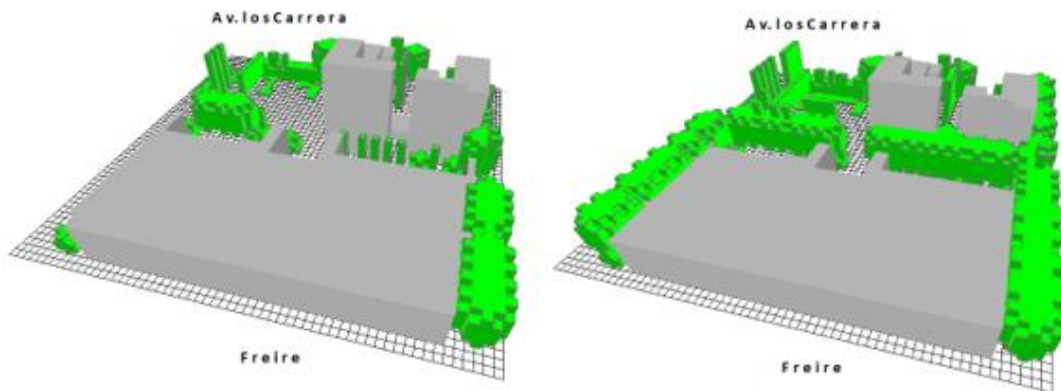


Fuente: elaboración propia

4.2.4.1 Simulación de escenarios con incremento de vegetación al 20% y al 35%

En estos modelos fue arborizado hipotéticamente el área de estudio con diferentes tipos de vegetación (digitalizado en 2D y 3D), entre ellas se encuentran: arboles de 5, 10, 15 y 20 metros y a un menor nivel el uso de especies herbáceas de 50cm.

Figura 23. Características de los escenarios simulados representado a través del programa ENVI-met 4.4.6.



Fuente: elaboración propia

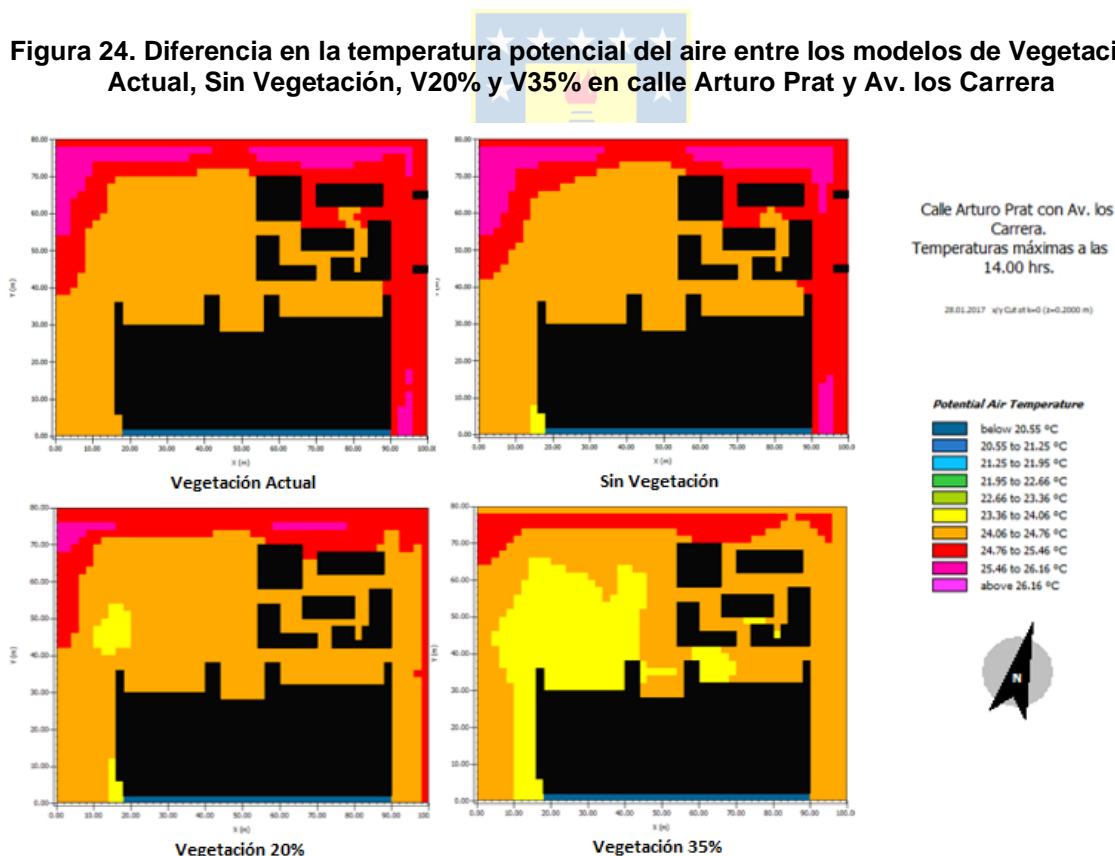
4.2.4.2 Temperatura potencial del aire en diferentes escenarios de vegetación

En el modelo de “Vegetación Actual” las temperaturas mínimas son de 19,9°C y 26,8°C la máxima. En este caso, las temperaturas mínimas son casi inexistentes con tan solo un 2,7% de presencia ubicado en el sector sur de la infraestructura de mayor tamaño (la cual es una constante en los 4 escenarios). Mientras, los rangos de mayor temperatura se extienden con un 97,3%. En cuanto a los resultados con el modelo “Sin Vegetación” los resultados son idénticos con la excepción de que la temperatura máxima en este modelo alcanza los 26,9°C. Esto puede deberse a que la vegetación que predomina actualmente consiste en especies herbáceas y especies arbóreas de menor tamaño que no influyen en la regulación de temperaturas en el sector.

La V20% posee una temperatura mínima de 19,9°C y máxima de 26,5°C a las 14:00 hrs, la vegetación se concentró por sobre todo en el sector baldío y zonas cercanas

a las avenidas principales para influir en las altas temperaturas que se presentan en el escenario de “Vegetación Actual”. La distribución de pixeles por rango de temperatura para este caso máximas cuenta con un 94,7% de presencia, disminuyendo tan solo un 2,6% en comparación al caso base. Así mismo, comparando ahora el rango entre los 21,7°C y 24,4°C, este cuenta con un 2,6% el cual era inexistente en el caso previo. Finalmente, la V35% posee una mínima de 19,9°C y máxima de 26,2°C. El rango de temperaturas mínimas se mantiene en los cuatro escenarios en un 2,7% pero es en V35% donde finalmente se puede ver una variación más significativa en rangos medios y máximos como se demuestra en la tabla 11.

Figura 24. Diferencia en la temperatura potencial del aire entre los modelos de Vegetación Actual, Sin Vegetación, V20% y V35% en calle Arturo Prat y Av. los Carrera



Fuente: elaboración propia

Tabla 11. Porcentaje de pixeles por rango de temperatura a las 14.00 hrs. 28 de enero, 2017

Arborización (%)	Vegetación Actual	Vegetación con 20% de arborización	Vegetación con 35% de arborización	Sin Vegetación
Rangos de T° <19,9°C – 21,7°C	2,7%	2,7%	2,7%	2,7%
21,7°C – 24,4°C	0%	2,6%	26,9%	0%
24,4°C - >27,1°C	97,3%	94,7%	70,4%	97,3%

Fuente: elaboración propia.

Las diferencias entre temperaturas potencial del aire a las 14:00 hrs que poseen los modelos V20% y V35% no son visibles a grandes rasgos como si lo son los demás escenarios base. La variación de temperatura que sufrió la simulación a un V20% no generó una regulación significativa en las altas temperaturas. Por el contrario, el escenario a un V35% sí pudo demostrar un cambio, disminuyendo el rango de altas temperaturas en un 26,9% y generando una superficie de temperaturas entre 21,7°C y 24,4°C en la zona identificada como terreno baldío y que se representa en el mapa de color amarillo.

4.3 Datos de sensores e interpolación espacial

De los 8 sensores que se desplegaron son 3 los que se encuentran más cercanos al sector de Víctor Lamas con Rengo por lo que los resultados se basan cerca de ese cuadrante. Los sensores 3 y 4 se ubican en árboles, por lo que se encuentran cubiertas de cierto porcentaje de sombra. Por el contrario, el sensor 5 se localiza en una enredadera expuesta constantemente a los rayos solares. Los registros de valores de temperatura se programaron del 27 al 30 de enero de 2017. Para este estudio, se ejecuta el geoprocésamiento para el día 28 de enero.

Los resultados de las temperaturas entregado por las imágenes satelitales en conjunto a las simulaciones con ENVI-met 4.4.6 mostró que los factores microclimáticos tienen un comportamiento similar a los datos observados *in situ* para el año 2017. Resumiendo, los resultados de la de temperatura promedio en el proceso de interpolación del periodo estival del año 2017 para el sector de Parque Ecuador, en un análisis donde se circunscriben los sensores 3, 4 y 5, revelan que las temperaturas mínimas en promedio se encuentran en un periodo de tiempo que se ubica entre las 02:00 y 06:00 horas de la mañana, con valores entre los 15,9°C y 16,7°C. Como se observa en la figura 25, hay una porción en ese rango horario, orientado al sureste donde se concentran las más mínimas temperaturas, esto coincide con la ubicación del parque Ecuador y la presencia de una arborización más densa.

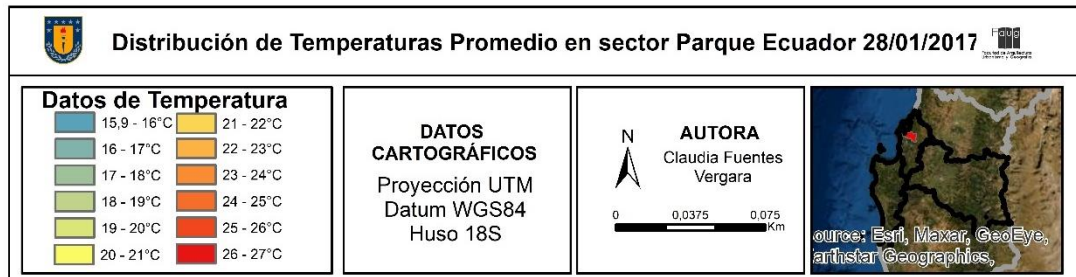
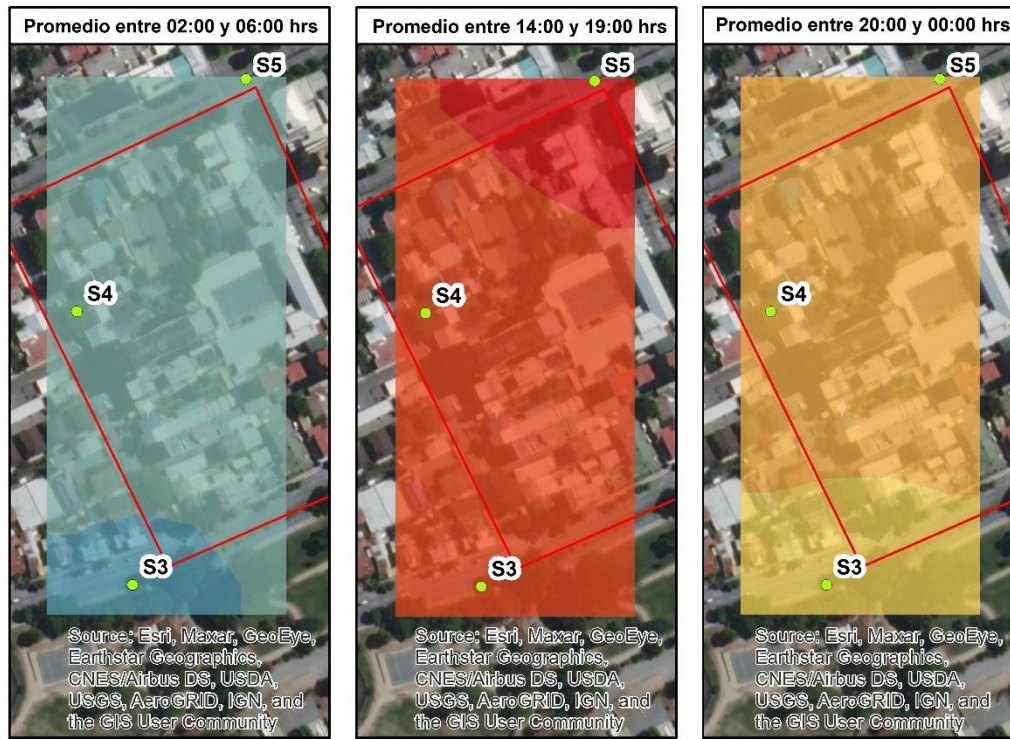


Las temperaturas máximas en promedio entre las 14:00 y 19:00 horas de la tarde, están entre los 25°C y 25,7°C. En este caso y mencionado con anterioridad, ocurre que el sensor 3 y 4 presentan rangos de temperaturas más bajas, esto puede deberse al entorno en la que se encuentran ubicados estos sensores, ya que a su alrededor existe una infraestructura verde mayor a la que se encuentra localizada cerca del sensor 5. Este último sensor se encuentra ubicado en medio de una avenida, por lo que factores como un alto flujo vehicular, aporta al aumento de temperaturas. Por último, las temperaturas comienzan a disminuir cerca de las 20:00 horas, similar a lo que sucede en el horario entre las 02:00 y 06:00 hrs, las temperaturas comienzan a disminuir desde el sector sureste, donde se encuentra el

Parque Ecuador y la presencia de una arborización urbana densa. Las temperaturas medias presentes varían entre los 21,7°C y 22,7°C.

En relación con los resultados simulados a través del programa ENVI-met y el análisis con el uso del sensor 4 (esto por ser el más cercano al área de estudio), la temperatura promedio captada entre las 14:00 y 19:00 horas a través del sensor consta de 25°C, el cual coincide con la temperatura registrada en la simulación de Víctor Lamas con Rengo bajo el escenario de “Vegetación Actual” donde las temperaturas máximas constan de 25°C a las 14:00 horas. Del mismo modo, el registro de temperatura mínima en ese rango horario fue de 23,4°C captado por el sensor, resultado similar a los 23,6°C que mostró la simulación. En tanto, los resultados satelitales nos permiten entrever que la concentración de las máximas temperaturas ocurre en sectores alejados de infraestructuras verdes densas de la ciudad. Si bien en las simulaciones se presentó solo un rango horario, los resultados en conjunto a las demás metodologías, permiten vislumbrar la relación entre las temperaturas y el efecto de la presencia o no de la cobertura vegetal.

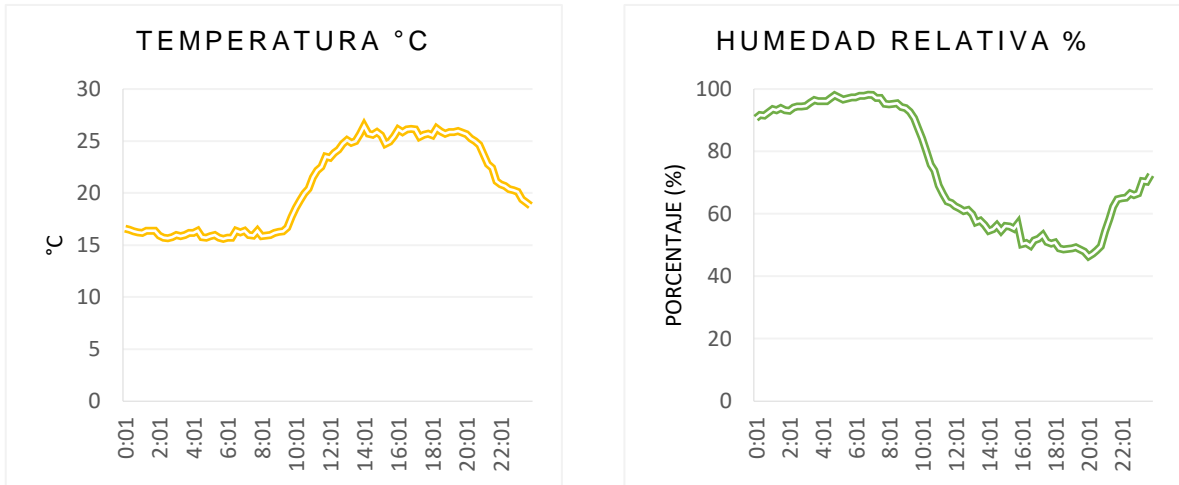
Figura 25. Interpolación de temperaturas promedio del día 28 de enero de 2017 en sector Parque Ecuador



Fuente: elaboración propia

Estos resultados se complementan con los datos de humedad relativa otorgados por el sensor 4, donde su porcentaje máximo para ese día fue de 98,1%, en tanto que su mínimo fue de 37,6% (ver figura 26) produciendo de esta forma una variación inversa de la distribución de temperaturas y la humedad relativa del lugar.

Figura 26. Gráfica de resultados de temperatura y humedad relativa en el monitoreo del sensor 4 en Parque Ecuador



Fuente: elaborado a partir de los datos de muestreo entregados por Dr. Francisco de la Barrera.

En general, el comportamiento microclimático del sector durante los 4 días de medición e integrando ahora los 8 sensores, posee un comportamiento regular en el horario de mínimas temperaturas, manteniéndose en un rango que varía entre los 13,6°C y 17°C. Por otro lado, se percibe una tendencia al aumento de las altas temperaturas por el sector oeste, por calle Aníbal Pinto y Avenida Chacabuco. El registro de temperaturas y su tendencia al aumento tiene que ver mayormente con la disposición y ubicación de los sensores, los cuales llegan a máximas de hasta 31,4°C como sucede con el sensor 7. Los que se encuentran entre los sensores 1, 2, 3 y 4 se encuentran localizados dentro o a metros del Parque Ecuador, siendo las temperaturas influenciadas por la presencia de vegetación o infraestructura verde más próxima. En cambio, los sensores 5, 6, 7 y 8 se disponen a lo largo de Av. Chacabuco donde su cubierta se compone principalmente de pavimento y tierras baldías (ver figura 3).

5. DISCUSIÓN

Las respuestas para enfrentar el cambio climático proceden centralmente de dos conjuntos de medidas: las medidas de mitigación y las medidas de adaptación (Lucas, 2016). Así, la mitigación es descrita como las políticas y acciones que tienen por objeto reducir las emisiones de GEI o potenciar los sumideros (por ejemplo, los océanos o los bosques) que absorben el CO₂ en la atmósfera, con la finalidad de reducir su magnitud. En cuanto a la adaptación, ésta se refiere a las respuestas para reducir las consecuencias negativas del cambio climático o para aprovechar sus posibles beneficios, a fin de que se aumente la capacidad de respuesta de los seres humanos, ecosistemas, entre otros (MMA, 2017). Las ciudades son consideradas ambientes desfavorables para la vegetación, sin embargo, su aplicación en áreas urbanas modifica las condiciones del microclima, tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, el patrón de viento y la precipitación. En este caso, la sombra es la función más importante de las infraestructuras verdes urbanas para mitigar el calor durante el día, seguida de la evapotranspiración y ventilación (Ali-Touder y Mayer, 2006; Bowler et al., 2010; Lee et al., 2016; Norton et al., 2015; Shashua-Bar y Hoffman, 2000).

Chile ha avanzado desde los compromisos internacionales a un desarrollo de políticas climáticas a nivel nacional con iniciativas para la mitigación del cambio climático, con el fin de propender hacia un desarrollo sustentable, resiliente y bajo en carbono (MMA, 2017). Bajo este contexto, se impulsan diferentes iniciativas en la que múltiples investigaciones han demostrado la gran incidencia de la vegetación (parques, áreas verdes en plazas, jardines, techos o cubiertas verticales “verdes”)

en la mitigación de los efectos de las ICUs superficiales contribuyendo a regular la temperatura ambiente (Acero, 2010; Cedeño, 2010; CEE, 2013; Corredor et al, 2012; Fagandini et al, 2013; Greene y Millward, 2017; Gunawardena et al., 2017; Honjo et al., 2003; Irie, 2017; Klein et al., 2008; Norton et al., 2013; O'Malley et al., 2015; Rodríguez, 2012 y 2014; Scodelaro, 2014; Tumini, 2010; Valenzuela, 2012; Vásquez, 2016). Estudios sobre los espacios verdes y la salud han demostrado también una evidencia sólida de los beneficios para la salud mental y de la reducción del estrés, en comparación con otras posibles vías para la salud (Vries, 2010; Gascon et al., 2015). No obstante, pocos casos en Chile han incorporado el análisis de la distribución espacial de dichos servicios y son aún menos aquellos que han evaluado sus vínculos con la planificación territorial (Bachmann-Vargas, 2013).

La investigación representa la situación del centro de Concepción, donde se eligieron 4 zonas con características propias. A través de la teledetección remota se logró demostrar que los sectores ubicados frente y a un costado del Parque Ecuador experimentan un mejor comportamiento térmico debido principalmente a una mayor concentración de vegetación y la cercanía a una zona con mayor proporción de espacios verdes, del mismo modo su infraestructura edilicia de gran altura contribuye a una moderación de las temperaturas microclimáticas. Por el contrario, la zona periurbana y comercial presentan una vegetación más fragmentada y un mayor porcentaje de superficie impermeable, generando un aumento de la temperatura superficial, resultando en la generación de islas de calor, identificadas a través de imágenes satelitales.

La combinación de las temperaturas máximas y mínimas en conjunto al análisis NDVI en relación con el primer objetivo, revela una isla de calor en el sector sureste del centro de Concepción, descubriendo que las estructuras conformadas por superficies impermeables y de mobiliario urbano poseen mayores temperaturas superficiales, mientras que las menores temperaturas se localizan en sectores con mayor cobertura vegetal, compuesta principalmente por especies arbóreas y herbáceas. Por lo tanto, esta investigación aborda las temperaturas que presenta la ciudad de Concepción y los problemas que está propensa a sobrellevar si la presencia de la cobertura vegetal disminuye a través del tiempo, descubriendo una relación entre la alta densidad arbórea sobre el territorio y la importancia de esta en la moderación de las temperaturas en microclimas con alta superficie impermeable.

Esto conlleva a una variación inversa entre la vegetación y la temperatura superficial del aire, ya que, se demuestra que a medida que se aumenta la vegetación en la superficie, la temperatura sufre un descenso en sus valores. Esto también se demuestra bajo los resultados de los 16 escenarios simulados a través del programa ENVI-met, programa capaz de reproducir el comportamiento microclimático y físico de los espacios urbanos (Rui et al., 2019). Para este caso, en el centro de Concepción, se efectuó la implementación mínima de un 20% y 35% de arborización, dando como resultado una reducción potencial de las temperaturas y que al mismo tiempo deduce una disminución en el estrés por calor de los habitantes, esto por las diferencias de hasta un 1°C que sufrieron los escenarios simulados. El aumento de la arborización a un 20% se apoya con el estudio de Middel et al., (2015) quien sugirió que aumentar la cobertura de árboles de un 10%

a 25% podría potencialmente compensar el cambio climático. Los resultados son similares al estudio de Zölch et al. (2016) quien formula que colocar la vegetación estratégicamente en áreas expuestas al calor (en este caso cerca de avenidas concurridas de la ciudad y sectores baldíos) aumentan los efectos de mitigación y reduce la temperatura potencial del aire. Por lo tanto, se sabe que una ejecución a tal porcentaje de vegetación o en este caso arborización, es una buena propuesta para comenzar a implementar en ciudades como lo es el caso de Concepción.

De igual manera y en comparación con la investigación de la geógrafa Javiera Pérez (2020), los resultados tienen implicaciones que llevan a discutir el espacio público abierto disponible en la ciudad. Por un lado, su investigación se aplica con una metodología similar, pero en una zona suburbana con espacios más abiertos y viviendas más pequeñas, lo que permite la aplicación de un mayor porcentaje de vegetación en las simulaciones. Por el contrario, en esta investigación las zonas se ubican dentro de la ciudad, con espacio público reducido junto a viviendas y edificaciones de mayor tamaño lo cual imposibilita la implementación de un porcentaje de vegetación mayor al 35%, muy por lo bajo al 50% y 90% que incorporó Pérez y que al mismo tiempo contrasta en los resultados obtenidos, confirmando de esta forma valores más significativos en las diferencias de temperaturas que se forjan en el territorio. A raíz de esto, impulsar una política para incrementar la vegetación en espacios céntricos de la ciudad se hace imposible si no existe espacio disponible para ello, por lo tanto, una de las acciones para potenciar estos espacios es repensar la ciudad desde sus espacios públicos, a través de una planificación en el que se compatibilice el desarrollo económico y el mejoramiento en la calidad

ambiental a través de un diseño que incorpore principalmente criterios de conectividad, paisajísticos, y sustentables en el que se alcance a un nivel tanto local como regional.

Finalmente, y en relación con lo anteriormente expuesto, el clima urbano se ve afectado principalmente por la variabilidad y el cambio climático, por ello es importante que en las planificaciones urbanas se tomen en cuenta también estos factores. La planificación urbana procura el bienestar de la población y a tal efecto debe considerar diversos factores físico-bióticos, ambientales, económicos, políticos, culturales; el clima es uno de los que no se debe ignorar (Conde et al., 2013). Dada esta investigación, es urgente que las áreas urbanas contemplen cambios en los espacios verdes a la hora de diseñar y planificar el crecimiento actual y futuro de la ciudad, esto debido a los diversos estudios que simulan una configuración óptima basada en el uso de vegetación y que para este caso se proporcionó a través del programa ENVI-met el cual permite tener un enfoque integral de los efectos que producen los espacios abiertos vegetados (Stocco et al., 2018) en donde se aborda principalmente la mitigación del cambio climático, la calidad del aire, biodiversidad y los efectos sociales y de salud (Chen et al., 2014a; Coombes et al., 2010; Davies et al., 2011; Demuzere et al., 2014; Hansen et al., 2016; Klemm et al., 2015; Strohbach et al., 2013; Tratalos et al., 2007).

5.1 Aportes al conocimiento e investigación

Este estudio sugiere ante los resultados obtenidos a través del programa ENVI-met y los escenarios modelados, el potencial que posee este *software*, ya que permite analizar el sistema de microclima desde diferentes perspectivas. Además, una vez

que el modelo es creado, permite mirar el impacto de la vegetación en condiciones climáticas específicas a través de un complejo modelo de simulación cercano a la realidad.

Con el programa, se permitió una evaluación general del porcentaje promedio en la que la superficie de vegetación comienza a incidir en las temperaturas superficiales de la ciudad, permitiendo de esta forma estimar o fijar cierto estándar de superficies similares a las estudiadas, sugiriendo de esta forma su implementación en sectores donde se encuentre; baja demanda de vegetación urbana, sectores expuestos a altas temperaturas, alta densidad edilicia, entre otros. Por lo tanto, se pretende dimensionar a escala local las interacciones que se producen entre las superficies, edificios y especies vegetales, considerando el impacto de la presencia o ausencia que tienen estas últimas.

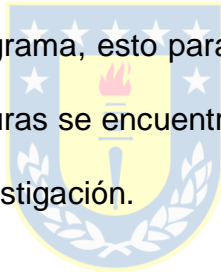


5.2 Limitaciones

Las principales limitaciones tuvieron que ver con el *software* ENVI-met, atribuibles a la versión gratuita del programa, donde se limita la base de datos y parámetros de entrada. Las dimensiones máximas del modelo en la versión LITE son de 50 x 50 x 40 a diferencia de la versión pagada que cuenta con más de 200 x 200 x 30. Otra de las limitantes y que coincide con la investigación de Pérez (2020), consiste en el tamaño del área de la simulación generando un problema de escala en la digitalización de los elementos del barrio, ya que, un píxel abarca un espacio muy grande y así disminuye el detalle de la información. Con relación a los modelos, la limitación tuvo que ver con el porcentaje de vegetación, el cual no podía aumentarse a más de un 35% ya que se contaba con una superficie concreta y finita en donde

solo se podía integrar cierta cantidad de especies para llevar a cabo la simulación. Aun así, la herramienta ha demostrado una buena capacidad, según la literatura para simular y representar la dinámica microclimática dentro de un ciclo diario o la alta resolución espacial y temporal que esta posee (Arriaga et al., 2019).

Por último, sobre los sensores *in situ*, se contó con los datos de humedad relativa de solo uno de los tres sensores, por lo que se carece de una información completa de la relación que mantienen ambas variables pero que no desestiman los resultados y la relación que estas mantienen. En cuanto al análisis con la interpolación cruzada y la relación que se desea establecer con los escenarios simulados de ENVI-met, es necesario formar un estudio con un rango de horario más amplio bajo este último programa, esto para que los resultados y análisis del comportamiento de las temperaturas se encuentren más *ad hoc* a lo que se desea representar bajo este tipo de investigación.



6. CONCLUSIÓN

La infraestructura verde representada por una arborización urbana y residencial es una de las mejores medidas para revertir los efectos de la isla de calor urbana, ya que muestran una tendencia de reducción de las temperaturas en todos sus escenarios simulados. Esto se combina junto a las condiciones de la ciudad, donde la influencias climáticas, morfológicas y estructurales impactan en el descenso o aumento de las temperaturas superficiales del aire. Los resultados comprueban que el aumento en la densidad de vegetación en todas las áreas de interés disminuye la temperatura potencial del aire, cuyos efectos al mismo tiempo disminuirían la intensidad de fenómenos climáticos, como lo es la isla de calor urbana, generando de esta forma un confort térmico urbano beneficioso para sus habitantes.

En relación con los resultados se proponen estrategias mediante la mitigación a través de políticas públicas urbanas que aseguren la sustentabilidad ambiental, donde se actúe de forma simultánea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), empleando indicadores verdes que aseguren cierto porcentaje de ocupación de suelos y superficies de espacios verdes acorde a los requerimientos y condiciones de las áreas a intervenir. El enfoque de estas estrategias debe comenzar por ver a la ciudad como un complejo de sistemas que interactúan entre sí y a la vez son interdependientes en donde se integra lo social, lo económico y lo ambiental.

Dado lo anterior, es necesario un desenvolvimiento que, al momento de planificar las ciudades, se afronte el desafío de priorizar la creación de estos nuevos espacios, generando un efecto positivo tanto climático como social. Esto producto de que, en

los últimos 20 años, son apreciables los efectos negativos de la creciente urbanización en la ciudad, debido al reemplazo de cobertura vegetal por construcciones urbanas (Rojas et al., 2017), generando un aumento de la temperatura superficial. Por lo tanto y tal como menciona Martini et al. (2017), las áreas verdes se deben ubicar de manera dispersa dentro de las ciudades, pues una mayor distribución de estas zonas produce un efecto atenuante más eficiente (Flores-De la O et al., 2018).

Finalmente, se presenta el uso de ENVI-met como un aporte importante a la validación de los resultados de temperaturas a escala local, modelando escenarios a partir de datos meteorológicos y prediciendo en este caso el comportamiento de microclimas con relación a la vegetación presente en el espacio.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, M. (2017). Heat island effect related ecosystem services on an urban setting Las Condes case study. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Santiago, Universidad Andres Bello, 87p. Recuperado de <http://repositorio.unab.cl/xmlui/handle/ria/7065>
- Alchapar, N. y Correa, E. (2016a). Pautas de diseño para disminuir las temperaturas urbanas en regiones con alta productividad solar. Parámetros morfológicos y materiales. *Revista Hábitat Sustentable*, 6(1), 84–95. Recuperado de <https://doi.org/10.22320/07190700.2016.06.01.09>
- Alchapar, N. y Correa, E. (2016b). Potencial de las Herramientas de Simulación para la Planificación Sustentable Simulation. *Acta Del I Encuentro Nacional Sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable*, 425–436. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/59417/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1
- Alchapar, N., Pezzuto, C. y Correa, E. (2018). Parámetros urbanos morfo-materiales y su correlación con las temperaturas de aire en verano. *Ambiente Construido*, 18(4), 199–213. Recuperado de <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400301>
- Alchapar, N., Correa, E. y Cantón, A. (2018). ¿Techos reflectivos o verdes? Influencia sobre el microclima en ciudades de zonas áridas. Mendoza, Argentina. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 11(2), 1–23. Recuperado de <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/88499>
- Arellano, B. y Roca, J. (2018). Áreas Verdes e Isla De Calor Urbana. En: Libro de proceedings, CTV 2018. XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual. “Ciudades y Territorios Inteligentes”. Mendoza, 5-7 septiembre 2018. Barcelona: CPSV, 2018, p. 417-432. Recuperado de <https://doi.org/10.5821/ctv.8255>
- Arriaga, M., Martínez-Torres, K., Rincón-Martínez, J. & González-Trevizo, M. (2019). Programa de simulación ENVI-MET en el estudio de vegetación urbana. En *Perspectivas científico tecnológicas sobre desarrollo e innovación*. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/340389960>
- Balter, J., Alchapar, N., Correa, E. y Ganem, C. (2021). Modelado urbano microclimático para la simulación termo-energética de viviendas en edificios en altura en Mendoza, Argentina. Integración del software ENVI-met y EnergyPlus. *Informes de La Construcción*, 73(561), 1-11. Recuperado de <https://doi.org/10.3989/ic.76749>
- Bruse, M. (2004). ENVI-met 3.0: Updated Model Overview. www.envi-met.com
- Cárdenas-Celis, A. (2019). La influencia de la arborización y de la pavimentación en el confort térmico urbano en la avenida Leopoldo Machado, Macapá- Brasil, 2017. Tesis para optar el grado académico de maestra en Arquitectura y

- Sostenibilidad. Perú, Universidad Ricardo Palma, 219p. Recuperado de <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/1867>
- Carfan, A., Galvani, E. y Nery, J. (2012). Study of thermal comfort in the City of São Paulo using ENVI-met model. *Investigaciones Geograficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, (78), 34-47.
- Castro, S. (2005). Evaluación de un índice para valorar las áreas verdes urbanas: su aplicación y análisis en la localidad de barrio Dent y Altos del Escalante con una perspectiva geográfica. *Revista Reflexiones*, 84(1). Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/11417>
- Castro, S. A., Leiva, N. G., Bolados, M. & Figueroa, J. A. (2018). Riqueza y distribución de la flora urbana de Santiago de Chile: una aproximación basada en interpolación IDW. *Caderno de Pesquisa*, 30(1). Recuperado de <https://doi.org/10.17058/cp.v30i1.12198>
- Cifuentes, C. (2017). Análisis entre la temperatura superficial y temperatura atmosférica en la formación de Islas de Calor Urbano y efectos de las coberturas naturales en la ciudad de Concepción. Tesis para optar al Título de Geofísico. Concepción, Universidad de Concepción, 119p. Recuperado de <https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2018/05/201708-Carlos-Cifuentes-Verdugo.pdf>
- Conde, C., Pabón, D. y Sanchez, R. (2013). La importancia de la información climática para la planificación del crecimiento y el desarrollo urbano. En *Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina* (1.ª ed., pp. 25–40). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11362/37075>
- Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J., Prakash, A., Mattar, C., Skoković, D. y Sobrino, J. (2018). An improved single-channel method to retrieve land surface temperature from the landsat-8 thermal band. *Remote Sensing*, (10), 1-14. <https://doi.org/10.3390/rs10030431>
- De la Barrera, F., & Henríquez, C. (2017). Vegetation cover change in growing urban agglomerations in Chile. *Ecological Indicators*, 81(October), 265–273. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.067>
- De la Barrera, F., Reyes-Paecke, S. (2020). Green infrastructures to mitigate extreme temperatures in cities. (In press) Massimo Palme and Agnese Salvati (Eds): Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies. Springer.
- Flores-De la O, J., Villanueva-Solis, J. y Quiroa-Herrera, J. (2018). Evaluación de los efectos microclimáticos que tiene la vegetación en la mitigación de la isla de calor urbana: Parque en la ciudad de Torreón, México. *Revista de Ciencias Ambientales*, 52(2), 123-140. Recuperado de <https://doi.org/10.15359/rca.52-2.7>
- Flores-Xolocotzi, R. (2012). Incorporación Desarrollo Sustentable y gobernanza a la gestión y planificación de áreas verdes urbanas. *Frontera Norte*, (24), 165-190.

- Frick, J. (2017). Análisis de la relación entre temperaturas superficiales y tejidos urbanos como insumo para la planificación urbana. El caso de Temuco-Padre las Casas. *Espacio y Desarrollo*, (32), 75-98.
- Kurbán, A. y Cúnsulo, M. (2015). Estudio del efecto térmico de espacios verdes urbanos del árido con sensores remotos. *Revista hábitat sustentable*, (5), 43–55. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/1932>
- Lamarca, C., Qüense, J. y Henríquez, C. (2018). Thermal comfort and urban canyons morphology in coastal temperate climate, Concepción, Chile. *Urban Climate*, 23, 159–172. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.10.004>
- Langemeyer, J., Wedgwood, D., McPhearson, T., Baró, F., Madsen, A. y Barton, D. (2020). Creating urban green infrastructure where it is needed – A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Science of the Total Environment*, 707. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135487>
- Lucas, Andrea. (2018). Más de una década de cambio climático en Chile: análisis de las políticas domésticas. *Boletín mexicano de derecho comparado*, 51(153), 587-625. Recuperado de <https://doi.org/10.22201/ijj.24484873e.2018.153.13651>
- Martini, A., Biondi, D., y Batista, A. C. (2017). Urban forest components influencing microclimate and cooling potential. *Revista Árvore*, 41(6). Recuperado de <https://www.scielo.br/j/rarv/a/6yTp3HSYh4kfhFJV5Tky3ZP/?lang=en>
- Martínez, J. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. *Revista Investigaciones Geográficas*, 83-99. Recuperado de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/40931/3/Investigaciones_Geograficas_62_06.pdf
- MMA, SINIA. (2020). Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente. (Nro. 8). Gobierno de Chile, pp. 60-75. Recuperado de http://www.mapama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM/PDF_AM_Ambienta_2016_115_60_75.pdf%0Ahttp://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/Dinamicas/secciones/articulos/Lucio16.htm
- MMA. (2017). Plan Nacional Climático 2017-2022. 54,14 MMA. (2017). *Plan Nacional Climático 2017-2022*. 54,13. Recuperado de https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/plan_nacional_climatico_2017_2.pdf
- Morales, V., Castro, L., Vargas, M. y Rojas, T. (2018). Indicadores ambientales de áreas verdes urbanas para la gestión en dos ciudades de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1421–1435. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32258>
- Pacifici, M. y Nieto-Tolosa, M. (2020). *Comparing ENVI-Met and Grasshopper Modelling Strategies to Assess Local Thermal Stress and Urban Heat Island Effects*. (In press) Massimo Palme and Agnese Salvati (Eds): Urban

Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies. Springer. Recuperado de <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-030-65421-4>

- Palacios, J., Zárate-Gómez, R., Minaya, R., Martín, M. y Benavides, J. (2020). Predicción de la pérdida de la cobertura vegetal por aumento de áreas urbanas en Iquitos, Perú. *Ciencia Amazónica (Iquitos)*, 7(1), 37–50. <https://doi.org/10.22386/ca.v7i1.263>
- Perez, J. (2020). Rol de la vegetación en el control del microclima urbano y en la adaptación a los efectos del cambio climático en el barrio de San Pedro de la Costa I ubicado en San Pedro de la Paz, Chile. Tesis para optar al Título de Geógrafa. Concepción, Universidad de Concepción, 85p. Recuperado de <http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/6217/1/TESIS%20ROL%20DE%20LA%20VEGETACION%20EN%20EL%20CONTROL%20DEL%20MICROCLIMA%20URBANO%20.Image.Marked.pdf>
- Picón, M. C., de la Barrera, F., Reyes, S., Forray, R., & Berrizbeitia, A. (2017). Ecological Planning in Santiago, Chile. How Far Are We? Classification of Planning Initiatives Based on a Brief Literature Review. *Investig. Geogr. Chile*, 54(15110020), 105–126. Recuperado de <https://investigacionesgeograficas.uchile.cl/index.php/IG/article/view/48044/50585>
- Reyes, S. y Figueroa, 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*, 36(109), 89–110. Recuperado de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-71612010000300004
- Rojas, C., de la Barrera, F., Aranguíz, T., Munizaga, J. y Pino, J. Efectos de la urbanización sobre la conectividad ecológica de paisajes metropolitanos. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(2), 155-182. Recuperado de <http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/pdf/reuge/v26n2/v26n2a07.pdf>
- Romero, H., Salgado, M. y Fuentes C. (2011). Segregación socio-ambiental en espacios intraurbanos de la ciudad de Santiago de Chile. *Instituto de Geografía-Unam*, (525), 55–82. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/118100/SegregacionSocioAmbiental.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salas-Esparza, M. y Herrera-Sosa, L. (2017). La vegetación como sistema de control para las Islas de Calor Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Revista Hábitat Sustentable*, 7(1), 14–23. Recuperado de <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2737/2310>
- Salgado V., Vásquez, A. y Fuentes, C. (2008-11). Desigualdades Socio-Ambientales Urbanas. Estudio de Caso en la Comuna de Peñalolén. 1-12. Recuperado de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/118150>
- Sarricolea, P., Aliste, E. y Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de

- la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8, 71-84p. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/26890748.pdf>
- Sarricolea, P. y Vide, J. (2014). La isla de calor urbana del área metropolitana de Santiago (AMS) de Chile a partir de diferencias térmicas de los observatorios de Talagante y Cerrillos. *Perspectiva Geográfica*, 18(2), 239. Recuperado de <https://doi.org/10.19053/01233769.2677>
- Trlica, A., Hutyra, L., Schaaf, C., Erb, A. y Wang, J. (2017). Albedo, Land Cover, and Daytime Surface Temperature Variation Across an Urbanized Landscape. *Earth's Future*, 5(11), 1084–1101. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/2017EF000569>
- Venter, Z., Krog, N. y Barton, D. (2020). Linking green infrastructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. *Science of the Total Environment*, 709, 136193. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136193>
- WHO Regional Office for Europe. (2016). *Urban green spaces and health*. Recuperado de https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/321971/Urban-green-spaces-and-health-review-evidence.pdf
- Venter, Z., Krog, N. y Barton, D. (2020). Linking green infraestructure to urban heat and human health risk mitigation in Oslo, Norway. *Science of the Total Environment*, 709. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31887497/>
- Zölch, T., Maderspacher, J., Wamsler, C. y Pauleit, S. (2016). Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 305–316. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011>