



**“Factores explicativos del comportamiento espacial de la temperatura del aire de invierno y verano para la ciudad de Santiago durante el periodo 2007 – 2017”**

Memoria para optar al título profesional de Geógrafo

**Profesora Guía: Pamela Smith Guerra**

**Alumno: Alan Luis Andy Vargas Valdés**

**Santiago de Chile, 07 de enero de 2021.**

## **Agradecimientos**

*En primera instancia quisiera dar las gracias a mi madre y mi padre, Marisol y Julio; los cuales siempre han estado ahí para mí, entregándome su cariño y apoyo incondicional, les agradezco por siempre enseñarme y educarme, y entregarme lo más valioso que unos padres pueden entregarle a su hijo su tiempo.*

*También me gustaría agradecer a todos aquellos amigos que me han acompañado a lo largo de mi vida y de este proceso, en especial a Valentina y Mauricio los cuales siempre me ayudaron y aconsejaron cuando algo no resultaba o simplemente los ánimos flaqueaban, pues sencillo no fue este proceso, pero juntos logramos llevarlo a cabo.*

*Y finalmente dar mis más sinceros agradecimientos a la profesora Pamela, por su paciencia y su disposición a resolver siempre nuestras dudas y darnos consejos para poder llevar a buen término este proyecto, sobre todo en tiempos tan complejos como los vividos en los últimos meses.*

# INDICE

<b>Agradecimientos</b> .....	2
<b>Resumen</b> .....	6
<b>Abstract</b> .....	6
<b>Capítulo I: Presentación</b> .....	8
<b>1.1 Introducción</b> .....	8
<b>1.2 Planteamiento del problema</b> .....	9
<b>1.3 Objetivos</b> .....	12
<b>Capítulo II: Estado del asunto</b> .....	13
<b>2.1 Clima urbano</b> .....	13
2.1.1 <i>Expansión urbana</i> .....	13
<b>2.3 Factores explicativos e investigaciones del clima urbano de Santiago</b> .....	14
2.3.1. <i>Humedad Relativa</i> .....	14
2.3.2. <i>Presencia y estado de la vegetación</i> .....	15
2.3.3. <i>Proporción de superficie Impermeabilizada</i> .....	16
2.3.4. <i>Rugosidad Urbana</i> .....	16
2.3.5. <i>Temperatura de emisión superficial</i> .....	17
2.3.6. <i>Flujo de calor antropogénico</i> .....	18
2.3.7. <i>Distancia a cursos de agua o al mar</i> .....	19
<b>Capítulo III: Planteamiento Metodológico</b> .....	20
<b>3.1. Materiales</b> .....	20
<b>3.2. Métodos</b> .....	21
3.2.1. Determinar los factores explicativos de la distribución de las temperaturas para Santiago .....	21
3.2.2. Analizar la distribución de las temperaturas del aire de la ciudad de Santiago durante el periodo 2007 – 2017 y las variaciones de estas a través de los años, evaluando la intensidad de la isla de calor urbana. ....	33
<b>Capítulo IV: Resultados</b> .....	37
<b>4.1. Datos atmosféricos utilizados en los Modelos de regresión y en la espacialización de las temperaturas a las 22 hrs de invierno y verano de Santiago</b> .....	37
<b>4.2. Selección de los Variables</b> .....	40
<b>4.3. Correlación de variables con la temperatura atmosférica registrada</b> .....	41

<b>4.4. Modelos de Regresión .....</b>	<b>44</b>
<b>4.5. Distribución espacial de las temperaturas modeladas .....</b>	<b>46</b>
4.5.1. Distribución espacial de la temperatura del aire para las noches de Veranos (22:00 hrs).....	46
4.5.2. <i>Distribución espacial de las temperaturas modelo Invierno 22:00 hrs.....</i>	<i>50</i>
<b>4.6. Diagnóstico de los resultados de los modelos.....</b>	<b>55</b>
4.6.1 <i>Diagnostico del modelo de distribución de temperaturas de las 22 hrs en Verano.....</i>	<i>55</i>
4.6.2 <i>Diagnostico del modelo de distribución de temperaturas de las 22 hrs en Invierno.....</i>	<i>57</i>
<b>Capítulo V: Discusión y conclusión .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1. Discusiones .....</b>	<b>61</b>
<b>5.2. Conclusiones.....</b>	<b>64</b>
<b>Capítulo VI: Bibliografía.....</b>	<b>66</b>
<b>Capitulo VII: Anexos .....</b>	<b>69</b>

## Índice de figuras.

<b>Figura 1: Formula Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2: Relaciones entre las ICU de superficie y atmosféricas.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3: Cartografía del área de estudio y las estaciones meteorológicas.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4: Código Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5: Ejemplo de Grafico anual valores diarios NDVI año 2016.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 6: Código Temperatura de Emisión Superficial. ....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 7: Ejemplo de Grafico Temperatura de Emisión Superficial Nocturna 2007 – 2017.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 8: Código NDBI.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 9: Ejemplo de Grafico NDBI año 2017.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 10: Caminos o red vial.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 11: Cursos de agua.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 12: Grafico de temperaturas promedio a las 22 Hrs de Veranos 2007 al 2017.....</b>	<b>37</b>

<b>Figura 13: Grafico de temperaturas promedio a las 22 Hrs de Inviernos 2007 al 2017.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 14: Distribución de temperaturas 22Hrs de Verano del 2007.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 15: Distribución de temperaturas 22Hrs de Verano del 2017.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 16: Distribución de temperaturas 22Hrs de Invierno del 2007.....</b>	<b>50</b>
<b>Figura 17: Distribución de temperaturas 22Hrs de Invierno del 2017.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 18: Cartografía de diagnóstico, temperaturas de Verano 2007.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 19: Cartografía de diagnóstico, temperaturas de Verano 2017.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 20: Cartografía de diagnóstico, temperaturas de Invierno 2007.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 21: Cartografía de diagnóstico, temperaturas de Invierno 2017.....</b>	<b>58</b>

### Índice de tablas

<b>Tabla 1: Estaciones utilizadas y coordenadas.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 3: Listado factores explicativos y los autores que los abordan.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 4: Análisis de Correlación variables.....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 5: Ecuaciones modelos de regresión 22Hrs.....</b>	<b>43</b>

## **Resumen**

En la Actualidad, procesos como la urbanización y densificación de la población que habita en las ciudades han significado fuertes alteraciones en las coberturas naturales y seminaturales, como lo son campos de cultivos y vegetación dispersa, los cuales han sido reemplazados por usos de suelo urbanos, generando variaciones en el albedo y la reflectividad de la luz y el calor, esto debido a los diferentes materiales que son utilizados para la construcción estos. Lo cual también viene acompañado de una baja absorción de agua por parte del suelo debido a la impermeabilización de las superficies urbanas y alteraciones en el comportamiento de térmico de las superficies, propiciando un mayor grado de almacenamiento y emisión de calor debido a la mayor superficie expuesta y en contacto con la atmosfera, propiciando un aumento en las temperaturas (Grimmond & Oke, 1998; Kusaka, 2008). Estas nuevas condiciones que se presentan en el medio ambiente urbano derivan en la existencia del clima urbano (Molina, 2007; Sarricolea et al., 2008)

La presente investigación busca abordar la relación existente entre las temperaturas atmosféricas registradas por distintas estaciones meteorológicas y las distintas variables que podrían ser factores explicativos del comportamiento y distribución de las temperaturas de la ciudad de Santiago para el periodo 2007 al 2017. Esto con el fin de establecer parámetros que permitan la espacialización de las temperaturas atmosféricas para las épocas de invierno y verano mediante la construcción de modelos de regresión múltiple. Para posteriormente analizar, comparar y validar la distribución de temperaturas obtenidas de los modelos resultantes con las temperaturas que fueron registradas en las distintas estaciones meteorológicas que se distribuyen en la ciudad de Santiago. Respecto a los resultados obtenidos de la espacialización de las temperaturas del aire a través de los modelos de invierno y verano generados se tiene que las temperaturas más altas se encuentran principalmente hacia el sector poniente y el centro de la ciudad, y las más bajas se distribuyen principalmente en el sector nororiente y parte del sector sur de la ciudad. El factor que resulto ser el más determinante en este último punto fue la vegetación.

## **Abstract**

At present, processes such as urbanization and densification of the population living in cities have meant strong alterations in natural and semi-natural covers, such as crop fields and scattered vegetation, which have been replaced by urban land uses, generating variations in the albedo and the reflectivity of light and heat, this due to the different materials that are used for their construction. This is also accompanied by a low water absorption by the soil due to the waterproofing of urban surfaces and alterations in the thermal behavior of the surfaces, favoring a higher degree of storage and heat emission due to the larger exposed surface. and in contact with the atmosphere, causing an increase in temperatures (Grimmond & Oke, 1998; Kusaka, 2008). These new conditions that occur in the urban environment lead to the existence of the urban climate (Molina, 2007; Sarricolea et al., 2008) This research seeks to address the relationship between the atmospheric temperatures recorded by different meteorological stations and the different variables that could be explanatory factors of the behavior and distribution of temperatures in the city of Santiago for the period 2007 to 2017. This in order to establish parameters that allow the spatialization

of atmospheric temperatures for the winter and summer seasons through the construction of multiple regression models. To later analyze, compare and validate the distribution of temperatures obtained from the resulting models with the temperatures that were recorded in the different meteorological stations that are distributed in the city of Santiago. Regarding the results obtained from the spatialization of air temperatures through the generated winter and summer models, it is found that the highest temperatures are mainly towards the western sector and the center of the city, and the lowest are distributed mainly in the northeast sector and part of the southern sector of the city. The factor that turned out to be the most determining factor in this last point was the vegetation.

## **Capítulo I: Presentación**

### **1.1 Introducción**

En el presente trabajo de investigación de tesis se abordaron los Factores explicativos del comportamiento espacial de la temperatura del aire de invierno y verano para la ciudad de Santiago durante el periodo 2007 – 2017, los cuales fueron determinados en una primera instancia mediante revisión bibliográfica, quedando los siguientes; Cobertura de vegetal, cobertura de suelo construida, humedad relativa, temperatura de emisión superficial, distancia a cursos de agua y distancia a caminos. Posteriormente fue generada una base de datos utilizando los registros disponibles en el Servicio Nacional de la calidad del Aire (SINCA) y la Dirección General de Aguas (DGA), los cuales contaban con la información a nivel horaria de temperatura atmosférica registrada y humedad relativa del aire. El resto de los valores de los demás factores explicativos fueron obtenidos a través de Google Earth Engine. A esta base de datos que contenía valores de 10 años ( 2007 - 2017) de los factores o variables antes mencionados se le aplicaron análisis de estadísticos de normalidad y correlación para después poder generar modelos de regresión múltiple mediante el software SPSS, los cuales sirvieron para poder espacializar las temperaturas del aire de la ciudad de Santiago y así como poder analizar el comportamiento y distribución de estas a lo largo de la superficie urbana, relacionando así los distintos factores con las variaciones de temperatura a lo largo de la extensión de la ciudad y su entorno; dentro de los cuales el que más destacó fue la superficie con cobertura vegetal generando disminución en las temperaturas atmosféricas tanto para el caso de invierno como para el de verano. Finalmente se llevaron a cabo diagnósticos de los modelos generados a través de la comparación de las temperaturas atmosféricas modeladas y las temperaturas atmosféricas registradas.

## 1.2 Planteamiento del problema

En los últimos años el cambio climático se ha convertido en el tema central de debates e investigaciones de todo tipo, debido a que sus consecuencias se están manifestando en distintos puntos del planeta. Ejemplo de lo anterior, puede ser el caso de Ciudad del Cabo capital de Sudáfrica, la cual, en el año 2018, presentó un déficit hídrico que produjo que para el día 11 de mayo de 2018 las represas estuvieran al 13,5% de su capacidad, por lo que el agua debió ser racionada a 25 lts diarios por persona (El País, 2018). De acuerdo con la superintendencia de servicios sanitarios (Siss,2019) una persona en Chile gasta en promedio 170 litros de agua al día, y en una sola descarga de un WC se pueden utilizar de entre 10 a 22 litros de agua (Siss,2019), lo cual nos da una idea de cómo sería la situación de llegar tener que racionar el agua como en el caso de Ciudad de Cabo.

El cambio climático ya ha comenzado con generar cambios en la vida diaria de algunas ciudades y sus habitantes, además, si a este se le agrega el crecimiento de la población, y la expansión en el territorio de la mancha urbana, se tiene que no solo existen repercusiones a nivel de ciudad, sino que, además, se generan variaciones en las características medio ambientales de distintas zonas geográficas; tales como alteraciones de la cobertura vegetal (Molina, 2007; Sarricolea et al., 2008), impermeabilización de superficies (Grimmond & Oke, 1998; Kusaka, 2008), aumento de las temperaturas superficiales (Kusaka, 2008), etc. Algunas de estas variaciones se han visto reflejadas en el comportamiento del clima al interior de la ciudad, ejemplo de ello son las islas de calor urbana (ICU), la que se constituye como una de las principales características del clima urbano (LAMPTEY ,2009). A su vez, las variaciones que la ICU sufra están muy relacionadas con el incremento de la población de las ciudades, y con ello también al cambio de usos de suelo, todo esto sumado al contexto de cambio climático actual. Tal y como indican Sarricolea y Romero (2010: pág. 80) “los impactos que producen las ciudades sobre el medio ambiente están estrechamente relacionados con los montos de población que albergan y el tamaño físico de ellas”. Por lo cual, una ciudad como Santiago, que se encuentra en constante expansión verá acentuados los efectos sobre el clima por el aumento de los montos de población y expansión de la urbe.

Es por ello por lo que se plantea como necesario abordar el comportamiento de la distribución de las temperaturas atmosféricas en la ciudad y con ello, el fenómeno de islas

de calor urbanas; las cuales de acuerdo con Sarricolea et al. (2008: pág. 71) “corresponden a un aumento de origen antrópico de las temperaturas de la ciudad en comparación con su entorno inmediato de carácter natural y rural, siendo más intensa dicha diferencia en las noches”. El clima urbano se asocia con factores y procesos que están relacionados con su formación y comportamiento, por ello es importante destacar en este punto que, como indica Stewart & Oke, (2009) en Smith y Romero (2016) “la complejidad de los procesos que generan un clima urbano crece a medida que se incrementa la escala de análisis, y van adquiriendo una importancia creciente aspectos como los usos y coberturas del suelo, la morfología de la ciudad y la materialidad de sus construcciones”. Esto último, nos indica un punto muy importante a considerar al momento de llevar a cabo investigaciones referentes al clima urbano, el cual es que este es dinámico y complejo, es decir está en constante cambio y las variables que afectan a su comportamiento también varían a lo largo del tiempo. Es por ello que en para poder lograr una mejor comprensión y un análisis más detallado del comportamiento del clima urbano se hace necesario incorporar distintas variables y factores que tienen distintos grados de influencia en este y evidenciar los cambios y alteraciones que estas tienen a lo largo de los años

Respecto a los factores explicativos de la isla de calor urbana, en Chile se han realizado trabajos como los de Smith y Romero (2016), quienes los estudian para explicar la distribución de las temperaturas del aire en época de verano en Santiago, a través de un modelo de regresión múltiple, en el cual la temperatura es considerada la variable dependiente. Otra investigación que existe a nivel nacional es la de Sarricolea et al. (2008), que apunta a analizar la intensidad máxima de la ICU nocturna de la ciudad de Rancagua y los factores explicativos asociados a ella mediante análisis espacial y geoestadístico.

Cabe mencionar que el presente estudio aborda la misma área de estudio que el realizado por Smith y Romero (2016); la ciudad de Santiago, esto se debe a que, siendo la capital del país, se encuentra en constante expansión y crecimiento, generando así cambios a nivel medio ambiental, ocupando nuevas extensiones de suelo que antes no eran parte del área urbana. Por lo cual se hace necesario el abordar esta área de estudio y generar un nuevo modelo de distribución de temperaturas del aire, pues el estudio de Smith y romero (2016) tomaba como referencia únicamente el verano del año 2009, y además de haber transcurrido 11 años, actualmente se cuenta con nuevas herramientas disponibles, como Google Earth Engine, facilitando el llevar a cabo estudios en torno a clima urbano, ya que

pone a disposición una gran cantidad de información proveniente de imágenes satélites, que además, pueden ser procesadas en dicho software

Por lo anterior, el presente trabajo de memoria de título plantea abordar como tema de estudio los factores explicativos del comportamiento espacial de la temperatura del aire para la ciudad de Santiago a lo largo de un periodo de 10 años, y con ello, la consecuente distribución espacial y comportamiento de la isla de calor urbana. Esto debido a que el clima urbano es un sistema dinámico y en constante cambio, y las variables que influyen en el comportamiento y distribución de las temperaturas en la ciudad también sufren alteraciones y modificaciones con el paso de los años y los procesos asociados a la expansión y densificación urbana. Por lo cual se hace necesario el analizar y describir el escenario actual de la distribución y comportamiento de las temperaturas dentro del área urbana y sus alrededores, y con ello poder ver cuales ha sido los procesos y alteraciones que ha sufrido el medio ambiente urbano a lo largo de los últimos años.

## **1.3 Objetivos**

### **Objetivo General**

“Generar un modelo de distribución de temperaturas atmosféricas a través de la identificación y análisis de los factores explicativos para la ciudad de Santiago durante el periodo 2007 – 2017”

### **Objetivos Específicos:**

- Determinar los factores explicativos de la distribución de las temperaturas para Santiago.
- Analizar y evaluar la distribución de las temperaturas del aire de la ciudad de Santiago durante el periodo 2007 - 2017 y las variaciones de esta a través de los años, evaluando la intensidad de la isla de calor urbana.

## Capítulo II: Estado del asunto

### 2.1 Clima urbano

El estudio del clima urbano a lo largo de las últimas décadas ha tomado gran relevancia, pues las ciudades se han convertido en el principal polo de atracción de población, lo que ha generado cambios a nivel de superficies construidas por la demanda de espacio y crecimiento de la urbes, esto a su vez, como indican Smith y Andrade (2013) en la actualidad se reconoce que constituye un problema ambiental, es por ello que a nivel de climatología urbana se busca encontrar una relación entre los diferentes componentes o factores, tanto naturales como artificiales que modifican y configuran el medio ambiente, y con ello el clima, a nivel urbano.

Uno de los fenómenos más característicos a nivel de clima urbano es la llamada Isla de calor urbana, la cual como nos indica LAMPTEY (2009) en Smith y Andrade (2013) “es la principal consecuencia de la modificación de las temperaturas atmosféricas” y que además se constituye como la diferencia en el gradiente térmico, que existe entre áreas urbanas y su entorno rural o natural, donde la ciudad es comparativamente más caliente (OKE 1987; CUADRAT et al. 2003; ARNFIELD 2003)

#### 2.1.1 Expansión urbana

Actualmente las ciudades a nivel mundial han visto transformadas y alteradas sus dinámicas de crecimiento y expansión; esto debido a que se han transformado en polos de atracción de población, llegando en algunas zonas, como en el caso de Latinoamérica, a cifras donde casi dos tercios de la población vive en ciudades y cercano a un 80% de población de esta región vive en zonas urbanas (CEPAL, 2012), por lo cual nuestra región se posiciona como una de las más urbanizadas del mundo.

Es por ello, por lo que hoy en día diversas investigaciones y estudios centran su atención en el medio ambiente urbano y los diversos fenómenos que en él se desarrollan. Ejemplo de ello; son los cambios en la superficie del territorio, aumentando la superficie ocupada por el área urbana y reemplazando áreas naturales, como nos indica Smith (2011) “*El aumento de la superficie urbana y el consecuente reemplazo de superficies naturales y seminaturales por condiciones fuertemente artificializadas, no está exento de efectos sobre el medio ambiente*”. Estos efectos sobre el medio ambiente se hacen presentes debido a

que estas áreas naturales cumplieran con determinados servicios ambientales (Romero, 2001; Romero *et al.*, 2003) como lo son el control de temperaturas, humedad, infiltración de aguas, etc. Los cuales ya no siguen la misma dinámica al ser cubiertos y reemplazados por áreas urbanas, las cuales son construidas y cubiertas por nuevas superficies artificiales, generándose así impermeabilización de los suelos. Como se explicaba anteriormente, esto genera alteraciones a niveles del medio ambiente urbano, debido a que los distintos factores o variables que indican en diferentes grados sufren variaciones y alteraciones a lo largo del paso de los años, es por ello que para poder entender la manera en que estos factores se comportan y tienen incidencia en el clima urbano es que se hace necesario abordar su estudio dentro de un periodo de tiempo en sea posible evidenciar alteraciones de estos y como han influido en la distribución de la temperatura a través de los años.

### **2.3 Factores explicativos e investigaciones del clima urbano de Santiago**

La isla de calor como fenómeno del clima urbano, presenta, al igual que este, factores que explican la distribución y configuración de las temperaturas a nivel ciudad, denominados factores explicativos, estos han sido abordados a diferentes maneras y bajo variadas metodologías por distintos autores. Algunos de estos factores explicativos son: Superficie Impermeabilizada (Grimmond & Oke, 1998; Kusaka, 2008), presencia de vegetación (Molina, 2007; Sarricolea *et al.* 2008), humedad relativa (Carreras *et al.*, 1990; Coutts *et al.*; 2007), rugosidad urbana (Yamashita *et al.*, 1986; Sproken-Smith & Oke, 1999), temperatura de emisión superficial (Kusaka, 2008; Sarricolea y Romero, 2006), Distancia a cursos o cuerpos de agua (Sarricolea y Romero, 2009; Coutts *et al.*, 2007), flujo de calor antropogénico (Guijarro, 1998; Grimmond & Oke, 1998). Los cuales se pasan a detallar a continuación:

#### *2.3.1. Humedad Relativa*

Como señala Carreras *et al.* (1990) en Smith y Andrade (2013) *“la temperatura atmosférica se relaciona de manera inversa con la humedad relativa, consecuentemente cuando se genera una isla de calor, también se genera una isla de sequedad”* y además como Coutts *et al.* (2007) dentro del mismo texto anterior indica que, el hecho de que *“las ciudades sean más calientes, así como la presencia de islas de calor, responde principalmente a la falta de humedad”*. Otro punto importante por mencionar respecto a la humedad relativa del aire

es que actualmente algunos estudios indican que, al producirse alteraciones a nivel de paisajes naturales, incluso a baja escala, esto genera como consecuencia disminución a nivel de evapotranspiración y con ello menor disponibilidad de humedad a nivel atmosférico, lo que a su vez genera disminución de la regulación de las temperaturas (Smith y Andrade ,2013). Esto último se relaciona directamente con el siguiente factor explicativo a abordar.

### 2.3.2. *Presencia y estado de la vegetación*

Los cambios en los usos de suelo asociados a la urbanización generan modificaciones y cambios a nivel de clima urbano, como se indica en la descripción del factor explicativo anterior, se generan cambios a nivel de regulación de las temperaturas. Por el contrario, la presencia de vegetación ayuda a inhibir el grado de deterioro ambiental a nivel urbano, y además a regular los valores extremos; tanto de las temperaturas como de la humedad relativa (Vilela 2004; Cuadrat et al. 2005). Esto debido a que la cobertura vegetal genera una mayor evapotranspiración con lo cual eleva la humedad relativa del aire y además genera que la cantidad de energía disponible a nivel atmosférico que pueda ser absorbida por las superficies urbanas construidas sea menor (Smith y Romero ,2016).

Otro punto importante por abordar respecto a este factor como indican Bolund & Hunhammar (1999) es el hecho de que *“sus sombras disminuyen hasta en un 20% la radiación solar y su follaje y densidad pueden reducir entre un 10 y 30 % la velocidad del viento”*. Es debido a lo anteriormente descrito que gran parte de los autores que han escrito acerca de la isla de calor urbano y sus factores explicativos, apuntan a que estas se forman debido a la falta o eliminación de la vegetación. ( Molina 2007; Sarricolea et al. 2008).

Cabe mencionar que este factor explicativo es integrado como variable a los modelos de distribución de temperaturas; mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual es calculado mediante las bandas roja e infrarroja cercana a través de la siguiente ecuación

#### **Figura 1: Formula Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)**

$$\text{NDVI} = (\text{IRC}-\text{R}) / (\text{IRC}+\text{R})$$

Fuente: Elaborado en base a Sarricolea et al. 2008

### 2.3.3. Proporción de superficie Impermeabilizada

Respecto a este factor explicativo de la isla de calor urbana, se tiene que los cambios generados debido a la urbanización, y la consecuente sustitución de las superficies naturales y/o cobertura vegetal por materiales de construcción como cemento o pavimento generan alteraciones a nivel de clima urbano esto debido a como nos indican los autores Grimmond & Oke (1998) y Kusaka (2008) estas coberturas impermeabilizadas actúan de diferente forma al absorber , almacenar y transferir el calor a nivel atmosférico.

Un ejemplo de lo anteriormente descrito es lo que señalan Smith y Romero (2016) de acuerdo con Coutts *et al.* (2007), en donde, *“respecto al comportamiento de la temperatura atmosférica, se ha demostrado que en la tarde y tras la puesta de sol, las ciudades registran temperaturas más elevadas, que alcanzan su máximo en las islas de calor que generalmente corresponden a superficies de mayor densidad de ocupación humana”*. En donde *“los factores que explican este proceso se relacionan con la eliminación de la vegetación y de los suelos permeables, que generan una mayor evaporación y humedad relativa del aire.”* Y esto a su debido a la menor admitancia térmica de los elementos de las superficies construidas (Grimmond & Oke, 1998).

Otro punto importante por abordar respecto a las superficies impermeabilizadas es lo que indican los autores Arnold & Gibbons (1996), al impermeabilizar superficies, y con ello inhibir también la infiltración de agua, se reduce considerablemente la capacidad de evapotranspiración que este tiene, llegando a ser del orden del 30% o 40% menos que en aquellas áreas donde el suelo si mantiene su permeabilidad.

### 2.3.4. Rugosidad Urbana

La rugosidad urbana hace referencia a un índice respecto a la altura de construcciones y edificaciones, a escala del dosel. Se le considera como factor explicativo pues estas edificaciones atrapan la radiación de onda larga durante la noche, lo que genera que la velocidad de enfriamiento de los objetos y superficies urbanas sea más lenta, a comparación de que si no existieran obstáculos (Smith y Romero ,2016). Y, además, cabe mencionar que estas estructuras urbanas generan modificaciones respecto a; el acceso a luz solar en el día y alteran los flujos de viento a nivel de vías y calles (Sproken-Smith & Oke, 1999; Eliasson, 1999; y Honjo *et al.*, 2003. en Smith y Romero ,2016).

Otro punto por abordar respecto a la rugosidad urbana es el que nos ofrece Yamashita et al. (1986) en Sarricolea (2008), en donde se destaca la importancia de la densidad de edificación y la rugosidad urbana, pues estas tienen una directa influencia “*en el factor de en el factor de visión del cielo (sky view factor), aumentando la intensidad de las temperaturas del aire*”

### 2.3.5. *Temperatura de emisión superficial*

Como ya se enunciaba en algunos de los otros factores explicativos, la urbanización genera cambios en las condiciones físicas propias de la superficie terrestre, es debido a esto, como señala Kusaka (2008), que la radiación solar es capaz de ser absorbida, almacenada y emitida hacia la atmosfera. Esta energía emitida por los diferentes materiales que componen la superficie urbana construida es medida a través de la temperatura de emisión superficial, lo cual es posible gracias imágenes infrarroja de sensores remotos instalados en los diferentes satélites en órbita a la Tierra, con ellas es posible además estudiar a la isla de calor urbana de superficie, la cual corresponde, de acuerdo a (Sarricolea y Romero, 2006), a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y cuerpos urbanos y que son captados directamente por sensores infrarrojos .

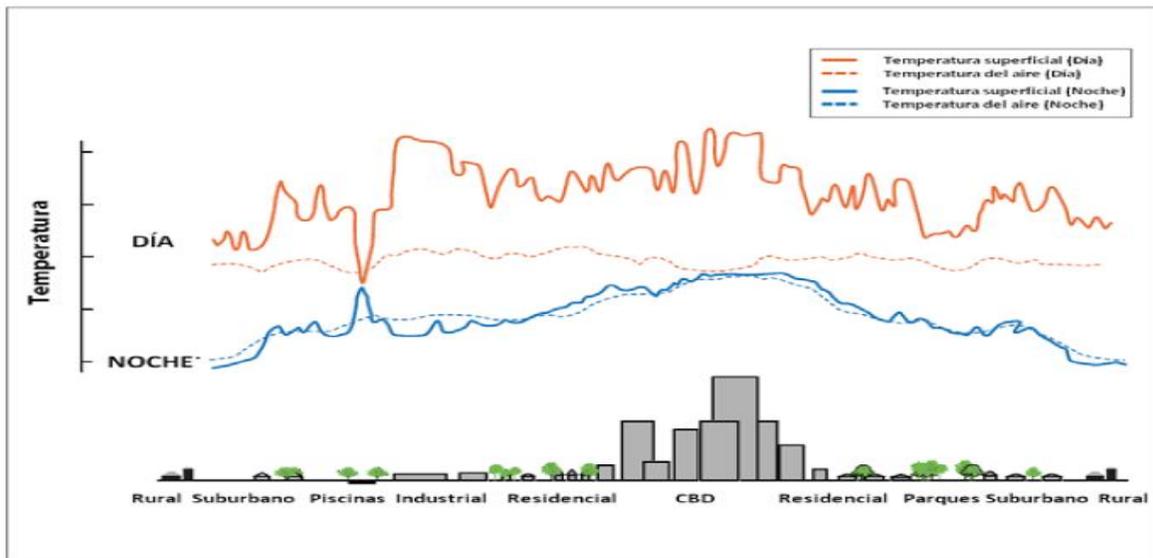
Un punto importante por agregar respecto a las temperaturas de emisión superficial es el hecho de que existen estudios que apuntan a que existe un patrón similar en cuanto a la distribución de las temperaturas atmosféricas y las de emisión superficial, esto debido a que ambas temperaturas, se encuentran fuertemente influenciadas por la distribución de coberturas y usos de suelo (Molina 2007; Sarricolea 2008)

### 2.3.6. Flujo de calor antropogénico

A nivel histórico la tendencia general de la evolución de las ciudades las ha llevado a aumentar de tamaño y al mismo tiempo a aumentar el nivel de vida en ellas, lo que a su vez ha implicado un incremento a nivel de consumo energético y de emisiones tanto de contaminantes como de energía a la atmosfera.

De acuerdo con algunos estudios llevados a cabo, el flujo de calor antropogénico como factor explicativo de la ICU, incide en el aumento de temperaturas medias en las zonas urbanas; debido fundamentalmente a la generación y emisión de calor asociados a las actividades antrópicas sobre el territorio (calefacción, respiración, transporte, actividades industriales) (Guijarro, 1998; Grimmond & Oke 1998).

**Figura 2: Relaciones entre las ICU de superficie y atmosféricas**



Fuente: *Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso, Chile, (Sarricolea y Romero, 2010)*

### *2.3.7. Distancia a cursos de agua o al mar*

Este factor explicativo como señalan Sarricolea y Romero (2009) “*representa la posibilidad que las áreas sean alcanzadas por las masas de aire locales que se generan sobre el mar, sobre los ríos y humedales, que regulan el comportamiento térmico y favorecen la circulación de los vientos*”.

Como se aprecia en lo anteriormente enunciado, este factor explicativo tiene directa relación con la presencia de cursos de agua, cuerpos de agua o inclusive con el mar, esto debido a que la humedad que estos pueden aportar a la atmosfera tiene directa incidencia en las temperaturas atmosféricas y además con ello con la circulación del viento. Esto debido a que, como se describía en el factor explicativo de la humedad relativa, la humedad tiene la capacidad de regular las temperaturas atmosféricas, y que en muchos casos el hecho de que se formara la isla de calor se debía a la presencia o falta de humedad (Coutts et al. ,2007).

## Capítulo III: Planteamiento Metodológico

### 3.1. Materiales

Para llevar a cabo la presente investigación se utilizó información extraída desde fuentes bibliográficas (memorias, investigaciones, planes nacionales de acción/adaptación, etc.), en primera instancia provenientes de aquellos textos e investigaciones que ya habían abordado con anterioridad temas relacionados al clima urbano, y algunas otras publicaciones relacionadas con el cambio climático y como este se aborda a nivel institucional; como el “Plan Nacional de Adaptación al cambio climático”, y también el “Plan Nacional de adaptación para ciudades 2018 – 2022”.

Para la construcción de series de datos climáticos, se obtuvo información de estaciones administradas por instituciones públicas como la Dirección General de Aguas (DGA) y el Servicio de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), de las cuales se tomaron en consideración 13 estaciones en total (11 de SINCA y 2 de DGA) las cuales mantenían registros de datos meteorológicos (temperatura atmosférica, en grados Celsius y humedad relativa del aire, en porcentajes) dentro del periodo de tiempo 2007 al 2017. Esto último debido a que fue el periodo en cual se contaba con la mayor cantidad de información disponible y con menos periodos de tiempo con vacíos o errores en los registros. Además, se las estaciones debían estar ubicadas dentro de la ciudad de Santiago y sus inmediaciones rurales.

Por otra parte, para llevar a cabo la espacialización en un SIG de la información meteorológica de las estaciones disponibles (SINCA y DGA), y de los factores explicativos asociados a la distribución de las temperaturas, se hizo necesario obtener información geoespacial (Shapes Files) desde el explorador climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2” de la Universidad de Chile (<http://explorador.cr2.cl/>), y además se utilizaron las coordenadas UTM entregadas para cada estación disponible de la red de Servicio Información Nacional de la Calidad del Aire

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Determinar los factores explicativos de la distribución de las temperaturas para Santiago

Para llevar cabo este objetivo, se hizo necesario en primera instancia; el determinar cuáles serían aquellos factores explicativos por considerar en el presente trabajo de memoria de título, para ello en principio se tomaron en consideración los factores explicativos abordados por Smith y Romero (2016), los cuales son; Cobertura Vegetal (NDVI), distancia a cursos de agua, distancia a caminos, temperatura de emisión superficial (día y noche).

Además, se buscó identificar nuevos posibles factores explicativos del comportamiento y distribución de las temperaturas en la ciudad de Santiago, a través de la revisión de fuentes bibliográficas que hayan abordado los factores explicativos de las temperaturas para distintas ciudades en el mundo, y así, poder incorporar nuevos factores al modelo de distribución de temperaturas urbanas que se busca generar. Tras llevar a cabo revisión bibliográfica acerca de los factores explicativos de la distribución de temperaturas; se determinó que en la amplia mayoría de estas un factor a considerar era la cobertura de suelo que ha sido construida, es por ello que para analizar e incorporar este factor a los ya antes mencionados, se recurrió a indagar sobre posibles Índices de Diferencia Normalizada a utilizar, dentro de los se optó por el Índice de Diferencia Normalizada de Edificación (NDBI) el cual permite identificar zonas con superficies construidas o edificadas (Chen *et al.*, 2006 en Córdoba, 2013 )

#### 3.2.1.1 *Temperatura y Humedad Relativa*

Con anterioridad, como parte del trabajo de práctica profesional, se generó una base de datos desde enero del 2007 a diciembre del 2017 (10 años); con algunos de los factores explicativos de la distribución de la temperatura del aire utilizados en Smith y Romero (2016); los cuales fueron: cobertura vegetal (NDVI), Temperatura de emisión superficial (MODIS), tanto para el día como para la noche, distancias a cursos de aguas y caminos.

Para la obtención de los valores horarios de aquellos datos meteorológicos considerados como factores explicativos, como lo son la temperatura atmosférica y la humedad relativa se recurrió a las estadísticas históricas disponibles en las páginas web del Servicio de Información Nacional de la Calidad del Aire y de la Dirección General de Aguas, las cuales se muestran especializadas en la **Figura 3**.

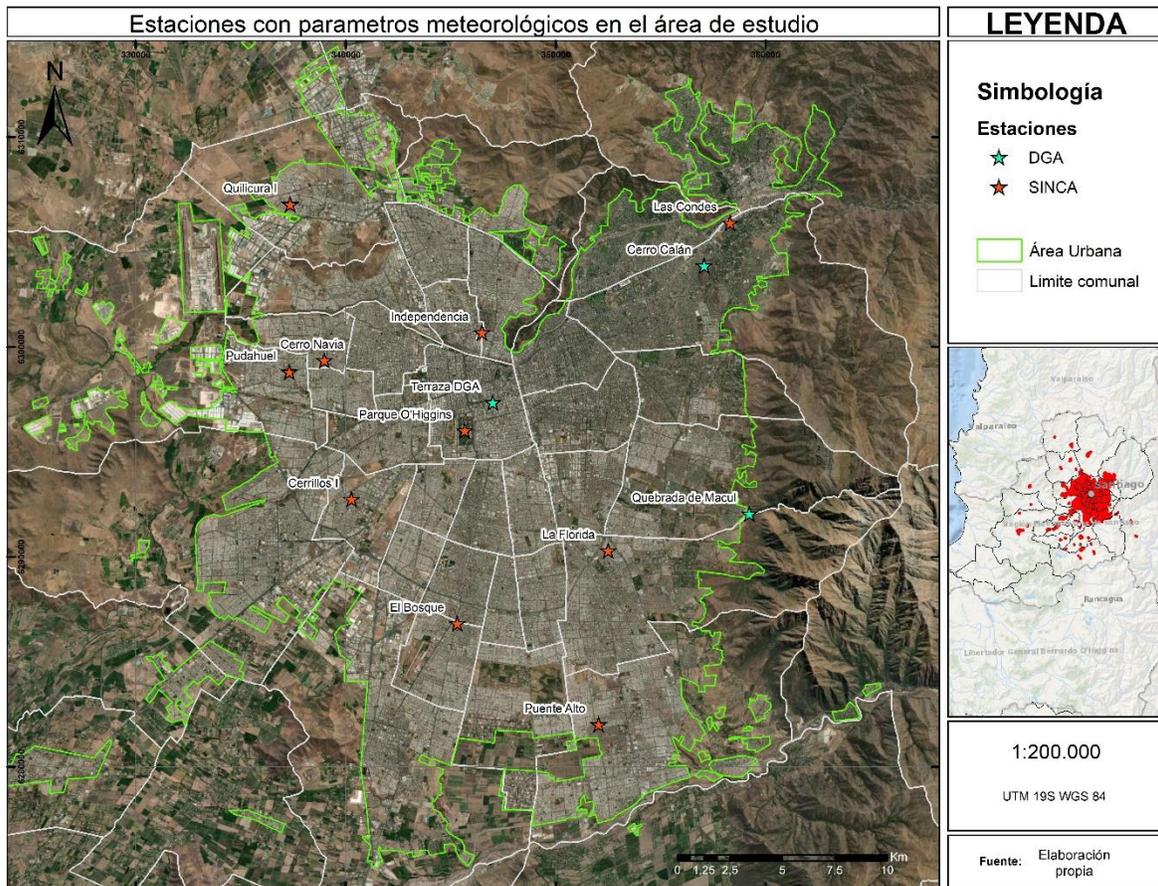
Las estaciones con parámetros meteorológicos utilizadas fueron:

**Tabla 1: Estaciones utilizadas y coordenadas**

SINCA	DGA
Cerrillos (340277; 6292750)	Terraza DGA (347025; 6297388)
Cerro Navia (338984; 6299360)	Cerro Calán (357078; 6303827)
El Bosque (345313; 6286830)	Quebrada de Macul (359255; 6291968)
Independencia (346488; 6300680)	
La Florida (352504; 6290300)	
Las Condes (358305; 6305910)	
Pudahuel (337311; 6298810)	
Puente Alto (352049; 6282010)	
Quilicura (337356; 6306790)	
Parque O'Higgins (345673; 6296020)	
Talagante (318945; 6272300)	

(Fuente Elaboración propia en base a SINCA y DGA)

**Figura 3: Cartografía del área de estudio y las estaciones meteorológicas**



(Fuente: Elaboración propia)

### 3.2.1.2. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Respecto al resto de los factores explicativos, como se enunciaba anteriormente, fueron obtenidos mediante la interfaz de programación de aplicaciones (API) de *Google Earth Engine*, por medio de códigos de programación mediante la herramienta Code Editor. Cabe mencionar que para obtener valores que fueran representativos para cada estación meteorológica, en primera instancia, se llevó a cabo la especialización mediante ArcGIS de las 13 estaciones, para posteriormente generar un archivo shape del área de influencia de cada estación con un radio de 75 metros debido a que este es el radio de alcance del sensor utilizado para las mediciones en las estaciones (MET ONE 83D), de acuerdo al manual del fabricante disponible en su página web (metone.com).

Los shapefiles de áreas de influencias antes mencionados fueron subidos a la plataforma de Google Earth Engine para posteriormente ser incorporados en el código a generar y así obtener valores promedios para cada indicador en cada una de las estaciones a utilizar.

El código utilizado para poder obtener los valores diarios del **NDVI**, se escribió en base a un producto MODIS Combined 16-Day NDVI (MODIS/MCD43A4\_NDVI) , el cual es generado a través del cálculo de bandas:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

El producto obtenido de este cálculo de bandas es generado desde la colección de imágenes MODIS/MCD43A4. Es por ello por lo que tras seleccionar la colección de imágenes del producto MODIS/MCD43A4\_NDVI, se le aplica un filtro por fecha para así seleccionar el periodo desde el que se desea obtener valores diarios de NDVI. Posteriormente para poder obtener los datos en valores anuales, se aplica a la variable la opción de graficar en series por año, generando así series de gráficos de 12 meses de enero a diciembre de cada año (2007 – 2017), ver **Figura 4** y **5**. Para acotar la superficie desde la cual se obtienen los datos, al código se le aplica un Clip para la región específica a abordar, la cual en este caso corresponde al Shape de área de influencia de cada estación meteorológica, los cuales son cargados previamente a la plataforma de Google Earth Engine e importados al código que se está escribiendo.

Los gráficos obtenidos fueron posteriormente descargados en formato CSV y trabajados en Excel para ser incorporarlos a la base de datos de factores explicativos.

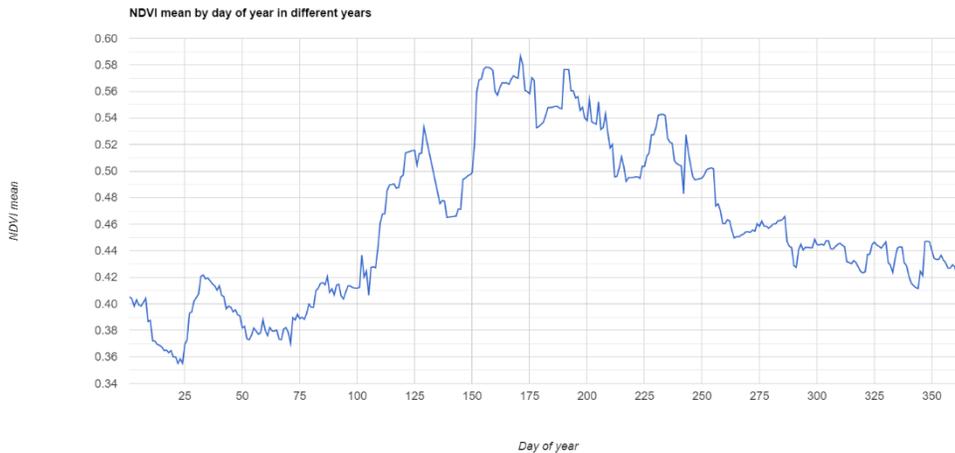
**Figura 4: Código Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada**



```
NDVI *
Imports (2 entries)
  var modisNDVI: (Deprecated) ImageCollection "MODIS Combined 16-Day NDVI" (1 band)
  var cerrillos: Table users/alanlavv/CERRILLOS1
1 // Mapa de territorio
2 Map.addLayer(cerrocalan);
3 //Coleccion MODIS NNDI
4
5 var modisNDVI = ee.ImageCollection('MODIS/MCD43A4_NDVI');
6 var collection = ee.ImageCollection('MODIS/MCD43A4_006_NDVI').filterDate(ee.Date('2016-01-01'), ee.Date('2016-12-31'));
7 //crear grafico
8 var graphic = ui.Chart.image.doySeriesByYear(collection, 'NDVI', cerrillos, ee.Reducer.mean(), 500);
9 var graphic = print(graphic);
10
11
```

Fuente: Elaboración propia mediante API Google Earth Engine

**Figura 5: Ejemplo de Grafico anual valores diarios NDVI año 2016**



Fuente: Elaboración propia mediante API Google Earth Engine

### 3.2.1.3. Temperatura de Emisión Superficial

En el caso de la temperatura de emisión superficial al igual que el anterior factor explicativo se optó por la utilización del sensor remoto MODIS, para ser más específico; la colección de imágenes “MOD11A1.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km”. Dentro de esta colección de imágenes existen distintos productos disponibles para poder trabajar y extraer datos; de estos, se utilizaron los productos de bandas “LST\_Day\_1km” y “LST\_Night\_1km”, los cuales son la; temperatura de emisión superficial diurna diaria y la temperatura de emisión superficial nocturna diaria respectivamente (**Figura 6**).

Estos productos contienen los valores de la temperatura en grados Kelvin, es por ello por lo que para poder trabajar en las mismas unidades que la temperatura atmosférica, es decir grados Celcius (C°); se aplica al código el cálculo de conversión de grados Kelvin a Celsius.

Al igual que en el caso del código que se utilizó para obtener el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, a este código también se le agrego un filtro por fecha, para así poder seleccionar el periodo de tiempo del cual se desea obtener datos. Los cuales posteriormente se descargan en forma gráficos anuales por medio de la aplicación de una variable o comando para graficar la información que se busca obtener del código (**Figura 7**).

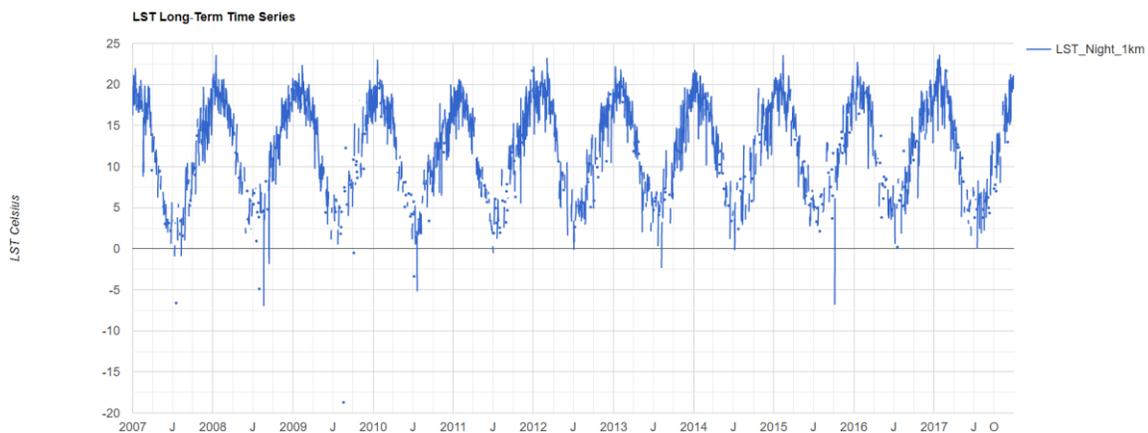
Estos datos fueron clipeados, es decir cortados mediante los shapes de cada una de las estaciones, para así poder contar solo con información de temperatura de emisión superficial del entorno o área de influencia de cada una de ellas.

**Figura 6: Código Temperatura de Emisión Superficial.**

```
T° Emisión Superficial MDOIS *
Imports (2 entries)
  var imageCollection3: ImageCollection "MOD11A1.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity Daily Global 1km"
  var dga: Table users/alanlavv/TERRAZADGA
1 // Temperatura de emisión superficial
2 // Collect bands and scale
3 var modisLSTnight = ee.ImageCollection('MODIS/006/MOD11A1').select('LST_Night_1km');
4
5 var modLSTnight = modisLSTnight.map(function(img) {return img.multiply(0.02).subtract(273.15).copyProperties(img,['system:time_start','system:time_e
6 });
7
8
9 // Select dates
10 var collection05night = ee.ImageCollection(modLSTnight.filterDate('2007-01-01', '2017-12-31'));
11
12 //Clip to Specified Region
13
14 var clipped05night = collection05night.mean().clip(dga)
15
16 // Charts Long-Term Time Series
17 var TS5 = Chart.image.series(collection05night, dga, ee.Reducer.mean(),1000, 'system:time_start').setOptions({title: 'LST Long-Term Time Series',v
18 });
19 print(TS5);
20
```

Fuente: Elaboración propia mediante API Google Earth Engine

**Figura 7: Ejemplo de Grafico Temperatura de Emisión Superficial Nocturna 2007 - 2017**



Fuente: Elaboración propia mediante API Google Earth Engine

#### 3.2.1.4. Índice de Diferencia Normalizada de Edificación (NDBI)

Los valores diarios de este factor explicativo, al igual que los dos factores explicativos anteriormente descritos, fueron obtenidos mediante la creación de un código a través la API de Google Earth Engine. Para este caso se optó por elegir el satélite LANDSAT 7, debido que su tiempo de funcionamiento abarca todo el periodo de tiempo del cual se buscaba obtener valores (desde el 1 enero del año 2007 al 31 de diciembre del año 2017).

Para generar el índice de diferencia normalizada de edificación se hace necesario recurrir a la formula mediante la cual se puede calcular este Índice de diferencia normalizada:

$$\text{NDBI} = (\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR})$$

Como anteriormente se enunciaba, el sensor seleccionado para llevar cabo el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Edificación fue LANDSAT 7, es por ello que las bandas a utilizar para este caso fueron la banda 5, la cual para este sensor corresponde a la banda de infrarrojo cercano de onda corta o SWIR (Short-wavelength infrared), y la banda 4 la cual corresponde a la banda de infrarrojo cercano o NIR (Near infra red), las que cuentan con una resolución de imagen de 30 metros, como se aprecia en la **Tabla 2**.

**Tabla 2: Bandas Landsat 7 y Landsat 8**

S.N.	Landsat 7 Enhanced Thematic Mappers Plus (ETM +)			Band	Landsat 8 Operational Land Imagers (OLI) & Thermal Infrared Sensor (TIRS)		
	Resolution (meter)	Wavelength (micrometer)	Band Name		Band Name	Wavelength (micrometers)	Resolution (meter)
1	30	0.45-0.52	Blue	<b>Band 1</b>	Ultra-Blue	0.435-0.451	30
2	30	0.52-0.60	Green	<b>Band 2</b>	Blue	0.452-0.512	30
3	30	0.63-0.69	Red	<b>Band 3</b>	Green	0.533-0.590	30
4	30	0.77-0.90	NIR	<b>Band 4</b>	Red	0.636-0.673	30
5	30	1.55-1.75	SWIR 1	<b>Band 5</b>	NIR	0.851-0.879	30
6	60* (30)	10.40-12.50	Thermal	<b>Band 6</b>	SWIR 1	1.566-1.651	30
7	30	2.09-2.35	SWIR 2	<b>Band 7</b>	SWIR 2	2.107-2.294	30
8	15	0.52-0.90	Panchromatic	<b>Band 8</b>	Panchromatic	0.503-0.676	15
9				<b>Band 9</b>	Cirrus	1.363-1.384	30
10				<b>Band 10</b>	TIRS 1	10.60-11.19	100 * (30)
11				<b>Band 11</b>	TIRS 2	11.50-12.51	100 * (30)

Fuente: Bandas Landsat 7 & Landsat 8, (Bahadur, 2018)

Por lo anterior, la fórmula para llevar a cabo el cálculo de NDBI usando Landsat 7 quedaría de la siguiente forma:

$$\text{NDBI} = (\text{BAND 5} - \text{BAND 4}) / (\text{BAND 5} + \text{BAND 4})$$

Debido a que como este Índice de Diferencia Normalizada no se encuentra como un producto disponible en la colección de imágenes de Google Earth Engine, se hizo necesario, en primer lugar, agregar como variable a abordar en el código la fórmula anteriormente mencionada (SWIR – NIR) / (SWIR + NIR), y posteriormente atribuirle a está, mediante una nueva variable, las bandas que correspondían a cada una; es decir SWIR= Banda 5 y NIR = Banda 4. Todo esto para poder generar imágenes que fueran resultado de ese cálculo de bandas.

Posteriormente, se pasó a seleccionar la colección de imágenes con la cual se iba a trabajar; USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance (LANDSAT/LE07/C01/T1\_RT\_TOA), y se le aplicó la variable antes definida que contenía la fórmula para el cálculo de bandas.

Al igual que en los anteriores factores explicativos se le aplicó una selección o filtro por fecha, para obtener así, solo el periodo de tiempo que deseaba abordar, y se agregó al código la variable que contenía la selección o clip del área entorno a la estación meteorológica a abordar dependiendo del caso. Esto debido a que, como antes se mencionaba, para poder obtener datos en particular de cada estación estas se iban reemplazando dentro del código para así tener información de cada una en el periodo de tiempo seleccionado (2007 – 2017). Finalmente, se incorporó la variable de graficar los datos generados a través de este código, gráficos que fueron posteriormente descargados en formato CSV e incorporados a la base de factores explicativos de la distribución de la temperatura de Santiago (**Figura 8 y 9**).

Cabe mencionar que los gráficos obtenidos mediante este código entregaron datos separados cada 16 días, esto debido a la periodicidad con la que el satélite elegido capta información de la superficie terrestre.

**Figura 8: Código NDBI**



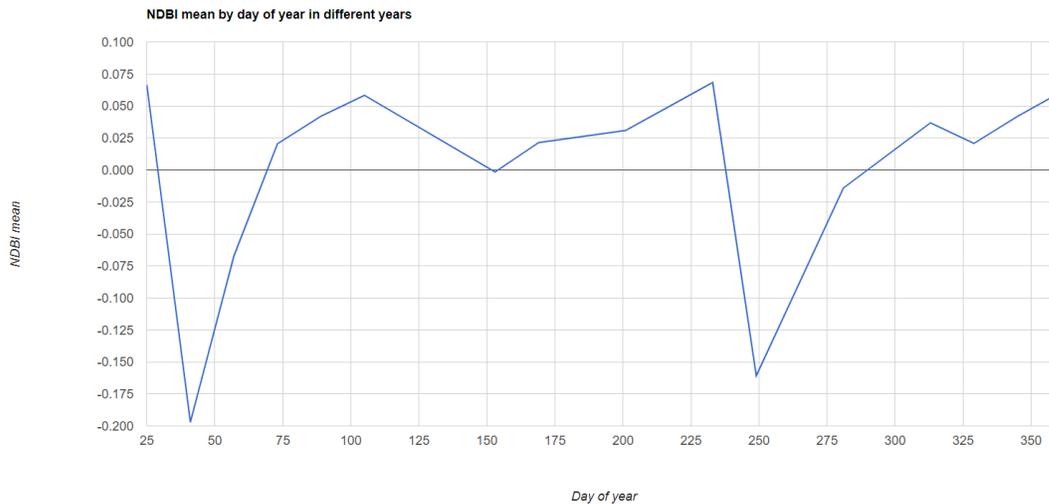
```
NDBI LANDSAT 7 RESUME
Get Link Save Run Reset

Imports (2 entries)
var imageCollection: ImageCollection "USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 and Real-Time data TOA Reflectance" (10 bands)
var INDEPENDENCIA: Table users/alanlavv/INDEPENDENCIA

1 var ndbi = function(image)
2 //ORIGINAL
3 // seleccion de NDBI (Normal Difference Built-up Index)
4 {
5 var ndbi2 = image.expression(
6 '(swir - nir) / (swir + nir)',
7 {
8   swir : image.select('B5'),
9   nir  : image.select('B4')
10 });
11 image = image.addBands(ndbi2.rename('NDBI'));
12 return image;
13 }
14
15 // coleccion de imagenes
16 var img = ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C01/T1_RT_TOA')
17   .filterDate('2017-01-01', '2017-12-31')
18   .map(ndbi);
19
20 var img2 = img.select('NDBI');
21
22 var graphic = ui.Chart.image.doySeriesByYear( img2, 'NDBI', INDEPENDENCIA, ee.Reducer.mean(), 1000);
23 var graphic = print(graphic);
24
```

Fuente: Elaboración propia mediante API Google Earth Engine

**Figura 9: Ejemplo de Grafico NDBI año 2017**



Fuente: Elaboración propia mediante API Google Earth Engine

### 3.2.1.5. Distancia a cursos de agua y distancia a caminos/vías

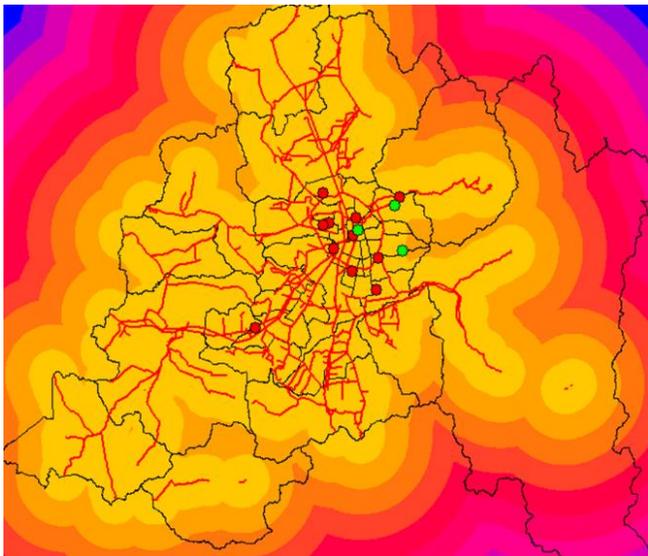
Para poder calcular las distancias a cursos de aguas y caminos respecto a cada una de las 13 estaciones con parámetros meteorológicos se utilizó el software ArcGIS 10.5. Se utilizaron los shapefiles de la red hidrográfica y la red vial a nivel nacional disponibles en la Biblioteca del Congreso Nacional.

Los shapefiles descargados fueron cortados usando como referencia la región metropolitana, y posteriormente se aplicó una selección por atributo a ambos archivos; para la red hidrográfica se seleccionaron solamente aquellos cursos de agua que mantuvieran constantemente flujo de aguas (esteros, ríos, canal, zanjón), excluyendo las quebradas, debido a la intermitencia de flujo de agua. En el caso de la vías o red vial estas se encontraban divididas en caminos pavimentados y de tierra, por ende, se optó por seleccionar aquellos que eran caminos pavimentados para ser utilizados en los cálculos.

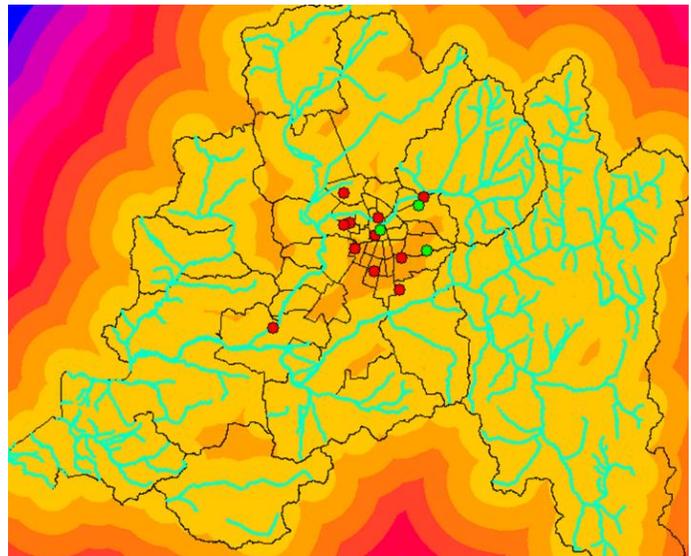
Utilizando los shapes anteriormente generados mediante las selecciones de atributos, se aplicó la herramienta “Euclidean Distance”, generando así dos raster resultantes con distintos rangos de distancias entorno a los shapes de cursos de agua y caminos (**Figura 10 y 11**).

Y finalmente para poder obtener las distancias desde cada una de las estaciones hasta los cursos de agua y los caminos o red vial se empleó la herramienta “Zonal statistics as Table”, generando como resultado una tabla con las distancias existente entre las estaciones respecto a los cursos de aguas y vías más cercanas.

**Figura 10: Caminos o red vial**



**Figura 11: Cursos de agua**



(Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS 10.5)

Estas distancias fueron incorporadas y ordenadas en la base de datos de factores explicativos, para posteriormente comenzar con el análisis de estadístico de todos los datos recopilados.

### 3.2.1.6. Análisis estadístico

Los datos contenidos en la base de datos de factores explicativos fueron analizados y filtrados, en primera instancia, se aplicó a estos datos un análisis de determinación de outliers o valores atípicos mediante puntaje Z:

Puntaje Z:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Donde:

$x$ : dato

$\mu$ : promedio de datos

$\sigma$ : desviación estándar

Si  $Z > |3|$  es valor atípico

Es decir:

$$\text{puntaje } z = \frac{(x - \bar{x})}{\text{Desv. Estandar}}$$

Una vez filtrados y eliminados los valores atípicos o anómalos de la base de datos, se rellenaron los datos utilizando el procedimiento planteado por Moreira *et al.* (2006), en donde aquel dato faltante corresponde a la media aritmética de aquellos valores disponibles en los dos días anteriores y posteriores que se registran en una estación meteorológica a la misma hora. El horario seleccionado fueron las 22:00 hrs debido a que se buscaba elegir un horario pasado 2 horas de la puesta de sol.

Originalmente en la base de datos existían 10.704.080 datos y posterior a filtrar por el horario de 22:00 hrs quedaron 446.105 datos. Los cuales fueron filtrados y separados por estaciones del año (Invierno, Otoño, Primavera y Verano) para un mejor manejo de estos.

Posteriormente la base de datos fue llevada al software SPSS de IBM en donde se le aplicaron análisis estadísticos de normalidad optando por el de Smirnov-Kolmogorov, debido a la cantidad de datos, y para los análisis de correlación se utilizó el método de Spearman.

Este método de correlación permite evaluar si existe relación entre dos variables A y B, este se lleva a cabo mediante un parámetro o valor que mide la fuerza de asociación entre estas variables, el cual se denomina coeficiente de correlación o “r”.

Si este valor “r” o coeficiente de correlación tiende a 1 existe una correlación positiva entre A y B, mientras que si este valor tiende a -1 existe una correlación negativa entre A y B. Existe mayor correlación positiva o negativa entre más el valor se aproxime a 1 o -1 respectivamente. Pero en el caso de que este valor sea 0; esto indica que no existe correlación lineal entre las variables analizadas.

3.2.2. Analizar la distribución de las temperaturas del aire de la ciudad de Santiago durante el periodo 2007 – 2017 y las variaciones de estas a través de los años, evaluando la intensidad de la isla de calor urbana.

#### 3.2.2.1. Creación de modelos (verano e invierno)

Respecto a los modelos de regresión, se hace necesario abordar en qué consisten y cuál es el objetivo de aplicarlos a los factores explicativos de la distribución de temperatura en Santiago.

Los modelos de regresión o regresión lineal múltiple, como nos indica Granados (2016), “se basa en ajustar modelos lineales o linealizables entre una variable dependiente y más de una variable independientes” y la regresión se define, de acuerdo al mismo autor, como “una técnica estadística que consiste en calcular la similitud (correlación) en forma de función matemática”, en donde la Correlación corresponde a la “medida de similitud de la variabilidad de dos magnitudes escolasticas (que, como varían, las denominamos variables). en cuanto a técnicas de regresión existen muchas, estas se plantean en función del tipo de variables y de la forma funcional supuesta entre cada una de ellas. Las más elementales y básicas de todas las regresiones, corresponden a las regresiones lineales, a

pesar de que también son las más potentes en cuanto a la capacidad de obtener información de correlación entre ellas.

Este tipo de regresión cuenta con una forma simple, la cual empareja dos variables, la cual tiende a ser insuficiente para fenómenos más complejos en los que influyen más de dos variables, para este último caso se utiliza la otra forma de regresión lineal la cual se denomina múltiple( Moral, 2006;Granados ,2016).En los modelos desarrollados a través de la regresión lineal múltiple, como señala Granados (2016) “*se supone que más de una variable tiene influencia o esta correlacionada con el valor de una tercera variable*”.

Como se mencionaba anteriormente la base de datos fue trabaja desde el software SPSS de IBM, desde este programa utilizando la herramienta de análisis estadístico, se generaron modelos de regresión múltiples introduciendo los distintos factores explicativos como variables independientes, siendo la variable dependiente de estas la temperatura atmosférica.

Lo que se busca en este caso es evidenciar que los distintos factores y elementos del clima urbano no se encuentran relacionados o influenciados por una sola variable, es por ello, que se opta por utilizar herramientas estadísticas como la correlación y los modelos de regresión múltiple, para poder comprender y relacionar de una manera más completa e integral el comportamiento de la temperatura a nivel espacial de las ciudades.

Para llevar a cabo la creación de modelos de comportamiento de temperatura, se determinó que debido a la gran cantidad de datos obtenidos dentro del periodo de tiempo entre 2007 al 2017, lo óptimo era poder aprovechar la mayor cantidad de estos por lo cual se decidió por tratar de abordar la creación de modelos tanto con los datos veranos y de inviernos.

Los modelos fueron desarrollados mediante dos métodos disponibles en SPSS, los cuales fueron “introducir” y “eliminar”, esto debido para poder hacer una comparación entre los distintos modelos generados y sus variables viendo cuales de ellas explican en mayor o menor grado las temperaturas atmosféricas y su distribución, y así, a su vez optar por el que represente mejor manera la realidad a modelar. Para ello se analizaron los coeficientes beta de cada modelo generado, tanto para aquellos de verano como para los de invierno, en base a estos se construyeron las fórmulas de los modelos de regresión para su posterior espacialización en ArcGIS. Debido al bajo valor de coeficiente beta que presentaban la distancia a cursos de agua y caminos se decidió dejar ambos factores fuera de la construcción de la fórmula de ambos modelos de invierno y verano para las 22 hrs.

Para construir las fórmulas de los modelos de distribución de temperaturas, esta investigación considero la ecuación establecida por McGrath (1975):

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon$$

En donde;

**Y** = Variable dependiente.

**X1, X2, X3** = Variables independientes.

**$\beta_1, \beta_2, \beta_3$**  = Coeficientes beta o de regresión parciales constantes.

**$\varepsilon$**  = Proporción de la varianza que no es explicada por las variables independientes incluidas en la ecuación.

#### *3.2.2.3. Aplicación de modelo: valores promedios.*

La aplicación del modelo se llevó a cabo espacializando los factores explicativos mediante algebra de mapas aplicando las fórmulas resultantes de los modelos del invierno y verano para el 2007 y 2017, todo esto mediante el software ArcGIS.

El cálculo de algebra de mapas se llevó a cabo aplicando las fórmulas de los modelos de distribución de temperatura obtenidos de SPSS y a imágenes ráster obtenidas mediante códigos de Google Earth Engine, las cuales contenían los valores promedios anuales de cada variable, es decir, tanto el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el Índice de Diferencia Normalizada de Edificación y la Temperatura de emisión superficial, fueron aplicadas al modelo con imágenes en formato ráster correspondientes a promedios anuales. Cabe destacar que la variable de humedad fue espacializada mediante interpolación mediante el método IDW, y posteriormente incorporada al modelo junto al resto de variables.

*3.2.2.4. Validar y evaluar los modelos distribución de las temperaturas del aire de la ciudad en base a temperaturas registradas.*

Para llevar a cabo la validación de los modelos de regresión resultantes de invierno y verano se consideró el valor de R, el cual varía entre 0 y 1, considerándose óptimo que este valor tienda a 1.

Además, se llevó a cabo diagnósticos de los modelos de regresión, lo cual consiste en comparar las estimaciones distribución de las temperaturas generadas por los modelos y las temperaturas registradas; esto mediante la espacialización de la distribución de temperaturas atmosféricas registradas en las estaciones con parámetros meteorológicos del Servicio Información Nacional de la Calidad del Aire y de la Dirección General de Aguas, mediante el software interpolación los datos registrados de estas estaciones mediante el software ArcGIS.

## Capítulo IV: Resultados

### 4.1. Datos atmosféricos utilizados en los Modelos de regresión y en la espacialización de las temperaturas a las 22 hrs de invierno y verano de Santiago.

Las temperaturas registradas por las estaciones con parámetros meteorológicos del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire y la Dirección General de Aguas de los inviernos y veranos del 2007 al 2017, considerando como tales; para el caso de los veranos del 21 de diciembre al 20 de marzo, y para los inviernos del 21 de junio al 20 de septiembre; de los respectivos años dentro del periodo de tiempo antes señalado.

En la **Figura 12** se grafica el comportamiento de las temperaturas atmosféricas promedio de los veranos; iniciando el 21 de diciembre del 2006 al 20 de marzo del 2018.

Como se aprecia en el gráfico de la **Figura 12**, las temperaturas promedio más altas a lo largo de este periodo de tiempo, la registran las estaciones que se encuentran dentro la ciudad de Santiago, y en particular aquellas que se encuentran emplazadas en la zona centro y el sector poniente de la ciudad, como por las estaciones de; Independencia, Terraza DGA, Cerrillos y Pudahuel. Las cuales además tienen una leve tendencia al aumento. Un caso particular a mencionar es la estación Parque O'Higgins, pues a pesar de estar próxima a las otras estaciones mencionadas, registra menores temperaturas promedios, lo cual evidencia el efecto que tiene la vegetación y la humedad relativa ( siendo la vegetación la que más incide de acuerdo a lo que nos indica el modelo de regresión) en la disminución o amortiguamiento de las temperaturas, absorbiendo la energía atmosférica disponible en el medioambiente urbano y a su vez liberando humedad mediante evapotranspiración que regula los valores extremos de la temperatura del aire.

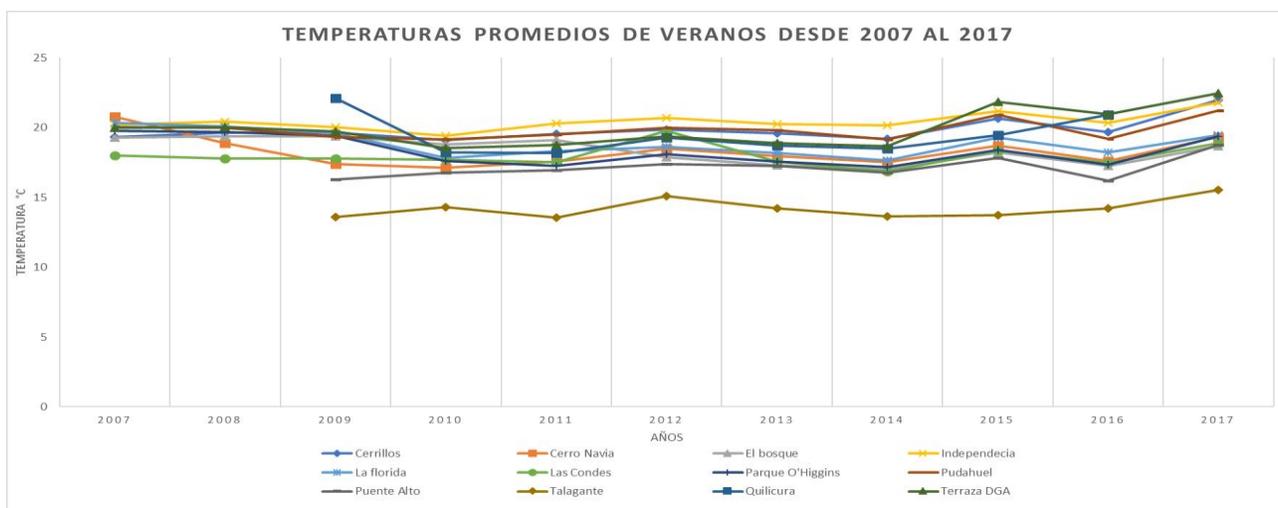
Por otra parte, aquellas estaciones ubicadas en la periferia y cercanas al entorno rural de Santiago registran menores temperaturas promedios que el resto de las estaciones, ejemplo de ello son las estaciones de; Talagante, Puente Alto, Las Condes, Quilicura, El Bosque, La Florida.

Las diferencias en la distribución de las temperaturas a través de extensión se la ciudad de Santiago, nos indican que la isla de calor urbana se ubica en la zona centro y parte de sector poniente. Este punto se abordará con mayor grado de detalle en la distribución espacial de las temperaturas modeladas.

Cabe mencionar que, las temperaturas promedio registradas en las distintas estaciones a lo largo de los distintos veranos estudiado no sufrieron grandes variaciones a través de los años, solo se evidencia una variación durante el año 2015 en cual todas las temperaturas promedio tendieron a elevarse para luego disminuir en el 2016 y volver a subir en el año 2017.

En el año 2017, se registró el peak de temperaturas promedio de los veranos a las 22 hrs del periodo de tiempo analizado. Registrando un valor de 22,46° en la estación Terraza DGA (emplazada en la comuna de Santiago), coincidiendo con lo observado en todo el centro – sur de Chile, superando los máximos históricos observados en ciudades como, por ejemplo, Los Ángeles o Chillán. Mientras que, al mismo tiempo la temperatura promedio más baja de las estaciones se presentó en la estación de Talagante con 15,51 °C. Registrando así, una ICU de 6,95 °C.

**Figura 12: Grafico de Temperaturas Promedio a las 22 hrs de Veranos 2007 al 2017**



(Fuente: Elaboración propia)

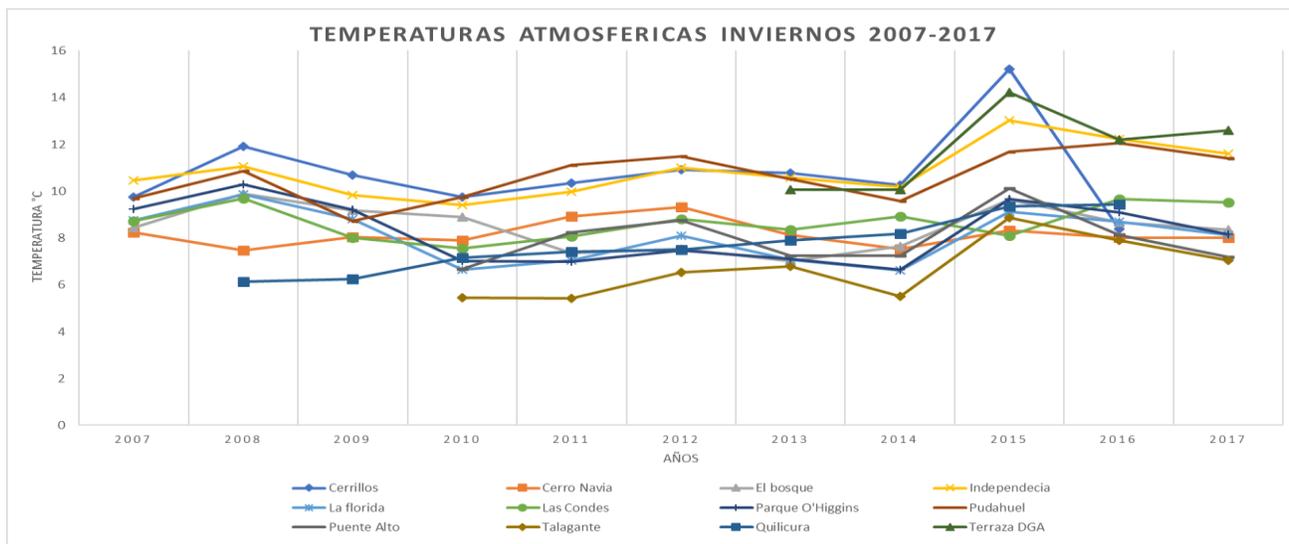
Mientras que en la **Figura 13** se grafica el comportamiento de las temperaturas atmosféricas promedio de los inviernos; iniciando el 21 de junio del 2007 y terminando el 20 de septiembre (considerando solo los periodos de tiempo de los distintos inviernos dentro del periodo 2007 - 2017 como se indica al inicio de este apartado)

Se aprecia, en primera instancia que, a diferencia de las temperaturas medias registradas en verano, las registradas en invierno presenta mayor variación espacial, es decir, existe mayor diferencia entre las temperaturas promedio anuales registradas en las distintas estaciones meteorológicas. (**Figura 13**)

Al igual a como se observó en el análisis anterior para el caso del verano, las estaciones que registran las mayores temperaturas son aquella que se emplazan más cercanas al centro de la ciudad de Santiago y en algunos casos, hacia el sector poniente, dentro de las cuales se encuentra; Cerrillos, Terraza DGA, Independencia y Pudahuel. Por otra parte, se aprecia que estaciones ubicadas en la periferia o cercanas a los entornos de la ciudad, son aquellas que registran las temperaturas promedio más bajas, como, por ejemplo; Puente alto, Talagante, Las Condes, La Florida y Quilicura. Al igual que en el caso anterior la estación de Parque O'Higgins mantiene temperaturas promedio más bajas que el resto de las estaciones que se encuentran más próximas a esta.

Es importante agregar, que, si bien las temperaturas promedio de los diferentes inviernos dentro del periodo de tiempo estudiado presentan mayor grado de fluctuación que las temperaturas promedio de los veranos, estas también sufren su mayor variación en el año 2015 con un ascenso de las temperaturas medias de las diferentes estaciones, para posteriormente descender en los años siguientes. Este peak de las temperaturas registrado durante el año 2015, alcanza temperaturas de 15,22° C en la estación Cerrillos, mientras que la estación que más baja temperatura registra durante este mismo año corresponde a Las Condes con 8,09°C (registrando una temperatura incluso más baja que la estación de Talagante que está más cercana a la zona rural, lo cual se explica en parte por la continentalidad y la influencia de la cordillera los Andes). Resultando en una diferencia de la temperatura registrada de 7,13 °C entre ambas estaciones ubicadas ambas en la zona urbana.

**Figura 13: Grafico de Temperaturas Promedio a las 22hrs de inviernos 2007 al 2017**



(Fuente: Elaboración propia)

## 4.2. Selección de los Variables.

La selección de las posibles variables a incorporar en los modelos generados, como se indica en la metodología, fue en primera instancia bibliográfica, mediante la cual se obtuvieron posibles factores explicativos a abordar en distintas fuentes bibliográficas dando como resultado el siguiente listado de factores explicativos de la temperatura se Santiago

**Tabla 3: Listado factores explicativos y los autores que los abordan**

<b>Factor Explicativo</b>	<b>Autor</b>
Cobertura Vegetal	Oke (1982) Nowak & MacPherson(1993) Honjo <i>et al.</i> (2003) Coutts (2007) Nyuk & Kardinal (2008)
Humedad	Molina (2007) Sarricolea (2009)
Distancia a cursos de agua	Molina (2007) Sarricolea (2009)
Distancias a caminos	Smith & Romero (2016) Smith & Andrade (2013)
Temperatura Superficial	Sarricolea <i>et al.</i> (2008) Sarricolea (2009)

Cobertura de Suelo Construida	Córdoba, (2013) Goñi, (2016) Zhang, (2009).
-------------------------------	---

(Fuente: Elaboración Propia en base a bibliografía)

### 4.3. Correlación de variables con la temperatura atmosférica registrada

Estas variables fueron ingresadas al software SPSS para correlacionar la variable dependiente de las independientes, las cuales para este caso son la temperatura atmosférica y los factores explicativos de la tabla anterior. Sin embargo, antes de llevar a cabo la correlación entre los factores explicativos de verano e invierno, se aplicó a estos, pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov; optando por este método debido a la cantidad de datos con los que se contaba (**Anexo 1 y 2**).

Como se aprecia tanto para los datos de los factores explicativos de invierno y verano; el valor de la significancia estadística o “p” valor es  $p < 0,05$ , por lo cual se debe dudar de la homogeneidad de las varianzas, es decir, dudar de la normalidad de los datos de los factores explicativos, tanto como el caso de invierno como para verano; esto en gran medida debido a la gran cantidad de datos con los cuales se trabajó.

Para generar los modelos de distribución de temperaturas de Santiago de verano e invierno, se seleccionaron aquellas variables que tuvieran una relación estadística significativa respecto a la temperatura atmosférica de invierno y verano registrada dentro del periodo que se extiende entre el 2007 y el 2017. Para ello, se llevaron cabo análisis estadísticos de correlación mediante el programa de IBM SPSS; el método de análisis de correlación utilizado fue el de Spearman (**Tabla 4**), distribución anormal de los datos de las variables; por lo cual el método estadístico de correlación a considerar fue el de Spearman, en atención a la distribución anormal de los datos de las variables, de acuerdo con el resultado anterior

**Tabla 4: Análisis de Correlación variables**

Variables	Temperaturas 22 Hrs Verano		Temperatura 22 Hrs Invierno	
	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
<b>Humedad</b>	-0,569**	-0,559**	-0,394**	-0,375**
<b>NDVI</b>	-0,269**	-0,183**	-0,159**	-0,087**
<b>T° Sup. MODIS (noche)</b>	0,498**	0,482**	0,648**	0,643**
<b>Cursos de agua</b>	0,024	0,027	-0,039	-0,008
<b>Caminos</b>	-0,023	-0,024	-0,032	-0,005
<b>NDBI</b>	-0,129**	-0,105**	-0,114**	-0,136**

\*\* : La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral)

(Fuente: Elaboración propia mediante software SPSS)

Las variables escogidas a partir del análisis de correlación fueron; La humedad relativa del aire, el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), la Temperatura de emisión superficial nocturna y el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI). De las cuales; la humedad, NDVI y NDBI, se relacionan de forma inversa con la temperatura atmosférica

registrada, es decir, cuando los valores de estas variables aumentan, la temperatura atmosférica disminuye. Mientras que, por el contrario, la temperatura de emisión superficial fue la única que se relacionaba de forma positiva con la temperatura atmosférica, dicho de otra forma, cuando los valores de la temperatura de emisión superficial aumentan también lo hace la temperatura atmosférica.

Dentro del punto anteriormente mencionado, se hace referencia a que el Índice de Diferencia Normalizada Edificada dio como resultado una relación inversa o negativa con las temperaturas atmosférica, resultado con el cual no se contaba, pues de acuerdo con las investigaciones de diferentes autores como lo son; Zhang & Han. (2009) y Zha *et al.* (2003), la superficie urbana construida actúa de diferente forma al absorber, almacenar y transferir el calor a nivel atmosférico, lo cual genera un aumento de las temperaturas atmosféricas; dicho de otra manera; lo que se esperaría de los valores del NDBI, sería que existiese una relación directa o positiva respecto a las temperaturas atmosféricas.

Esto debido a que, al cambiar la superficie de cobertura natural por otra superficie urbana con materiales como el pavimento o cemento, estas presentan un albedo muy bajo, es decir la mayor parte de la radiación que incide sobre estas superficies es absorbida y no reflejada, por lo cual estas se calientan con mayor facilidad que otras que presentan un mayor albedo. Lo cual deriva en que emitan y transfieran en mayor medida energía en forma de calor a la atmosfera, es decir, que presentan una mayor emisión de temperatura superficial.

Este punto se abordará más en detalle en la discusión para evaluar posibles causas del resultado arrojado por este análisis de correlación y que es lo que realmente reflejan los valores del Índice de Diferencia Normalizada Edificada.

#### 4.4. Modelos de Regresión

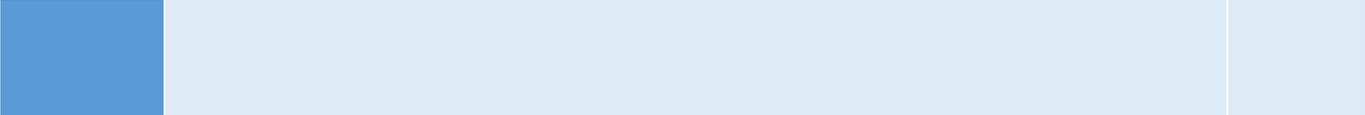
Se crearon dos modelos para generar las cartografías de distribución de temperaturas atmosféricas para Santiago a partir de los datos de inviernos y veranos desde 2007 al 2017.

Para esta investigación la variable considerada como dependiente corresponde a la temperatura atmosférica registrada a las 22:00 hrs en veranos e inviernos dentro del periodo de tiempo anteriormente descrito. Y las variables explicativas de la temperatura atmosférica corresponden a; Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (vegetación), humedad relativa del aire, temperatura de emisión superficial nocturna y Índice de Diferencia Normalizada Edificada (superficie impermeabilizada).

La siguiente tabla presenta los coeficientes de regresión o coeficientes betas de cada variable, valores los cuales representan el grado de participación para determinar la temperatura atmosférica mediante los modelos de verano e invierno. Cabe destacar que para obtener estos coeficientes, los datos utilizados fueron estandarizados previamente a ser incorporados al software SPSS para su análisis.

**Tabla 5: Ecuaciones modelos de regresión 22Hrs**

Estación	Modelo de Regresión	R
Verano	$T^{\circ} \text{ del aire} = - (\text{HUMEDAD} * 0,084) - (\text{NDVI} * 2,196) + (\text{T}^{\circ} \text{ Superficial noche} * 0,528) - (\text{NDBI} * 1,692) + 14,833$	0,792
Invierno	$T^{\circ} \text{ del aire} = - (\text{HUMEDAD} * 0,082) - (\text{NDVI} * 4,499) + (\text{T}^{\circ} \text{ Superficial noche} * 0,765) - (\text{NDBI} * 0,855) + 12,074$	0,689



**Nota: T° del aire : Temperatura del aire; Humedad: Humedad relativa del aire; NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada; T° Superficial Noche: Temperatura de emisión superficial nocturna; NDBI: Índice de Diferencia Normalizada Edificada**

(Fuente: Elaboración propia)

A partir de los modelos de regresión lineal es posible dar cuenta que la vegetación, tanto en invierno como en el verano, es aquella variable que actúa disminuyendo la temperatura, en mayor medida que el resto de las variables.

Como se indicaba anteriormente, la vegetación es la variable que tiene mayor incidencia en la disminución de las temperaturas de la temperatura haciendo que estas disminuyan, en el caso particular del invierno presenta un coeficiente de regresión que duplica al coeficiente beta que presenta esta misma variable respecto al modelo de 22 hrs de verano.

## 4.5. Distribución espacial de las temperaturas modeladas

### 4.5.1. Distribución espacial de la temperatura del aire para las noches de Veranos (22:00 hrs)

Para analizar la distribución de las temperaturas obtenidas a través del modelo generado para las 22 hrs de la época Verano, este se aplicó a través de álgebra de mapas de ArcGIS a las variables del año 2007 y también a las del año 2017, para así apreciar la distribución y comportamiento de éstas al inicio y término del periodo de tiempo abarcado (2007 al 2017) y analizar sus diferencias.

#### 4.5.1.1. Análisis de distribución de temperaturas verano de 2007

Durante las 22:00 horas del verano de 2007, como se aprecia en la **Figura 14**, se evidencia la diferencia de temperaturas presentes en la ciudad de Santiago respecto a su entorno no urbano. Las zonas en las que se distribuyen las temperaturas más bajas corresponden principalmente al sector oriente y sector sur de la zona urbana, las cuales presentan temperaturas entorno a los 15 °C y los 17 °C. Por otra parte, las temperaturas más altas se concentran en el sector Norponiente de Santiago, en específico entorno a la estación de Cerro Navia, registrando temperaturas entre los 18 °C y 21 °C.

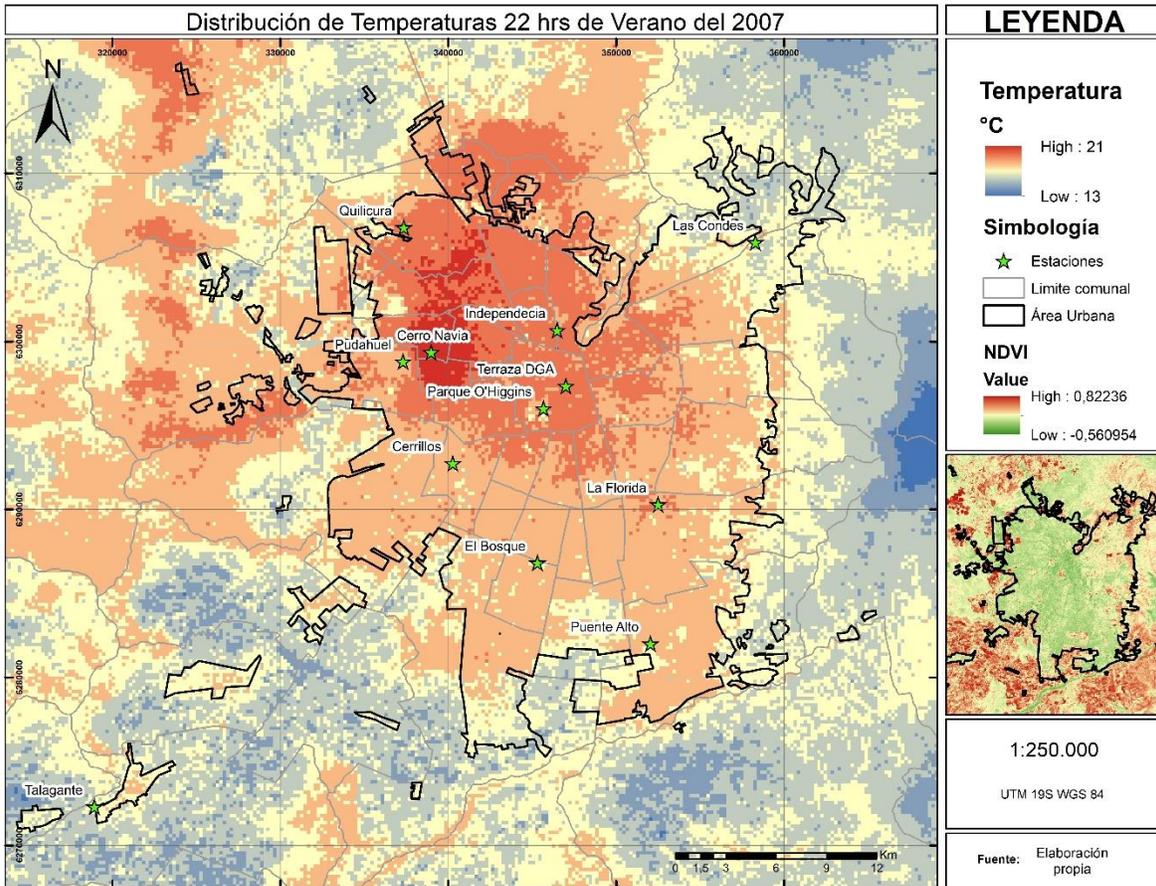
El sector Nororiente de la ciudad posee temperaturas cercanas a las que presentan el entorno rural no urbano. Respecto a la intensidad que presenta la isla de calor urbana, esta registra 6 °C, la cual corresponde a la diferencia de temperaturas registradas en las zonas más cálidas y la temperatura que se presenta el sector no urbano.

Un punto importante por destacar es que además de existir diferencias entre la ciudad y el entorno rural que rodea a ésta, existen variaciones en la distribución de las temperaturas al

interior de está, en términos generales, la temperatura tiende a decrecer desde la zona centro de la ciudad hacia la periferia que se ubica al oriente y sur de está. Cabe mencionar que una particularidad respecto a lo anteriormente dicho se da en comunas como La Florida y Peñalolén, en donde se observan de pequeñas islas de calor.

El comportamiento de las temperaturas anteriormente descrito se puede explicar en gran medida a los diferentes factores que forman parte del modelo de verano para las 22 hrs, el grado de magnitud de cada uno de ellos que estos presentan en el modelo. Como se aprecia en la **Tabla 7**, el factor que más influye en disminuir las temperaturas corresponde a la cobertura vegetal (NDVI), mientras que el factor que en mayor medida se le atribuye el aumento de temperaturas es la temperatura de emisión superficial. Por lo cual, las menores temperaturas se concentran en aquellas zonas en donde las temperaturas de emisión superficial son menores y a su vez la cobertura vegetal es mayor o se encuentra en mejores condiciones, dando como resultado que la energía disponible a nivel atmosférico sea menor, debido que gran parte de ella es absorbida y no es emitida de vuelta al aire. Mientras que, por lo contrario, las mayores temperaturas se concentran en zonas donde las temperaturas de emisión superficial son mayores y las superficies presentan baja o nula presencia de cobertura vegetal, esto debido al reemplazo de esta por coberturas artificiales y las cuales presentan un mayor albedo, lo cual genera que estas superficies emitan mayor cantidad de energía/calor a la atmosfera, aumentando así las temperaturas de emisión superficial.

**Figura 14: Distribución de Temperaturas 22 hrs de Verano del 2007**



(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.1.2. Análisis de distribución de temperaturas verano de 2017

En el caso de las 22:00 hrs del verano del año 2017, se aprecia en la **Figura 15**, que las diferencias entre las temperaturas de la ciudad de Santiago y su entorno no urbano se mantienen. Las temperaturas más altas se concentran en la zona centro de la ciudad, proyectándose hacia la zona norte y a parte del sector nororiente de la zona urbana, estas presentan temperaturas entorno a los 19 °C y 21 °C. Mientras que, las temperaturas más bajas se distribuyen principalmente hacia el sector suroriente de Santiago, más específicamente entorno a Puente Alto, estas presentan registros que oscilan entre los 16°C y 18°C

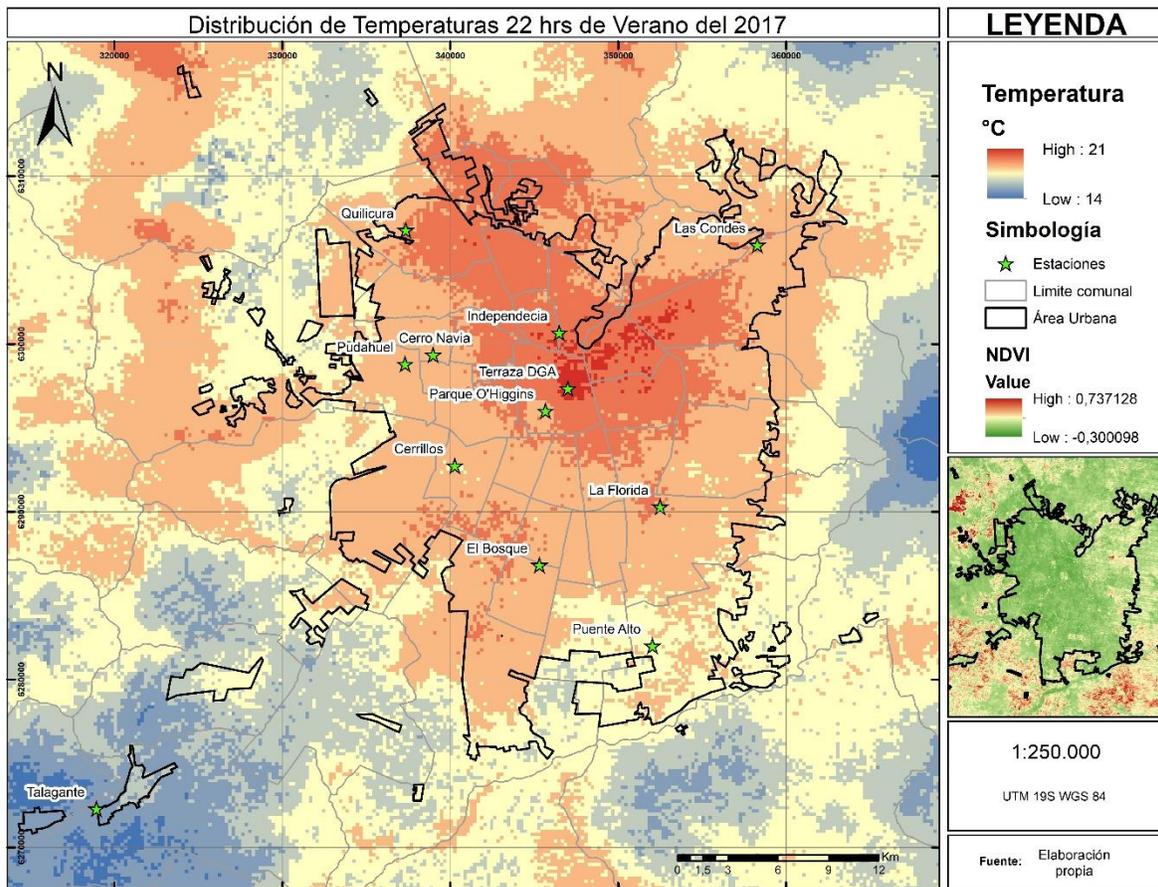
La zona suroriente presenta temperaturas cercanas a las que presenta el entorno rural no urbano. En este caso la isla de calor se manifiesta con una intensidad de 5°C.

Al igual que en el año 2007, las temperaturas de la ciudad además de presentar variaciones respecto al entorno rural que rodea a esta, también presentan variaciones en la distribución

de estas a nivel urbano, las temperaturas comienzan a disminuir a medida que nos acercamos más a las comunas ubicadas en la periferia, más específicamente hacia la zona sur. Por otra parte, se pueden distinguir pequeñas islas de calor en partes de algunas comunas como lo son San Bernardo, La Florida, Lo Espejo, La Cisterna, Maipú y parte de Cerrillos.

Respecto a los factores o variables que explican esta distribución dentro del modelo de 22hrs de verano utilizado para este año, se tiene que, como se mencionaba en el caso del año 2007, la superficie que mantiene cobertura vegetal y la temperatura de emisión superficial, son los dos factores que más inciden en el comportamiento de las temperaturas para este modelo, disminuyendo las temperaturas o elevándolas respectivamente. En este caso el cambio en la distribución y comportamiento de las temperaturas se explica principalmente a procesos como la expansión urbana y la densificación de zonas que antes no eran tan pobladas como lo son actualmente, esto a su vez a generado cambios en las coberturas de suelo urbano, zonas que anteriormente mantenían coberturas naturales o quizás eran usadas como áreas verdes, son reemplazadas por construcciones y coberturas artificiales de origen humano. Por otra parte, zonas que antes eran ocupadas por casas o construcciones de menor envergadura, ahora son reemplazadas por edificaciones en altura lo que a su vez genera que exista una mayor superficie que está entregando calor a la atmosfera, es decir, mayor emisión de calor superficial, lo que retrasa el enfriamiento de las superficies e intensifica el fenómeno de la isla de calor urbana, cambiando el comportamiento y distribución de las temperaturas de la ciudad.

**Figura 15: Distribución de Temperaturas 22 hrs de Verano del 2017**



(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.2. Distribución espacial de las temperaturas modelo Invierno 22:00 hrs

Para llevar a cabo el análisis de la distribución de las temperaturas obtenidas a través del modelo generado para las 22 hrs de la época de invierno, al igual que para el modelo de verano, se recurrió a la aplicación de este modelo mediante algebra de mapas en ArcGIS a las variables del invierno del año 2007 y a las del invierno del año 2017, inicio y termino del periodo de tiempo abordado en esta investigación.

##### 4.5.2.1. Análisis de distribución de temperaturas invierno de 2007

Respecto a las 22:00 hrs del invierno del año 2007, en la **Figura 16** es posible apreciar como la zona urbana mantiene diferencias de temperaturas respecto a su entorno no urbano. Las temperaturas más bajas se distribuyen principalmente hacia el sector sur de la ciudad, en donde se registran temperaturas entorno a los 4°C y 8°C. Mientras, que las temperaturas más altas se concentran mayoritariamente hacia el sector Norponiente y norte de la ciudad, más específicamente entorno a Cerro Navia, registrando temperaturas entorno a los 9°C y 12°C.

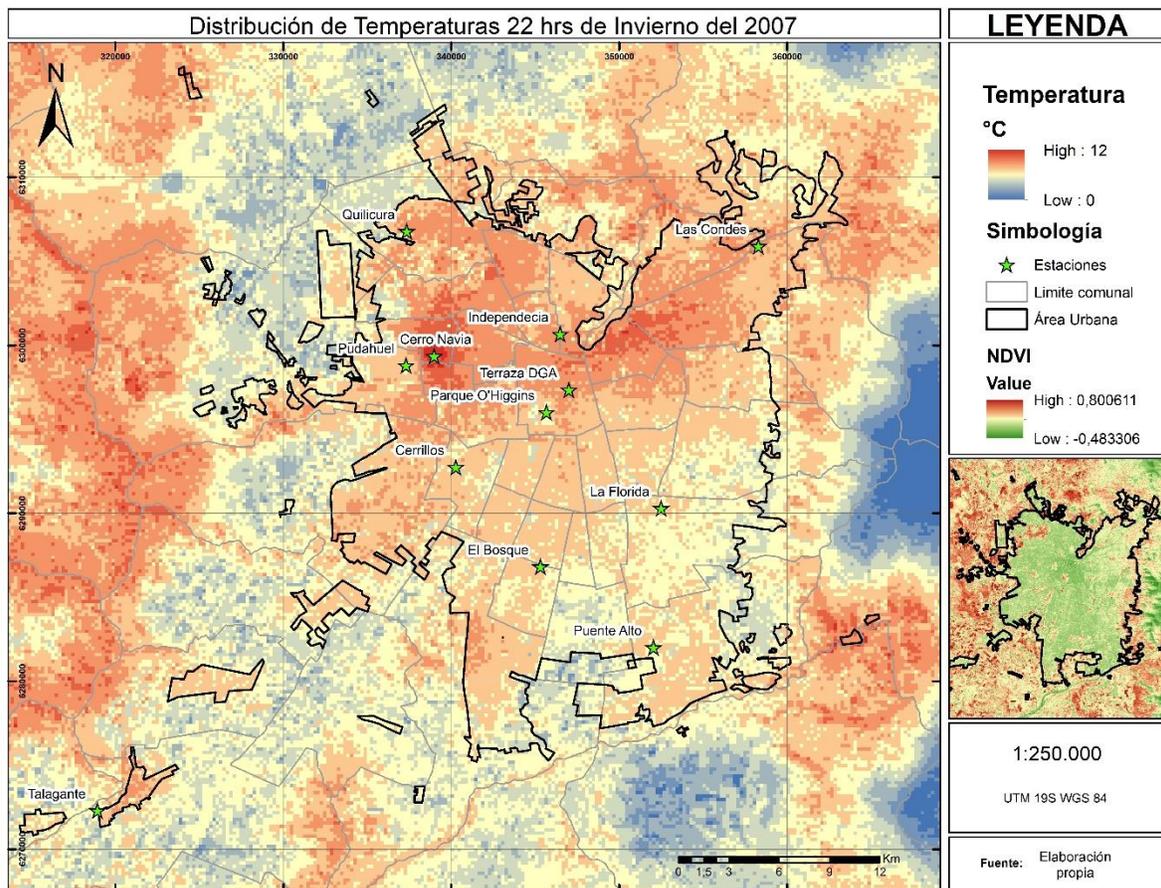
La zona sur presenta temperaturas similares a las que se distribuyen en el entorno no urbano de Santiago. En cuanto a la intensidad alcanzada por la isla de calor urbana; esta registra 8°C, correspondiente a la diferencia de temperaturas registradas en las zonas más cálidas y la temperatura que se presenta en el entorno rural no urbano de Santiago.

Las variaciones, en cuanto a la distribución de las temperaturas, se presentan tanto entre los entornos rurales no urbanos y la ciudad, y además al interior del área urbana abarcada por esta, ejemplo de ello es el hecho de que las temperaturas comienzan a descender desde la zona Norte y Norponiente de ciudad hacia la zona sur de esta. Un punto que cabe mencionar es que en dirección al sector Nororiente se aprecia una isla de calor que se distribuye hacia comunas como lo son Providencia y Las Condes.

En cuanto a cómo los distintos factores que definen el comportamiento y distribución de las temperaturas en el modelo de las 22hrs de invierno; se tiene que al igual del caso del verano, el factor que influye en la disminución de las temperaturas es el que corresponde a la cobertura vegetal, mientras que, por el contrario, el que estas aumenten se debe a la temperatura de emisión superficial. Pero cabe destacar, que en este caso el coeficiente beta o coeficiente de regresión que presenta la cobertura vegetal (representada por el NDVI) llega a ser más del doble del coeficiente que esta misma variable presentaba para el modelo de verano (ver **Tabla 7**). Esto se aprecia claramente en el caso de las cercanías a la estación de Parque O'Higgins, en donde las temperaturas son mucho menores respecto a las que se registran en las cercanías a este lugar, evidenciando como es que este factor actúa en mayor grado que el resto de los factores que son parte del modelo de 22 hrs de invierno, generando un descenso en las temperaturas obtenidas a través del modelo y con ello variaciones en la distribución y comportamiento de las temperaturas del medio ambiente urbano.

Otro punto o particularidad importante por denotar para el caso de la distribución de las temperaturas de 22hrs de invierno del 2007, es aquel que se puede apreciar en el sector correspondiente a las comunas de San José de Maipo y Pirque, en donde se evidencia una isla de calor. Esto debido, en gran parte al efecto que tienen los vientos catabáticos como lo es el Raco, el cual se caracteriza por ser cálido y seco, generando así una disminución de la humedad del aire (factor que de acuerdo al modelo aporta a disminuir la temperatura), y además actúa calentando las superficies, generando así una mayor temperatura de emisión superficial, factor que, como se describía anteriormente, actual aumentado las temperaturas dentro del modelo aplicado para este caso.

**Figura 16: Distribución de Temperaturas 22 hrs de Invierno del 2007**



(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.5.2.2. Análisis de distribución de temperaturas invierno de 2017

Para las 22:00 hrs del invierno de 2017, en la **Figura 17** se evidencia que las diferencias existentes entre las temperaturas al interior de la ciudad y las que se registran en el entorno rural no urbano se han mantenido. Las temperaturas más bajas se distribuyen hacia parte del sector poniente en comunas como Renca y Pudahuel, también a algunas comunas ubicadas en el sector sur de la capital, como la Florida, El Bosque y parte de Puente Alto, zonas en las cuales se registran temperaturas que oscilan entre 6°C y los 9°C. Por otra parte, las temperaturas más altas se localizan en el sector centro y se prolongan hacia parte del sector oriente de Santiago, en comunas como; Santiago, Providencia, Ñuñoa y parte de las Condes. Parte de estas altas temperaturas también se presentan en el sector Suroriente de ciudad, específicamente la comuna de Puente Alto y parte de las otras dos comunas de la Provincia de Cordillera en el entorno rural no urbano de Santiago. Estas altas temperaturas varían entre los 10°C y 13°C.

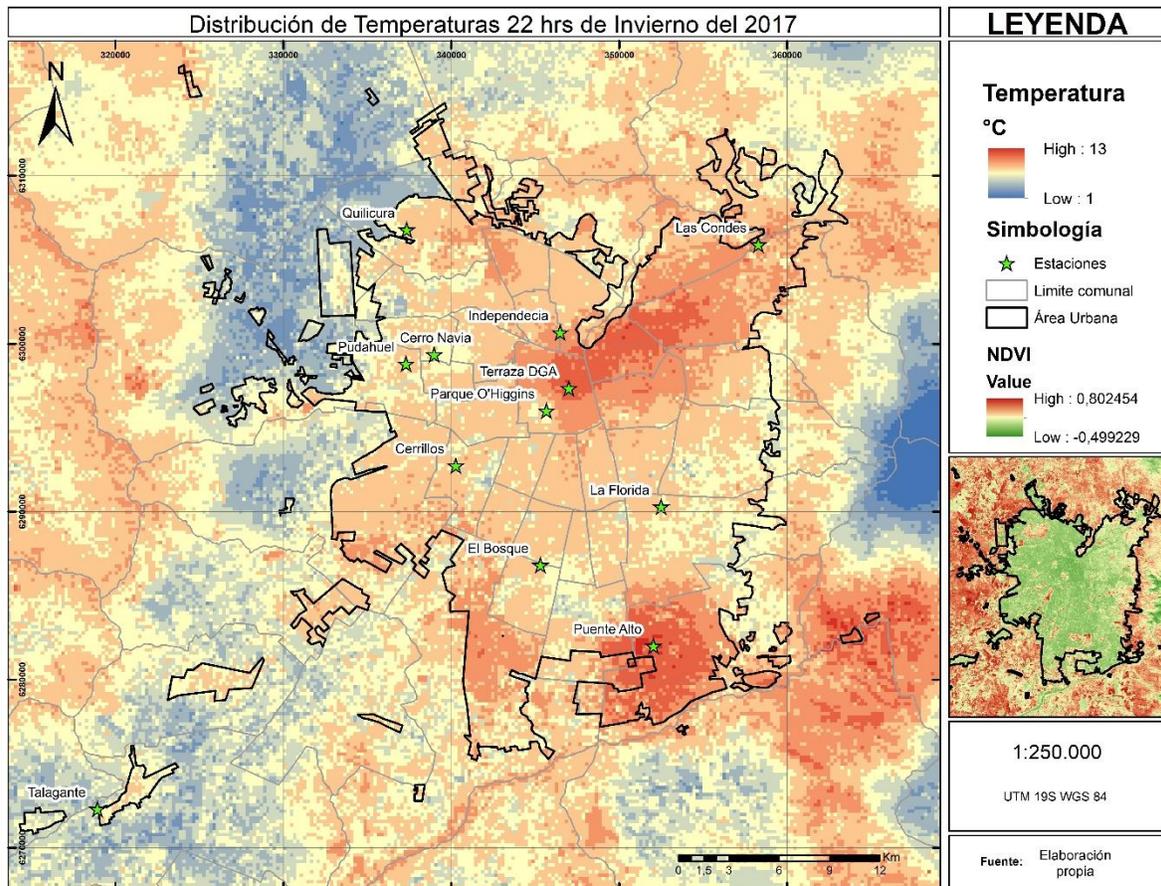
El sector norponiente y parte del Suroriente son los que registran temperaturas similares al entorno rural de Santiago, debido a lo cual se registra una intensidad de la isla de calor de 7°C.

Si bien se pueden observar variaciones respecto a las temperaturas que presenta el entorno rural no urbano respecto a las temperaturas que presenta la ciudad, esto no sucede de igual manera en el caso de las variaciones de temperaturas que existen al interior de la ciudad, pues la distribución de estas no sigue el mismo patrón decreciente hacia todos los sectores más periféricos de esta. Lo anterior debido a que, si bien las temperaturas decrecen a medida que nos desplazamos hacia el sector poniente y al sur de la ciudad, al llegar al extremo suroriente de Santiago, es decir, la comuna de Puente Alto, las temperaturas se vuelven a elevar hasta alcanzar los 13°C.

Lo anteriormente descrito en el párrafo anterior, se debe en gran parte a como los distintos factores que definen el comportamiento y distribución de las temperaturas en el modelo de las 22hrs de invierno. Al igual que en el invierno del año 2007, esta concentración de altas temperaturas en el sector Suroriente de la capital se explica por vientos catabáticos, que modifican el comportamiento de las temperaturas de emisión superficial elevándolas al calentar las distintas coberturas y superficies del medio ambiente urbano. En este caso, la influencia del Raco se manifiesta en una mayor área de superficie abarcando gran parte de la comuna de Puente alto y también el entorno rural no urbano como lo son las comunas

de Pirque y San José de Maipo. Esto genera que las superficies que ya se comenzaban a enfriar y habían entregado parte de su energía disponible a la atmosfera, se vuelvan a calentar o entreguen su calor de forma más lenta debido a que la temperatura del aire interfiere con el intercambio de calor hacia la atmosfera.

**Figura 17: Distribución de Temperaturas 22 hrs de Invierno del 2017.**



(Fuente: Elaboración propia)

#### 4.6. Diagnóstico de los resultados de los modelos.

Para llevar cabo, diagnósticos de los modelos de invierno y veranos generados, se llevó a cabo una comparación entre las temperaturas registradas y las temperaturas generadas por medio de la aplicación de los modelos. Esto se llevó a cabo mediante la espacialización tanto de temperaturas registrados como de las modeladas.

En una primera instancia se llevaron a cabo interpolaciones mediante el método IDW de ArcGIS para así dar continuidad espacial a los datos de temperaturas registrados y espacializarlos.

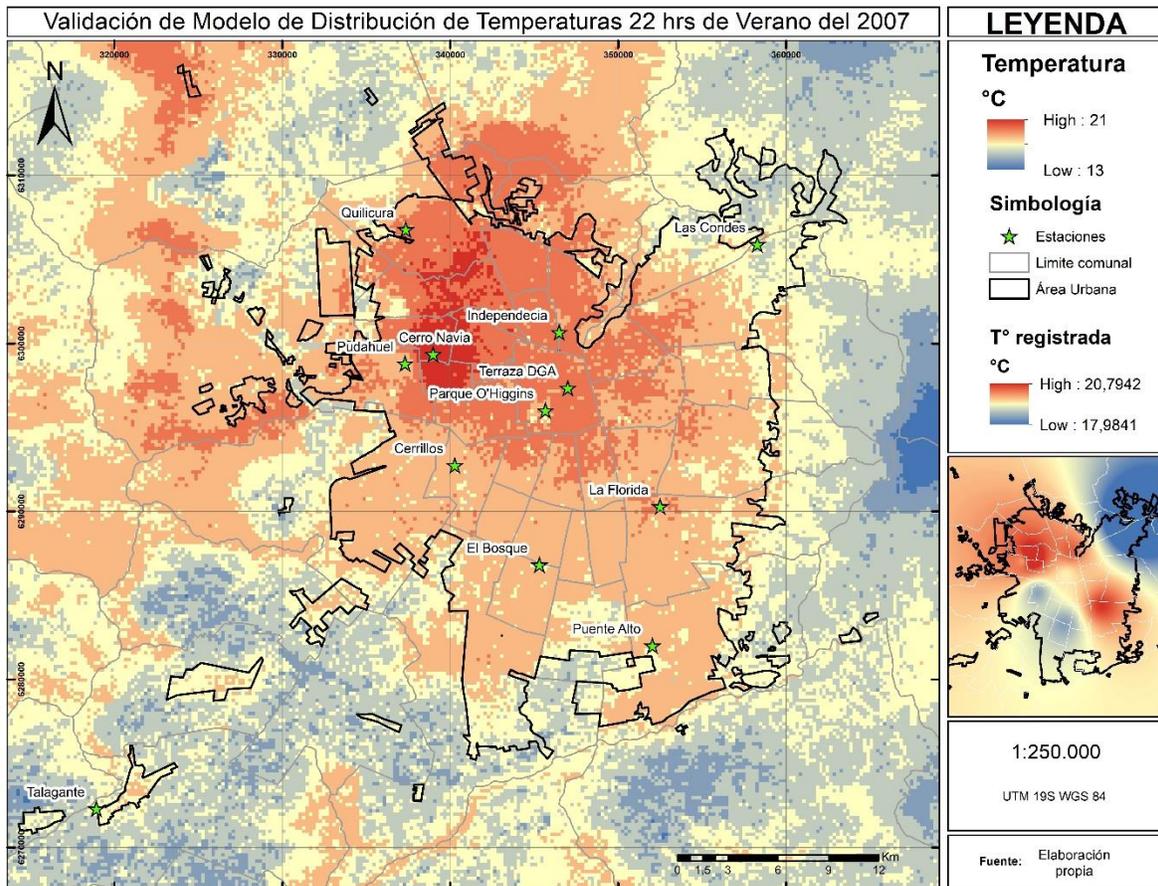
El proceso de evaluación se realizó mediante una comparación de los datos de temperatura atmosférica registrados por las distintas estaciones con parámetros meteorológicos (SINCA Y DGA) de los años 2007 y 2017, tanto como inviernos y veranos, de esos respectivos años. Cabe mencionar que estos datos de temperatura atmosférica registrada no fueron incorporados para la construcción de ninguno de los dos modelos generados.

##### *4.6.1 Diagnostico del modelo de distribución de temperaturas de las 22 hrs en Verano.*

En la cartografía que se muestra en la **Figura 18**, se presenta la distribución de las temperaturas modeladas, mientras que en el esquicio se presentan la interpolación de las temperaturas registradas, en ambas pertenecientes al verano del año 2007. En esta cartografía se evidencia una distribución similar de las temperaturas. Las temperaturas más altas se ubican principalmente en el sector norponiente de ciudad y también en dirección hacia el suroriente, más específicamente hacia la estación de La Florida, mientras que las temperaturas más bajas se registran en el sector nororiente de ciudad, ejemplo de ello es la estación de Las Condes.

Respecto a las temperaturas promedio; en el caso de las temperaturas obtenidas a través del modelo esta fue de 17,04 °C, mientras que en el de las temperaturas registradas por las estaciones, la media fue de 19,69 °C. Por lo cual, la diferencia entre las temperaturas modeladas y las registradas por las estaciones, de las 22 hrs de verano del 2007, es de 2,65 °C (ver **Anexo 5**).

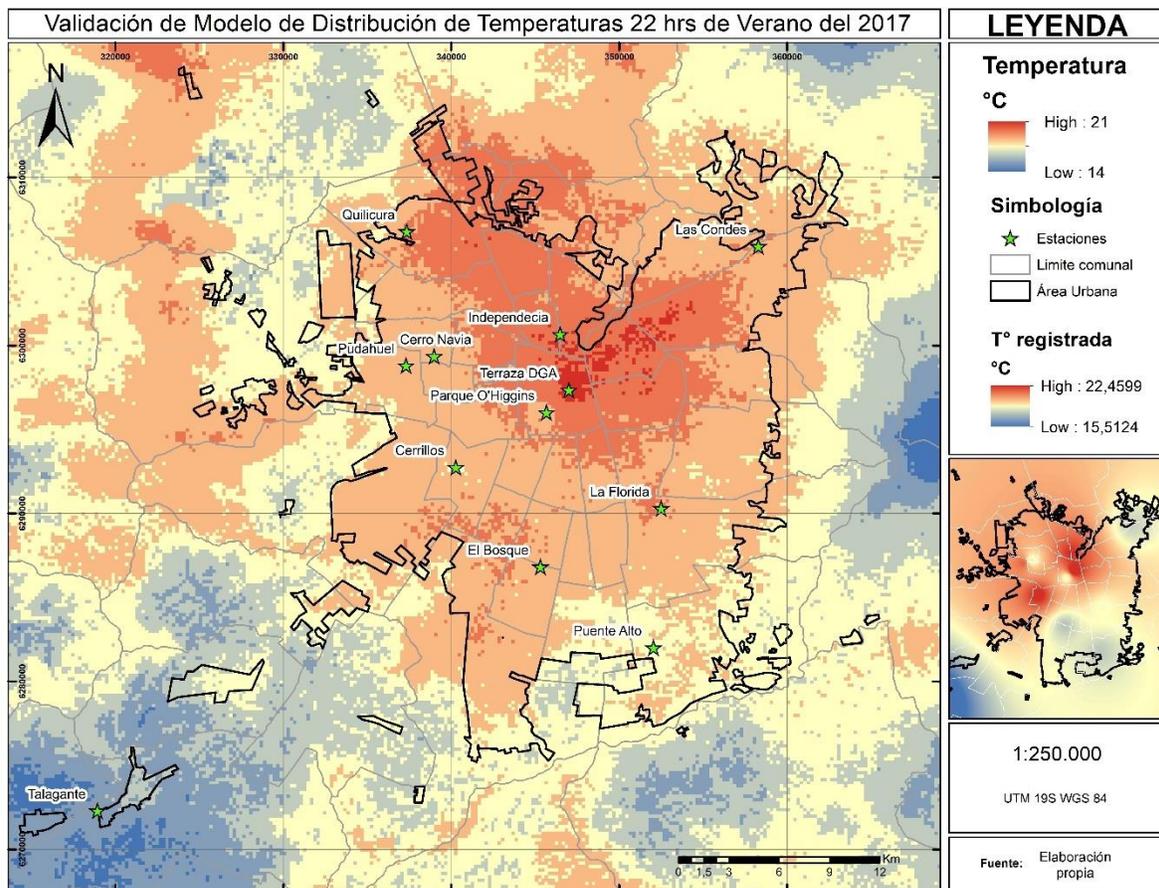
**Figura 18: Cartografía de diagnóstico, Temperaturas Verano 2007**



(Fuente: Elaboración propia)

Respecto al verano del año de 2017, a este también se le aplicó el modelo de verano generado, resultando la cartografía que se muestra en la **Figura 19**, con su correspondiente esquicio en el cual se presentan las temperaturas registradas, espacializadas mediante el método de interpolación IDW. Como se aprecia en la cartografía, tanto las temperaturas registradas, como las obtenidas por la aplicación del modelo de verano, a nivel general, mantuvieron distribución muy similar a través de la extensión de cobertura urbana de ciudad de Santiago. Ubicándose las mayores temperaturas en el sector centro y prologándose, en mayor medida, hacia el sector norponiente y nororiental de la capital. Además, se observan temperaturas entorno a los 20° C se distribuyen hacia el sector sur poniente, en comuna como el Bosque, La Cisterna, Lo Espejo, Maipú y San Bernardo. Respecto a las temperaturas promedio, las temperaturas modeladas presentan una media de 18,08 °C, mientras que las temperaturas registradas llegan a un promedio de 19,52 °C. Por ende, ambas presentan una diferencia de 1,44 °C (ver **Anexo 5**).

**Figura 19: Cartografía de diagnóstico, temperaturas Verano 2017**



(Fuente: Elaboración propia)

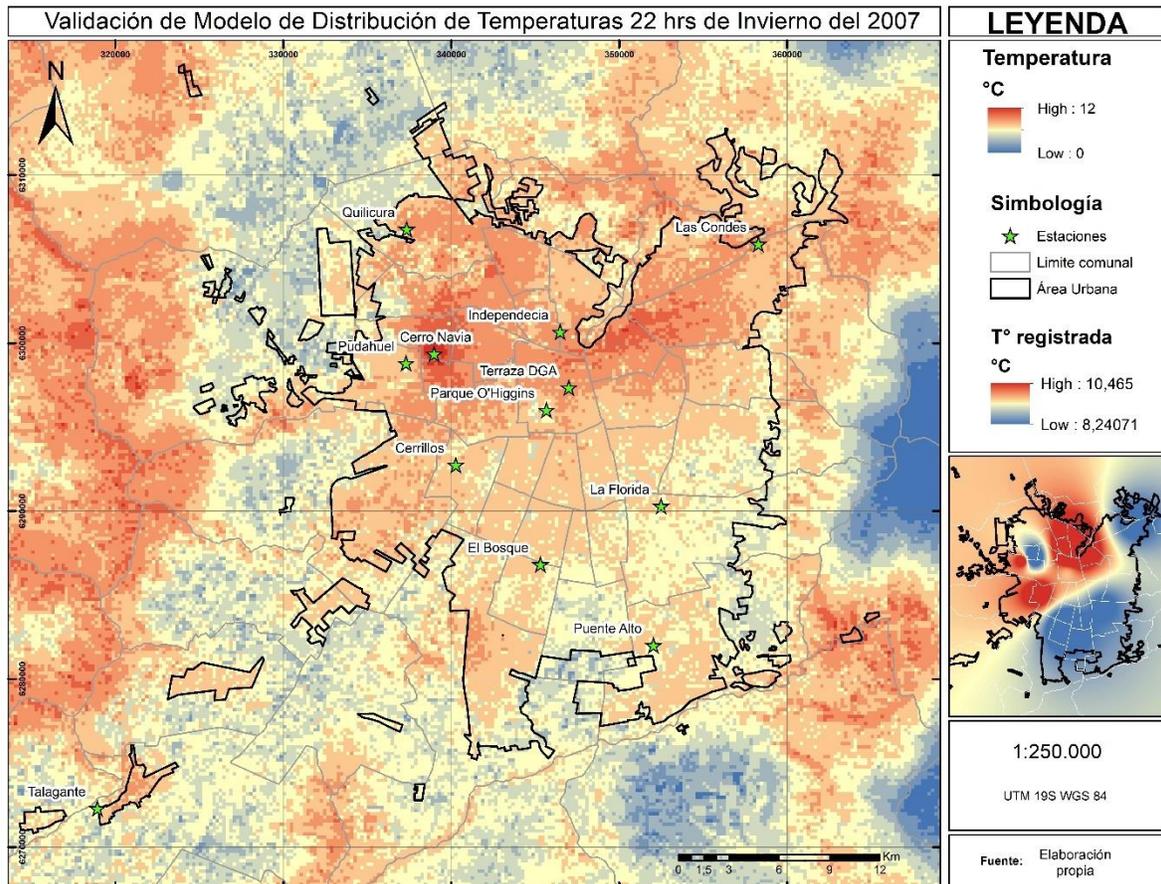
*4.6.2 Diagnostico del modelo de distribución de temperaturas de las 22 hrs en Invierno.*

Respecto al modelo generado para las 22hrs de la época de invierno, se aprecia en la **Figura 20**, correspondiente al año 2007, que la distribución de las temperaturas es muy similar a la distribución presentada por las temperaturas registradas en las estaciones meteorológicas, concentrándose las mayores temperaturas en torno al poniente y norponiente y centro de ciudad, en comunas como; Pudahuel, Independencia, Santiago, Quinta Normal, Providencia, Ñuñoa, Conchalí, Recoleta, entre otras. Las menores temperaturas se distribuyen hacia el Sur, Sur Oriente y Nororiente de Santiago. Una leve diferencia de las temperaturas se aprecia en las cercanías de la estación meteorológica de Cerro Navia y su entorno más cercano (comuna de Lo Prado) en donde se registra una pequeña isla de frio o menores temperaturas que en las demás zonas circundantes, pero esto se explica debido a la diferencia entre las temperaturas mínimas representadas en la

**Figura 20**, debido a que, mientras que la mínima de la rango de temperaturas modeladas es de 0 °C, la mínima del rango de las temperaturas registradas es de 8°C, lo cual genera que debido a la representación de la escala o gama de colores se perciba como si la diferencia de temperaturas fuese mayor. En caso de las temperaturas modeladas Cerro Navia presenta una temperatura de 11 °C, mientras que en las temperaturas registradas 8,24°C, quedando en 2,76 °C de diferencia.

En el caso de las temperaturas promedios; las temperaturas modeladas registran 7,32° C, mientras que las temperaturas registradas 9,15 °C. resultando una diferencia entre ambas 1,83 °C (ver **Anexo 6**)

**Figura 20: Cartografía de diagnóstico, temperaturas Invierno 2007**

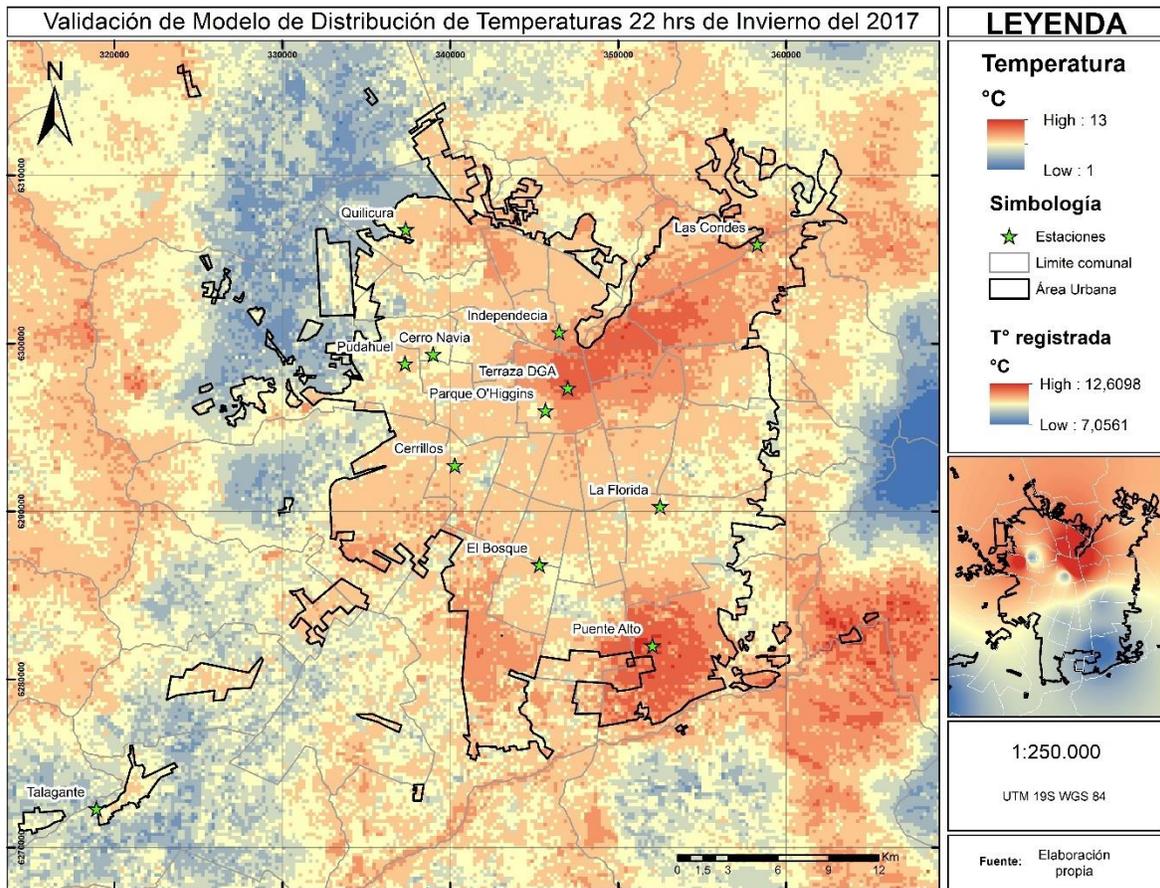


(Fuente: Elaboración propia)

En cuanto al invierno del año 2017, se puede apreciar en la **Figura 21**, que si bien las temperaturas registradas y las obtenidas a través del modelo presentan la misma una distribución similar en cuanto a la concentración de temperaturas en el sector centro de la ciudad y parte de la zona nororiente de ésta, el comportamiento de las temperaturas difiere entre ambas a medida que se distribuyen hacia la zona sur y suroriente de Santiago. Mientras que, en las temperaturas que se aprecian en el esquicio de la cartografía correspondientes a las temperaturas atmosféricas registradas por las estaciones evidencian una distribución de las temperaturas más bajas en la zona sur y suroriente (Puente Alto, La Florida, La Pintana, por ejemplo). Las temperaturas modeladas, por otra parte, exhiben una concentración de altas temperaturas en el sector suroriente, más específicamente, concentrándose en la comuna de Puente Alto, este comportamiento de las temperaturas modeladas se abordará en mayor grado de detalle en siguiente parte de esta investigación en donde se buscará explicar el comportamiento y distribución de las temperaturas obtenidas a través de los dos modelos generados (22hrs de invierno y 22hrs de verano).

En cuanto a las temperaturas promedios, en el caso de las temperaturas de registradas presentan para las 22 hrs del invierno del año 2017 un promedio de 9,07 °C, mientras que para ese mismo caso la distribución de temperaturas modeladas, mantienen una media de 8,20 °C. Quedando en una diferencia de 0,87 °C entre ambas (ver **Anexo 6**).

**Figura 21: Cartografía de diagnóstico, temperaturas Invierno 2017**



(Fuente: Elaboración propia)

## Capítulo V: Discusión y conclusión

### 5.1. Discusiones

A lo largo de este trabajo de investigación diversos fueron los autores mencionados que ya han abordado el clima urbano y las islas de calor con anterioridad, es por ello que se vuelve necesaria llevar a cabo un análisis y discusión de los resultados que estas diversas investigaciones han aportado a la comprensión y estudio del clima urbano los distintos fenómenos y factores asociados a este.

En esta investigación se reafirma lo mencionado por diversas investigaciones como las de Molina (2007), Sarricolea et al. (2008), Vilela (2004), Cuadrat et al. (2005), Smith y Romero (2016) y diversos autores respecto a que la presencia de la vegetación es un factor explicativo fundamental en la distribución y comportamiento de las temperaturas a nivel de clima urbano, provocando una disminución de estas en aquellos sectores de la ciudad donde el estado y presencia de esta es mayor. Para el caso de estudio de esta investigación que abarcaba un periodo de estudio de 10 años para generar de modelos de distribución de temperaturas para la noche de Santiago en invierno y verano, se obtuvo como resultado que vegetación es el factor que más disminuye o amortigua las temperaturas en las noches de verano e invierno, siendo mayor su grado en influencia en la época de invierno en donde las zonas que presentaban mayor cobertura vegetaciones mantenían temperaturas más bajas que aquellas que se ubicaban más al centro de la ciudad y por ende menor cantidad de coberturas vegetales y mayor cantidad de superficies impermeabilizadas y artificiales.

Pero sin duda, lo que en mayor grado destaca o resalta de algunos de los resultados de esta investigación en comparación a investigaciones anteriormente mencionadas a lo largo de este texto como las de Zha & Gao (2003), Zhang, (2009), Córdoba (2013), Goñi (2016), entre algunos otros autores, es la correlación inversa que arrojó la variable de superficie impermeabilizada representada por el Índice de diferencia normalizada de edificación; pues lo que se esperaría de estas es que fuera un correlación directa, es decir a medida que la cantidad de superficie impermeabilizada aumentase también lo harían las temperaturas atmosféricas, pero como se enunciaba anteriormente esto no fue así. Parte de este resultado posiblemente se atribuya al Índice de diferencia normalizada de edificación y los valores que de este se obtuvieron mediante Google Earth Engine, lo cual se pasará a

detallar de mejor manera más adelante en las discusiones donde se aborda la parte metodológica.

La presente investigación solo considero información de estaciones con parámetros meteorológicos que fuesen de acceso público y además gratuita. Es por ello, por lo que la información utilizada no pertenecía solo a una institución si no que provenía desde distintas fuentes, cada una con intereses y objetivos distintos, lo cual limitó en cierta medida la disponibilidad de información y la continuidad de los datos que se requerían para abordar el periodo de estudio que deseaba abarcar. Además de ello, existían zonas las cuales no se contaba con estaciones que mantuvieran registros meteorológicos, o si estos existían no mantenían continuidad en el tiempo de registro de datos, sumado a que algunas estaciones mantenían largos periodos (llegando ser meses o años en algunos casos) de registros vacíos o erróneos, lo que generaba tener que llegar descartar estas estaciones como fuente de datos y así disminuir aún más la cantidad de información disponible (estación cerro Calán y Quebrada de Macul, por ejemplo, pertenecientes a la Dirección General de Aguas). Esto en parte, puede ser el motivo por el cual existen diferencias entre las temperaturas modeladas y los valores registrados de temperatura atmosférica en las estaciones para el caso de las 22 hrs del invierno del 2017.

Referente a lo anterior, otra fuente a la que se recurrió para obtener información fueron las imágenes satelitales, lo cual permitió obtener datos de factores con representación espacial continua, sirviendo como complemento para información discreta obtenida desde estaciones con parámetros meteorológicos. Estas imágenes fueron obtenidas mediante la plataforma de programación de Google Earth Engine, desde esta plataforma fueron obtenidos en primera instancia los valores de cada factor explicativo o variable seleccionada para la construcción del modelo de cada día de las épocas del año, esto género que se contara con una gran cantidad de información disponible para ser introducida en la creación de los modelos, pero de la cual se terminaron descartando dos variables ( distancia cursos de agua y distancia a caminos) las cuales se había pensado tendrían mayor grado de influencia en cuanto a la distribución de las temperaturas, pero las que finalmente tras ser filtradas y limpiadas sus bases de datos tuvieron que ser descartadas.

Semejante a lo comentado en el párrafo anterior, fue lo que sucedió con el Índice de Diferencia Normalizada de Edificación (NDBI), este factor al generar los modelos de

distribución de temperaturas para las 22 hrs de verano e invierno no genero el comportamiento o influencia esperado en la distribución de las temperaturas modeladas, lo que se esperaba que ocurriese respecto a este factor es; que actuara aumentando las temperaturas, esto debido a que debería representar o evidenciar aquellas superficies que han sido construidas o reemplazadas por coberturas artificiales como lo son el hormigón, concreto o asfalto, las cuales han pasado a reemplazar coberturas de origen natural o terrenos de cultivos, lo cual se esperaría que evidenciara todas aquellas zonas donde el Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) arrojara valores bajos del índice, indicando mal estado o nula presencia de vegetación. Pero en cambio, el valor que el NDBI arrojó a elaborarse ambos modelos fueron valores negativos en sus coeficientes de regresión, además, también arrojó valores negativos en las pruebas de correlación de Spearman, es decir, que de acuerdo con los modelos generados este factor actúa disminuyendo la temperatura, contrario a todo lo que se esperaba que ocurriera.

En primera instancia, al obtener estos resultados se planteó el hecho de hubiera un error en la elaboración del código por el cual fueron obtenidas las imágenes satelitales y valores que se utilizaron para trabajar este factor y poder usarlo en la creación de modelos, debido a que no fue posible conseguirlo como un producto ya elaborado en Google Earth Engine o algún producto disponible de algún sensor remoto como Landsat o MODIS, por lo cual se optó por generarlo mediante fórmulas de cálculos de bandas de Landsat 7, el cual abarcaba a totalidad el periodo que se buscaba utilizar para generar los modelos sin tener que alternar entre dos misiones Landsat (Landsat 7 y 8). Pero al revisar el código y modificarlo repetidas veces para tratar de encontrar la falla, no se hallaron errores e incluso se modificó para poder obtener el NDVI y así comparar resultados con las imágenes de NDVI obtenidas mediante el producto MODIS, las cuales resultaron ser muy similares. Por lo cual se plantea que, para tratar de abordar esta variable como posible factor explicativo de las temperaturas en futuras investigaciones, esto se lleve a cabo mediante el Índice Build-Up, el cual complementa tanto el Índice de Diferencia Normalizada de Edificación como el Índice de vegetación de diferencia normalizada, para una mayor rigurosidad en los resultados (Zha & Gao, 2003)

## 5.2. Conclusiones

Las temperaturas promedio anuales de invierno y verano para ciudad de Santiago en el periodo de tiempo del año 2007 hasta el año 2017, presentan diferentes puntos de inflexión y fluctuación a través de los diferentes años que se encuentra dentro del periodo de tiempo analizado, lo cual, a su vez, también varía dependiendo de la época o estación del año. Para el caso de la época de verano, las temperaturas promedio en los gráficos de la **Figura 12**, mantienen una leve tendencia a elevarse, presentando una variación desde el año 2007 al 2017 de 0,17°C. Mientras que, por otra parte, en el caso de la época de invierno, las temperaturas han fluctuado mostrando mayor grado de oscilación a través del periodo de tiempo abarcado, como se aprecia en la **Figura 13**, en donde se evidencian mayor cantidad de puntos de inflexión a través de los años; entre los años 2007 al 2017 las temperaturas han tendido a un leve aumento, registrando 0,08 °C. Cabe mencionar que, si bien las variaciones han sido muy leves, esto se debe en gran medida a que el periodo que se analiza es muy corto en comparación a la mayoría de los estudios climáticos que analizan como han variado las temperaturas, los cuales tienden a tomar periodos de 30 años o más.

Respecto a los factores o variables utilizadas, la presente investigación reconoce aquellos factores que ejercen influencia en la formación del clima urbano de la ciudad de Santiago, de los seis que originalmente se habían escogido a través de la revisión bibliográfica, de investigaciones y artículos que habían abordado temáticas similares con anterioridad, solo 4 fueron los que finalmente se relacionan o ejercen determinado grado de influencia en el comportamiento de las temperaturas atmosféricas de la ciudad de Santiago y su clima urbano. El grado de influencia de estas variables presenta cambios en las diferentes épocas del año, es debido a esto que la distribución y comportamiento de las temperaturas puede ser explicado por las variaciones en las variables o factores dependiendo de las diferentes estaciones del año, como lo fue para este caso el caso del invierno y verano.

En la época de verano, la cobertura vegetal es el factor que más influencia tiene en el descenso de las temperaturas y el amortiguamiento de estas. Lo cual se evidencia en sectores de la ciudad en donde la cobertura de áreas verdes y vegetación es mayor, ejemplo de ello es el Parque O'Higgins y la comuna de las Condes, en donde los valores del NDVI arrojaron valores que indican alta presencia de vegetación, y los cuales presentan temperaturas más bajas que las zonas urbanas continuas que los rodean. En el caso de

del modelo de invierno, la cobertura vegetal también fue el factor predominante en cuanto a la influencia que ejerce sobre la distribución de las temperaturas llegando a duplicar el efecto de reducción en las temperaturas que presentaba el modelo generado para verano, esto debido a que, en este caso en particular, es decir, en invierno la cobertura vegetal sufre cambios en su distribución, tanto en el caso de si natural, paños de cultivos o áreas verdes, pues las cantidad de agua disponible en el medio ambiente varía respecto a la de verano, en el caso de las coberturas vegetales naturales, estas cubren zonas las cuales estaban desprovistas de vegetación en verano, mientras que las alteraciones en las zonas que presentaban cultivos se pueden explicar debido a la rotación y cambios que hay en las diferentes especies que se cultivan dependiendo de la época. Estas variaciones y aumento en la superficie que ocupaba la cobertura vegetal respecto al verano, es lo que genera que el índice de vegetación diferenciada aumentó su coeficiente de regresión y así determine en mayor medida la distribución de las temperaturas.

Similar a lo descrito en párrafo anterior, la cobertura vegetal, la humedad relativa del aire y la superficie impermeabilizada arrojaron una correlación negativa con la temperatura. El caso de la superficie impermeabilizada es posiblemente se deba a un error de los datos al ser ingresados al modelo, pues este factor tuvo que ser obtenido de diferente manera que el resto.

Un apartado importante por agregar en este punto, y que se evidenció en el análisis de la distribución de las temperaturas para las 22hrs de invierno y verano, al inicio y término del periodo de tiempo abarcado esta investigación, es como las variaciones que ha sufrido la zona urbana han derivado en cambios y perturbaciones del clima urbano, generando que las temperaturas alteren su distribución a lo largo y ancho de la superficie ocupada por la ciudad en el territorio. El crecimiento y expansión de la ciudad derivado en el desplazamiento de las islas de calor generadas por esta misma, debido a el reemplazo de superficies que antes eran ocupadas por coberturas vegetales o por zonas urbanas, pero las cuales no se encontraban tan densamente ocupadas y construidas, por nuevas construcciones en altura y densificación de zonas residenciales. Estos cambios en el comportamiento de las temperaturas se evidencian al comparar la distribución de temperaturas, ya sea las generadas por los modelos, o por las registradas por las estaciones, en ambos casos las islas de calor se han desplazado desde la zona centro y poniente de Santiago prologándose hacia parte del sector oriente.

## Capítulo VI: Bibliografía

- Arnfield, A. J. (2003). "Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island". *International journal of climatology*, 23(1), 1-26.
- Arnold Jr, C. L., & Gibbons, C. J. (1996). "Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator". *Journal of the American planning Association*, 62(2), 243-258. Recuperado desde: [http://www.esf.edu/cue/documents/arnoldgibbons\\_impervioussurfacecoverage\\_1996.pdf](http://www.esf.edu/cue/documents/arnoldgibbons_impervioussurfacecoverage_1996.pdf)
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). "Ecosystem services in urban áreas". *Ecological economics*, 29(2), 293-301.
- Cassinelli, F., (2019). "Chilenos gastamos en promedio 170 litros de agua al día", *24 Horas Data*, Recuperado el 14 de Enero de 2020, de: <https://www.24horas.cl/data/chilenos-gastamos-en-promedio-170-litros-de-agua-al-dia-enterate-de-cuanto-podrias-ahorrar-con-esta-calculadora-3134373>
- CEPAL, N. (2012). "*Población, territorio y desarrollo sostenible*". En *Comité Especial de la CEPAL sobre Población y Desarrollo, Quito, Ecuador*. Recuperado desde: <https://www.cepal.org/en/eventos/comite-especial-la-cepal-poblacion-desarrollo-ecuador-2012>
- CORREA, E., Rosa, C., & Lesino, G. (2006). "*Monitoreo de Clima Urbano: análisis estadístico de los factores que determinan la isla de calor y su aporte al diseño de los espacios urbanos*". AVERMA, Salta, 10, 41-48.
- Coutts, A. M., Beringer, J., Jimi, S., & Tapper, N. J. (2009). The urban heat island in Melbourne: drivers, spatial and temporal variability, and the vital role of stormwater. Melbourne VIC. <http://www.researchgate.net/publication/266267164>.
- Cuadrat J., Vicente- Serrano S., SAZ M. 2005. "Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La isla de calor y sus factores condicionantes". *Boletín de la Asociación de Geógrafos de España*, 40: 311-327
- Flaño, P. R., Martín, L. R., Suárez, P. M., & Cordero, A. H. (2008). "La isla de calor en Las Palmas de Gran Canaria: intensidad, distribución y factores condicionantes". *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*, (47), 157-173. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3093433/1.pdf>
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. *Journal of applied meteorology*, 38(7), 922-940.
- Guijarro, J. A. (1998). Influencia de la urbanización en las series termométricas de Baleares. IV Reunión de Climatología:"El clima y el factor urbano"(Madrid, 27-28 Feb. 1998):305-314. Recuperado de : <https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/3733/1/urbatemp.pdf>

- KUSAKA, H. 2008. Recent progress in urban climate study in Japan. *Geographical Review of Japan*, 81 (5): 361 – 374.
- MOLINA, M. (2007). “Efectos de los tipos de urbanización asociados al crecimiento urbano del área Metropolitana del Gran Santiago sobre la generación y comportamiento de micro islas de calor”. Memoria para optar al Título de Geógrafo. Universidad de Chile. Santiago, 118 pp. Inédito
- Montero Granados. R (2016): “Modelos de regresión lineal múltiple. Documentos de Trabajo en Economía Aplicada”. Universidad de Granada. España. Recuperado de: [https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion\\_lineal.pdf](https://www.ugr.es/~montero/matematicas/regresion_lineal.pdf)
- MOREIRA, J.M.; CORZO, M.; PITA, M.; GUERRERO, C. 2006. *El clima, una herramienta para la gestión de la información climatológica en Andalucía*. Comunización 272, tecnimap, Sevilla. 1-8 p. En: [www.administracionelectronica.gob.es/recursos/pae\\_000002499.pdf](http://www.administracionelectronica.gob.es/recursos/pae_000002499.pdf)
- Oke, T. R., & Cleugh, H. A. (1987). “Urban heat storage derived as energy balance residuals”. *Boundary-Layer Meteorology*, 39(3), 233-245.
- Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., & Masson, V. (2007). “Anthropogenic heat release in an old European agglomeration” (Toulouse, France). *International Journal of Climatology*, 27(14), 1969-1981. Recuperado de <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/joc.1530>
- Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & 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, 71-84.
- Sarricolea Espinoza, P., & Romero Aravena, H. (2009). “Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el Área Metropolitana de Valparaíso (AMV)”. In 5th International Conference Virtual City and Territory, Barcelona, 2, 3 and 4 June 2009 (pp. 345-356). Centre de Política de Sòl i Valoracions.
- Smith, Pamela, & Romero, Hugo. (2016). “Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile”. *Revista de geografía Norte Grande*, (63), 45-62. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000100004>.
- Smith, Pamela (2011). “Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile. Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano”. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Smith, P., & Andrade, X. (2013). “Distribución termal intraurbana en las ciudades de Santiago y Valparaíso. Análisis comparativo de sus factores explicativos”. *Investigaciones Geográficas*, (46), pág-25, Santiago, Chile.
- Soler, D. (2018). “Ciudad del Cabo, la agonía de quedarse sin agua”, *Diario El País*, Recuperado el 26 de Abril del 2018, desde: [https://elpais.com/elpais/2018/02/09/planeta\\_futuro/1518177674\\_391436.html](https://elpais.com/elpais/2018/02/09/planeta_futuro/1518177674_391436.html)
- VILELA, J. (2004). “Distribución del arbolado urbano en la ciudad de Fuenlabrada y su contribución a la calidad del aire”. *Revista Ciudad y Territorio*, 36: 419 – 427

-Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing*, 24(3), 583-594.

-Zhang, Y., Odeh, I. O., & Han, C. (2009). Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(4), 256-264.

Goñi, L., Gregorini, G., & Aldalur, B. (2016) Análisis del crecimiento edilicio mediante imágenes Landsat en la localidad de Monte Hermoso, Argentina.

Córdoba, J. F., & Millán, N. G. (2013). CARACTERIZACIÓN DE ISLAS FRESCAS URBANAS-IFU-EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA. *Entorno Geográfico*, (9).

<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal14/Nuevastecnologias/Teledeteccion/04.pdf>

## Capítulo VII: Anexos

### Anexo 1: Datos Verano 22 hrs años 2007 al 2017.

#### Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	T° del aire	Humedad	Valor NDVI	MODIS (noche)	Cursos de agua	Caminos	NDBI	
N	6929	6929	6929	6929	6929	6929	6929	
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	18,669730	57,497545	0,252245	17,660635	4223,582688	985,365620	0,049934
	Desviación típica	2,6701872	14,942875	0,1081692	1,9781942	3,5111978E3	541,539367	0,0511983
Diferencias más extremas	Absoluta	0,026	0,035	0,262	0,031	0,236	0,192	0,177
	Positiva	0,012	0,024	0,262	0,018	0,236	0,160	0,177
	Negativa	-0,026	-0,035	-0,104	-0,031	-0,166	-0,192	-0,165
Z de Kolmogorov-Smirnov		2,138	2,882	21,840	2,542	19,646	15,973	14,706
Sig. asintót. (bilateral)		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

(Fuente: Elaboración Propia en base a spps)

### Anexo 2: Datos Invierno 22 hrs años 2007 al 2017.

#### Prueba de Kolmogorov-Smirnov

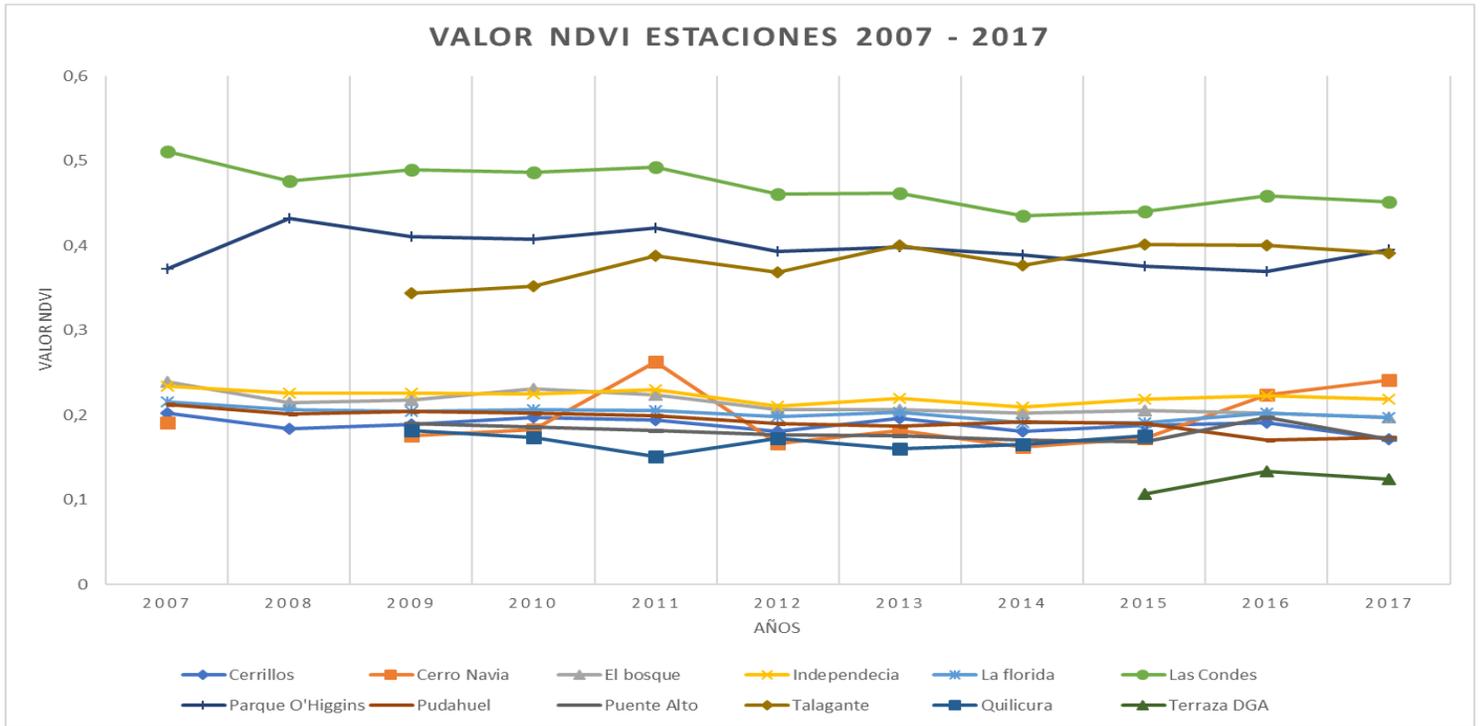
	T° del aire	Humedad	Valor NDVI	MODIS (noche)	Cursos de agua	Caminos	NDBI	
N	2329	2329	2329	2329	2329	2329	2329	
Parámetros normales <sup>a,b</sup>	Media	8,852686	70,516965	0,263954	4,922074	4204,194904	953,220933	0,057089
	Desviación típica	3,3859838	14,4838892	0,1233684	2,8583443	3,6562783E3	458,847712	0,0471905
Diferencias más extremas	Absoluta	0,030	0,045	0,205	0,043	0,216	0,169	0,126
	Positiva	0,030	0,034	0,205	0,041	0,216	0,162	0,126
	Negativa	-0,013	-0,045	-0,091	-0,043	-0,177	-0,169	-0,115
Z de Kolmogorov-Smirnov		1,463	2,193	9,874	2,068	10,408	8,159	6,098
Sig. asintót. (bilateral)		0,028	0,000	0,000	0,000	,000	0,000	0,000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

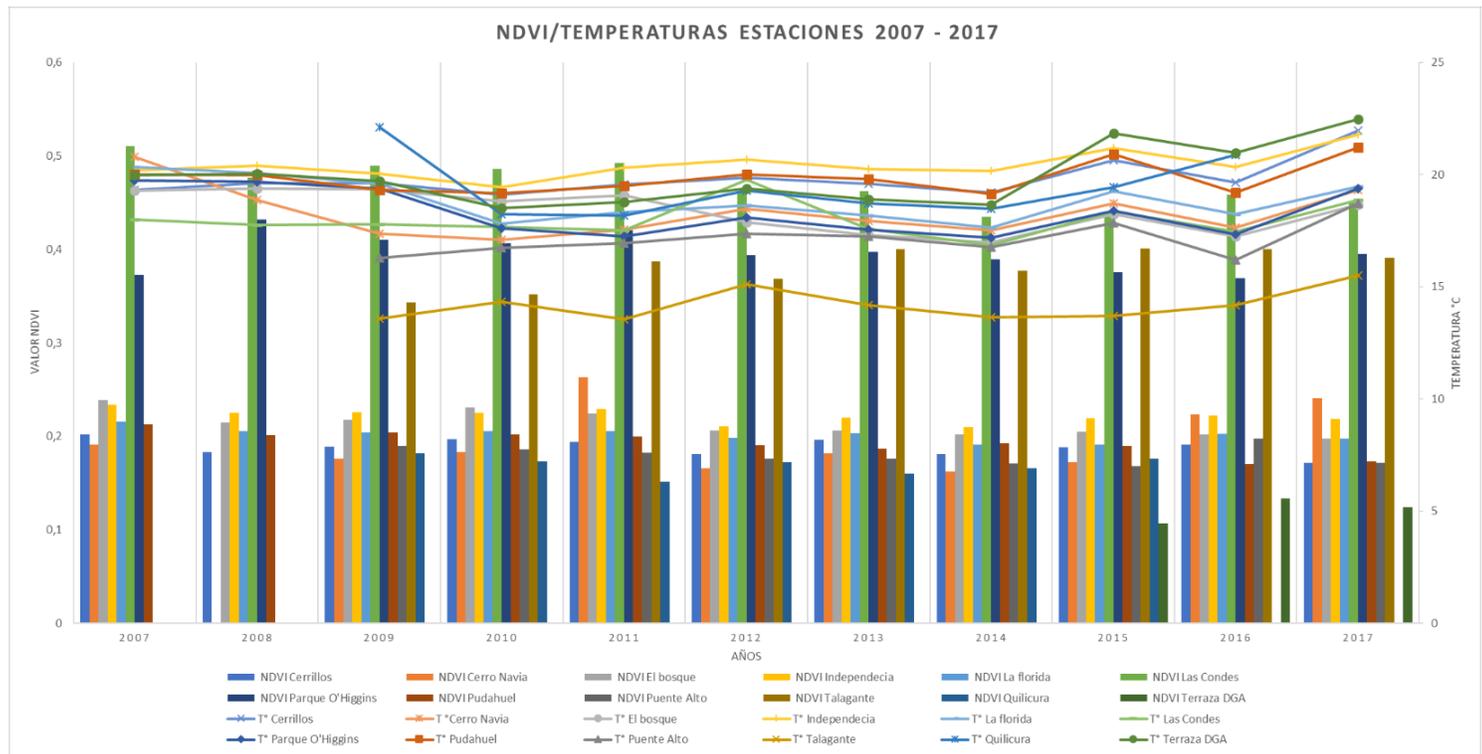
(Fuente: Elaboración Propia en base a spps)

**Anexo 3: Valor NDVI de las estaciones periodo 2007 al 2017.**



(Fuente: Elaboración Propia en base a datos recopilados)

**Anexo 4: Comparación NDVI y Temperatura de cada estación 2007 al 2017.**



(Fuente: Elaboración Propia en base a datos recopilados)

### Anexo 5: Diferencias temperaturas registradas y modeladas: Veranos 2007 y 2017

Año	2007			2017			
	Estación	T° registrada	T° Modelo	Diferencia Temperatura	T° registrada	T° Modelo	Diferencia Temperatura
	Cerrillos	19,319	18	1,319	21,962	19	2,9625
	Cerro navia	20,792	21	0,205	19,304	19	0,3045
	El bosque	19,285	18	1,285	18,651	19	0,3483
	Independencia	20,202	19	1,202	21,794	20	1,7944
	La Florida	20,328	19	1,328	19,475	19	0,475
	Las Condes	17,984	17	0,984	18,870	19	0,1292
	Parque O'Higgins	19,741	18	1,741	19,367	19	0,3679
	Pudahuel	20,005	18	2,005	21,214	19	2,2144
	Puente Alto	-	17	-	18,731	18	0,7315
	Quilicura	-	19	-	-	19	-
	Talagante	-	16	-	15,512	16	0,4876
	Terraza DGA	-	19	-	22,46	21	1,46
	Promedios Temp. °C (Histogramas)	19,698	17	2,65	19,52	18,08	1,44

(Fuente: Elaboración Propia en base a datos recopilados)

### Anexo 6: Diferencias temperaturas registradas y modeladas: Inviernos 2007 y 2017

Año	2007			2017			
	Estación	T° registrada	T° Modelo	Diferencia Temperatura	T° registrada	T° Modelo	Diferencia Temperatura
	Cerrillos	9,76	8	1,76	-	8	-
	cerro navia	8,24	11	2,76	8,021	8	0,021
	El bosque	8,45	7	1,45	8,34	8	0,34
	independencia	10,47	10	0,47	11,603	10	1,603
	La florida	8,77	8	0,77	8,129	9	0,871
	Las Condes	8,72	8	0,72	9,532	9	0,532
	Parque O'Higgins	9,25	8	1,25	8,159	8	0,159
	Pudahuel	9,71	8	1,71	11,389	9	2,389
	Puente Alto	-	7	-	7,179	11	3,821
	Quilicura	-	9	-	-	8	-
	Talagante	-	7	-	7,056	6	1,056
	Terraza DGA	-	9	-	12,61	11	1,61
	Promedios Temp. °C (Histogramas)	9,15	7,32	1,83	9,07	8,2	0.87

(Fuente: Elaboración Propia en base a datos recopilados)

## Anexo 7: Temperaturas atmosféricas promedio veranos 2007 al 2017

Temperaturas atmosféricas registradas Veranos (°C)												
Año/Estaciones	Cerrillos	Cerro Navia	El Bosque	Independencia	La Florida	Las Condes	Parque O'Higgins	Pudahuel	Puente Alto	Talagante	Quilicura	Terraza DGA
<b>2007</b>	19,3197	20,7942	19,2856	20,2021	20,3285	17,9841	19,741	20,0056	x	x	x	19,97155
<b>2008</b>	19,619	18,878	19,3834	20,4094	20,084	17,7637	19,6702	19,979	x	x	x	20,0398
<b>2009</b>	19,6099	17,3619	19,3592	20,0344	19,5928	17,78	19,3924	19,3332	16,2785	13,594	22,1159	19,7134
<b>2010</b>	19,1088	17,1024	18,7993	19,4308	17,8112	17,6806	17,605	19,1625	16,7488	14,3196	18,2319	18,5179
<b>2011</b>	19,5474	17,5568	19,0898	20,3047	18,3286	17,5028	17,2366	19,4916	16,945	13,5519	18,1735	18,77065
<b>2012</b>	19,8614	18,4747	17,881	20,682	18,6346	19,7678	18,0888	20,0021	17,3721	15,1101	19,2991	19,3854
<b>2013</b>	19,5746	17,9361	17,3109	20,2479	18,1668	17,5671	17,5386	19,8046	17,2319	14,1928	18,7114	18,89325
<b>2014</b>	19,192	17,5193	16,9823	20,1632	17,6475	16,8523	17,1802	19,1484	16,7602	13,642	18,4672	18,6717
<b>2015</b>	20,6302	18,7198	18,2289	21,1779	19,262	18,3594	18,3938	20,9025	17,8363	13,7049	19,4338	21,8297
<b>2016</b>	19,6636	17,6246	17,2563	20,3449	18,2345	17,4504	17,3451	19,2046	16,1999	14,1953	20,8947	20,9581
<b>2017</b>	21,9625	19,3045	18,6517	21,7944	19,475	18,8708	19,3679	21,2144	18,7315	15,5124	x	22,46

(Fuente: Elaboración Propia en base a datos recopilados)

## Anexo 7: Temperaturas atmosféricas promedio inviernos 2007 al 2017

Temperaturas atmosféricas registradas Veranos (°C)												
Año/Estaciones	Cerrillos	Cerro Navia	El Bosque	Independencia	La Florida	Las Condes	Parque O'Higgins	Pudahuel	Puente Alto	Talagante	Quilicura	Terraza DGA
2007	9,758	8,241	8,449	10,465	8,766	8,723	9,245	9,705	x	x	x	x
2008	11,900	7,468	9,906	11,061	9,869	9,697	10,287	10,869	x	x	6,140	x
2009	10,693	8,033	9,184	9,848	8,803	8,008	9,208	8,722	x	x	6,239	x
2010	9,746	7,896	8,904	9,408	6,647	7,550	7,026	9,752	6,674	5,450	7,148	x
2011	10,360	8,913	7,363	9,968	7,037	8,084	6,996	11,126	8,249	5,416	7,414	x
2012	10,920	9,326	7,520	11,006	8,107	8,804	7,473	11,492	8,764	6,527	7,499	x
2013	10,788	8,118	7,022	10,582	7,083	8,352	7,110	10,529	7,238	6,794	7,907	10,067
2014	10,263	7,516	7,633	10,189	6,608	8,930	6,649	9,567	7,233	5,520	8,187	10,073
2015	15,227	8,317	9,627	13,031	9,133	8,092	9,678	11,688	10,107	8,857	9,349	14,215
2016	8,392	8,006	8,667	12,215	8,690	9,671	9,098	12,044	8,135	7,890	9,427	12,187
2017	x	8,021	8,340	11,604	8,130	9,532	8,159	11,389	7,180	7,056	x	12,610

(Fuente: Elaboración Propia en base a datos recopilados)