

Análisis del Impacto de Diferentes Coberturas Vegetacionales Sobre la Temperatura de Superficie Terrestre en el Área Urbana de Talca – Chile, Mediante la Aplicación de Tecnologías Geoespaciales

Christian López Olivari¹, Yony Ormazabal Rojas², Carlos Mena Frau², Rafael López Olivari³

¹ Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Católica del Maule, Avenida San Miguel N°3516, Talca, Chile.

² Centro de Geomática, Universidad de Talca, Avenida Lircay S/N°, Talca, Chile.

³ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA, Carillanca, Km 10 camino Cajón-Vilcún S/N°, Temuco, Chile.

Resumen. Debido a la falta de áreas verdes urbanas y al proceso de crecimiento urbano por extensión y densificación que modifica la cobertura del suelo natural, se generan Islas de Calor Urbana (UHI) que producen efectos ambientales negativos al interior de las ciudades relacionados con el incremento de la temperatura. En Chile, no existe claridad respecto del real impacto en la temperatura que tienen las distintas coberturas de vegetacionales urbanas. Por esta razón, se ha llevado a cabo un estudio en la ciudad de Talca (Latitud 35° 26' y Longitud 71°40'), con el propósito de analizar el impacto de las coberturas vegetacionales urbanas (áreas verdes municipales potenciales, conformadas y consolidadas, áreas verdes privadas, bosques urbanos, terrenos agrícolas y terrenos eriazos) sobre la Temperatura de Superficie Terrestre (LST), mediante el uso de mapas vectoriales e imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ de invierno y verano de los años 2007, 2008, 2009 y 2010.

1 Introducción

Las áreas verdes urbanas proporcionan a los habitantes una serie de beneficios que mejoran su calidad de vida [1]. En el ámbito ambiental, ayudan a controlar el ruido ambiente, mejoran la calidad del aire, regulan las altas temperaturas estivales, constituyen corredores verdes urbanos con biodiversidad y permiten reducir el efecto invernadero [2], [3]. En el ámbito social, permiten la recreación y deporte de los habitantes promoviendo su salud física y mental, filtran la radiación ultravioleta que produce cáncer a la piel de las personas, permiten disminuir el stress de los habitantes y proveen espacios para la integración social [4]. En el ámbito económico, aumentan la plusvalía de los barrios cercanos a ellas y permiten generar empleo en torno a ellas [5]. En definitiva, las áreas verdes urbanas colaboran positivamente con la salud de los ciudadanos y aportan un gran valor ambiental a las ciudades [1]. En contrapartida, el proceso de crecimiento urbano por extensión y densificación de las ciudades sumado a la falta de áreas verdes, entre otros factores, generan un alza en la temperatura intraurbana conocida como Islas de Calor [2], [3], existiendo una directa relación

entre la falta de vegetación y las altas temperaturas urbanas [6]. La presencia de áreas verdes en la ciudad permite aportar sombra sobre las superficies que absorben calor y refrescar el ambiente estival mediante el proceso de evapotranspiración [7]. El uso de la geomática permite identificar áreas territoriales con presencia de vegetación, como también obtener valores de temperatura a partir de los números digitales (ND) de los píxeles de las imágenes satelitales a través del uso de variados algoritmos [8]. Talca destaca por ser una de las ciudades más calurosas de Chile, presentando una alta sensación térmica y elevados valores de temperatura máxima media mensual en época estival, sólo levemente inferiores a los de la ciudad de Los Andes y San Felipe, definidas como las más calurosas del país [9]. En efecto, el menor valor de temperatura máxima absoluta registrada en Talca durante los meses de diciembre a febrero del período 1977-2005 corresponde a 31,5°C [10]. Debido al fenómeno anterior, el presente estudio se centra en analizar el impacto de las coberturas vegetacionales urbanas sobre la temperatura de la superficie terrestre en la ciudad de Talca, buscando corroborar los beneficios ambientales de éstas sobre la temperatura y resaltar su impacto positivo en la ciudad, especialmente en los períodos de verano. Como muestra la presente investigación, la ciudad de Talca posee 3,77 m² de área verde urbana de carácter público, lo cual representa un déficit de espacios verdes urbanos respecto a los estándares internacionales [11]. Las diferentes coberturas vegetacionales urbanas han sido clasificadas en siete grupos homogéneos. De estos grupos, aquellos con mayor presencia de vegetación muestran los mayores porcentajes de disminución en la temperatura de superficie terrestre (LST) respecto a terrenos eriazos de la ciudad para períodos de calor.

2 Área de Estudio y Materiales

2.1 Área de Estudio

Espacialmente, la zona de estudio corresponde al área urbana de Talca, la cual queda determinada por el polígono del Límite Urbano de la ciudad, el cual está definido en el artículo 6 de la Ordenanza Local del Plan Regulador Comunal de dicha ciudad. (PRCT) de 1990 [12], vigente hasta el año 2011. La superficie de la zona de estudio corresponde a 3.508,2 ha, donde al año 2010 se ha estimado una población urbana de 231.610 habitantes [13]. La ciudad de Talca se ubica en la Región del Maule, a 35° 26' de latitud Sur y 71° de longitud Oeste, a 102 m.s.n.m. Esta área se encuentra en la zona de transición entre los climas áridos-semiáridos de la zona Norte y los fríos y lluviosos de la zona Sur. Su clima mediterráneo impone características de estacionalidad en sus precipitaciones anuales: seis meses de lluvia (Abril a Septiembre) y seis meses con escasa presencia de ésta (Octubre a Marzo) [10]. La ciudad de Talca ocupa un sector central adyacente a la Cordillera de la Costa, encontrándose abrigada de vientos marinos, razón por la cual el verano es caluroso y seco (Diciembre a Marzo). El área urbana de Talca se emplaza adyacente por el norte a la Cordillera de la Costa, lo que hace que la ciudad se encuentre al abrigo de los vientos marinos, lo que hace que la ciudad sea calurosa y seca durante épocas estivales (Diciembre a Marzo). La figura 1 muestra el área de estudio considerada para la investigación.

2.2 Materiales

Se utilizaron las bandas 3, 4 y 6 de un total de ocho imágenes del satélite Landsat 7 ETM+, correspondientes a los períodos de verano e invierno de los años 2007, 2008, 2009 y 2010. En la construcción de Polígonos para la conformación de las diferentes coberturas se utilizaron imágenes QuickBird del período 2007-2010 (Bandas espectrales Azul, Verde y Rojo, con una resolución máxima de 0,6m). Las imágenes fueron corregidas geoméricamente mediante el programa Erdas Imagine 9.1 utilizando como referencia una capa temática en formato *.shp de las calles de la ciudad de Talca, georreferenciada en coordenadas UTM, Datum WGS84, Huso 19S. Se utilizaron dos capas de información vectorial extraídas del Plan Regulador Comunal de Talca de 1990 y que corresponden a las calles de la ciudad y el polígono que define el radio urbano de Talca. Las capas vectoriales se trabajaron en el programa ArcMap de ArcGIS como cobertura del tipo *.dxf, a partir del archivo original de extensión *.dwg de AutoCad. Adicionalmente se consideró la actualización de la capa vectorial de Cad que contiene los polígonos de áreas verdes urbanas municipales. Para el procesamiento y documentación de la información anteriormente señalada, se utilizaron tres programas computacionales: Software ArcGIS de ESRI, - Software Erdas Imagine 9.1 de Leica Geosystems Geospatial Imaging y el Software AutoCad 2007 de Autodesk.

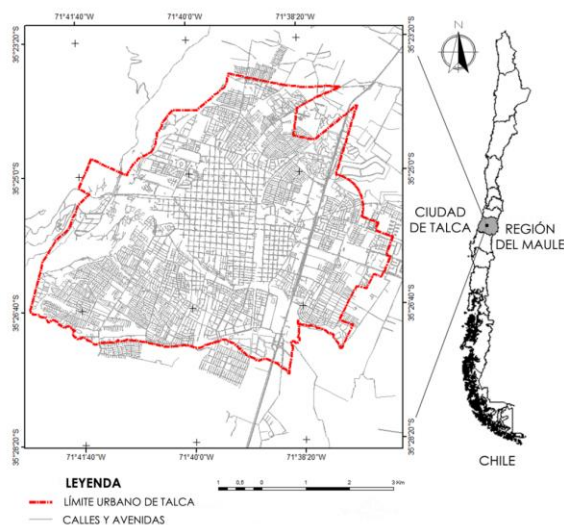


Fig. 1. Área de Estudio: área urbana de la ciudad de Talca.

2.3 Método

Para el desarrollo del proyecto se establecieron cuatro fases metodológicas. La Primera Fase corresponde a la preparación de la información de entrada e identificación y clasificación de coberturas para el área de estudio. La Segunda Fase corresponde a la determinación de la Temperatura de Superficie Terrestre (LST), del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) y a la reagrupación de los polígonos

constantes de cada cobertura del área de estudio. La Tercera Fase corresponde al análisis de los datos. La cuarta Cuarta Fase y final se centra en correlacionar los valores de NDVI y LST para las distintas coberturas clasificadas del área de estudio.

Primera Fase: Con el fin de trabajar con las ocho imágenes Landsat 7, se procedió a realizar una corrección atmosférica y geométrica mediante Erdas Imagine 9.1. Sobre la base de una capa temática en formato*.shp de las calles de la ciudad de Talca, (georeferenciada en coordenadas UTM, Datum WGS84, Huso 19S). En base a imágenes de alta resolución (QuickBird) del período 2007-2010, se procedió a construir una base de datos mediante la digitalización de una serie de polígonos que representan áreas de la ciudad no edificada que van desde suelos desnudos a suelos con alta presencia de vegetación. Se propuso una propia clasificación basada en coberturas vegetacionales homogéneas entre sí y con características claramente distinguibles. Las coberturas homogéneas definidas para el presente estudio se han agrupado en siete categorías asignado a cada una de ellas un código representativo, según se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de coberturas vegetacionales urbanas para la ciudad de Talca, Chile.

Categoría	Descripción	Código
Sitio eriazo	Terreno urbano privado, no edificado que presenta praderas naturales o tierra.	TER
Predio Agrícola Urbano	Terrenos con cultivos agrícolas dentro del límite urbano	AGU
Área verde privada	Jardines y parques privados (cementeros, parques deportivos, universidades, entre otros)	AVP
Área verde municipal consolidada	Terreno municipal que alberga plazas y parques urbanos consolidados de gran jerarquía	MUN_CS
Área verde municipal conformada	Terreno municipal que alberga plazas y plazoletas de barrios más recientes de la ciudad.	MUN_CF
Área verde municipal Potencial	Terreno municipal que se encuentra a la espera de constituirse en área verde urbana.	MUN_ER
Arborización urbana	Bosque urbano, arborización de calles y avenidas, masas de árboles al interior de manzanas y patios interiores de predios urbanos, otras masas arbóreas asociadas a cursos de agua y límites prediales.	ARB

Segunda Fase: En base a las imágenes Landsat 7 ETM+, correspondientes a las estaciones de invierno y verano de los años 2007, 2008, 2009 y 2010, se procedió a estimar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) [14], con el cuál fue posible establecer distintos niveles de cobertura y vigorosidad vegetacional dentro del radio urbano de la ciudad de Talca para los distintos períodos de tiempo. Para tal fin se utilizó el siguiente algoritmo [15]:

$$\text{NDVI} = (\text{BIC} - \text{BR}) / (\text{BIC} + \text{BR}). \quad (1)$$

Donde BR equivale a la longitud de onda entre los 0,63 y 0,69 micrones y BIC a la longitud de onda entre los 0,76 y 0,90 micrones para el caso del Sensor ETM+ del Satélite Landsat 7. La operación se realizó en el programa computacional Erdas Imagine 9.1. Para determinar los valores de Temperatura de Superficie Terrestre de las imágenes se utilizó un algoritmo monocanal para transformar los valores de los números digitales (0-255) a radiancia [8], Eq. 2:

$$L\lambda = L_{\min\lambda} + (L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda} / \text{QCAL}_{\max}) \text{QCAL} \quad (2)$$

Donde $L\lambda$ es la radiancia espectral, $L_{\min\lambda} = 3,20$ [W/m²*str* μm], $L_{\max\lambda} = 12,65$ [W/m²*str* μm], QCAL es un número digital (DN) entre 0 y 255, y QCAL_{\max} es la máximo número digital DN = 255. y luego éstos son transformados a temperatura de superficie terrestre [16], Eq. 3:

$$\text{LST} = [K2 / \ln (K1 / L\lambda + 1)] \quad (3)$$

Donde LST es la Temperatura de la Superficie Terrestre en Kelvin (K), $L\lambda$ es la radiancia espectral obtenida desde la Eq.2, $K1$ and $K2$ son constantes de calibración del satélite, donde $K1 = 666,09$ [W/m² * str * μm] and $K2 = 1.282,71$ [K]. Finalmente los grados Kelvin (K) son convertidos a grados Celsius (° C) usando la Eq. 4:

$$\text{LST} (^\circ\text{C}) = \text{LST} (K) - 273,16 \quad (4)$$

Tercera Fase: Las coberturas urbanas modifican su condición a través del tiempo, es decir, áreas que correspondían a terrenos agrícolas pasan a ser construidas o terrenos eriazos se constituyen en nuevas áreas verdes urbanas. Esta condición hizo necesario identificar aquellos polígonos representativos de cada cobertura que se han mantenido constantes durante el período de tiempo del estudio, de tal forma de no producir distorsiones en los valores de los resultados (valores de LST y NDVI que corresponden a coberturas modificadas de la capa analizada). Para lo anterior, se superpuso la capa vectorial construida sobre la imagen actual con la del año inicial y se conservaron los polígonos que se mantuvieron constantes en el tiempo. Luego se verificó su calidad de “constante” con las demás capas de información. Se realizó este proceso para cada una de las coberturas clasificadas. Como producto de esta etapa se han obtenido polígonos que se mantienen constantes durante el período 2007 – 2010 y que resultan representativos de cada cobertura clasificada. Los análisis realizados en las siguientes etapas consideran sólo este conjunto de polígonos, desestimando las variaciones de uso para evitar errores en los resultados finales debido a estos cambios. Los valores de NDVI y LST para cada una de las coberturas vegetacionales identificadas en cada imagen del período 2007-2010, se han tabulado en 112 planillas de datos. Los polígonos vectoriales han incorporado la totalidad de las coberturas vegetacionales identificadas y que se encuentran presentes dentro del territorio de estudio. Se han considerado la totalidad de los polígonos cuya superficie es igual o mayor a la resolución espacial de la imagen Landsat 7, siendo coherentes con el concepto de completitud de los

datos. Se han superpuesto los mismos polígonos de coberturas vegetacionales sobre las imágenes de las series invierno y verano del período 2007-2010, las cuales han sido corregidas radiométricamente y geométricamente, procurando la exactitud posicional de los datos relevados. Las imágenes de la serie verano corresponden al mes de enero de los años 2007, 2008, 2009 y 2010 con lo que se procura la exactitud temporal de los datos. Esta situación no ocurre en forma categórica con la serie de invierno, la cual trabaja con el mes de julio, debido a la presencia de nubosidad sobre el territorio de estudio al momento de la toma. Esta situación obligó a eliminar los datos de abril de 2009 e incorporar los de septiembre de 2008 (mes cercano al resto de los datos) asumiendo una diferencia temporal de los datos para esta serie. Los valores de NDVI obtenidos se encuentran dentro del rango -1 a 1, lo que concuerda con la definición del algoritmo. Se ha asumido la distorsión de valores asociada a la resolución espacial propia de la imagen (30m). Por lo que en este caso, la exactitud de los polígonos de las coberturas, respecto a la realidad, se encuentra limitada por la condición antes señalada. Al ser una limitante intrínseca al tamaño del píxel entregado por el sensor del satélite y dada la extensión del área de estudio, la distorsión que pudiese resultar no se considera relevante para el proyecto. Para el caso de los valores de LST, los datos se han concentrado para todas las coberturas y series dentro del rango comprendido entre los $-5,7$ y $45,6^{\circ}\text{C}$ (valores de LST mínimo y máximo de todas las coberturas y series). Según todo lo anterior, se ha estimado que los datos son consistentes y se ajustan a rangos de tolerancia aceptables para este tipo de investigación.

Cuarta Fase: Una vez determinadas las coberturas, éstas se superpusieron como trama de puntos sobre cada imagen que contiene los datos de temperatura y NDVI. La extracción de datos se efectuó mediante la función Sample de la herramienta Extraction del Spatial Analyst Tool del programa computacional ArcGIS, con lo cual se han obtenido tablas de datos que han permitido construir los diversos gráficos de la etapa de análisis. Para describir el comportamiento conjunto de las dos variables NDVI y LST se construyó para cada cobertura de cada serie, un diagrama de dispersión o nube de puntos, donde cada píxel extraído de la imagen aparece representado como un punto en el plano definido por los valores de las variables descritas (valores de NDVI en X y valores de LST en Y). Para establecer la relación lineal entre las variables se incorporó una recta de regresión, aplicando el método de mínimos cuadrados entre las dos variables. Esto permitió encontrar tendencias entre las variables para las distintas coberturas en las diferentes series, las cuales son parte del análisis que se desarrolla en el presente documento más adelante.

3 Resultados

A partir de la metodología anteriormente señalada, se obtuvieron siete mapas temáticos correspondientes a cada cobertura identificada, conteniendo figuras de los polígonos que no han presentado variación en su uso de suelo durante el período 2007-2010. Los Terrenos Eriazos (TER) presentes en la ciudad alcanzan los 2,63 Km² de extensión, siendo la cobertura que presenta la mayor ocupación de suelo urbano con un 7,5%. Seguido por la cobertura correspondiente a los Terrenos Agrícolas Urbanos, los que alcanzan los 2,32 Km² de superficie con una ocupación del suelo urbano de un

6,62%. Por el contrario, las coberturas con menor presencia dentro de la ciudad corresponden a las Áreas Verdes Municipales y a las Áreas Verdes Privadas, con porcentajes de ocupación del suelo urbano inferior al 2%. La totalidad de las coberturas analizadas representan el 25,46% de ocupación del suelo, correspondiendo el resto a superficies edificadas libres de coberturas vegetacionales (edificios, calles, pavimentos, entre otros). 10 m^2 de área verde/habitante [11], se considera internacionalmente como un estándar mínimo de referencia para las áreas verdes urbanas. Este estándar está referido principalmente a los espacios públicos o a espacios verdes urbanos de uso público que generalmente son administrados por el municipio respectivo. Si consideramos dentro de esta categoría a las coberturas MUN_CS y MUN_CF, obtenemos un indicador de referencia de $3,77 \text{ m}^2$ de Áreas Verdes Municipales totales por cada habitante de Talca, lo cual permite identificar un déficit de $6,23 \text{ m}^2$ de área verde / habitante. La cobertura MUN_ER corresponde a terrenos eriazos en espera de su conformación definitiva como futuras áreas verdes. Al considerar esta cobertura en el cálculo, el déficit disminuye a $4,73 \text{ m}^2$ de área verde municipal por cada habitante. La Figura 2 muestra las distintas coberturas vegetacionales identificadas.

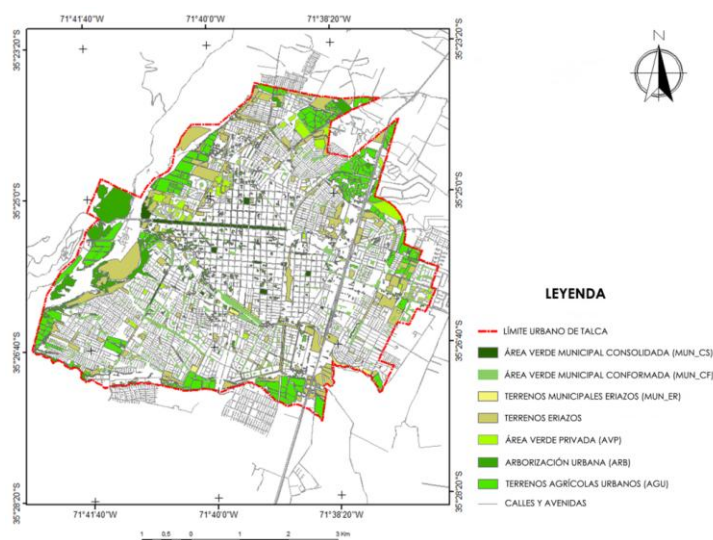


Fig. 2. Coberturas vegetacionales de Talca, Chile.

En general, todas las correlaciones para los períodos estivales de las diversas coberturas muestran una tendencia a la disminución de los valores de LST conforme aumentan los valores de NDVI. Es decir, a mayor presencia vegetacional se advierte una disminución de la temperatura de superficie. La Figura 3 muestra el gráfico de cuatro coberturas correspondientes a la época estival de distintos años, en las cuales es posible distinguir con claridad que la línea de tendencia indica la existencia de una disminución en la temperatura conforme los valores de NDVI son más próximos a 1 y viceversa.

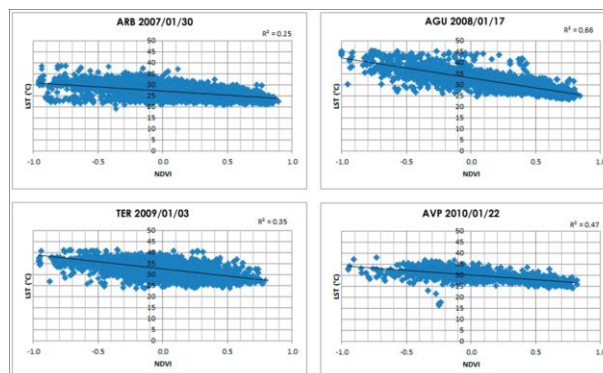


Fig. 3. Espacio LST-NDVI : tendencias para la serie de verano, coberturas ARB, AGU, TER y AVP.

Al revisar las correlaciones LST-NDVI para los períodos invernales, estos no muestran una marcada tendencia global de comportamiento, sin embargo, es posible identificar una tendencia leve de aumento de temperatura mientras es el valor de NDVI que se puede advertir en los casos de coberturas con mayor presencia vegetacional, coberturas ARB, AVP, MUN_CS y MUN_CF. Esta condición también se repite en terrenos eriazos, que en épocas invernales presentan presencia de malezas, vegetación arbustiva estacional o césped. En el período estival los valores de NDVI de los terrenos eriazos se concentran bajo el valor 0, mientras que el período invernal los mismos puntos se desplazan hacia la derecha, es decir, los valores se concentran sobre el valor 0, lo que indica mayor presencia de vegetación. La cobertura MUN_CS durante el período invernal del año 2008, presenta una concentración de puntos atípica en relación al resto de las coberturas (valores de NDVI < a 0), lo que podría explicarse porque esta cobertura concentra especies de hojas caducas (por ejemplo la Alameda de Talca) y al período de sequía ocurrido durante la temporada inmediatamente anterior (2007-2008). En efecto, Talca presentó un déficit de precipitaciones para el año 2007 de un 48,2% respecto a la media histórica y un déficit del caudal medio del Río Maule para el mes de enero de 2008 de un 61,1% respecto de la media histórica. La sequía del período 2007-2008 ha sido catalogada como una de las graves de los últimos 50 años [17]. Tales factores climáticos demuestran la importancia de incorporar más mejores áreas verdes para la ciudad.

En la serie verano, los mayores valores de NDVI se asocian a las coberturas AGU (terrenos agrícolas urbanos) , AVP (áreas verdes privadas) y ARB (arborización y bosques urbanos), mientras que los valores más bajos se asocian a la cobertura MUN_ER (terrenos municipales destinados a la construcción de áreas verdes, actualmente es estado de abandono o eriazos). Sin embargo, la serie MUN_CS correspondiente a terrenos municipales consolidados, presenta un resultado inesperado, en cuanto a que los valores de NDVI resultan bajos. Lo anterior podría ser explicado debido a que la resolución espacial de la imagen (30x30m) no ha permitido discriminar la masa arbórea del resto de las coberturas presentes en cada manzana, las cuales están asociadas a pavimentos, suelos y superficies construidas, que no necesariamente correspon-

den a arborización. Igual suerte presenta la Serie MUN_CF correspondiente a terrenos municipales destinados a áreas verdes en vías de consolidación. En este caso, la cobertura presenta bajos niveles de vegetación, los cuales corresponden principalmente a árboles en etapa de crecimiento y en algunos casos áreas de césped con circulaciones de tierra, maicillo o gravilla. Para el año 2008, las coberturas AGU, MUN_CF y MUN_CS no presentan una disminución de los valores de NDVI respecto al resto de las coberturas, lo que podría explicarse por la mayor disponibilidad de agua producto del riego de los terrenos agrícolas y riego municipal de las áreas verdes consolidadas y conformadas de su jurisdicción.

En la serie invierno, las coberturas asociadas a la mayor cantidad de vegetación (MUN_CS, ARB, AVP y MUN_CF) obtuvieron una abrupta disminución de los valores de NDVI para el año 2008, lo cual podría explicarse por la sequía ocurrida en la zona central de Chile. No se incluyen valores para el año 2009 ya que la fecha de la imagen satelital disponible para invierno de ese año (abril) difiere mucho del resto de las imágenes del estudio (julio). En el caso particular de la cobertura MUN_CS, esta disminución se ve mayormente afectada, dado que presenta especies arbóreas de hoja caduca como el Alamo y Platano Oriental, entre otras especies.

Para la serie de verano se han obtenido las mayores temperaturas en las coberturas que presentan suelos desnudos y en aquellos carentes o con baja presencia de vegetación (coberturas TER, MUN_ER, MUN_CF), mientras que las menores temperaturas están directamente relacionadas a las coberturas con alta presencia y cobertura vegetal (coberturas ARB, MUN_CS y AVP).

Lo anterior corrobora que en épocas estivales las menores temperaturas están asociadas a aquellas superficies de la ciudad que poseen vegetación, mientras que la más altas temperaturas urbanas se asocian a aquellas zonas que no presentan coberturas vegetacionales [6].

Tomando en cuenta las temperaturas promedio de las coberturas de suelos eriazos TER y MUN_ER para la serie de verano del período 2007-2010, se ha estimado la diferencia de temperatura de cada una de las coberturas con presencia de vegetación en relación a las coberturas de referencia REF1 (TER) y REF2 (MUN_ER), según se muestra en Tabla 2. La mayor reducción de temperatura la genera el arbolado o bosque urbano (ARB) con hasta un 11,93% de reducción con relación a los terrenos eriazos. Seguido por la cobertura de las Áreas Verdes Municipales Consolidadas (9,11%), las Áreas Verdes Privadas (6,95%), los Terrenos Agrícolas Urbanos (5,45%) y finalmente las Áreas Verdes Municipales Conformadas (3,27%).

Tabla 2. Reducción de LST en °C and % de cada cobertura en relación a TER y MUN_ER.

Cobertura	Serie de Verano				
	Promedio de LST 2007-2010 (°C)	Reducción de LST (REF1)		Reducción de LST (REF2)	
		(°C)	(%)	(°C)	(%)
TER (Ref1)	32,52	-	-	-	-
MUN_ER (Ref2)	32,50	-	-	-	-
MUN_CF	31,46	1,07	3,27	1,04	3,21
AGU	30,75	1,77	5,45	1,75	5,39
AVP	30,26	2,26	6,95	2,24	6,89
MUN_CS	29,56	2,96	9,11	2,94	9,05
ARB	28,65	3,88	11,93	3,86	11,87

Al considerar los valores promedios anuales más altos entre las coberturas TER y MUN_ER y se estimó un valor promedio de referencia máximo general para terrenos eriazos (32,67°C). Lo anterior permite señalar que el valor promedio de temperatura entre coberturas extremas (Terrenos eriazos y Bosque urbano) es de hasta 4,02°C [18], según muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Reducción de LST en °C y % de cada cobertura en relación al promedio de los máximos anuales de las coberturas TER y MUN_ER.

Cobertura	Serie de verano		
	Promedio de LST 2007-2010 (°C)	Reducción de LST	
		(°C)	(%)
TER + MUN_ER max	32,67	-	-
MUN_CF	31,46	1,21	3,70
AGU	30,75	1,92	5,88
AVP	30,26	2,41	7,38
MUN_CS	29,56	3,11	9,52
ARB	28,65	4,02	12,30

En general, las curvas de temperatura que corresponden a las distintas coberturas, con excepción de ARB, se concentran en una banda que fluctúa en un grado de diferencia aproximadamente. Sin embargo, resulta interesante resaltar que para la serie de invierno la cobertura correspondiente a bosques urbanos (ARB), la cual posee la densi-

dad y antigüedad vegetacional más alta de las coberturas, se mantiene constante levemente sobre los 7°C. Cuando existe un aumento de temperatura de la banda alrededor de los 9°C, la cobertura ARB asciende levemente a los 7,6°C; mientras que cuando la banda de temperatura que contiene las diversas coberturas desciende por debajo de los 6°C, la cobertura ARB desciende levemente sobre los 7,1°C, manteniéndose relativamente estable respecto de las demás [19]. El análisis no incluye la imagen correspondiente a la serie invierno del año 2009, ya que esta corresponde al mes de abril con condiciones climáticas diferentes al resto de la serie, más cercana al mes de julio.

Al comparar las curvas de valores promedio de NDVI y de LST de algunas coberturas para el período 2007 – 2010 de la serie verano, según muestra la figura 4, se advierte la menor distancia entre curvas para las coberturas AVP y ARB, las que poseen mayor presencia de especies vegetacionales, lo que se traduce en valores de NDVI cercanos y sobre 0 (los más altos de las coberturas) y temperaturas cercanas a los 30°C (las más bajas de las coberturas). Para el mismo período, se advierte la mayor distancia entre curvas para las coberturas MUN_ER y TER, las que corresponden a terrenos eriazos con escasa o nula presencia de especies vegetacionales, lo que se traduce en valores de NDVI bajo 0 (los más bajos de las coberturas) y temperaturas cercanas a los 35°C (las más altas de las coberturas). Para todos los casos se advierte la influencia de la temporada de sequía 2007-2008 en una baja del valor NDVI en el año 2008.

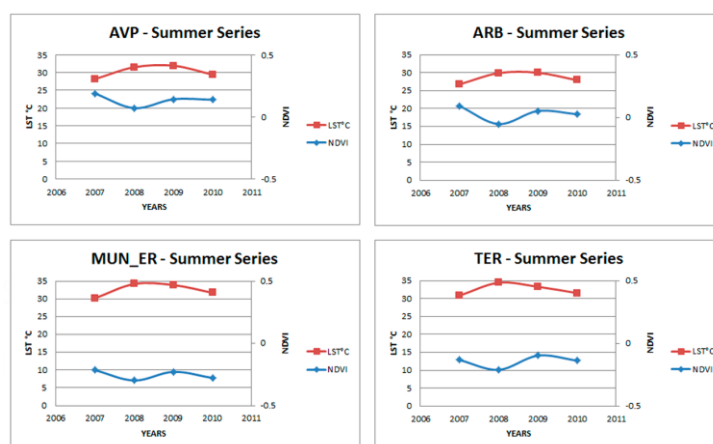


Fig. 4. LST-NDVI, Series de verano – coberturas AVP, ARB, MUN_ER y TER.

Según muestra la figura 5, para el período de invierno las temperaturas en todas las coberturas se mantienen relativamente similares no existiendo diferencias importantes. Sin embargo, se advierte una fuerte baja del valor NDVI para el año 2008 en las coberturas ARB y MUN_CS, seguida por MUN_CF y AVP, todas con alta presencia de vegetación. Lo anterior podría deberse a la influencia de la temporada de sequía 2007-2008 que disminuye el vigor vegetal, pero no altera su capacidad de regulación térmica.

Por el contrario, las coberturas MUN_ER y TER presentan un alza importante en sus valores de NDVI con respecto al resto de las coberturas y a su serie verano. Lo anterior podría deberse a la influencia de especies vegetacionales estacionales (praderas silvestres, arbustos, malezas).

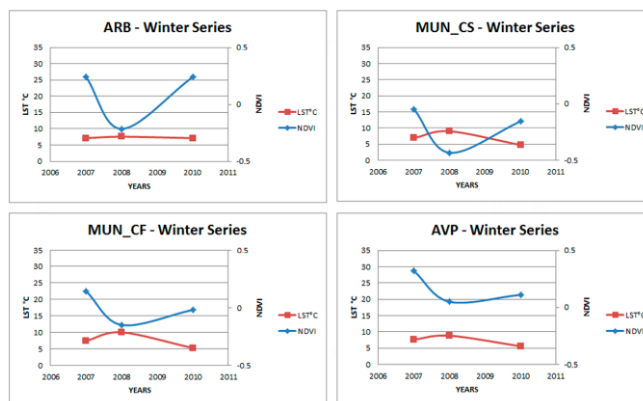


Fig. 5. LST-NDVI, Series de invierno – coberturas ARB, MUN_CS, MUN_CF y AVP

Es importante señalar que existe una correspondencia espacial de la relación LST-NDVI para la ciudad de Talca especialmente en períodos estivales. La Figura 6 permite relacionar visualmente la correspondencia espacial entre la falta de áreas verdes ($NDVI < 0$) con las mayores temperaturas urbanas para los períodos estivales ($LST > 30^{\circ}C$). De la comparación espacial de las imágenes se puede afirmar, de forma general, que para los períodos de verano, la mayor concentración de calor urbano se encuentra asociado a las áreas con vegetación nula, escasa o inexistente. Con lo cual, un simple análisis visual ratifica que la vegetación urbana tiene una incidencia directa en la disminución de la temperatura al interior de la ciudad en los períodos de calor o verano.

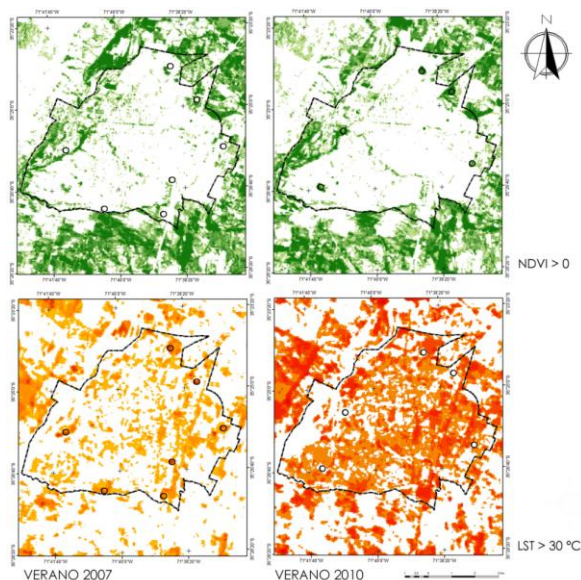


Fig. 6. Comparación visual de valores de NDVI y LST entre imágenes de la serie de verano de los años 2007 y 2010.

3 Conclusiones y Recomendaciones

Para períodos de calor o épocas estivales existe una tendencia de todas las coberturas vegetacionales a disminuir la temperatura de superficie terrestre conforme aumentan los valores de NDVI. En base a la información disponible y antecedentes recopilados, se puede afirmar que, para la ciudad de Talca, las áreas verdes urbanas arborizadas (ARB, MUN_CS, AVP, MUN_CF) disminuyen en promedio hasta en 4,02 °C la temperatura de superficie terrestre respecto de otras coberturas u otras áreas sin arborización (MUN_ER, TER). En la serie de verano, las coberturas denominadas Bosques Urbanos, Áreas Verdes Municipales Consolidadas y Áreas Verdes Privadas, presentan una mayor disminución de la temperatura para el período 2007-2010 con respecto a los terrenos eriazos de Talca (12,30%, 9,52% y 7,38% respectivamente). Para el año 2008 en la Serie Verano se aprecia en todas las coberturas un alza generalizada de los valores de LST respecto de los otros años del período, lo que podría ser explicado como consecuencia del fenómeno de La Niña, el cual produjo una importante sequía en la temporada 2007-2008, con un déficit pluviométrico para el año 2007 en Talca del 48,2% respecto a la media histórica. El comportamiento de las coberturas para la Serie de Invierno del período 2007-2008 no presenta una tendencia tan marcada como la Serie de Verano, lo que podría deberse a la presencia de especies de hoja caduca que incorporan valores digitales de suelo al píxel de la imagen y al crecimiento de malezas y otras especies estacionales en terrenos eriazos. No obstante, la cobertura “bosques urbanos” se mantiene estable en sus valores de LST durante el período respecto al resto de las coberturas, lo que podría deberse a la

homogeneidad de la canopia durante las distintas estaciones del año. Para períodos de frío o épocas invernales existe una leve tendencia de las coberturas con alta presencia de vegetación a aumentar la temperatura de superficie terrestre conforme aumentan los valores de NDVI. Esta condición se presenta en las coberturas Áreas Verdes Privadas, Áreas Verdes Municipales Conformadas, Bosques Urbanos y Áreas Verdes Municipales Consolidadas. Las coberturas que mejor responden frente a la reducción de temperatura en períodos estivales son los Bosques Urbanos (por ejemplo el sector Río Claro y Cerro Virgen de Talca), seguida por la cobertura de Áreas Verdes Municipales Consolidadas (por ejemplo las plazas del casco histórico y la Alameda de Talca) y en tercer lugar las Áreas Verdes Privadas (por ejemplo los jardines y parques de universidades, parques cementerios y campos deportivos). La cobertura de Áreas Verdes Municipales Conformadas es la que mejor responde a mantener temperaturas mayores frente al descenso de la temperatura en períodos invernales, mientras que los bosques urbanos mantienen una temperatura estable y son menos sensibles frente al ascenso y descenso de la temperatura en períodos de frío o épocas de invierno. Finalmente, el presente estudio aporta datos concretos sobre el impacto de las coberturas vegetacionales urbanas de Talca sobre la Temperatura Superficial Terrestre, proporcionando información relevante a la toma de decisiones relacionadas con los beneficios de la incorporación de la silvicultura urbana como un elemento relevante en la conformación de espacios públicos y privados, permitiendo en definitiva la incorporación de nuevas y mejores áreas verdes que puedan impactar favorablemente la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

Referencias

1. Heidt, V.; Neef, M. 2004, Benefits of Urban Green Space and Urban Climate. RegioComun-Institute for Strategic Regional Management. Alemania. Disponible en: <http://www.regiocomun.geowiss.uni-mainz.de/>. Consultado 12 mar. 2010.
2. Tumini, I., 2009. Strategies to reduce the heat island effect in urban areas: study applied to the case of Madrid. GBC. Spain.
3. Wong, E. 2009. Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies. U.S. Environmental Protection Agency's Office of Atmospheric Programs (EPA).
4. Maas, J., Sonja ME, V. D., Robert A, V. & Groenewegen, P. P., 2009. Social contacts as a mechanism behind the relation between green space and health. Health and Place 15, 586-595.
5. Nowak, D., Dwyer, J. and Childs, G., 1997. The benefits and costs of urban greening. En: Krishnamurthy, L., Nacimiento, J. (Eds.), Urban green areas in Latin America and the Caribbean. Banco Interamericano de Desarrollo. 17-38p.
6. Akbari, H.; Pomerantz, M.; Taha, H. 2001. Cool Surface and Shades on Residential Heating and Cooling Energy Use in Four Canadian Cities. Energy 17(2):141-146.
7. Sorensen, M., Berzatti, V., Kerpi, K. & Williams, J., 1998. Management of Urban Green Areas. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo. Sustainable Development Department N° ENV-109.
8. Markham, B. L.; Barker, J. L. 1986. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures: EOSAT Landsat Technical Notes, Vol. 1, pp. 3-8.
9. Dirección Meteorológica de Chile, 2007. Atlas Climático de Chile, Campos Pluviométricos and Termales. Subdirección de Climatología y Meteorología –Departamento de Climatología – Subdepartamentode Servicios Climatológicos, 2007. pp. 78. Santiago, Chile.

10. CITRA, 2010. Centro de Investigación y Transferencia Tecnológica en Riego y Agroclimatología de la Universidad de Talca. Talca, Chile. Disponible en: http://www.citrautalca.cl/html/agroclimatologia/caracteristicas_agroclimaticas_talca.html.
11. ONU, 1996. Programa para los asentamientos humanos de Naciones Unidas, Agenda Hábitat. Estandul, Turkía. Disponible en: <http://www.un.org/spanish/conferences/habitat.htm>.
12. Municipalidad de Talca, 2010. Dirección de Obras Municipales. Plan Regulador Comunal de Talca (1990). Talca, Chile.
13. INE. 2010. Instituto nacional de Estadísticas. Proyecciones de Población para la Región del Maule, Chile. Goward, S.N.; Markham, B.; Dye, D.G.; Dulaney, W.; Yang, J. 1991. Normalized Difference Vegetation Index Measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer. *Remote Sensing of the Environment*, v. 35, pp. 257-277.
14. Tucker, C. J., W. W. Newcomb, S. O. Los, and S. D. Prince, 1991. Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, v. 12, p.1113-1115.
15. Singh, S.M. 1988. Brightness temperature algorithms for Landsat Thematic Mapper data. *Remote Sens. Environ.*, 24: 509-512.
16. INIA. 2008. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Sequía en Chile, Leopoldo Sánchez Grunert, Abril de 2008. Santiago, Chile.
17. Makhelouf, A. 2008. The Effect of Green Spaces on Urban Climate and Pollution. Civil Engineering Department, University of Chlef, Algeria. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 2009, Vol. 6, No. 1, pp. 35-40.
18. Andrade, H.; Vieira, R. 2007. A climatic study of an urban green space: the Gulbenkian Park in Lisbon (Portugal). *Finisterra-Revista Portuguesa de Geografia Lisboa*. XLII (84), pp. 27-46.