

CARACTERIZACIÓN DE ISLAS FRESCAS URBANAS -IFU- EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA

URBAN FRESH ISLANDS CHARACTERIZATION IN THE CITY OF CALI, COLOMBIA

Jhonattan Fernández Córdoba y Nathalie García Millán

Geógrafos

Departamento de Geografía, Universidad del Valle; Cali, Colombia

tatan.ferco@hotmail.com

Resumen. Resaltar la importancia de incluir, dentro de los procesos de planificación urbana, una nueva percepción de ciudad que involucre dentro de su funcionalidad los beneficios que brindan elementos del medio biofísico como la vegetación, es de gran importancia para poder aspirar a una sustentabilidad urbana. Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo llevar a cabo una caracterización de lo que aquí se define como Islas Frescas Urbanas -IFU- en la ciudad de Santiago de Cali a partir de las zonas con presencia de vegetación y su relación con la temperatura, teniendo en cuenta la percepción y valoración por parte de la comunidad sobre estos espacios y su distribución espacial en el territorio. La teledetección representa una herramienta importante para el desarrollo metodológico de la investigación; en este sentido, la obtención y correlación de indicadores de vegetación como el NDVI y el NDWI e indicadores como el de Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) y de área construida (NDBI), con ayuda de imágenes satelitales LANDSAT 5 TM de los años 1999 y 2011, permitieron la identificación de zonas concebidas como IFU en la ciudad de Cali para tales fechas. También se introducen, a través de herramientas como la encuesta y la observación, técnicas de investigación de tipo cualitativo, con las que se logró conocer la percepción y valoración sobre la relación vegetación-temperatura en determinadas zonas de la ciudad.

Palabras claves: Islas Frescas Urbanas; vegetación urbana; clima urbano; teledetección; gestión ambiental urbana; planificación urbana.

Abstract. In order to achieve sustainable cities, it is important to include within urban planning processes, the benefits provided by biophysical elements such as vegetation. Therefore, this research aims to conduct a characterization of what is here defined as Urban Fresh Islands -IFU- in the city of Santiago de Cali based on the presence of vegetation and its relationship with temperature. In addition to this, it was taken into account the perception and assessment made by the community about these spaces and their spatial distribution in the territory. Remote sensing techniques were an important tool for the development of the research. To identify the IFU areas, indicators such as NDVI and NDWI were collected and used in conjunction with Land Surface Temperature (LST) and built up area (NDBI) derived from Landsat 5 TM satellite images of 1999 and 2011. Additional information was gathered by means of direct observation, surveys and qualitative research techniques in order to assess the perception and valuation of vegetation-temperature relationship in certain areas of the city.

Key words: Urban Fresh Islands; urban vegetation, urban climate, remote sensing, urban environmental management, urban planning.

Introducción

Definición de islas frescas urbanas, IFU

El concepto de Islas Frescas Urbanas se construye en esta investigación a partir de dos postulados: el primero de estos, hace referencia a parámetros biofísicos que tienen que ver con la relación entre temperatura y vegetación urbana; y el segundo, hace referencia a parámetros sociales en los cuales se inserta la relación entre los habitantes de la ciudad y la vegetación urbana. Teniendo en cuenta la definición de Isla de Calor Urbano planteado por EPA (2010) la cual hace referencia a las capas de aire de una ciudad o una área construida las cuales son más calientes que las del aire alrededor, las IFU se definen como las zonas que frecuentemente presentan temperaturas menores que el resto de la ciudad, gracias a las propiedades de la vegetación presente en la misma y que contribuyen al mejoramiento del confort térmico; entendido el confort térmico como la comodidad que siente el ser humano respecto a la temperatura del medio que lo rodea junto con la aserción de que no es posible llegar a una definición de confort si no se llega a un punto de equilibrio térmico, en el cual, es necesario buscar un punto medio entre los extremos de temperatura (insolación y congelación) que resiste el hombre. (Olgyay, 1968).

Área de estudio y herramientas

El municipio de Santiago de Cali se encuentra ubicado al sur occidente de Colombia y al sur del departamento del Valle del Cauca sobre los 3°27' Latitud Norte y 76°31' Longitud Oeste; el área urbana cuenta con una población aproximada de 2.225.036 (Departamento Administrativo de Planeación Municipal de Santiago de Cali, 2011) y está localizada sobre el piedemonte del flanco oriental de la Cordillera Occidental y sobre el margen izquierdo del Rio Cauca a una altura promedio de 995 m.s.n.m. y cuenta con un área aproximada de 120,9 km². La ciudad Presenta una temperatura promedio anual de 24,6 °C y una precipitación media anual de 1140 mm (Figura 1). Esta ciudad, cuenta con el estatus de estar en el podio de las ciudades más importante del país después de la capital Bogotá y después de Medellín; este estatus permite dar cuenta de la dinámica que se expresa en la ciudad hoy en día gracias a que corresponde al centro principal urbano, cultural y económico del suroccidente colombiano y a que cuenta con la tercera mayor cantidad de población urbana de Colombia.

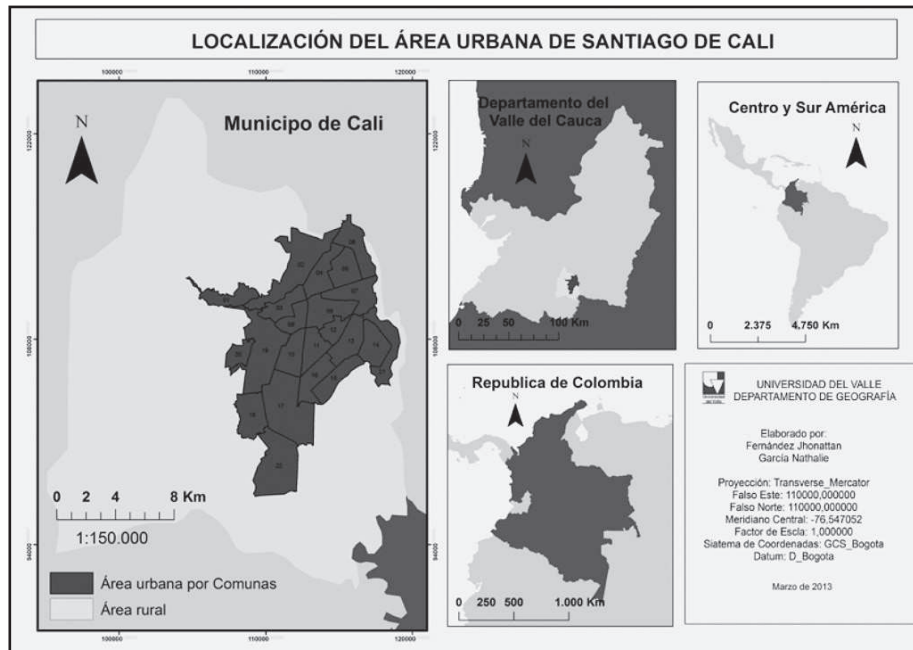


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio

Para la presente investigación se utilizaron dos imágenes Landsat 5 TM identificadas con el código 09 y 58 (Path y Row) las cuales se obtuvieron del U.S. Geological Survey. Las imágenes fueron tomadas el 10 de julio de 1999 y el 05 de marzo de marzo del 2011; poseen correcciones geométricas, cuentan con una resolución espacial de 30 m y un número total de siete (7) bandas (1-7). El procesamiento digital de las imágenes satelitales se realizó con el software ERDAS versión 9.2 y el procesamiento y la elaboración cartográfica de las variables estudiadas se realizaron a partir del software Arcgis versión 9.3.1 teniendo como cartografía base las capas vectoriales del perímetro urbano y comunas elaboradas por el Departamento de Planeación Municipal. Por otro lado, se hizo uso de encuestas y se desarrollo un proceso breve de observación, lo cual permitió realizar un acercamiento a la percepción y valoración de las IFU por parte de un número de habitantes de la ciudad y de los investigadores.

Metodología

Tratamiento de las imágenes Landsat 5 TM y obtención de indicadores (LST, NDVI, NDWI y NDBI)

El proceso de caracterización de las IFU inició con la identificación de las mismas a través la aplicación de varios modelos sobre las imágenes satelitales, lo que permitió obtener los indicadores que ayudaron a dicha identificación. En la primera fase se llevaron a cabo correcciones de tipo radiométrico, y posteriormente se procedió a obtener los indicadores NDVI, NDWI, NDBI y Temperatura de la Superficie (LST).

• **Primera fase: correcciones radiométricas**

En esta fase, primero se realizó el recorte de las imágenes sobre el área de estudio. No se aplicaron correcciones geométricas ni correcciones atmosféricas, gracias a que las imágenes se encontraban georreferenciadas y las condiciones atmosféricas bajo las cuales fueron adquiridas eran muy buenas. Por lo tanto, esta fase solo hace referencia al cálculo de reflectividades. El cálculo de reflectividades se refiere a la conversión de los valores digitales (ND) de las imágenes originales a variables físicas (Chuvieco, 2002); esta conversión se realizó en dos partes:

Primero, con la ecuación 1 se realizó la conversión de los ND originales a valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibrado del sensor (Landsat Project Science Office, 2008):

$$L_{\lambda} = ((L_{MAX_{\lambda}} - L_{MIN_{\lambda}}) / (QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN})) * (QCAL - QCAL_{MIN}) + L_{MIN_{\lambda}} \quad (\text{Ecu. 1})$$

Donde:

- L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor en unidades de $W/m^2 * sr * \mu m$
- $L_{MAX_{\lambda}}$ = Radiancia espectral en el sensor que es escalado a $QCAL_{MAX}$ en unidades de $W/m^2 * sr * \mu m$ (Metadatos de la imagen correspondiente)
- $L_{MIN_{\lambda}}$ = Radiancia espectral en el sensor que es escalado a $QCAL_{MIN}$ en unidades de $W/m^2 * sr * \mu m$ (Metadatos de la imagen correspondiente)
- $QCAL_{MAX}$ = Valor máximo del pixel calibrado correspondiente al $L_{MAX_{\lambda}}$ en valores de ND (Metadatos de la imagen correspondiente)
- $QCAL_{MIN}$ = Valor máximo del pixel calibrado correspondiente al $L_{MIN_{\lambda}}$ en valores de ND (Metadatos de la imagen correspondiente)
- $QCAL$ = Valor del pixel calibrado (ND)

Segundo, con la ecuación 2 se estimaron los valores de reflectividad aparente conociendo la irradiancia solar espectral y la fecha de toma de las imágenes (Chuvieco, 2002):

$$p_{(k)} = D * \pi * L_{\lambda} / E_{0(k)} * \cos \theta_i \quad (\text{Ecu. 2})$$

Donde:

- $p_{(k)}$ = Reflectividad aparente
- L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor
- $E_{0(k)}$ = Irradiancia solar en el techo de la atmósfera
- θ_i = Angulo cenital solar
- D = Factor corrector de la distancia tierra-sol, calculado como:
- $D = (1 + 0,01674 * (\text{Sen}(2\pi * (J - 93,5) / 365)))$
- Donde J = Día Juliano

- **Segunda fase: obtención de indicadores**

Con la obtención de la reflectividad aparente para las dos imágenes, se procedió a la aplicación de los modelos correspondientes que permitieron la determinación de los indicadores presentados a continuación:

Temperatura de la Superficie (LST): La medida de la temperatura de la superficie terrestre a través de la teledetección se fundamenta en el principio físico de que la temperatura de un cuerpo puede ser obtenida a partir de la radiación que este emite en la región espectral del infrarrojo térmico (8 μm - 15 μm). Sin embargo, se debe tener en cuenta que los valores de temperatura que registra el satélite no corresponden exactamente a los valores de temperatura real que se obtendrían llevando a cabo una medida sobre un cuerpo de manera directa; por lo tanto, para poder deducir la temperatura real a partir de los valores de temperatura del satélite, se hizo necesario introducir el factor de corrección de la emisividad (López y Caselles, 1986).

El procedimiento que se realizó para el cálculo la temperatura de la superficie se describe a continuación (Santana *et al*, 2010). La ecuación 3 permitió calcular la temperatura de la superficie terrestre (LST), restándole el valor de 273 para obtener la temperatura en unidades de Grados Centígrados.

$$LST = [Tb / 1 + (\lambda * Tb / p) * \log \epsilon] - 273 \text{ (Ecu. 3)}$$

Donde:

$LST =$	Temperatura de la superficie terrestre
$Tb =$	Temperatura de brillo del satélite
$\lambda =$	longitud de onda media de la banda térmica; correspondiente a 11,5 μm (Weng <i>et al</i> , 2004)
$p =$	$h * c / \sigma$ donde: $h = 6,626 * 10^{-34}$ (Constante de Planck); $c = 2,998 * 10^8$ (Velocidad de la luz); $\sigma = 1,38 * 10^{-23}$ (Constante de Boltzman)
$\epsilon =$	emisividad de la superficie

La ecuación 4 permitió calcular la temperatura de brillo (Tb).

$$Tb = K2 / \log ((K1 / L_{\lambda}) + 1) \text{ (Ecu. 4)}$$

Donde:

$K1 =$	constante de calibración 1 en $\text{W/m}^2 * \text{sr} * \mu\text{m}$; (607,76 para Landsat 5)
$K2 =$	constante de calibración 2 en grados Kelvin; (1260,56 para Landsat 5)
$L_{\lambda} =$	Radiancia espectral en la apertura del sensor

La ecuación 5 permitió calcular la emisividad de la superficie (ϵ).

$$\epsilon = fv * \epsilon_v + (1 - fv) * \epsilon_s \text{ (Ecu. 5)}$$

Donde:

$\epsilon_v =$	Emisividad de la cubierta vegetación asumida como 0,985
$\epsilon_s =$	Emisividad de la cubierta suelo asumida como 0,978
$f_v =$	Fracción de vegetación

La ecuación 6, por medio del NDVI, permitió el cálculo de la fracción de vegetación (f_v).

$$f_v = 1 - ((NDVImax - NDVI) / (NDVImax - NDVImin))^a \quad (\text{Ecu. 6})$$

Donde:

$NDVI_{max} =$	Valor de NDVI máximo para la vegetación de mayor verdor
$NDVI_{min} =$	Valor de NDVI mínimo presente en el suelo desnudo
$a =$	Valor de la orientación de la hoja de la planta; correspondiente a 0,6 (Li <i>et al</i> , 2004)
$NDVI =$	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): El NDVI (por sus siglas en inglés Normalized Difference Vegetation Index) es uno de los índices de vegetación más utilizados en la teledetección, y sirve para estimar cantidad, grado de desarrollo y calidad de la vegetación en un determinado territorio; este índice se expresa en valores entre -1,0 y 1,0 (Sancha Navarro, 2010). La ecuación 7 permitió la obtención del índice de Vegetación de Diferencia normalizada (NDVI).

$$NDVI = (IRC - R) / (IRC + R) \quad (\text{Ecu. 7})$$

Donde:

$IRC =$	Infrarrojo cercano (banda 4 para Landsat TM)
$R =$	Rojo Visible (banda 3 para Landsat TM)

Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI): El NDWI (por sus siglas en inglés Normalized Difference Water Index) es un índice que permite evaluar el contenido de agua en la vegetación (Chen *et al.*, 2006). Este índice es más sensible a los cambios en el contenido de agua presente en la vegetación además de ser menos sensible a los efectos de dispersión atmosférica; cabe resaltar que este índice no debe ser considerado como sustituto del NDVI, sino como un índice independiente y complementario a éste (Gao, 1996). Al igual que el NDVI este índice se expresa en valores entre -1,0 y 1,0. La ecuación 8 permitió estimar el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI).

$$NDWI = (IRC - IRM) / (IRC + IRM) \quad (\text{Ecu. 8})$$

Donde:

$IRC =$	Infrarrojo cercano (banda 4 para Landsat TM)
$IRM =$	Infrarrojo medio (banda 5 para Landsat TM)

Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI): El NDBI (por sus siglas en inglés Normalized Difference Built-up Index) es un índice que permite estimar zonas con superficies construidas o edificadas (Chen *et al.*, 2006 y Zha *et al.*, 2003) junto a las superficies desnudas (Santana *et al.*, 2010). Al igual que los índices anteriores, este índice se expresa en valores de -1,0 a 1,0. A través de la ecuación 9 se logró obtener el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI).

$$NDBI = (IRM - IRC) / (IRM + IRC) \text{ (Ecu. 9)}$$

Donde:

IRC = Infrarrojo cercano (banda 4 para Landsat TM)

IRM = Infrarrojo medio (banda 5 para Landsat TM)

Tratamiento estadístico y cartográfico de indicadores (LST, NDVI, NDWI y NDBI).

Previo al desarrollo de estas dos fases se hizo necesario proyectar cada una de las imágenes satelitales de los indicadores obtenidos al sistema de referencia espacial de las capas cartográficas del Departamento de Planeación Municipal de Santiago de Cali para que existiera correlación entre la información espacial. A continuación se describen las dos fases:

• Primera fase: obtención y análisis de datos estadísticos

Esta fase hace referencia a la adquisición de datos estadísticos como promedios, valores máximos y mínimos y desviaciones estándar a partir de los valores mostrados por cada uno de los indicadores anteriormente obtenidos. Cabe resaltar, que se trabajó con la capa vectorial de Comunas, ya que la Comuna corresponde a la figura de división político – administrativa de ordenamiento, gestión y planificación del área urbana del Municipio de Santiago Cali. Posterior a la obtención de estos datos estadísticos se procedió a organizarlos en diferentes tablas de Excel, lo que permitió, a partir de los valores promedios por comunas, aplicar medidas de tendencia central como la media, mediana, desviación estándar y valores máximos y mínimos por cada indicador para toda la ciudad. Subsiguientemente, se pasó a realizar correlaciones estadísticas entre los indicadores NDVI, NDWI y NDBI con el indicador LST, para esto se aplicaron medidas de covarianza y coeficiente de correlación de Pearson (Martínez Bencardino, 2006).

• Procesamiento cartográfico

Esta fase comenzó por la realización de una reclasificación de los valores arrojados por cada indicador en su respectiva imagen (raster). Seguidamente se llevó a cabo una transformación de las imágenes reclasificadas de cada uno de los indicadores a capas tipo vector. Por último, se procedió a realizar el corte del área urbana sobre las capas tipo vector resultantes del proceso anterior.

Construcción de criterios para la identificación de Islas Frescas Urbanas -IFU-

Esta tercera parte se llevó a cabo a partir de dos pasos: el primero, consistió en construir parámetros que permitieran delimitar las zonas definidas como IFU para la ciudad de Santiago de Cali y segundo, realizar dicha delimitación a partir de los parámetros estipulados.

- **Definición de parámetros**

Estos parámetros se construyeron a partir de los volares arrojados por parte de cada indicador; este paso consistió en definir un valor umbral para cada indicador, este valor umbral se asumió a partir de los siguientes postulados:

Temperatura de la superficie (LST): para definir el valor umbral de este indicador se tuvo en cuenta dos aspectos: primero, el valor umbral mínimo y máximo de biotemperatura de la zona de vida de bosque seco tropical definido por Holdridge (1987) a la cual pertenece el área urbana de Santiago de Cali y que corresponde a 24 °C y 30 °C respectivamente; y segundo, la zona de confort propuesta por Olgay (1968) para la ciudad de Santiago de Cali con un rango entre 21,2 °C y 26,8 °C. Por lo tanto, con el criterio de abarcar los dos aspectos anteriormente mencionados, en esta investigación se definió un umbral de LST de temperaturas menores hasta un límite de 26 °C.

NDVI: Viedma y Chuvieco (1993) plantean que las cubiertas vegetales presentan un valor umbral crítico de NDVI en torno a 0,2; y Chen *et al* (2006) establece un valor mínimo apropiado de 0,2; esto quiere decir que a medida que este valor incrementa el estado de las cubiertas vegetales será más vigorosa y densa. Por lo tanto, en esta investigación se definió un umbral de NDVI a partir de 0,3 con el fin de garantizar una selección de las cubiertas de vegetación en mejores condiciones.

NDWI: Gao (1996) establece un valor umbral de NDWI para la vegetación húmeda de 0,064 y Chen *et al* (2006) plantea un valor mínimo apropiado de 0,05; por lo tanto, valores mayores indican un nivel más alto de humedad en las cubiertas vegetales. En este sentido, el valor umbral de NDWI que se definió fue de 0,1; con el fin de garantizar la selección de las cubiertas vegetales con buena condición de humedad.

NDBI: según lo planteado por Chen *et al* (2006) el rango apropiado de NDBI para indicar presencia de cubiertas vegetales es menor a cero (<0), esto quiere decir que valores mayores a cero son indicadores de cubiertas edificadas y suelos desnudos; por lo tanto, se definió -0,1 como valor umbral tomando todos los valores menores a este, con el fin de garantizar la selección de cubiertas con presencia de vegetación.

- **Delimitación de las IFU**

Seguido de la definición de parámetros en cada uno de los indicadores, se llevó a cabo un solapamiento de los 4 indicadores y se realizó una intersección teniendo como referencia los parámetros estipulados en el punto anterior. Para la realización de este procedimiento, primero se exportaron de cada indicador los polígonos que abarcaba cada uno de los parámetros establecidos, con el fin de obtener las capas delimitadas de cada parámetro. Segundo, se procedió con el solapamiento de estas capas y se realizó una intersección de las mismas.

Aproximación al contexto espacial de las Islas Frescas Urbanas -IFU-

Posterior a la identificación de las IFU en la ciudad de Cali, surgió la necesidad de ir un poco más allá de la mera identificación y tratar de comprender el comportamiento espacial de las IFU. Por lo tanto se procedió a situar esta propuesta en un contexto territorial que permitiera: primero, erigir las IFU como un hecho geográfico enmarcado en las dinámicas del área urbana de Santiago de Cali y segundo, plasmar una pequeña propuesta de aplicación del concepto de IFU como un elemento de sustentabilidad urbana. Para realizar esta aproximación al comportamiento espacial de las IFU se realizó un ejercicio de interpretación de la relación espacial entre las IFU y algunas variables socioeconómicas. Para esto, se realizó un solapamiento de las IFU identificadas para el año 2011 con información del área urbana correspondiente a: estratificación socioeconómica, densidad de población e índice de área verde por habitante, estas tres variables a nivel de comuna y áreas de actividad a nivel de zonas.

Acercamiento a la valoración de las Islas Frescas Urbana en la ciudad de Cali.

Para conocer la valoración y percepción acerca de las Islas Frescas Urbanas - IFU- presentes en la ciudad de Cali, se llevaron a cabo dos fases metodológicas. La primera fase constó de una encuesta realizada a la comunidad sobre la opinión en torno a las zonas con presencia de vegetación, y la segunda hace referencia a un proceso etnográfico de observación por parte de los investigadores que se llevó a cabo haciendo uso de la rutas del Sistema Integrado de Transporte Masivo de Cali -MIO-, en las cuales, se escogieron cuatro (4) estaciones distribuidas en el norte, sur, centro y oriente de la ciudad: *Vipasa, Univalle, Centro y Nuevo Latir*, respectivamente. Se escogió trabajar por medio del transporte masivo porque infraestructuralmente brinda un escenario similar en cada punto de observación. De este modo, para cada punto de observación se indicó en un diario de campo una serie de atributos correspondientes a las siguientes variables: niveles de calor, ventilación, bebidas, comportamiento, estrés, aspectos fisiológicos y nivel de confort térmico, el cual, se evaluó en rangos cualitativos de bueno, moderadamente bueno, moderado, moderadamente malo y malo.

Resultados y discusión

Comportamiento de Indicadores LST, NDVI, NDWI y NDBI para las imágenes Landsat 5 TM de 1999 y 2011

- **Indicadores Imagen Landsat 5 TM 1999 (Figuras 2 y 3).**

LST (Temperatura de la superficie): la temperatura de la superficie terrestre presento un promedio de 29,1°C con un valor máximo de 31°C y mínimo de 25,5°C. A nivel de comuna, los valores promedios en la temperatura de la superficie más bajos se presentaron en las comunas 1, 17, 18, 20, 21 y 22; mientras que los más altos se encontraron en las comunas 3, 4, 8, 9, 11, 12, 13 y 14. Sin embargo, para este año solo la comuna 1 y 22 presentan valores de temperatura inferior o iguales a los 26°C.

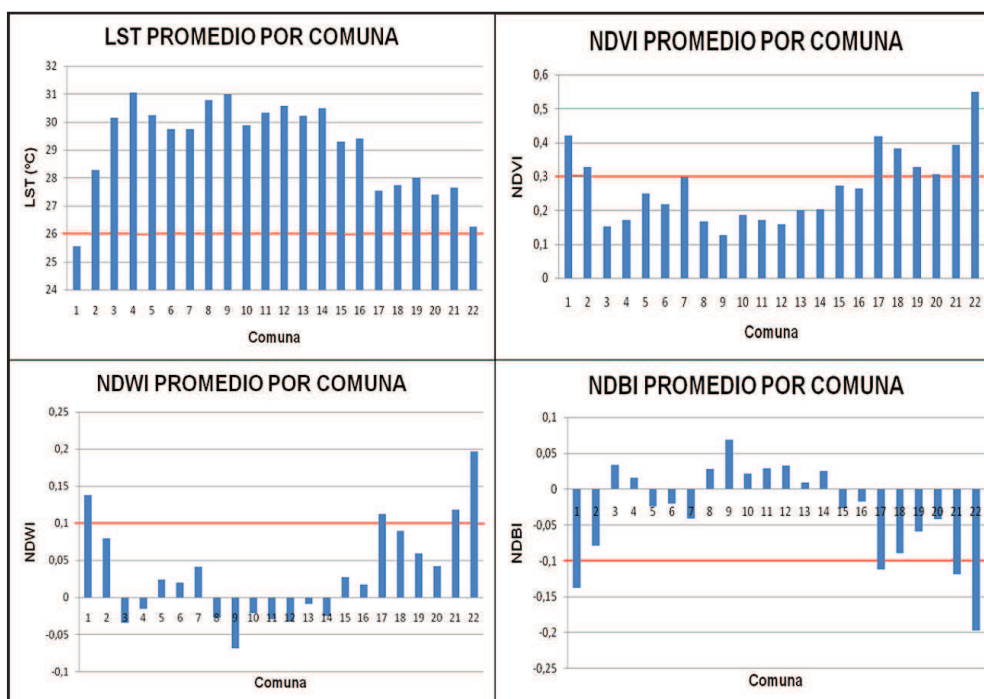


Figura 2: Gráficos de los valores promedios por comuna en cada indicador del año 1999

NDVI: Las comunas que presentan un valor NDVI mayor o igual a 0.3 (umbral definido para la presente investigación) son la 1, 2, 17, 18, 19, 20, 21 y 22, mientras que los valores más bajos se presentaron en las comunas 3, 4, 8, 9, 10, 11 y 12. Pese a que se encontraron varias comunas con valores por encima del umbral establecido para la identificación de las IFU, el promedio de este indicador para toda la ciudad fue de 0,27, presentando una mediana de 0,25, un mínimo de 0,12 y máximo de 0,55.

NDWI: En el contenido de humedad de la vegetación se encontró que buena parte de las comunas presentaron valores por encima del umbral establecido para la identificación de las IFU, observándose los valores más altos en las comunas 2, 18, 19, 20, 21 y 22. De esta forma, el promedio de NDWI para el área urbana del municipio de Santiago de Cali fue de 0,03 y la mediana 0,02. Sin embargo, se hallaron valores críticos para este indicador en las comunas 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

NDBI: En los datos arrojados por el NDBI se encontró que las comunas con la mayor presencia cubiertas con vegetación en su interior son la 1, 17, 21 y 22, y las de mayor concentración de edificaciones son la 3, 8, 9, 10, 11, 12 y 14. El promedio de este indicador para la ciudad fue -0,03 lo cual indica una existencia de cubiertas vegetales pero no en abundantes cantidades

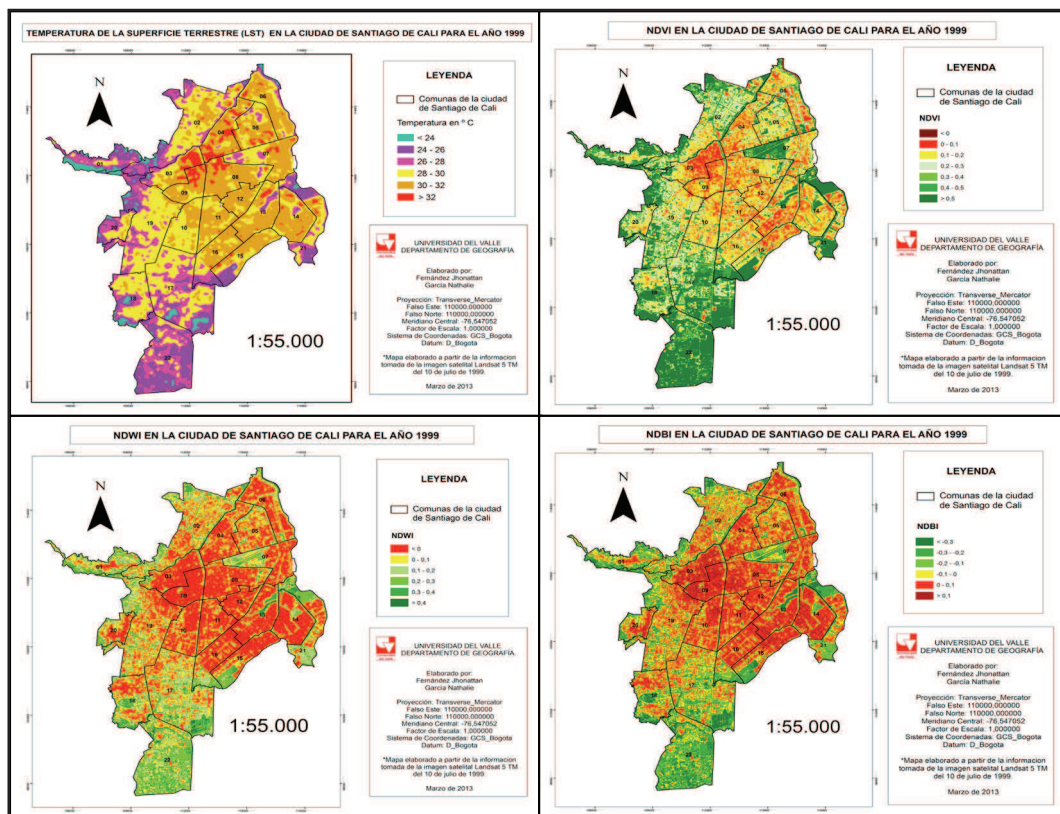


Figura 3. Mapas de los indicadores del año 1999

- **Indicadores imagen Landsat 5 TM 2011 (Figuras 4 y 5).**

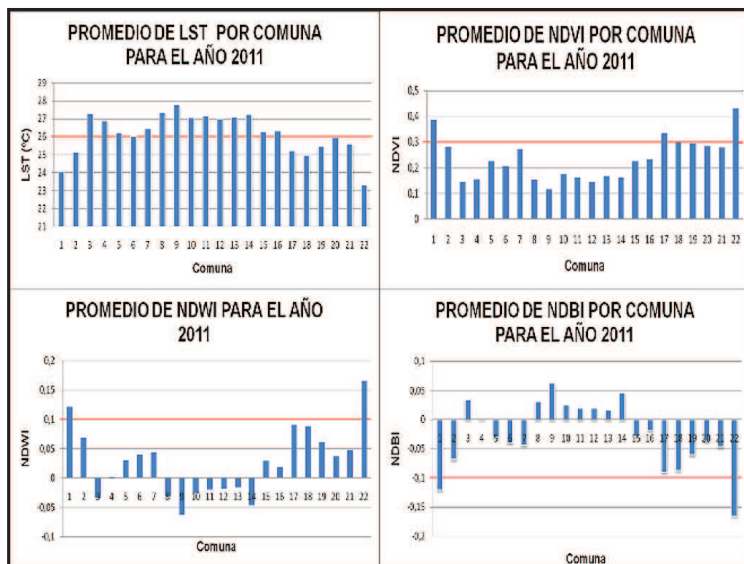
LST (Temperatura de la superficie): Para la imagen del año 2011 se encontró una temperatura de la superficie promedio de 26,1 con un valor mínimo de 23,3 un máximo de 27,7 y una mediana de 26,2. A nivel de comuna, se obtuvo que los valores por debajo de los 26°C se presentaron en las comunas 2, 17, 18, 19, 20, 21 y 22; y lo valores más altos encuentran en las comunas 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

NDVI: Este indicador arrojó un valor promedio por comuna de 0,23 el cual, se encuentra por debajo del umbral establecido como criterio en la presente investigación. Se encontró que sólo tres comunas (1, 17 y 22) presentaron valores en su promedio por encima de 0,3; sin embargo, varias comunas presentan valores cercanos a este umbral. Los valores más bajos en este indicador son los de las comunas 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

NDWI: El NDWI promedio obtenido para toda la ciudad fue de 0,02, valor que se encuentra por debajo de 0,1 (umbral establecido), la mediana fue de 0,02, el valor mínimo de -0,06 y el máximo de 0,16. En este sentido, las comunas que presentaron valores por encima del umbral sólo fueron las comunas 1 y 22, observándose valores críticos en gran parte de las comunas, sobre todo en las 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

NDBI: Este indicador arrojó que sólo la comuna 22 tenía un valor promedio que se encontraba por debajo del umbral establecido (valores menores a -0,1), mientras que la comunas que presentaron valores que indican mayor concentración de edificaciones son la 3, 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14. A nivel de ciudad el promedio fue de -0,02 y la mediana de -0,02. Los valores obtenidos para el NDBI demuestran que para el año 2011 se observaba una marcada superioridad de las áreas construidas sobre las zonas con presencia de vegetación a nivel de comuna y de ciudad.

Figura 4. Gráficos de los valores promedios por comuna en cada indicador del año 2011



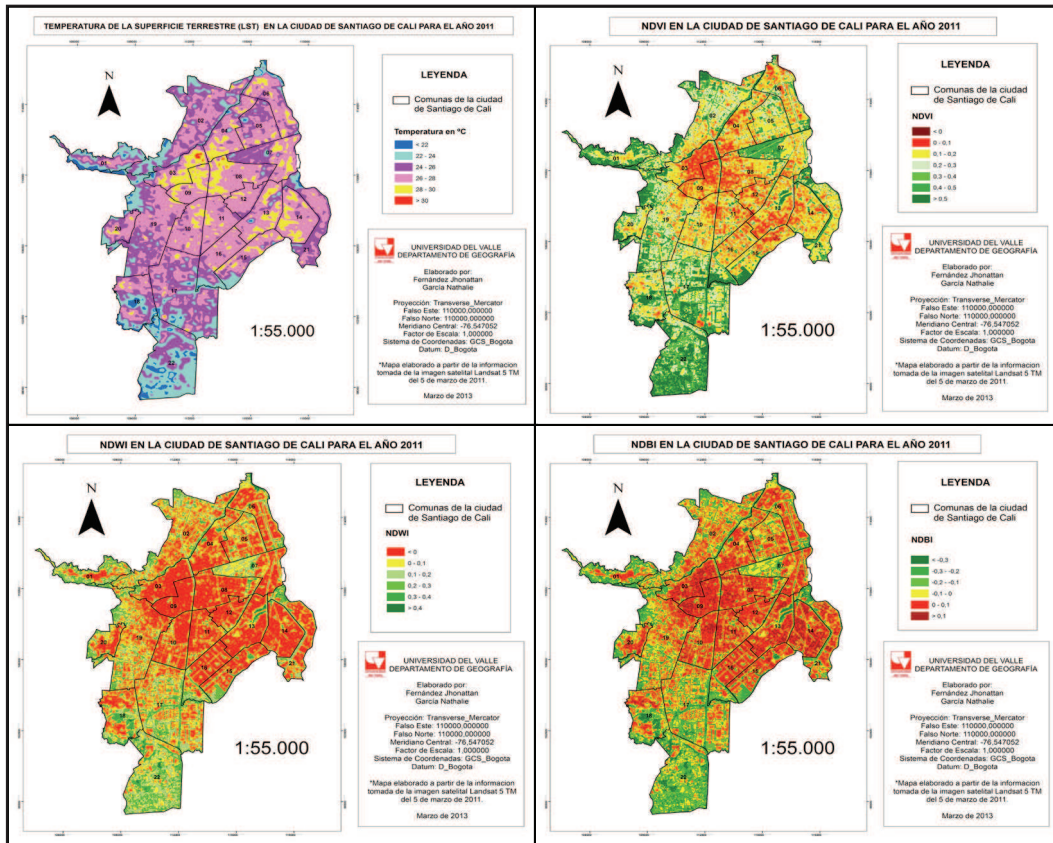


Figura 5. Mapas de los indicadores del año 2011

Relación entre Temperatura y vegetación a partir de los indicadores LST, NDVI, NDWI y NDBI

- **Correlación indicadores imagen 1999 (Figura 6).**

Para la relación entre LST y NDVI el coeficiente de correlación de Pearson fue de $-0,920$ lo que indica una correlación excelente entre las dos variables; respecto a la covarianza el resultado fue de $-0,153$ por lo tanto la correlación existente entre los dos indicadores es inversamente proporcional, puesto que es negativa. En la relación LST y NDWI la correlación de Pearson y la covarianza arrojaron valores de $-0,920$ y $-0,093$ respectivamente, lo que significa que existe una correlación perfecta e inversamente proporcional entre estos dos indicadores. Por último, para la relación entre LST y NDBI el coeficiente de correlación arrojó un valor de $0,920$, indicando que la relación existente es excelente; sin embargo, la covarianza arrojó un resultado positivo de $0,093$ lo que significa que son variables directamente proporcionales (Martínez Bencardino, 2006).

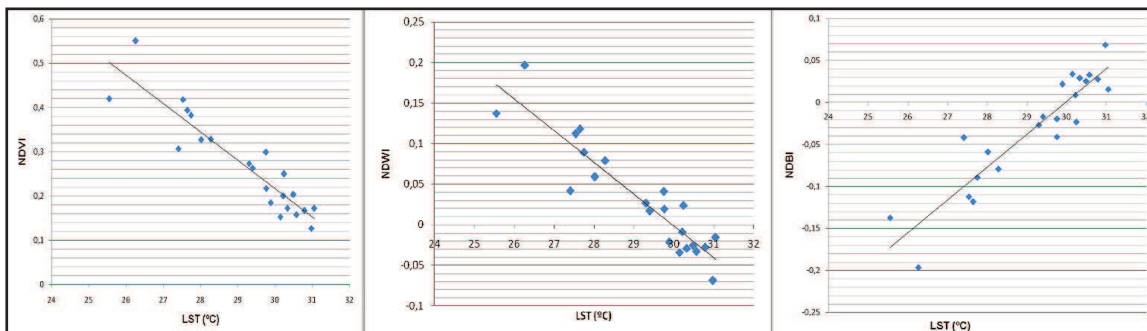


Figura 6. Correlación entre los indicadores para la imagen del año 1999

• **Correlación indicadores imagen 2011 (Figura 7).**

El coeficiente de correlación de Pearson y la covarianza para la relación LST y NDVI arrojaron valores de -0,964 y -0,088 respectivamente, lo cual indica que existe una correlación excelente e inversamente proporcional entre estos dos indicadores. Esta misma correlación se presentó para la relación LST y NDWI, ya que se observó un resultado de -0,984 en el coeficiente de correlación y en la covarianza se obtuvo un valor de -0,061. Al igual que en los casos anteriores, para la relación LST y NDWI el coeficiente de correlación de Pearson indica que existe una correlación excelente entre los dos indicadores al arrojar un valor de 0,984; sin embargo, en la covarianza arrojo un valor positivo de 0,061 lo cual señala una relación directamente proporcional (Martínez Bencardino, 2006).

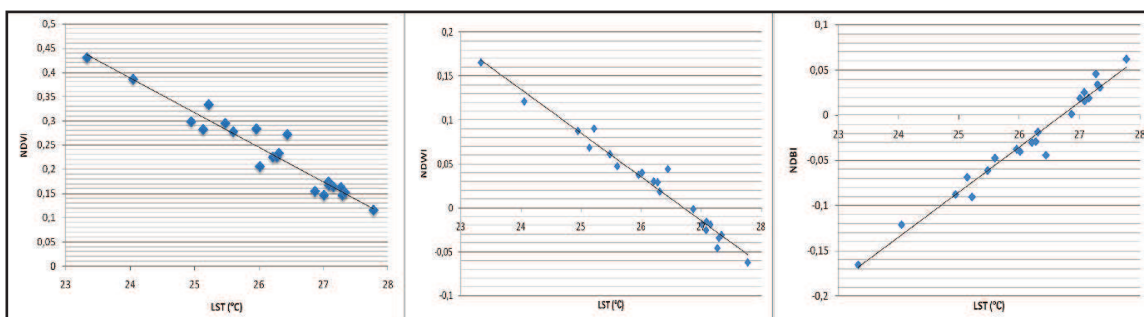


Figura 7. Correlación entre los indicadores de la imagen del 2011

Las Isla Frescas Urbanas caleñas

Las zonas identificadas como IFU para las dos fechas evaluadas, según el comportamiento de los criterios utilizados para dicha identificación, arrojan como resultado áreas con presencia de vegetación vigorosa y con un buen contenido de humedad, con baja densidad de edificaciones y con temperaturas superficiales menores a 26 °C (Figura 8a y 8b). Cabe aclarar, que estas zonas no conservan un estado permanente, en cuanto a las propiedades que poseen, debido a lo siguiente: primero, los resultados obtenidos para cada imagen no son comprobables entre sí, dado que las características climáticas sobre las cuales se obtuvieron las mismas son distintas; por lo tanto, este factor se convierte en un elemento que influye en los estados fenológicos de la vegetación y por ende en la reflectividad de los elementos estudiados, aspecto que no permite una comparación multitemporal; y segundo, el nivel de frescura no es homogéneo en todas las zonas identificadas como IFU, puesto que algunas partes contemplan características distintas en cuanto a tipo de vegetación predominante, estados fenológicos y la influencia del contexto en el que se desenvuelven las mismas, generando que algunas IFU presenten mejores condiciones en cuanto a temperatura superficial y por ende, en cuanto a confort térmico ofrecido (Figura 8c y 8d). Por último, cabe aclarar que la presencia de vegetación en una ciudad no siempre se constituye como un indicador de alta calidad ambiental, puesto que algunos procesos del medio urbano como el manejo indebido de residuos sólidos, biológicos, industriales, etc, el descuido de las autoridades ambientales en cuanto a protección y manejo de la vegetación y la falta de educación y concientización de los habitantes en cuanto al cuidado, preservación y apropiación de los espacios verdes o blandos, influyen fuertemente en el estado, las propiedades y los beneficios inherentes a la vegetación.

Por otro lado, las IFU identificadas para los años evaluados, presentaron un patrón en su distribución espacial de tipo agrupado, principalmente hacia la zona noroeste, oeste y en mayor medida hacia la zona sur de la ciudad; observándose una menor presencia para la zona centro y oriente. Para el caso de la zona oriente, las IFU que se pueden observar se constituyen en espacios con difíciles problemáticas ambientales y con gran desatención por parte de las autoridades que trabajan en este ámbito. Es necesario aclarar, que la comparación de las IFU de las dos fechas solo se establece en cuanto a distribución espacial, debido al aspecto referente a la fenología explicado anteriormente. Este patrón de distribución da cuenta de que a pesar de la implementación de un Plan de Ordenamiento Territorial para el municipio de Santiago de Cali en el año 2000, no se percibe un cambio estructural en el comportamiento y presencia de vegetación en la ciudad después de 12 años de implementación del mismo.

136

Las Islas Frescas Urbanas -IFU- en el contexto Caleño.

Como se pudo ver anteriormente, las IFU cuentan con una distribución espacial agrupada; sin embargo, conocer solo el tipo de distribución no permite comprender la situación en el contexto territorial caleño. Por lo tanto, cabe mostrar la relación entre IFU identificadas para el 2011 y algunas variables territoriales que podrían mostrar un mejor escenario de las IFU como un hecho geográfico situado en la ciudad de

Cali. En primera medida, en cuanto a densidad poblacional, se puede observar que las IFU están distribuidas mayormente hacia las comunas que cuentan con los valores más bajos de densidad (Figura 9a) observándose algunos casos atípicos en este patrón respecto a las Comunas 21 y 20, que a pesar de contar con los valores más altos de densidad poblacional muestran presencia de IFU; sin embargo, estas IFU, en el caso de la Comuna 21, se encuentran en el rango de las zonas que aportan el mínimo confort, debido al tipo de vegetación que poseen y al estado en el que se encuentran. En relación a la estratificación socioeconómica, las IFU que aportan las mejores condiciones de bienestar térmico se concentran hacia las comunas que cuentan con una estratificación media-alta y alta; con excepción de la Comuna 1 que a pesar de presentar una estratificación socioeconómica baja, cuenta con IFU de buena calidad en cuanto al confort (Figura 9b). Por último, el patrón de distribución de las IFU para el año 2011 se relaciona directamente con el índice de zona verde por habitante¹ estimado para la ciudad en el POT del año 2000 (Figura 9c), lo cual da cuenta de una fuerte carencia en cuanto a zonas verdes en la mayor parte de las comunas de la ciudad.

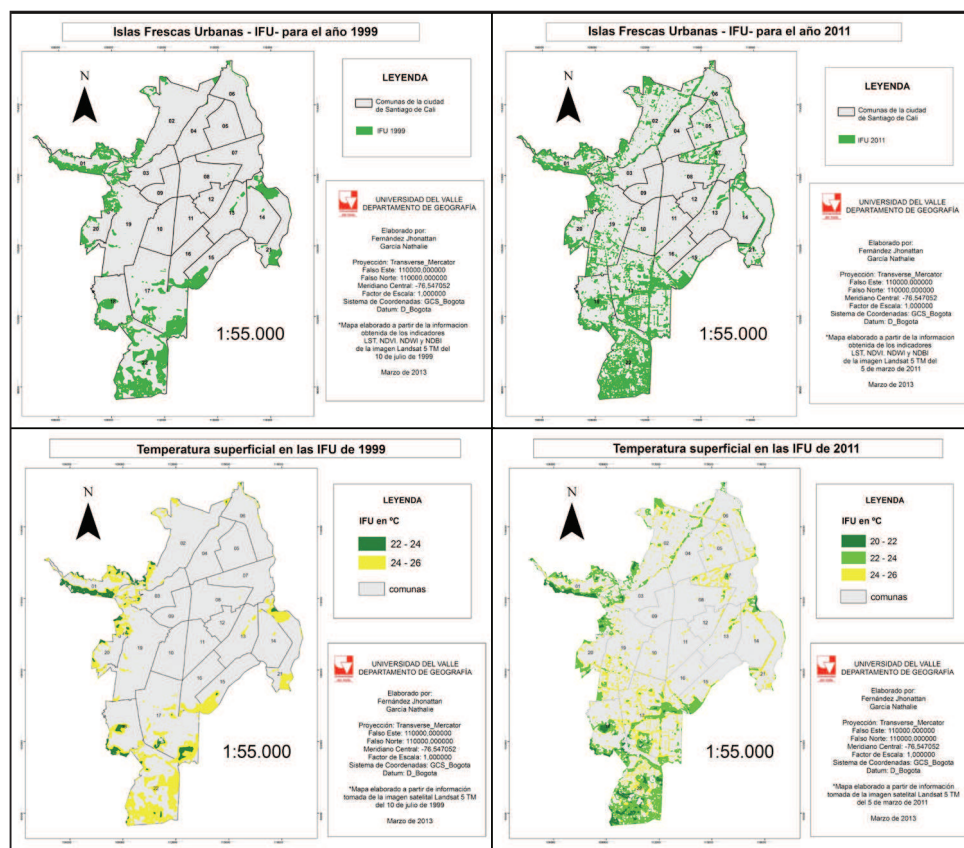


Figura 8. Mapas de distribución y Temperatura superficial de las IFU para los años 1999 y 2011

Posterior a la identificación de un patrón de distribución y de contextualización general de las IFU en el ámbito territorial caleño, se hizo necesario realizar un acercamiento más detallado a estas zonas, debido a que las actividades que se desenvuelven alrededor de las IFU no son homogéneas. Por lo tanto es importante considerar la influencia de la actividad colindante a las IFU, puesto que determinan sobre estos espacios una serie de atributos que inciden en las propiedades y características que poseen, como por ejemplo, el estado ambiental, la consolidación y el acceso de la población. Tomando como referencia las IFU identificadas para el año 2011 y las áreas de actividad definidas por el POT de la ciudad, se puede encontrar el siguiente panorama general de las áreas más representativas referente al tipo de actividad (Figura 9d).

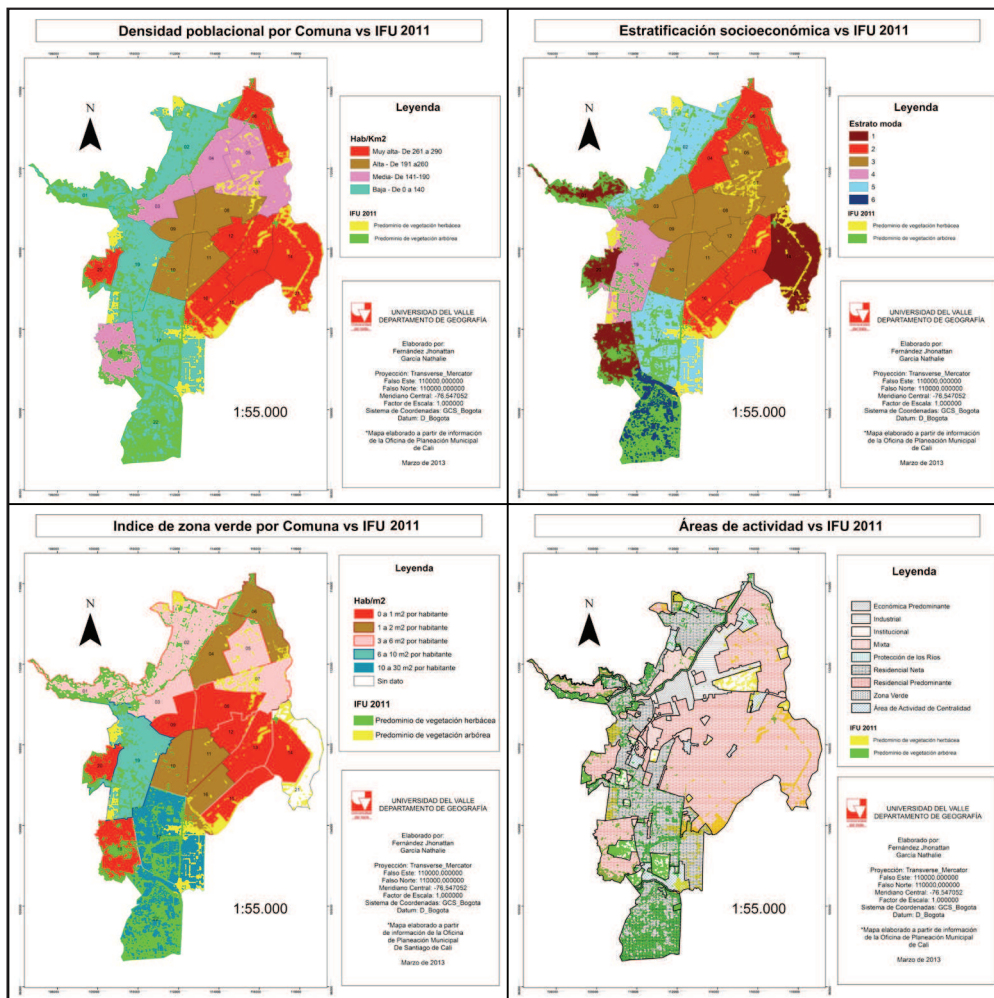


Figura 9. Mapas de las Isla Frasca Urbanas en relación al contexto caleño

En este sentido se pudieron encontrar tres aspectos importantes: primero, los espacios de mayor extensión con los cuales cuenta la ciudad, en torno a cubiertas vegetales de buena calidad y consolidación, corresponden a espacios cerrados de carácter institucional, lo cual restringe en gran medida el disfrute y los beneficios de estos espacios para gran parte de la ciudadanía caleña; por otro lado, buena parte de las cubiertas vegetales localizadas hacia las comunas 22, 17 y 19, corresponden a zonas verdes pertenecientes a condominios o conjuntos residenciales cerrados. Segundo, la mayoría de las IFU con altas restricciones, y por lo tanto de menor calidad, se encuentran localizadas hacia la zona oriental de la ciudad, debido a que este sector carece de normatividad en cuanto a estipulación de zonas verdes de protección, preservación o parques a escala urbana y debido también al deterioro ambiental y falta de cuidado al cual están sometidos estos espacios en esta parte de la ciudad. Por último, se puede observar que las zonas de protección de los ríos, se consideran las IFU de mayor calidad, puesto que corresponden a espacios abiertos de libre acceso para la ciudadanía, poseen alta cubierta boscosa, se encuentran protegidos normativamente y cubren de manera lineal una gran porción del área urbana.

Percepción y valoración de las Islas Frescas Urbana en la ciudad de Cali

Encuestas: Del total de la población encuestada, el 54% correspondían al género femenino y 46% al masculino. La mayoría de los encuestados pertenecían a un rango de edad entre los 18 y 30 años. Respecto al nivel educativo el 58% de la población encuestada estudió hasta la secundaria, seguido de un 30% con un título profesional o tecnológico y en menor medida título de posgrado. Por otro lado, la mayoría de los encuestados eran personas habitantes de las zonas en las que se establecieron los puntos de muestreo.

El 98% de la población encuestada manifestó que consideran que es importante conservar zonas con presencia de vegetación; así mismo, señalan que estas zonas alrededor de sus lugares de vivienda, trabajo o estudio le generan la sensación de agrado y tranquilidad. En cuanto a los beneficios que brinda la vegetación, se encontró que el 92% de la población afirmaron que en la zona en la que viven, trabajan o estudian la vegetación presente les genera beneficios; señalando, que esto se debe al conjunto de elementos conformado por el embellecimiento paisajístico, regulación del clima y zonas de esparcimiento que provee la vegetación. Por otro lado el 60% consideran que la vegetación brinda sus máximos beneficios en épocas soleadas; aunque el 30% señalan que tanto en épocas soleadas como de lluvias la vegetación les brinda beneficios.

Por otra parte, el 98% de las personas encuestadas consideraron que están totalmente de acuerdo con el planteamiento de que la presencia de vegetación influye en la disminución de la temperatura; así, los encuestados señalaban que en las zonas con presencia de vegetación cercanas a su lugar de vivienda, trabajo o estudio, lograban percibir más frescura que en otras zonas del barrio, comuna o ciudad. De igual forma, se considera que la presencia de vegetación es un elemento que contribuye al mejoramiento de la calidad de vida en la comuna o barrio donde viven, trabajan o estudian las personas encuestadas.

Respecto a la cantidad de zonas con presencia de vegetación en la zona donde viven, trabajan o estudian, el 80% de las personas encuestadas consideraron que estas deben aumentar sobretodo árboles grandes en conjunto con diversos tipos de vegetación. Así mismo, un 86% de los encuestados plantean que les gustaría que las zonas con presencia de vegetación sean espacios abiertos, que contengan variedad de especies; que además de conllevar al cuidado y protección de la misma, brinden espacios de esparcimiento y desarrollo de diferentes actividades para la comunidad.

En relación con el cuidado y mantenimiento de la vegetación por parte de las autoridades ambientales del municipio, el 74% de los encuestados consideran que esto no se lleva a cabo. Al mismo tiempo, se califica que la cantidad de zonas verdes presentes en la ciudad de Cali es moderada, aunque un porcentaje considerable de los encuestados creen que es baja y muy baja. Se debe agregar que el 92% de las personas encuestadas consideran que es muy importante que al interior de los planes y programas desarrollados en la ciudad se incorporen aspectos relacionados con el manejo y protección de la vegetación.

Observación etnográfica: La observación participante permitió conocer las diferencias existentes respecto al nivel de confort térmico sentido en cada uno de los puntos de observación. Se encontró, que a pesar de la existencia de un escenario similar, se logra percibir marcadas divergencias entre una localidad y otra. En los puntos de observación localizados en el centro y oriente, como respuesta al alto calor percibido, se manifestó la necesidad de ingerir bebidas refrescantes y ventilarse, se presentaron algunos niveles de estrés, se evidenciaron cambios fisiológicos como sudoración alta, aumento del ritmo cardiaco y algunas alteraciones en el comportamiento como movimiento excesivo de manos y pies e incomodidad con la vestimenta. Mientras tanto, en el punto de observación localizado al norte, mejora un poco más las condiciones de confort respecto a los dos anteriores puntos de observación; en este punto se logró percibir un nivel mayor de agrado respecto al calor del ambiente, puesto que a pesar de sentirse un poco de incomodidad con la vestimenta, el nivel de estrés disminuye y la sudoración y el ritmo cardiaco no es tan marcado. En este punto se logró observar que la cantidad de vegetación aumenta significativamente y las condiciones de sombra mejoran para esta localidad. En el punto de observación localizado al sur, el proceso de observación se llevó a cabo con gran tranquilidad, puesto que el grado de comodidad y bienestar respecto al calor es bastante alto; la gran presencia de vegetación alrededor brinda una sensación de frescura y no se presentaron cambios marcados en la sudoración, en el comportamiento y no hubo grado de estrés. (Figura 10 y Tabla 1).

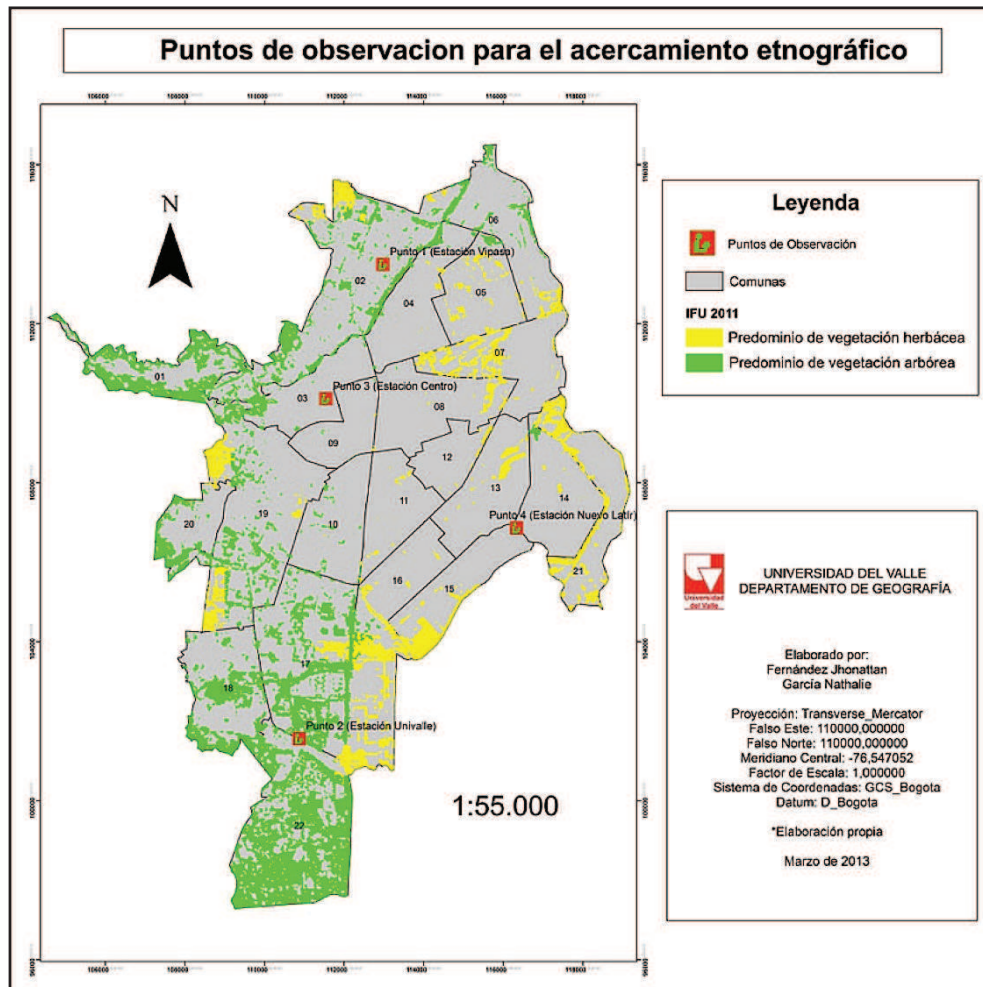


Figura 10. Localidades para la observación etnográfica por parte de los investigadores.

VARIABLES	OBSERVADOR 1				OBSERVADOR 2			
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4
<i>Niveles de calor</i>	N2	N5	N1	N1	N4	N5	N1	N3
<i>Ventilación</i>	V2	V2	V1	V1	V2	V2	V1	V1
<i>Bebidas</i>	B2	B2	B1	B1	B2	B2	B1	B1
<i>Comportamiento</i>	C2	C2	C1	C1	C2	C2	C1	C1
<i>Estrés</i>	E2	E3	E1	E1	E1	E3	E1	E2
<i>Aspectos fisiológicos</i>	F3	F3	F1	F1	F3	F3	F1	F2
<i>Nivel de confort</i>	M	B	M	M	MB	B	M	MM
Puntos de observación	Punto 1	Estación Vipasa						
	Punto 2	Estación Univalle						
	Punto 3	Estación Centro						
	Punto 4	Estación Nuevo Latir						
Niveles de calor	N1	Nivel de calor alto						
	N2	Nivel de calor moderado						
	N3	Nivel de calor medio -alto						
	N4	Nivel de calor medio- bajo						
	N5	Nivel de calor bajo						
Ventilación	V1	Siente la necesidad de ventilarse para disminuir el calor.						
	V2	No siente la necesidad de ventilarse.						
Bebidas	B1	Siente la necesidad de tomar bebidas refrescantes.						
	B2	No siente la necesidad de tomar bebidas refrescantes.						
Comportamiento	C1	Camina de un lado a otro para evadir la sensación de calor y busca un lugar más fresco.						
	C2	Siente un nivel de comodidad, por lo que observa con tranquilidad en su sitio de observación.						
Estrés	E1	El calor sentido aumenta mucho los niveles estrés						
	E2	Es poco el estrés sentido.						
	E3	No presenta estrés.						
Aspectos fisiológicos	F1	Aumenta la sudoración, se hace mayor esfuerzo para respirar y se percibe aumentos en el ritmo cardíaco.						
	F2	Sólo aumenta la sudoración.						
	F3	No se presentan cambios fisiológicos notorios.						
Nivel de confort sentido	B	Bueno						
	MB	Moderadamente Bueno						
	M	Moderado						
	MM	Moderadamente Malo						
	M	Malo						

Tabla 1. Matriz de resultados de la observación etnográfica

Conclusiones

El concepto de Islas Frescas Urbanas representa una categoría de gran importancia a ser tenida cuenta en el ordenamiento territorial, puesto que brinda elementos fundamentales que contribuyen al mejoramiento de la calidad ambiental de la ciudad; por tal razón, la incorporación de las IFU en las estrategias de planificación constituiría un avance en la gestión ambiental urbana.

Los resultados arrojados por los indicadores para los años 1999 y 2011, muestran que las relaciones establecidas entre los mismos evidencian que a medida que se presenta mayor cantidad, mejor calidad, estado de desarrollo y humedad de la vegetación en

una determinada zona, la temperatura superficial tenderá a ser menor. De otro lado, la alta densidad de zonas edificadas y suelo desnudo, influye directamente en el aumento de la temperatura de la superficie terrestre.

La distribución espacial que presentan las IFU tanto para el año 1999 como para el año 2011 es de tipo agrupado, en mayor medida hacia el noroeste, oeste y sur de la ciudad en las zonas de estratos socioeconómicos medio - alto y alto, de baja densidad de población y con los mayores índices de zonas verdes por habitante. Así mismo, las áreas urbanas con menor presencia de IFU son el centro y oriente de la ciudad, las cuales, se caracterizan por poseer estratificación socioeconómica baja, bajos índices de zonas verdes y alta densidad de población (sobre todo en el oriente).

Con la elaboración de la encuesta se evidencia que por parte de la comunidad se tiene una visión positiva y apropiación de los espacios con presencia de vegetación, en lo cual, se reconoce la importancia de incluir en el medio urbano espacios con presencia de vegetación como forma de mejorar la calidad de vida y ambiental del municipio. Por otro lado, existe un reconocimiento de la contribución de la vegetación en la disminución de la temperatura, manifestándose que las zonas con presencia de vegetación brindan espacios con mayor frescura, lo que los hace favorable para el desarrollo de diferentes actividades que conllevan al disfrute del ciudadano.

La observación realizada por parte de los investigadores permitió medir de forma directa los beneficios que brinda la vegetación y su influencia en el medio urbano; se observó que en la zonas con características de IFU el confort térmico es mejor que las zonas que no presentan características de IFU; así, se puede establecer que la presencia de IFU determinan en la ciudad el nivel de agrado y comodidad que se siente respecto a un lugar.

De manera general, en el desarrollo del marco cualitativo de la investigación, se logró identificar que el cuidado y mantenimiento de los espacios con presencia de vegetación muchas veces va más allá de la gestión de las autoridades municipales, y es un proceso que se encuentra ligado a aspectos relacionados con la educación, concientización y apropiación de estos espacios por parte de la comunidad. Por lo tanto, es necesaria la construcción de un masivo proceso educativo con el fin de fortalecer en la ciudadanía una cultura que reconozca, defienda y proteja la importancia de incluir en la funcionalidad urbana los beneficios del medio natural. Así mismo, poder reconocer, mediante procesos educativos, las visiones y actuaciones que tienen los distintos actores sociales que habitan la ciudad, permite la construcción de escenarios y estrategias de intervención alternativas, que apunten al desarrollo territorial así como al mejoramiento de las condiciones y la calidad de vida de las personas.

Finalmente, con el fin de garantizar el máximo provecho de los espacios con presencia de vegetación al interior de la ciudad, es fundamental la creación de programas que garanticen la protección, mantenimiento y cuidado de la vegetación, en el que se brinden los elementos necesarios para que la vegetación pueda desarrollar las propiedades y características que determinan la oferta de beneficios ambientales; en este sentido, como estrategia fundamental a seguir sería la real implementación del Estatuto Arbóreo y del Plan de Espacio Público para la ciudad de Cali.

Bibliografía

- AGENCIA DE PROTECCIÓN AL MEDIO AMBIENTE DE LOS ESTADOS UNIDOS (EPA). Desarrollo inteligente e islas de Calor. [Versión electrónica disponible en <http://www.epa.gov/hiri/resources/pdf/SmartgrowthSpanish.pdf>] [Consultado el día 19 de mayo de 2012], 2010.
- CHEN, X.; ZHAO, H.; LI, P. y YIN, Z. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. En: Remote Sensing of Environment. No. 104 (2006), p. 133-146.
- CHUVIECO SALINERO, Emilio. Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. España: Editorial Ariel, 2002. 586 p.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN MUNICIPAL (DAPM). Cali en cifras 2011. [Versión electrónica disponible en: www.planeacion.cali.gov.co/Publicaciones/Cali_en_Cifras/Caliencifras2011.pdf] [Consultado en Octubre de 2012], 2011.
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE PLANEACIÓN MUNICIPAL (DAPM). Plan de Ordenamiento Territorial. Municipio de Santiago de Cali. 2000.
- GAO, Bo-Cai. NDWI – A Normalized difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. En: Remote Sensing of Environment. No. 58 (1996), p. 257-266
- HOLDRIDGE, Leslie. Ecología Basada en Zonas de Vida. Costa Rica: Editorial Agroamerica, 1987. 216 p.
- LANDSAT PROJECT SCIENCE OFFICE. *Landsat 7 science data user's handbook, chapter 11 (Data products)*. Washington: Landsat Project Science Office. [Versión electrónica disponible en http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html] [Consultado en octubre de 2012], 2008.
- LOPEZ GARCIA, José y CASELLES MIRALLES, Vicente. Aplicación de la teledetección al estudio de a temperatura superficial del mar balear y golfo de valencia. En: Cuadernos de geografía. Vol. 38 (1986), p. 75-92.
- MARTÍNEZ BENCARDINO, Ciro. Estadística Básica Aplicada. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2006. 386 p.
- OLGYAY, Victor. Clima y Arquitectura en Colombia. Cali – Colombia: Universidad del Valle, 1968. 200 p.
- SANTANA, Luis M; ESCOBAR JARAMILLO, Luis A y CAPOTE, Paolo A. Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. En: Revista de geografía Norte Grande. Vol. 45 (2010), p. 77-95.
- SANCHA NAVARRO, Emilio F. El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las relaciones entre la vegetación y el clima. En: Ojeda, J; Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), Tecnologías de la información geográfica: La geografía al servicio de los ciudadanos. España: Universidad de Sevilla, 2010. p. 1095-1108.
- VIEDMA, Olga y CHUVIECO, Emilio. Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. El ejemplo de la Hoya de Buñol, Valencia. En: Boletín de información técnica – AITIM. No 167 (1993), p. 60 - 66
- ZHA, Y; GAO, J y NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban from TM imagery. En: International Journal of Remote Sensing. Vol. 24, No. 3, (2003) p. 583-594.