

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL CAMBIO DE LA COBERTURA
DE LA TIERRA EN EL FENÓMENO DE ISLA DE CALOR
URBANO (ICU) EN LA CIUDAD DE HEREDIA, COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios
de Posgrado en Desarrollo Sostenible (PPDS),
para optar al grado y título de Maestría Académica en
Desarrollo Sostenible con énfasis en Conservación de los Recursos Biológicos

OMAR E. BARRANTES SOTELA

Ciudad Universitaria Carlos Monge Alfaro, Costa Rica
2020

Dedicatoria

A mi familia, por su apoyo incondicional.

“Es muy común recordar que alguien nos debe agradecimiento, pero es más común no pensar en quienes le debemos nuestra propia gratitud.”

Johann Wolfgang Goethe

Agradecimientos

Este trabajo de investigación no sería posible sin el aporte y consejos de una gran cantidad de personas, que con su guía, orientación e inspiración es la razón de que pueda presentar y compartir esta obra. Algunos días fue fácil encontrar las palabras que llenan estas páginas y otros días... bueno no fue tan fácil. Pero gracias a la motivación y el aporte de familiares, amigos, profesores y compañeros, es que a esas palabras puede darles coherencia y por tal razón les expreso mis sinceros agradecimientos.

Al Dr. Gustavo Barrantes Castillo por su constante guía y por enfocarme cuando sentía que me desviaba del camino. A la M.Sc. Irina Katchan Katchan por sus valiosos aportes y estar siempre dispuesta a sentarse conmigo durante horas para discutir sobre el clima, gracias por su paciencia. Al M.Sc. Michael Moya Calderón por acompañarme en este proceso y tratar de una forma interesante los temas asociados al Desarrollo Sostenible. Al Director del Programa de la Maestría, el M.Sc. Ronald Sánchez Porras por compartir su conocimiento, experiencia y de las más entretenidas anécdotas, le agradezco su buena disposición y por hacernos sentir a mi y a mis compañeros de generación en un ambiente familiar. Al grupo de profesores que conforman el Programa de Maestría en Desarrollo Sostenible, en especial a la M.Sc. Liz Brenes Cambronero, al Dr. José Manuel Mora Benavides y al M.Sc. José Luis Fournier Rodríguez por sugerir aportes significativos para el desarrollo de este trabajo.

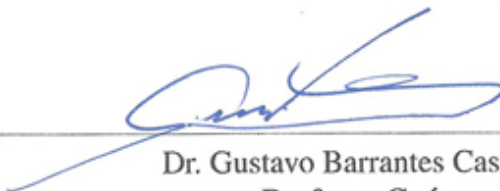
Gracias a mis compañeros de maestría por las discusiones, la pase muy bien con ustedes. A Mynor Delgado Castro por su amistad y por estar siempre dispuesto a pasar las madrugadas trabajando para cumplir con la meta. A Shamil Salazar Vega y a Marie Luise Beier Hidalgo por su colaboración con las encuestas. A la M.Sc. Lilliam Quirós Arias, que gracias a su apoyo me fue posible asistir a lecciones mientras me desempeñaba como académico. Al M.Sc. Dionisio Alfaro Rodríguez y a la Dra. Marilyn Romero Vargas por sus consejos y a quiénes considero como mis mentores.

Pero sobre todo a mi familia, gracias por estar siempre. Grey eres un bastión para mi, gracias por ser mi guía y brindarme tu amor. A Gael mi hijo y mi inspiración, que nació durante esta aventura, y a Ka gracias por estar pendiente de nosotros. A mis hermanos Mauricio y Tricia, y por supuesto a mis padres Isidro Barrantes Solís y Leda Sotela Lara. Sin ustedes, esto no tendría sentido.

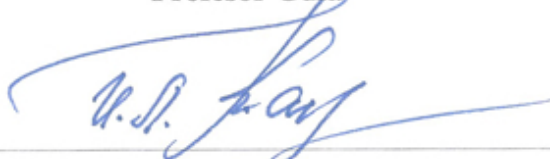
“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Desarrollo Sostenible de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Desarrollo Sostenible con énfasis en Conservación de los Recursos Biológicos”.



M.Sc. Liz Brenes Cambronero
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado



Dr. Gustavo Barrantes Castillo
Profesor Guía



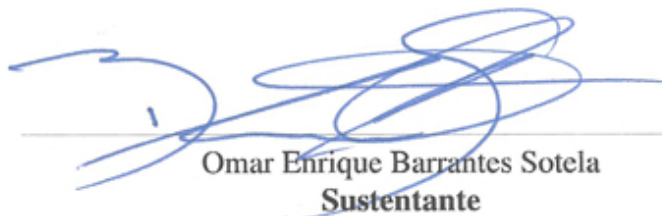
M.Sc. Irina Lvovna Katchan Katchan
Lectora



M.Sc. Michael Moya Calderón
Lector



M.Sc. Ronald Sánchez Porras
Director Programa de Posgrado en Desarrollo Sostenible



Omar Enrique Barrantes Sotela
Sustentante

Tabla de contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Hoja de aprobación	iv
Tabla de contenido	ix
Resumen	x
Lista de cuadros	xv
Lista de figuras	xxii
Lista de abreviaturas	xxiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Antecedentes	5
1.4. Justificación	7
2. REVISIÓN DE LITERATURA	10
2.1. La Ciudad	10
2.1.1. La Ciudad y las aglomeraciones urbanas	11
2.1.2. Crecimiento urbano	12

2.2.	El clima en las áreas urbanas	13
2.2.1.	Isla de Calor Urbana	14
2.2.2.	Medición y modelado de las ICU	15
2.3.	El Desarrollo Sostenible en las ciudades	19
2.3.1.	La evolución del concepto de desarrollo y sus implicaciones en las ciudades	20
	La concepción antropocéntrica de las ciudades	21
	El enfoque ecologista y orgánico	22
	Los nuevos enfoques de las ciudades sostenibles	23
2.4.	Políticas de mitigación del cambio climático desde el Ordenamiento Territorial	27
3.	ÁREA DE ESTUDIO	30
3.1.	Ubicación geográfica	30
3.2.	Aspectos históricos	32
3.3.	Características demográficas y socioeconómicas	35
3.4.	Clima y zona de vida	37
3.4.1.	Oscilaciones	39
3.5.	Configuración urbana	41
4.	MATERIALES Y MÉTODOS	42
4.1.	Tipo de investigación	42
4.2.	Variables y Categorías: definición e instrumentación	43
4.2.1.	Objetivo específico 1:	43
	Variable: Morfología del sistema urbano	43
	Categoría de Análisis: Cobertura de la tierra	48
	Variable: Cambio de cobertura de la tierra	53
4.2.2.	Objetivo específico 2:	55
	Variable: Temperatura de la superficie terrestre (TST)	55
	Variable: Isla de Calor Urbano.	68
4.2.3.	Objetivo específico 3:	71
	Variable: Escenarios de tendencias de cambio de cobertura de la tierra y variación de la ICU	71

5. RESULTADOS	78
5.1. Morfología del sistema urbano	78
5.1.1. Índice de forma y patrón de asentamiento	78
5.1.2. Densidad de población	79
5.1.3. Densidad de las actividades económicas	83
5.2. Cobertura de la tierra	85
5.2.1. Identificación: Largo plazo (1985-2019)	86
Cobertura de la tierra 1985	86
Cobertura de la tierra 2001	89
Cobertura de la tierra 2019	91
5.2.2. Identificación: Corto plazo (2017-2019)	96
Cobertura de la tierra 2017	96
Cobertura de la tierra 2018	99
Cobertura de la tierra 2019	101
5.2.3. Evaluación del proceso de asignación de las categorías	106
5.2.4. Descripción de las coberturas de la tierra	108
5.3. Patrón de cambio de cobertura de la tierra	111
5.3.1. Transformación Tasseled Cap (Kauth-Thomas) y valores de sesgo	111
5.3.2. Índice de Disturbio	117
5.4. Patrón de variabilidad climática	125
5.4.1. Temperatura del aire	125
Tendencia de la temperatura media del aire	126
5.4.2. Viento	132
5.5. Temperatura de la superficie	139
5.6. Isla de Calor Urbano	144
5.6.1. Perfiles térmicos: Categorías de cobertura	144
5.6.2. Perfiles térmicos: Zona Urbana - Zona Periférica	147
5.6.3. Relación entre las variables TST y DI	159
Regresión ponderada multinomial	162
5.7. Escenarios de tendencia	164
5.7.1. Componente: Coberturas de la tierra	165

Escenario 1: Crecimiento urbano tendencial	165
Escenario 2: Crecimiento urbano incrementado	165
Escenario 3: Arborización en las vías de comunicación	166
Escenario 4: Arborización al interior de las cuadras	166
5.7.2. Componente Térmico	172
5.8. Mapeo de actores claves	178
5.8.1. Percepción de los actores claves	179
Desempeño institucional	179
Sociograma de los actores	185
Causas del aumento de la temperatura en las ciudades	187
Infraestructura urbana: Parques, Áreas Verdes y Edificaciones	188
Gestión urbana: retos y desafíos	190
Patrón de consumo responsable	191
6. DISCUSIÓN	192
6.1. El sistema urbano	192
6.2. Cambio de las coberturas de la tierra	194
6.3. Isla de Calor	197
6.3.1. Escenarios	200
6.4. Líneas estratégicas	203
7. IMPLICACIONES EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE	209
8. CONCLUSIONES	211
Bibliografía	215
A. Imágenes satelitales	231
B. Propiedades de radiancia de materiales naturales	233
C. Estaciones Meteorológicas	235
C.1. Análisis de completitud de las estaciones meteorológicas	237
D. Series de tiempo	239

E. Oscilaciones	276
E.1. El Niño, Oscilación del Sur	277
E.2. Oscilación Decadal del Pacífico	280
E.3. Oscilación del Atlántico Norte	282
E.4. Oscilación del Ártico	284
F. Encuestas	286
F.1. Instrumentos de encuesta	286

Resumen

La presente investigación estudia la influencia del cambio de las coberturas de la tierra en el comportamiento de la intensidad y distribución espacial de la Isla de Calor Urbano (ICU) en la Ciudad de Heredia, entre los años 1985 al 2019. Con el propósito de establecer una serie lineamientos a ser considerados en la planificación de áreas urbanas sostenibles, así como para establecer planes de intervención del diseño urbano, que involucre reverdecer y arborizar la ciudad para regular la temperatura de la superficie.

La investigación analiza la morfología urbana, identifica y determina la evolución de las diferentes coberturas de la tierra mediante la estimación del índice de disturbio y como estas transformaciones influyen el aumento de la temperatura de la superficie terrestre entre el núcleo y los sectores periféricos de la ciudad, y que definen el fenómeno de la ICU.

Se asocia para cada cobertura su patrón de comportamiento térmico durante el período temporal y ámbito espacial; con tal de definir la magnitud e intensidad de la ICU. Para esto se utilizan metodologías de análisis espacial y geoestadísticos avanzados. También se construyen escenarios posibles y se identifican la dinámica de los actores, así como su percepción sobre temas asociados al incremento de la temperatura de la ciudad, el cambio climático y la gestión territorial.

Lista de cuadros

3.1. Estación San Lucía (Barva Heredia): Resumen Climático.	37
3.2. Aeropuerto Juan Santa María: Resumen Climático.	38
4.1. Escala de valoración de Índice Kappa.	50
4.2. Clases de uso/cobertura de la Tierra.	52
4.3. Constantes de calibración preestablecidas según tipo de sensor.	57
4.4. Constantes de calibración preestablecidas sensor Landsat 5 TM - Landsat 7 ETM+ (Qin <i>et al.</i> 2001).	58
4.5. Constantes de calibración preestablecidas sensor Landsat 8 TIRS (F. Wang <i>et al.</i> 2015).	59
4.6. Relaciones lineales para la aproximación de la temperatura atmosférica media efectiva (T_a) de la temperatura del aire en la superficie cercana (T_0) para 4 tipos de atmósfera estándar (Qin <i>et al.</i> 2001; F. Wang <i>et al.</i> 2015). .	60
4.7. Variaciones en la tasa de lapso de la temperatura del aire, para cada mes del año, en el Hemisferio Norte (Kunkel, 1989), y factores de ajuste de precipitación-elevación.	62
4.8. Designación de bandas según respuesta espectral, para el cálculo del NDVI.	63
4.9. Emisividad según valor del NDVI de la imagen espectral (Alfraihat, 2015; J. Zhang <i>et al.</i> 2006), y factores de ajuste de precipitación-elevación. . . .	64
4.10. Estimación de la transmitancia atmosférica para las bandas TIRS del sensor Landsat 8 según (F. Wang <i>et al.</i> 2015).	65
4.11. Estimación de la transmitancia atmosférica para la banda 6 TM del sensor Landsat 6 según (Qin <i>et al.</i> 2001).	66
4.12. Matriz de coherencia interna de la investigación	77
5.1. Heredia: Análisis de grafos a la red vial.	79

5.2. Heredia: Frecuencia del tipo de actividades económicas.	83
5.3. Heredia: Tipología de las estructuras con actividades económicas.	84
5.4. Área de estudio: Tamaño de muestras para entrenamiento del clasificador Random Forest (1985-2019).	86
5.5. Área de estudio: Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> en 20 corridas, 1985.	87
5.6. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Análisis de precisión por clase, 1985.	88
5.7. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Matriz de confusión R_{20} , 1985.	88
5.8. Área de estudio: Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> en 20 corridas, 2001.	89
5.9. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Análisis de precisión por clase, 2001.	90
5.10. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Matriz de confusión R_{16} , 2001.	90
5.11. Área de estudio: Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> en 20 corridas, 2019.	91
5.12. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Análisis de precisión por clase, 2019.	92
5.13. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Matriz de confusión R_{20} , 2019.	92
5.14. Área de estudio: Tamaño de muestras para entrenamiento del clasificador Random Forest (2017-2019).	96
5.15. Área de estudio: Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> en 20 corridas, 2017.	97
5.16. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Análisis de precisión por clase, 2017.	98
5.17. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Matriz de confusión R_{13} , 2017.	98
5.18. Área de estudio: Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> en 20 corridas, 2018.	99
5.19. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Análisis de precisión por clase, 2018.	100
5.20. Evaluación del clasificador <i>Random Forest</i> : Matriz de confusión R_{16} , 2018.	100

5.21. Área de estudio: Evaluación del clasificador Random Forest en 20 corridas. 2019	101
5.22. Evaluación del clasificador Random Forest: Análisis de precisión por clase. 2019	102
5.23. Evaluación del clasificador Random Forest: Matriz de confusión R_{14} . 2019	102
5.24. Coberturas de la tierra (Sensor Sentinel): Superficies en [Ha] entre 2017-2019.	108
5.25. Coberturas de la tierra (Sensor Landsat): Superficies en [Ha] entre 1985-2019.	108
5.26. Tasseled Cap: Patrón del indicador de cambio de cobertura.	111
5.27. Heredia, 1985: Coeficientes de simetría.	113
5.28. Heredia, 2001: Coeficientes de simetría.	113
5.29. Heredia, 2019: Coeficientes de simetría.	113
5.30. Heredia: Prueba estadística Wilcoxon para las diferencias del DI entre 1985-2019.	118
5.31. Coberturas de la tierra: Cambio relativo de la superficie [%].	124
5.32. Resumen estadístico de las temperaturas	125
5.33. Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos	132
5.34. Clasificación de la dirección del viento	133
5.35. Heredia: Resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie en las imágenes de satélite (1985 - 2019)	139
5.36. Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (1985-02-03)	144
5.37. Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (2001-01-14)	144
5.38. Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (2019-03-05)	144
5.39. Diferencias térmicas promedio en [°C] entre clases de cobertura de la tierra con respecto a la cobertura urbana.	146
5.40. Intensidad de la ICU - Perfil A: 1985 - 2019.	157
5.41. Coeficiente de determinación según transición entre las coberturas de la tierra	160
5.42. Coeficientes del modelo de regresión multinomial	162
5.43. Residuos estandarizados del modelo de regresión multinomial	162
5.44. Riesgo relativo del cambio de la variable predictora (RR)	163
5.45. Coberturas de la tierra según escenarios: Superficies en [Ha].	171
5.46. Diferencias superficiales en [Ha] de los escenarios con respecto a la cobertura de la tierra 2019.	171

5.47. Escenario 01: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra	173
5.48. Escenario 02: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra	173
5.49. Escenario 03: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra	173
5.50. Escenario 04: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra	173
5.51. Diferencias térmicas en [°C] de los escenarios con respecto al año 2019.	174
5.52. Diferencias térmicas en [%] de los escenarios con respecto al año 2019.	174
5.53. Actores considerados	178
5.54. Desempeño institucional del Estado costarricense.	180
5.55. Gobierno local: desempeño y gestión urbana ante el cambio climático.	181
5.56. Academia: desempeño y labor ante el calentamiento o el cambio climático de las ciudades.	183
5.57. Institucionalidad: coordinación de esfuerzos entre entes estatales.	183
5.58. Adaptación climática: cantidad las áreas verdes en la ciudad.	188
5.59. Adaptación climática: calidad de las áreas verdes y recreativas en la ciudad.	189
5.60. Adaptación climática: calidad de las áreas verdes y recreativas en la ciudad.	189
5.61. Adaptación climática: Consumo responsable y actitudes orientadas a la sostenibilidad.	191
A.1. Imágenes multiespectrales Sentinel-2 utilizadas en la clasificación a detalle mediante <i>Random Forest</i> . Proyección UTM 16 N (WGS84). Resolución espacial 15 m.	231
A.2. Imágenes multiespectrales Landsat 5 TM utilizadas en el TST y Tasseled Cap. Proyección UTM 16 N (WGS84). Resolución espacial 30 m.	231
A.3. Imágenes multiespectrales Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas en el TST y Tasseled Cap. Proyección UTM 16 N (WGS84). Resolución espacial 30 m.	232
B.1. Propiedades radiativas de materiales naturales. Fuente: (T. Oke, 2002; Sellers, 1965)	233
B.2. Propiedades radiativas de típicos de áreas y materiales urbanos. Fuente: (T. Oke, 2002; Sellers, 1965)	234
C.1. Estaciones meteorológicas	235
C.2. Estaciones meteorológicas IMN: Análisis de completitud de los registros de la variable temperatura.	237

C.3. Estaciones meteorológicas IMN: Análisis de completitud de los registros de la variable humedad relativa.	238
E.1. El Niño y La Niña, años de ocurrencia y sus intensidades (ONI).	279
F.1. Características metodológicas de los instrumentos de encuesta.	286

Lista de figuras

2.1. Densidad de población mundial en el 2015. Generado a partir de los datos GPWv4 del SEDAC, NASA (Elaboración propia).	11
2.2. Las capas urbanas en la pepsfera en el que ocurre el fenómeno de Isla de Calor Urbano (Elaboración propia).	14
3.1. Área de estudio (Escala Regional).	30
3.2. Ciudad de Heredia	31
3.3. Heredia: Plano de la ciudad, 1942.	34
3.4. Heredia: Plano de la ciudad, 1958.	34
3.5. Pirámide poblacional de los distritos en el área de estudio.	36
3.6. Sistema de zonas de vida según Holdridge.	39
3.7. Anomalías del ENOS y registro temporal de las imágenes landsat.	40
4.1. Ubicación de las estaciones meteorológicas.	67
4.2. Propuesta de matriz impacto - incertidumbre	74
5.1. Heredia: Patrón de asentamiento y orientación de la red vial.	80
5.2. Heredia: Evolución de la población entre 1719-2011.	81
5.3. Heredia: Densidad de Población en el año 2011.	82
5.4. Heredia: Densidad de Actividades Económicas en el año 2019.	84
5.5. Heredia: Cobertura de la tierra, 1985.	93
5.6. Heredia: Cobertura de la tierra, 2001.	94
5.7. Heredia: Cobertura de la tierra, 2019.	95
5.8. Heredia: Cobertura de la tierra. 2017	103
5.9. Heredia: Cobertura de la tierra. 2018	104
5.10. Heredia: Cobertura de la tierra. 2019	105

5.11. Heredia, 1985. Tasseled Cap: Brillo, Verdor, Humedad (suelo); con su respectivo histograma. Coordenadas en UTM-16N.	114
5.12. Heredia, 2001. Tasseled Cap: Brillo, Verdor, Humedad (suelo); con su respectivo histograma. Coordenadas en UTM-16N.	115
5.13. Heredia, 2019. Tasseled Cap: Brillo, Verdor, Humedad (suelo); con su respectivo histograma. Coordenadas en UTM-16N.	116
5.14. Índice de disturbio [DI] (1985-2019): Comportamiento espacial y temporal.	119
5.15. Índice de disturbio [DI] (1985-2001): Valores extremos asociados al cambio de coberturas verdes por coberturas antrópicas.	120
5.16. Índice de disturbio [DI] (2008-2019): Valores extremos asociados al cambio de coberturas verdes por coberturas antrópicas.	121
5.17. Determinación de la perturbación espacial y temporal en el DI, por composición RGB entre imágenes.	122
5.18. Evolución del cambio de cobertura de la tierra durante el período 2017 y 2019.	123
5.19. Evolución del cambio de cobertura de la tierra durante el período 1985 y 2019.	124
5.20. Variación de la tendencia de la temperatura.	128
5.21. Estación UNA-Heredia: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.	129
5.22. Estación Santa Lucía: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.	129
5.23. Estación Aeropuerto Juan Santamaría: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.	130
5.24. Estación Santa Bárbara: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.	130
5.25. Estación Belén: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.	131
5.26. Estación Getsemaní: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.	131
5.27. Estación UNA: Velocidad y dirección promedio anual del viento.	134
5.28. Estación ASJO (84169): Velocidad y dirección promedio anual del viento.	134

5.29. Estación 84169 AJSO: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.	135
5.30. Estación 84197 Santa Bárbara: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.	136
5.31. Estación 84205 Getsemaní: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.	137
5.32. Estación UNA Campus Omar Dengo: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.	138
5.33. Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 1985-1989.	140
5.34. Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 1991-2001.	141
5.35. Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 2008-2015.	142
5.36. Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 2016-2019.	143
5.37. Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (1985-2001-2019)	145
5.38. Heredia: Perfiles de Temperatura.	148
5.39. Perfil térmico A: ICU [up] 1985-2001	149
5.40. Perfil térmico A: ICU [up] 2008-2019	150
5.41. Perfil térmico B: ICU [up] 1985-2001	151
5.42. Perfil térmico B: ICU [up] 2008-2019	152
5.43. Perfil térmico C: ICU [up] 1985-2001	153
5.44. Perfil térmico C: ICU [up] 2008-2019	154
5.45. Perfil térmico D: ICU [up] 1985-2001	155
5.46. Perfil térmico D: ICU [up] 2008-2019	156
5.47. Heredia: Diagrama de Hovmöller de la ICU 1985-2019.	158
5.48. Heredia: Análisis de regresión lineal Temperatura - DI (1985-2019)	161
5.49. Probabilidad de incidencia en el TST e DI, según cambio de la cobertura de la tierra en referencia a una cobertura forestal.	164
5.50. Escenario 01: Crecimiento urbano tendencial observado	167

5.51. Escenario 02: Crecimiento urbano incrementado	168
5.52. Escenario 03: Arborización en red vial	169
5.53. Escenario 04: Arborización en centros de cuadra	170
5.54. Escenarios térmicos	175
5.55. Perfil térmico A: Escenarios ICU [up]	176
5.56. Perfil térmico B: Escenarios ICU [up]	176
5.57. Perfil térmico C: Escenarios ICU [up]	177
5.58. Perfil térmico D: Escenarios ICU [up]	177
5.59. Gestión urbana: Iniciativas ante el calentamiento y el cambio climático en las ciudades impulsadas por los Gobiernos locales.	184
5.60. Análisis de los núcleos de las relaciones entre los actores. Los nodos de color azul, indican un comportamiento de satélite a los grupos conformados. 186	186
5.61. Causas del calentamiento en las ciudades	187
5.62. Gestión urbana: desafíos y retos.	190
6.1. Remanente de cultivo de café (2019-12-17).	195
D.1. Estación Meteorológica Universidad Nacional (40101): Serie temporal temperatura 2015 - 2018.	240
D.2. Estación Meteorológica Universidad Nacional (40101): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	241
D.3. Estación Meteorológica ITCR (73123): Serie temporal temperatura 1997 - 2019.	242
D.4. Estación Meteorológica ITCR (73123):Descomposición de serie de tiempo temperatura.	243
D.5. Estación Meteorológica Fabio Baudrit - UCR (84023): Serie temporal temperatura 1985 - 2002.	244
D.6. Estación Meteorológica Fabio Baudrit - UCR (84023):Descomposición de serie de tiempo temperatura.	245
D.7. Estación Meteorológica San Josecito - Heredia (84046): Serie temporal temperatura 1987 - 2010.	246
D.8. Estación Meteorológica San Josecito - Heredia (84046):Descomposición de serie de tiempo temperatura.	247

D.9. Estación Meteorológica Santa Lucía - Heredia (84111): Serie temporal temperatura 1985 - 2001.	248
D.10. Estación Meteorológica Santa Lucía - Heredia (84111): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	249
D.11. Estación Meteorológica San Luis - Heredia (84124): Serie temporal temperatura 1995 - 2002.	250
D.12. Estación Meteorológica Santa Lucía - Heredia (84124): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	251
D.13. Estación Meteorológica CIGEFI (84139): Serie temporal temperatura 1999 - 2019.	252
D.14. Estación Meteorológica CIGEFI (84139): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	253
D.15. Estación Meteorológica IMN - SJ (84141): Serie temporal temperatura 1995 - 2019.	254
D.16. Estación Meteorológica IMN - SJ (84141): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	255
D.17. Estación Meteorológica Aeropuerto Juan Santamaría (84169): Serie temporal temperatura 1997 - 2019.	256
D.18. Estación Meteorológica Aeropuerto Juan Santamaría (84169): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	257
D.19. Estación Meteorológica Iztaru (84181): Serie temporal temperatura 2003 - 2019.	258
D.20. Estación Meteorológica Iztaru (84181): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	259
D.21. Estación Meteorológica Laguna - Fraijanes (84189): Serie temporal temperatura 2003 - 2019.	260
D.22. Estación Meteorológica Laguna - Fraijanes (84189): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	261
D.23. Estación Meteorológica Recope (84191): Serie temporal temperatura 1998 - 2019.	262
D.24. Estación Meteorológica Recope (84191): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	263

D.25. Estación Meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños (84193): Serie temporal temperatura 2008 - 2019.	264
D.26. Estación Meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños (84193): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	265
D.27. Estación Meteorológica Santa Bárbara (84197): Serie temporal temperatura 2001 - 2019.	266
D.28. Estación Meteorológica Santa Bárbara (84197): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	267
D.29. Estación Meteorológica Belén (84199): Serie temporal temperatura 2004 - 2019.	268
D.30. Estación Meteorológica Belén (84199): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	269
D.31. Estación Meteorológica Zapote (84203): Serie temporal temperatura 2007 - 2019.	270
D.32. Estación Meteorológica Zapote (84203): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	271
D.33. Estación Meteorológica Getsemani (84205): Serie temporal temperatura 2009 - 2019.	272
D.34. Estación Meteorológica Getsemani (84205): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	273
D.35. Estación Meteorológica Volcán Poás (84221): Serie temporal temperatura 2011 - 2019.	274
D.36. Estación Meteorológica Volcán Poás (84221): Descomposición de serie de tiempo temperatura.	275
E.1. Índice de oscilación del sur (IOS). Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	277
E.2. Descomposición Serie de tiempo ENOS. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	278
E.3. Oscilación Decadal del Pacífico. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	280
E.4. Descomposición Serie de tiempo POD. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	281

E.5. Oscilación del Atlántico Norte. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	282
E.6. Descomposición Serie de tiempo NAO. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	283
E.7. Oscilación del Ártico. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	284
E.8. Descomposición Serie de tiempo AO. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).	285

Lista de abreviaturas

Términos o indicadores

AC	Autómata Celular
CG	Centro de Gravedad
CVI	Coficiente de Variación Interanual
DI	Disturbance Index (Índice de disturbio)
ENOS	El Niño Oscilación del Sur
GAM	Gran Área Metropolitana
ICU	Isla de Calor Urbano
MAG	Modelo Aditivo Generalizado
MDT	Modelo Digital del Terreno
PPV	<i>Positive Predict Value</i>
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
RR	Riesgo Relativo de cambio
SIG	Sistema de Información Geográfico
TCT	<i>Tasseled Cap Transformation</i>
TST	Temperatura de la Superficie Terrestre
TPV	Tasa Positiva Verdadera
ZCIT	Zona de Confluencia InterTropical

Instituciones

CNE	Comisión Nacional de Emergencias
DCC	Dirección de Cambio Climático
ICT	Instituto Nacional de Turismo
IFAM	Instituto de Fomento y Asesoría Municipal
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo
INVU	Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo
MEP	Ministerio de Educación Pública
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Económica y Política
MINAE	Ministerio Nacional de Ambiente y Energía
SETENA	Secretaria Técnica Nacional Ambiental



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Omar Enrique Barrantes Sotela, con cédula de identidad 503230581, en mi condición de autor del TFG titulado Análisis del efecto del cambio de la cobertura de la tierra en el fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU) en la ciudad de Heredia, Costa Rica.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Omar Enrique Barrantes Sotela

Número de Carné: B79072 Número de cédula: 503230581

Correo Electrónico: obarrantes@gmail.com

Fecha: 29-11-2020 Número de teléfono: 88669739

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Gustavo Barrantes Castillo

OMAR ENRIQUE
BARRANTES
SOTELA (FIRMA)
Digitally signed by
OMAR ENRIQUE
BARRANTES SOTELA
(FIRMA)
Date: 2020.11.29
21:50:05 -06'00'

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La urbanización puede introducir variaciones climáticas, al ser uno de los procesos más evidentes y extremos en el cual las actividades humanas alteran las características de los entornos naturales y las áreas circundantes. Estos cambios afectan la interacción de la superficie terrestre con la atmósfera. Un ejemplo de lo anterior, son las áreas urbanas que son generalmente más cálidas que los espacios naturales, debido a que sus superficies impermeabilizan el suelo, reducen la evapotranspiración y presentan diferencias en las capacidades térmicas, conductividad termal, albedos y emisividad que potencian el calentamiento urbano (Jacobson & Ten Hoeve, 2012). Por consiguiente, se pueden generar importantes alteraciones en los procesos atmosféricos locales y hasta a escalas climáticas sinópticas o globales (Loridan & Grimmond, 2012; Zhao *et al.* 2016).

A medida que ocurre el crecimiento (paulatino o acelerado) de un área urbana, factores como el calor producido por el efecto de la antropización y la contaminación atmosférica, contribuyen a la formación de un clima distinto e introduce una variación al estado natural. Una de las más evidentes manifestaciones de esta alteración es el fenómeno denominado Isla de Calor Urbano (ICU), en la que se reporta una máxima variabilidad de temperaturas entre las centralidades urbanas con respecto a su periferia. Se usa el término de “Isla” debido a que el patrón espacial de la variación de la temperatura superficial es muy similar al de un contorno insular.

El fenómeno de ICU está determinado no solo por el crecimiento urbano, sino también por el cambio de uso de la tierra y la contaminación del aire (Almusaed, 2011; Imhoff *et al.* 2010; Nguyen & Henebry, 2016). Con la formación de micro-climas en diferentes

lugares de la ciudad, usualmente más cálidos, se generan una gran cantidad de impactos negativos en los seres humanos. El estrés térmico que puede producir este fenómeno incide en la salud humana y en el estado de ánimo. Además, una elevada concentración de la contaminación del aire, combinada con altas temperaturas es un catalizador de varias enfermedades respiratorias y fallas cardiovasculares, en grupos vulnerables como niños y adultos mayores. Mientras que en los adultos es frecuente el estrés térmico, la prevalencia de síntomas de cansancio y deshidratación en los lugares de trabajo.

También provoca afectaciones en el sistema urbano, como el incremento del consumo energético asociado al uso extenso de mecanismos de enfriamiento, y que desencadena mayores emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero a la atmósfera. Esto incrementa la vulnerabilidad de las ciudades al cambio climático.

En Latinoamérica las aglomeraciones urbanas, han tomado un gran interés en el estudio climático urbano asociado al tema de ordenamiento territorial. Se considera que el proceso de urbanización no es simplemente la concentración demográfica en centros urbanos o ciudades. Es un proceso que promueve la expansión de las necesidades de consumo. Por consiguiente, las tres facultades principales de la propiedad: uso (*ius utendi*), goce (*ius fruendi*) y disfrute (*ius abutendi*) están sujetas a la dinámica de consumo y de producción. En el que los patrones de las coberturas de la tierra deben estructurarse según aquellos espacios geográficos que presentan las mejores condiciones de soporte para una actividad. Un aspecto importante de resaltar es que estos temas son parte integral de la discusión de las ciudades sostenibles y declarados como tal por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2018)¹. De tal forma, en la que si no existe una estrategia de organización del uso y ocupación del territorio es prácticamente imposible fomentar un óptimo desarrollo de las actividades humanas.

En la actualidad, la identificación del fenómeno ICU se usa como un indicador de sostenibilidad de las ciudades, ya que ofrece información relevante del tamaño de las aglomeraciones urbanas, niveles de contaminación atmosférica y tasa de cambio o crecimiento de las actividades humanas. Es importante mencionar, que así como cada ciudad presenta condiciones únicas y específicas en sus características de funcionalidad y configuración espacial; así es el patrón único en la distribución de las islas de calor. En gran medida, la ocupación incoherente del suelo, la construcción desorganizada de

¹Objetivos 3, 6, 7, 9, 11, 13 y 15 del Desarrollo Sostenible.

infraestructura y la insuficiencia o carencia de servicios básicos, tiene grandes implicaciones en la configuración espacial (forma y tamaño) de las ciudades, lo que no hace más que introducir disfuncionalidades al sistema urbano, como el caso específico del fenómeno de ICU (Schmidt & Buehler, 2007; Warren, 2009).

Por lo tanto, la integración de las acciones humanas y su relación con el cambio climático se visualiza como un acercamiento estratégico desde el punto de vista territorial. En el que las propuestas de planificación urbana deben desarrollarse desde una concepción de sostenibilidad al reducir el impacto del desarrollo humano sobre el ambiente y los recursos naturales. Según Ezquiaga Domínguez (2010) estimar el comportamiento térmico sobre el medio urbano se apoya en una creciente precisión de las previsiones climáticas. Estas deben considerar e integrar los factores naturales e incidencia de las actividades humanas asociadas a parámetros como el aumento de la temperatura, disminución de la precipitación y posible impacto en centros urbanos con aglomeraciones significativas de población.

En Costa Rica, son escasos los estudios climáticos en función de incentivar la sostenibilidad de los territorios. Esto justifica el desarrollo de una investigación al respecto. Además, las propuestas de planificación urbana adolecen de criterios que mejoren las condiciones de adaptación y mitigación al Cambio Climático. Es así como se propone estudiar la ciudad de Heredia. La cual reúne ciertas condiciones que propician el estudio de la Isla de Calor Urbano (ICU).

Heredia presenta la segunda tasa de mayor crecimiento urbano en la GAM, su proximidad con respecto al anillo de contención urbana favorece la presencia de una zona periurbana. También presenta espacios verdes intermitentes y amplios sectores impermeabilizados en asfalto y concreto, que pueden ser comparados en su factor térmico. Además, es una de las aglomeraciones urbanas de la GAM en las que se han registrado altos niveles de contaminación del aire (Herrera, 2011).

Por lo tanto, se espera que los resultados de esta investigación no solo beneficien a los habitantes del centro urbano de Heredia, sino que también puedan ser útiles para otros procesos de ordenamiento territorial en Costa Rica. Al generar insumos que puedan ser incorporados en la planificación territorial y urbana.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

1. Analizar la relación del cambio de cobertura de la tierra en el desarrollo del fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU) en la ciudad de Heredia, como un insumo para la planificación urbana sostenible del territorio.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Determinar los principales patrones de cambio de cobertura de la tierra que contribuyen en el fenómeno de ICU en el área de estudio.
2. Analizar las características térmicas y el patrón de distribución espacial de la ICU en la ciudad de Heredia.
3. Formular lineamientos estratégicos de planificación urbana sostenible, a partir de la elaboración de escenarios y tendencias que consideren el cambio de la cobertura de la tierra y la variación de la ICU.

1.3. Antecedentes

Los estudios climáticos urbanos tienen una gran relevancia y actualidad, pero no son novedosos. En 1833, Luke Howard fue el primer investigador en reportar que la temperatura del aire en una ciudad es más alta que en las áreas rurales que la rodean (Gartland, 2008). También, Emilien Renou en 1855 identifica un calentamiento anómalo del centro de París con respecto a su periferia. Sin embargo, el primero en discutir el diferencial térmico que ocurre en las ciudades mediante el término islas de calor urbano (ICU) fue Manley (1958). A partir de ese momento se han realizado grandes esfuerzos alrededor del mundo en estudiar el fenómeno (T. Oke, 2002).

Según Martínez (2014), ciudades de todos los continentes cuentan con un estudio sobre su isla de calor, entre las que destacan en Europa: París (Dettwiller, 1970), Plymouth (Millward, 1976), Glasgow (Hartley, 1977), Roma (Colacino, 1978-1982), Utrecht (Van Duk, 1980), Cracovia (Morawska y Cebulak, 1981), Viena (Bernhofer, 1984). En Norteamérica: Nueva York (Bornstein, 1968-1972), Montreal (Oke, East y Maxwell, 1971 y 1975), Ciudad de México (Jáuregui, 1973). Mientras que en Sudamérica: Río de Janeiro (Gallego, 1972), Sao Paulo (Lombardo, 1985). También en Asia: Hiroshima (Shitara, 1957), (Fukuoka y Nobuyuki, 1980), Tokyo (Kayane, 1964), (Sasakura, 1965) y (Nishizawa, 1979), Delhi (Bahl y Padmanabharmurty, 1979 y 1982) y finalmente en Africa: Nairobi (Okoola, 1979).

Tal y como menciona Verón (2010), en Latinoamérica pueden identificarse proyectos de investigación sobre el tema de islas de calor urbano. Destaca los trabajos realizados por Capelli de Steffens y Píccolo (2001), que estiman la forma y la intensidad de la isla de calor en la ciudad de Temuco, Chile. Mientras que Ferrelli *et al.* (2016) estudian ciudades argentinas y observan que las mediciones de intensidad son muy congruentes con la tendencia mostrada en otras ciudades del mundo. Según Guill (2016), en Ecuador se realizan estudios de ICU en ciudades como Manta, Esmeraldas y Guayaquil. Contreras *et al.* (2008), también expone el caso en Ciudad Juárez, México.

En Costa Rica, el tema ha sido muy poco tratado y solo se destaca un primer esfuerzo en la investigación de Arce y Acevedo (2014), en la que se trata de correlacionar el comportamiento térmico de la superficie de las coberturas del suelo, mediante una metodología de transectos. Es así como, en Costa Rica los estudios climáticos están

más enfocados en el sector agropecuario y en su mayoría se desarrollan de una manera muy descriptiva.

A pesar de la gran cantidad de estudios relacionados a la temática, ¿por qué se continúa estudiando este fenómeno? Existen varias razones que se originan de la premisa que los entornos urbanos son ecosistemas dinámicos en constante cambio y expansión. La variada composición urbana y la complejidad atmosférica asociada a las ciudades dificultan el registro uniforme de la temperatura y la determinación de los balances de energía asociados a los usos de la tierra. Además, la estructura urbana está compuesta de tipos de diversos materiales y elementos como cuerpos de agua, áreas verdes, jardines, pastos, áreas pavimentadas o de concreto. Cada uno de estos materiales tiene diferentes propiedades reflectivas y térmicas, que a su vez interactúan con respecto a otros. Esto dificulta establecer los intercambios energéticos y de advección en una escala de detalle apropiada, y que al analizar su patrón de distribución espacial hace muy particular su estudio.

Existen varias maneras de abordar el estudio de ICU, las variables más utilizadas en este tipo de estudios son la temperatura del aire y el de los materiales presentes en la superficie (Castán Broto & Bulkeley, 2013; Du *et al.* 2016; Fan *et al.* 2016; Offerle *et al.* 2007; T. Oke, 2002; Shen *et al.* 2013). Además, es común el uso de un enfoque cuantitativo, en el que se desarrollan modelos físicos y de correlación debido a las propiedades físicas de los diversos tipos de superficies urbanas son factores importantes que determinan la temperatura de la superficie de la tierra en las áreas urbanas. Estas van desde el color de la superficie, el factor de vista del suelo², la geometría y la transmitancia (Alfrahhat, 2015). En la literatura se destaca el papel que desempeñan los Sistemas de Información Geográfica (SIG), programas estadísticos (R, Matlab, Octave y SPSS) y de modelo de microclima en 3D para el comportamiento de materiales (ENVI-met) en el análisis del clima urbano.

El uso de diversas metodologías de análisis del fenómeno y las diversas escalas empleadas en los estudios dificultan la comparación entre casos. En ese sentido los esfuerzos de Menon *et al.* (2010) no deben pasar desapercibidos, ya que propusieron un modelo de superficie terrestre para calcular el cambio en la temperatura de la superficie debido al cambio de todos los albedos urbanos por 0.1 y un enfriamiento estimado. Sin embargo, no calcularon la respuesta climática con un modelo atmosférico. También, Jacobson y Ten Hoeve (2012) menciona varias propuestas interesantes para minimizar la influencia de las

²Es la relación entre la radiación recibida por una superficie plana y la radiación hemisférica completa.

islas de calor en las ciudades. Entre las más discutidas y empleadas en el diseño urbano son el uso de materiales naturales o con un comportamiento amistoso con el ambiente, como la utilización de colores reflectivos o de concreto permeable.

Por lo tanto, a medida que los efectos de la urbanización continúan motivando cambios biofísicos a escala global, las consecuencias resultantes de las nuevas condiciones climáticas en las ciudades deberán ser consideradas e implementadas para propiciar su adaptación. Este será uno de los grandes retos para alcanzar la sostenibilidad urbana.

1.4. Justificación

En el caso de Costa Rica, González y Saenz (1996) señalan que el crecimiento del Gran Área Metropolitana (GAM) y los centros urbanos no tienen un ordenamiento urbano lógico acorde a sus necesidades y actividades. En consecuencia, se considera un crecimiento acelerado, que principalmente ocurre a expensas del sector rural o de las áreas de protección agrícola especial.

Además, una de las principales críticas a las propuestas de ordenamiento del territorio en el país, tanto a nivel regional como local, es la carencia del análisis de los efectos climáticos y su impacto en las actividades humanas. El tema se aborda de manera general en diagnósticos, en el que se describe mediante un resumen las condiciones climáticas, sin considerar las variaciones de los datos en periodos mayores de 30 años y su comportamiento en intervalos cortos de tiempo. También, no se realiza un análisis integrado de otros elementos del sistema urbano como el transporte, la configuración y el diseño urbano. Se adolece de una apropiada aplicación del componente climático en las propuestas de ordenación urbana y territorial. Además, las políticas muchas veces son discursos sin contenido práctico, que no se logran vincular efectivamente en una normativa o reglamentación urbana (Álvarez-Vergnani, 2015; Chaverri-Polini, 2014).

Según el Informe del Estado de la Nación (Hernández-Sánchez, 2014), sobre el tema de crecimiento urbano se determina que las áreas construidas en la GAM se han expandido considerablemente entre 1986 y el año 2010. Muestra de lo anterior es que en 1986 el área urbana de la GAM era cercana a las 20.986 hectáreas, mostrando un incremento en alrededor de 6.058 hectáreas para el año 1997 (27.044 ha) y de 6.043 para el año 2010 (33.088 ha), lo cual representa un crecimiento absoluto cercano al 23 % en ese periodo analizado. Se indica

que el crecimiento urbano ocurrió principalmente en los bordes de las áreas construidas existentes. Además, se sugiere que la GAM creció principalmente mediante desarrollo de espacios vacíos en los bordes o dentro de áreas urbanas consolidadas, y no tanto mediante la dispersión de desarrollos urbanos lejanos del área construida existente.

Sin embargo, la GAM es más dispersa y menos densa que otras ciudades latinoamericanas, aunque el crecimiento del área construida (1986 - 2010) ha sido más compacto que el conjunto del área construida del periodo inicial (1986) (Hernández-Sánchez, 2014; Pujol-Mesalles & Pérez-Molina, 2012). Esto se asocia a un fuerte crecimiento de las viviendas urbanas en la GAM. En 1963 existían cerca de 64.500 viviendas urbanas alcanzando poco más de 600 000 en el 2011, con tasas de crecimiento mayores a las poblacionales. El proceso de crecimiento demográfico de la subregión, aunado al económico, necesitan y presionan por una mayor cantidad y calidad de tierras para localizar las nuevas actividades residenciales y productivas. Este proceso de crecimiento urbano está determinado por al menos tres elementos: a) la normativa (legislación general y específica); b) la política y c) el mercado (Mora-Ramírez, 2006).

Sin embargo, ante la ausencia y mala definición de regulaciones locales y la debilidad de las regulaciones regionales, así como políticas, en la GAM, el mercado constituye el operador básico de la expansión urbana. El mercado de tierras en esta región se gestiona en su mayoría por medio del sector inmobiliario (Hernández-Sánchez, 2014; Pujol-Mesalles & Pérez-Molina, 2012). Esto supone que el ritmo y la forma en la que ocurre el crecimiento urbano en la GAM no es sostenible en el tiempo, sin una adecuada planificación o intervención del Estado.

Estudios realizados por ProDUS-UCR (2007) y PRUGAM (2008) indican algunas características negativas del sistema de transporte. Donde su desarrollo está en función del vehículo automotor particular, a pesar de que el 76% de la población utiliza transporte colectivo. Existe una concentración del transporte en las centralidades urbanas que traen molestias de ruido y contaminación por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Según Herrera (2011) la flota vehicular es la principal fuente de contaminación atmosférica en Costa Rica, por lo que es necesario el ordenamiento vial en las ciudades. Las emisiones vehiculares aportan un 75% de la contaminación del aire, un 23% es contribución de la actividad industrial y energética, y el restante 2% es generado por otras fuentes. Otro factor fundamental son los vientos, que juegan un papel clave tanto a nivel de concentración

del contaminante como su distribución en el espacio.

Además, un diseño de la ciudad ineficiente se potencian situaciones como la contaminación ambiental del aire y la impermeabilización del suelo. Estos factores a su vez afectan el ciclo hidrológico y posteriormente el microclima de la ciudad. Paulatinamente la población es afectada por los cambios en las condiciones climáticas como el aumento de la temperatura, que afectan la salud y subsecuentemente aumentan el consumo energético.

Al analizar estos factores la centralidad urbana de Heredia reúne ciertas condiciones que justifican el estudio de la ICU. Es el área urbana con la segunda tasa de mayor crecimiento urbano en la GAM. Su proximidad con respecto al anillo de contención urbana favorece la ocurrencia de diversos procesos de gentrificación y la expulsión de habitantes del centro de la ciudad. También presenta espacios verdes intermitentes y amplios sectores impermeabilizados en asfalto y concreto, que pueden ser comparados en su factor térmico. Además, es una de las aglomeraciones urbanas de la GAM en las que se han registrado altos niveles de contaminación del aire³ (Herrera, 2011).

Por lo tanto, se espera que los resultados de esta investigación no solo beneficien a los habitantes del centro urbano de Heredia, sino que también puedan ser útiles para los procesos de ordenamiento territorial en Costa Rica. Al generar insumos que puedan ser incorporados en la planificación territorial y urbana.

La presente investigación busca responder las siguientes preguntas:

¿Cómo los cambios de cobertura de la tierra en la ciudad de Heredia inciden en el patrón de distribución de la isla de calor urbano?

1. ¿Cómo es la distribución de la temperatura superficial en el área de estudio?
2. ¿Cuáles procesos de cambio de cobertura de la tierra propician un incremento en el fenómeno de isla de calor?
3. Sí las tendencias de cambio de la cobertura natural a antrópico incrementan, ¿Qué podría suceder en el componente climático del sistema urbano?

³Estación ubicada en el Edificio de Rectoría de la Universidad Nacional.

Capítulo 2

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. La Ciudad

Para el año 2020 pueden existir más de 500 ciudades con más de un millón de habitantes, entre las más importantes¹ destacan Tokyo, Shangái, Yakarta, Delhi, Seúl, Ciudad de México, Nueva York y Sao Paulo. Por primera vez en la historia, la cantidad de habitantes en las zonas urbanas sobrepasarán en números a los habitantes de las zonas rurales (Angel *et al.* 2011; Ranagalage *et al.* 2017). Además, se espera que un alto porcentaje del crecimiento natural de la población mundial sea absorbido por las áreas urbanas con menor desarrollo en el mundo (Figura 2.1). Se establece entonces, que la urbanización es un proceso cultural primario característico de la evolución de las sociedades humanas, y por tal razón debe ser abordado como un factor clave para alcanzar el tan deseado desarrollo sostenible.

Debido a la complejidad de los espacios urbanos, en términos de desarrollo de las relaciones sociales, y las diferentes actividades económicas y el rango de servicios que son ofrecidos a sus residentes, ha provocado que definir el concepto de ciudad sea una tarea ardua e incluso hasta controversial por parte de los especialistas e investigadores. En un enfoque determinista y simple, la ciudad es definida como un espacio urbano delimitado en el que se concentra y habita una población (X. Wang, 2012). Mientras que el concepto de ciudad que ofrecen Guedes *et al.* (2009) desde el enfoque global y de la dependencia, consiste en un sistema de elementos socioeconómicos dentro de un sistema mundial que estimula el desarrollo económico y el mejoramiento técnico. A su vez Folch (2003), define la ciudad como un sistema de flujos materiales y energéticos, regido por la información y sometido a una escala ética de valores socioeconómicos. Por su parte Bettini (1998),

¹Con respecto a la cantidad de habitantes.

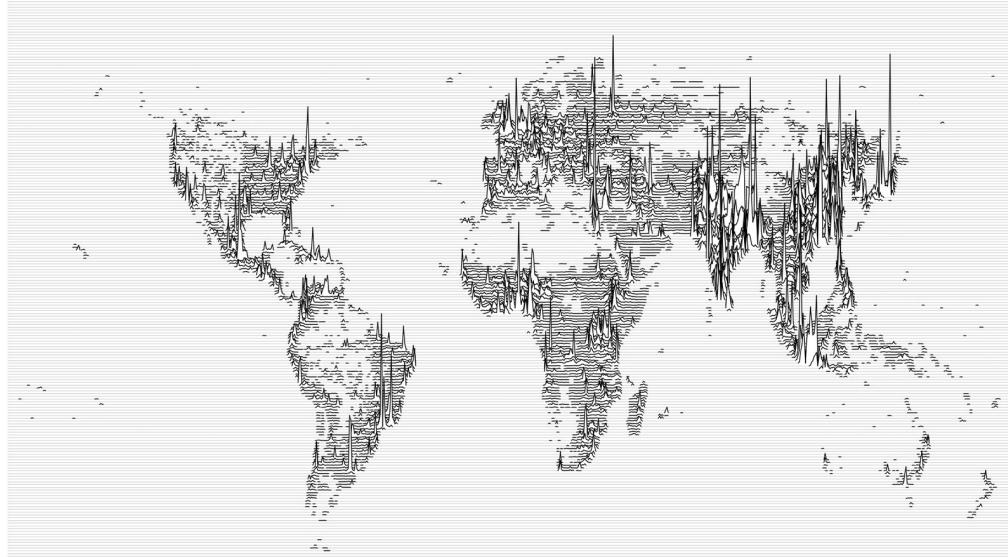


FIGURA 2.1: Densidad de población mundial en el 2015. Generado a partir de los datos GPWv4 del SEDAC, NASA (Elaboración propia).

Morales-Cerdas *et al.* (2018), Odum (1971), ofrecen una definición ecológica de la ciudad como un ecosistema heterótrofo incompleto, dependiente de amplias zonas limítrofes para la energía, los alimentos, las fibras, el agua y otros materiales. Por lo tanto, es posible decir que sí la ciudad es un artificio natural de la especie humana, es el sistema ecológico y social que constituye el ámbito existencial de buena parte de esta. Esta será la definición utilizada en la investigación.

2.1.1. La Ciudad y las aglomeraciones urbanas

Una de las principales diferencias entre el concepto de ciudad y una aglomeración urbana, es que la primera es una localidad definida según los límites legales/políticos y poseer un estatus urbano administrativamente reconocido que generalmente se caracteriza por alguna forma de gobierno local. Mientras que una aglomeración urbana se refiere a la población de facto contenida dentro de los contornos de un territorio contiguo habitado en los niveles de densidad urbana sin tener en cuenta los límites administrativos. Por lo general,

incorpora a la población de una ciudad o un pueblo, más que en las áreas suburbanas que se encuentran fuera, pero que se encuentran adyacentes a los límites de la ciudad.

Es así como las ciudades están asociadas a la jurisdicción institucional local como las municipalidades, y en varios casos también pueden ser referidas como áreas metropolitanas, que están compuestas por espacios urbanos continuos dentro de un sistema funcional estructural, como el caso de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

2.1.2. Crecimiento urbano

Desde un enfoque económico, una aglomeración urbana ocurre por la concentración geográfica y social del excedente del producto generado de las actividades humanas. La urbanización es un fenómeno de clases en los que los excedentes han sido extraídos de algún lugar y de alguien, y son controlados por otros (Harvey, 2013). Por lo tanto, la urbanización es necesaria para absorber los excedentes de capital que produce perpetuamente el sistema económico, y explica su crecimiento y dinámica.

Bajo esta concepción las aglomeraciones urbanas representan los espacios de mayor contradicción del desarrollo humano, con un costo alto. En especial cuando las zonas metropolitanas avanzan de manera rápida apropiándose de las pequeñas localidades y espacios de su periferia (Santos-Cerquera *et al.* 2013; X. Wang, 2012). Mientras más rápido se expanden las ciudades, requieren de un elevado nivel de consumo de recursos para producir bienes y servicios necesarios para su propia subsistencia (Frenkel & Ashkenazi, 2008). Es reconocido ampliamente que el crecimiento urbano (*urban sprawl*), es una característica no deseada en la estructura de la ciudad, debido a las desventajas económicas, sociales y ambientales que implica en la funcionalidad del tejido urbano (Rubiera Morollón *et al.* 2016).

Una evidencia interesante, es que al observar las curvas logísticas de crecimiento de la producción capitalista a lo largo del tiempo son en general similares a las curvas logísticas de la urbanización de la población mundial.

2.2. El clima en las áreas urbanas

El clima de una ciudad se determina por múltiples factores y variables, entre los que destacan su ubicación geográfica, hipsometría, cobertura vegetal, cuerpos de agua, tipo de materiales que componen las estructuras, disposición de la infraestructura, por citar algunos Gartland (2008). A medida que una aglomeración urbana crece y se desarrolla por las actividades humanas, nuevos factores como el calor producido por el hombre y la contaminación del aire, tienden a modificar el clima local de la ciudad y contribuyen a la formación de un clima urbano diferente.

Otro de los factores que se le atribuyen a las variaciones en el clima local de un sector urbano, son las concentraciones de los habitantes y las emisiones de calor producido por las actividades humanas. También el tipo de materiales predominantes en el diseño y construcción de materiales como el metal, hormigón, asfalto, ladrillo, madera y rocas provoca que la temperatura aumente en los centros más compactos, en comparación a otros espacios donde la continuidad urbana se ve de manera más intermitente y se va atenuando a medida que se aleja del centro.

La elevada densidad de edificaciones o bien una elevada aglomeración de infraestructura², que se manifiesta de manera horizontal y vertical, consume de manera acelerada el espacio aún desocupado y tiende a modificar la velocidad del viento y su dirección. Esto da lugar a diversas corrientes y tipos de circulación de aire local, que se denominan viento o brisa urbana.

Se sabe que el clima urbano se ven afectado directamente por la disminución de la cobertura vegetal del suelo y la construcción de infraestructuras que por su diseño y materiales incrementan el almacenamiento de calor. Lo cual es un indicador de los procesos y normativas que intervienen en el desarrollo urbanístico y que implica la carencia de principios de una construcción sostenible. También, denota los intereses del sector inmobiliario y el cual se le considera como un actor que impacta sobre el medio económico, ecológico y social.

²En el caso de Heredia se presenta una altura predominante de las estructuras de 1 piso, con casos aislados de 2 a 3 pisos.

2.2.1. Isla de Calor Urbana

El efecto de Isla de Calor Urbana (ICU) (*urban heat island* - UHI), se refiere al fenómeno en el que la centralidad de una determinada área urbana es más cálida³ que en su zona periférica no urbanizada (Cochran, 2014; Fan *et al.* 2016). De manera tradicional se cuantifica como la diferencia termal entre la temperatura del aire a una altura de la superficie de 1.5 m ($T_{1.5m}$) de una estación meteorológica ubicada en una región urbana con respecto a una estación meteorológica en la zona periférica (Jin, 2012). Por la anterior característica, es necesario definir de manera precisa el límite de la aglomeración urbana y su área inmediata mediante un mapa de cobertura de la tierra (Zhao *et al.* 2016).

El fenómeno de isla de calor urbano presenta dos características claves: 1. La ($T_{1.5m}$) urbana es mayor a la ($T_{1.5m}$) periférica. 2. El máximo efecto de la ICU se presenta durante la noche o en las primeras horas de la mañana. Se indica por varios autores que la ICU no solo corresponde a un fenómeno térmico, sino que también es una fuerza orientadora para el efecto de flujo inducido por la brisa o la circulación del viento, especialmente bajo la influencia de un débil sistema sinóptico. Las ICU pueden variar en su intensidad de un área a otra debido a varios factores. Según Taha (2017) las ICU en promedio oscilan entre 0.5°C a 3°C y en casos atípicos puede alcanzar 5°C en las regiones tropicales.

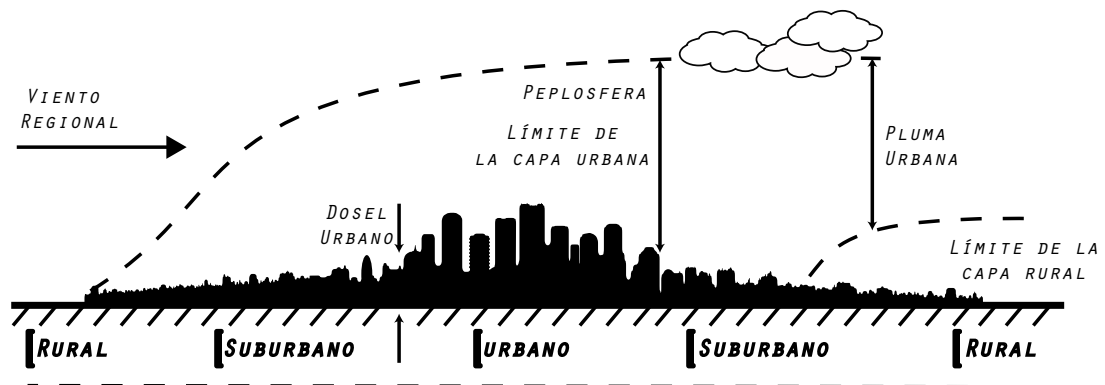


FIGURA 2.2: Las capas urbanas en la peplosfera en el que ocurre el fenómeno de Isla de Calor Urbano (Elaboración propia).

Según Gartland (2008), las islas de calor exhiben cinco características comunes:

³Se considera la temperatura del aire o de las superficies.

1. Al comparar las áreas rurales sin desarrollar, la ICU es por lo general más cálida, con distintos patrones diarios en su comportamiento. Suelen ser más calientes, en relación con las áreas rurales que rodean la ciudad, después de la puesta del sol, y más frías después del amanecer. La temperatura del aire en la capa del dosel urbano, debajo de los árboles y edificios, pueden alcanzar una diferencia de hasta 6° que con respecto al aire en las áreas rurales. A esa diferencia de temperaturas se le conoce como la intensidad de la ICU y se usa para medir su efecto.
2. La temperatura del aire es impulsada por el calentamiento de las superficies urbanas, ya que muchas superficies construidas por el hombre absorben más calor del sol que la vegetación natural.
3. Las diferencias en la temperatura del aire y de la superficie aumentan cuando el tiempo atmosférico es calmo y con el cielo despejado.
4. Las áreas con menor cobertura de vegetación y mayor desarrollo estructural tienden a ser más cálidas, y las islas de calor tienden a ser más intensas a medida que las ciudades crecen.
5. Las ICU también muestran un aire más cálido en el límite de la atmósfera baja o peflosfera⁴ (*Boundary layer*), la cual es la capa de aire que alcanza hasta 2000 metros de altura y se dice que es afectada por las inmediaciones de la superficie terrestre. Las ICU a menudo crean grandes columnas de aire más cálido sobre las ciudades, y las inversiones de temperatura causadas por las islas de calor son frecuentes.

2.2.2. Medición y modelado de las ICU

Según Gartland (2008), Liu y Zhang (2011), Menon *et al.* (2010), T. Oke (2002, 2006), la manera ideal de medir en cualquier ciudad la ICU, sería al examinar los patrones climáticos regionales considerando la ciudad y removiendo la ciudad de su ubicación. Debido a que lo anterior no es factible, se proponen una serie de metodologías para establecer el efecto del clima urbano.

1. **Estaciones fijas:** El método más simple y práctico de estudiar las ICU es comparando la información meteorológica existente de dos o más ubicaciones fijas. Es necesario disponer de datos horarios, diarios, mensuales y anuales. Los datos de las estaciones

⁴Sección más baja de la troposfera.

se usan comparando un par de estaciones, una localizada en el área urbana y otra en el área rural (Imhoff *et al.* 2010; T. R. Oke, 1973). También es posible estudiar con múltiples estaciones meteorológicas los impactos regionales, así como evaluar la tendencia y patrón temporal de la ICU, a medida que la región se urbaniza. Al usar este método es necesario escoger de manera inteligente la locación de las estaciones. También se recomienda tipificar las prácticas constructivas de las áreas urbanas, mientras que en las áreas rurales deben estar rodeadas de coberturas naturales.

Es común, usar una estación meteorológica ubicada en el centro administrativo o comercial de la ciudad y otra fuera de esta. Varias investigaciones usan las estaciones localizadas en los aeropuertos⁵ como puntos externos de la ciudad, debido a que son mantenidas de manera constante (Tasumi *et al.* 2008). Lo ideal es que la ubicación de los instrumentos esté en el dosel urbano⁶, al nivel del suelo (1.5 - 2 m), lo cual no es una característica común de las estaciones meteorológicas, en la que los instrumentos se ubican hasta una altura de 10 m sobre el nivel de suelo.

2. **Transectos móviles:** Debido al tamaño y forma de las ciudades, y la baja densidad espacial de los datos climáticos de las estaciones fijas, existen vacíos de información en áreas consideradas críticas o de interés al estudio de las ICU. De esta manera se propone la configuración temporal de estaciones móviles para registrar la información en ciertas localizaciones fijas.

Si todavía, no se cuenta con la capacidad económica y temporal para este tipo de configuración, una alternativa viable es el método de transectos móviles. Este método consiste en establecer una ruta que atraviesa una región o territorio, y se detiene a medir los datos del tiempo climático en una serie de ubicaciones previamente definidas (Martínez, 2014). La selección del medio de transporte en el que desplaza el instrumental varía según el tamaño de la ciudad. Las mediciones pueden llevarse a cabo durante el día o la noche, aunque es más frecuente el horario nocturno debido al poco tráfico y es el momento en el que se manifiesta la mayor intensidad de la ICU. El registro de datos debe ocurrir en condiciones de tiempo calmo y sin condiciones

⁵La práctica de usar la estación meteorológica de los aeropuertos no es recomendada por los investigadores, debido a que las condiciones elegidas para la ubicación de un aeropuerto no son las más apropiadas para la medición de la ICU.

⁶El dosel urbano se define como el volumen de aire debajo del techo de las estructuras o de las copas de los árboles.

de nubosidad.

Algunas limitaciones de esta metodología son la diferencia temporal de las mediciones, las cuales deben ajustarse a una línea base. Otra dificultad es el costo asociado para realizar mediciones simultáneas entre las rutas y puntos escogidos. También, deben tomarse las medidas necesarias para proteger el instrumental de fuentes de calor y de enfriamiento. Mientras que en cada medición debe considerarse el tiempo de espera para que el instrumental alcance su punto de equilibrio, y de esa forma garantizar una lectura válida. La calibración en el terreno de los instrumentos es otra consideración importante.

3. **Sensores remotos:** Las metodologías anteriores son por lo general usadas para el monitoreo de la temperatura del aire alrededor de la ciudad (Gartland, 2008). Mientras que los sensores remotos se utilizan para determinar la temperatura de la superficie, así como otras características entre las que destacan el tipo de cobertura, emisividad y reflectividad de los materiales y sus respectivos albedos (Kala *et al.* 2014). Debido a sus características pueden tomar una escena o fotografía de la energía radiada visible e invisible (Bosque *et al.* 1991; Chuvieco, 1996). En el caso de las imágenes satelitales, debido al desplazamiento orbital del satélite estas no registran de manera continua la información durante el día, sino que lo hacen solo durante el paso del sensor por el área de estudio. Si bien tienen un limitado periodo de registro temporal, tiene una gran ventaja de visualizar las temperaturas sobre grandes extensiones de superficie.

Se debe tener en consideración, que estas solo ofrecen una vista de las temperaturas de las superficies desde una perspectiva a vista de pájaro (*bird view*), que por lo general no considera las temperaturas verticales de las estructuras y debajo de los árboles. La selección de las imágenes también es fundamental, ya que no deben contener nubosidad y es necesario investigar si durante el registro de la imagen no existían condiciones adversas.

La instrumentalización de los sensores remotos se basa en mediciones de cinco longitudes de ondas diferentes, con las cuales es posible determinar qué tan calientes o fríos están los elementos que componen la superficie terrestre. La elaboración de perfiles térmicos es una fortaleza de la metodología, por el registro continuo de datos. En la actualidad, debido a una mayor disponibilidad de sensores y catálogos de firmas

espectrales, existe la posibilidad de generar series espaciotemporales. Incluso con la accesibilidad y mejora de la autonomía de la tecnología de los vehículos de vuelo no tripulado (UAV) o mejor conocidos como *drones*, pueden popularizar el uso de los sensores remotos para aplicaciones climáticas.

4. **Sensores verticales:** Según T. Oke (2006), cuando se está ante grandes superficies urbanas la afectación a la troposfera en la extensión de la capa urbana es más evidente, y tiende a generar turbulencia entre los 1 - 1.4 km de altitud. Esto puede suponer un riesgo para las aeronaves. Otra utilidad es relacionar el ICU con la contaminación atmosférica. Ante esta posibilidad, se usan globos sonda con instrumentos meteorológicos para medir a diferentes altitudes la temperatura de las masas de aire, distribución de aerosoles y otro tipo de particulado (Jacobson & Ten Hoeve, 2012). Los globos son liberados en zonas urbanas y rurales, mientras que los datos son enviados por ondas de radio. Esta metodología es por lo general utilizada en complemento de otras, para entender el efecto horizontal y vertical de las ICU.
5. **Balances energéticos:** Propone la medición del flujo de la energía que entra y sale de una superficie. Se considera un método de difícil implementación en pequeñas escalas, pero apropiado y exacto para escalas grandes (Jacobson & Ten Hoeve, 2012; Slater, 2010). Se dice que ofrece un mejor entendimiento del origen de la ICU. Se usa como referencia teórica la primera ley de la termodinámica, en la que se establece que la energía que entra y sale de una superficie debe conservarse. En el caso de la superficie terrestre la ecuación se conforma de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Convección} + \text{Evaporación} + \text{Energía almacenada} &= \\ \text{Calor antropogénico} + \text{Red de radiancia} & \end{aligned} \quad (2.1)$$

Debido a sus características, se involucra una gran cantidad de equipo e instrumental para las mediciones del flujo de energía. Se reconoce su uso en el estudio de edificaciones o estructuras, con el propósito de mejorar las condiciones de diseño y de habitabilidad (Brown & Southworth, 2008).

En todos los casos es necesario el uso de métodos numéricos y estadísticos para el análisis de los datos y poder modelar el comportamiento de la ICU. A su vez Gartland (2008), sugiere el uso combinado de las técnicas de medición propuestas para determinar

de forma efectiva la ICU, aunque esto tiende a aumentar los costos de la investigación. Para el caso de esta investigación se usará principalmente el método de sensores remotos, acompañado de información secundaria disponible y complementaria que se generó de otros métodos aquí mencionados.

2.3. El Desarrollo Sostenible en las ciudades

La definición de desarrollo sostenible que se utiliza en la investigación es la definida por la Maestría en Desarrollo Sostenible (2000) y que establece que:

“Es un proceso de desarrollo social y económico que se sustenta en el manejo y la conservación de los recursos naturales, con equidad social, que respeta a la diversidad cultural y fortalece la participación ciudadana, garantizando la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras”.

Es importante señalar, que Maurice Strong afirmó que la batalla de sostenibilidad se ganará o se perderá en las ciudades (Wackernagel, 1996). Una gran cantidad de profesionales de diversas disciplinas están de acuerdo en afirmar que el actual modelo de ciudad es ecológicamente insostenible y es socialmente injusto. La ciudad es un espacio logísticamente fundamental, pero biológicamente poco productivo. Es un espacio que importa recursos como energía y alimento de las áreas periféricas, y exporta productos residuales a las áreas rurales. Es decir, se le asigna un rol como agente contaminador, pero que no puede desligarse del sistema territorial en el que está inmerso. En la actualidad el desarrollo de los espacios urbanos, no solo limitan el desarrollo de los espacios rurales, también cada vez lo disminuye (Tello, 1996).

Es así como predomina un modelo, que define a las personas y la naturaleza como un recurso al servicio del beneficio privado, que se valoriza y se deprecia con el tiempo. Los debates sobre el cambio climático y los planes de acción, continúan en la actualidad ignorando los factores más importantes que contribuyen al problema de fondo como la población excesiva, altos niveles de consumo, e inequidad; así como también, las causas que inhabilitan el lidiar con el mismo, como las democracias disfuncionales, capitalismo salvaje, ecologías sociales enfermas (Wheeler, 2010).

Para profundizar sobre el tema es importante entender como diferentes profesiones que tienen que ver con la cosa urbana no solo han fallado para responder a la crisis en ciernes, sino como activamente han contribuido a generarla. Dado que es posible asociar una conexión entre el concepto de desarrollo que prevalece en el consciente socioeconómico predominante, con respecto a la forma de las ciudades, los patrones de asentamiento y su impacto ambiental. Para este ejercicio académico, se tomará como intervalo temporal de análisis los años de 1880 a 2020; que corresponden al desarrollo de la revolución industrial e implementación del modelo capitalista. También, asociados al incremento de la temperatura en el planeta (Pachauri *et al.* 2014; Randall *et al.* 2007).

2.3.1. La evolución del concepto de desarrollo y sus implicaciones en las ciudades

En 1880, en casi todos los países era deseado el incremento de la industria, la proliferación de cultivos, la extensión de los tendidos de líneas férreas y la diversificación comercial (Gudynas, 2004). Densificar la ciudad e incrementar su tamaño era un reflejo de prosperidad y desarrollo. Ese deseo de lo urbano se refleja incluso en la connotación de ciertos vocablos como civil, civilización y civismo. Por ejemplo, la palabra “civilizados” se deriva del latín *civilis*, que significa perteneciente a una ciudad, mantiene una connotación positiva al ser sinónimo de persona culta e ilustre. En contraposición el término “villano” del latín *villanus*, hace referencia al residente rural y sinónimo de persona inferior e inculta. A su vez, la naturaleza era considerada como un espacio en estado caótico o desordenado que debían ser organizado por las fuerzas económicas. Se idealiza el modelo concéntrico establecido por el economista Von Thünen en el año de 1842, en el que la distribución de la agricultura debe ubicarse alrededor de la ciudad.

El concepto de producción también se relaciona al de desarrollo. Producir artículos en el menor tiempo posible era lo esperado, incluso sí se atentaba contra la vida del obrero, que era expuesto a largas y agotadoras horas de trabajo por un salario reducido. La ciudad debía funcionar como una máquina de precisión, y su planificación seguía esa línea de pensamiento. Era común que la localización de las fábricas ocurriera en sectores aledaños al centro de la ciudad o del lugar de extracción de los recursos, para maximizar la ganancia marginal. La movilidad de los obreros era prioridad, por lo que era frecuente que las

residencias se ubicarán cerca de las fuentes de trabajo. Las viviendas eran pequeñas y muy densificadas para maximizar el uso del espacio. Este es el tipo de morfología urbana que se asocia a la ciudad industrializada.

A finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, las propuestas urbanas eran orientadas a resolver los problemas sanitarios y estructurales de la ciudad industrial como procurar para la población agua potable, eliminar el hacinamiento, mantener los espacios públicos, establecer sistemas de transporte eficiente y garantizar el bienestar social. En ese contexto de una inminente crisis humana, la planificación urbana incorpora en su acervo teórico y dialéctico los emergentes retos de la salubridad pública.

Howard (1902) idealiza por primera vez una propuesta alternativa al de la ciudad industrial. Su esquema se orientó en crear ciudades jardines más pequeñas y unidas por canales de tránsito y cinturones verdes. También, incluía grandes espacios verdes con el propósito de eliminar el humo de las industrias y garantizar un ambiente saludable a sus habitantes. Su propuesta nunca sería acogida. En esa misma línea fue el planteamiento del arquitecto modernista Le Corbusier en 1933, con su diseño denominado “Torres en el parque” (Wheeler, 2004). Este proyecto modernista fue emulado posteriormente en Estados Unidos, aunque con varias críticas y en el que se atribuía posiciones antihumanas, por su línea de diseños holístico-ecológicos. A pesar de sus detractores, varias de las ideas de Le Corbusier se plasman en la Carta de Atenas de 1938. De esta manera nacen dos corrientes diametralmente opuestas y que evolucionarían en el tiempo, la primera con marcadas tendencias antrópicas y la segunda levanta el estandarte del nuevo ecologismo en la construcción y evolución de los espacios públicos y privados en las ciudades.

La concepción antropocéntrica de las ciudades

Con el dominio del Keynesianismo como teoría económica durante ese período, la construcción de obra pública fue una prioridad para el Estado. Se fomentó aún más la expansión urbana en las áreas periféricas, generando fenómenos de suburbanización y dispersión. Este modelo se denomina *ex-urbs* y consiste primero en el concepto de la ciudad dispersa, que evoluciona al de espacios urbanos fragmentados o ciudad fractal (Monclús, 2000). Aunque las actividades financieras e institucionales todavía se localizan al interior de la ciudad, ocurre un despoblamiento paulatino de la centralidad urbana, solo disponible para los grupos de alto poder adquisitivo. También, se forman los espacios de segregación

de los suburbios, que dan paso a la marginalidad social y económica. Es importante destacar que el modelo de ciudad dispersa es una ruptura del modelo de ciudad compacta, que busca mantener una alta densidad y prioriza la diversidad de usos.

Estados Unidos es el principal propulsor de esta corriente urbana, que asocia la nueva infraestructura de la red vial con el uso continuo del vehículo particular para promover la industria automovilística y el consumo de combustibles fósiles. La reproducción de este modelo urbano en diversos lugares del planeta orientó el diseño de las ciudades hacia el uso y funcionamiento prioritario de los automotores, incluso por encima que al bienestar de los seres humanos (Tello, 1996; Wackernagel, 1996). Es posible afirmar como el tráfico motorizado es el primer problema ambiental de las grandes ciudades modernas.

Con el paradigma de la globalización, aparece la ciudad de la globalización que no es más que la acentuación de la ciudad dispersa. Se le considera una ciudad socialmente polarizada y segregada, y espacialmente caracterizada por la sub-urbanización, la polio-centralización y la fragmentación de la estructura urbana (Rodríguez, 2011). También, debido a la escasa regulación del Estado en la materia urbana y a los diversos procesos de conurbación, dan paso al desarrollo de las megalópolis o ciudades regionales.

Bajo este esquema el desarrollo humano y económico solo se puede alcanzar en la aldea global. Se refuerza la idea, que el motor del desarrollo solo puede alcanzarse a través de la industrialización, la sectorización y la división internacional del trabajo. La configuración y el diseño urbano debe homologarse para su uso global, y que favorece el proceso de deslocalización que limita la diversidad de la identidad urbana.

El enfoque ecologista y orgánico

Desde esta perspectiva, se debe mencionar la teoría del organicismo urbano, que es muy común en el diseño de las propuestas de los años 30's a 50's. Tiende a un ejercicio práctico de dibujos o esbozos del cómo será la ciudad futura deseada, siempre construida a largo plazo y con la certeza de que su diseño se realizará tal y como está propuesto por los urbanistas y profesionales involucrados. Se basa más en un ideal utópico, que no es posible realizar en el presente. Destacan posiciones muy particulares como la del planificador Lewis Mumford, que advirtió sobre los peligros de la Tecnópolis y que vinculó la urbanización, la tecnología y la guerra a gran escala, en la cual se le otorgaba a la tecnología anti-humanista un valor especial (Wheeler, 2004, 2010).

Con el movimiento ambientalista de los años 60's y 70's el discurso de lo urbano se enfatizó en la propuesta de alternativas asociadas a los valores espirituales, naturales y humanos, en lugar de la ganancia y el progreso económico. Con la proliferación de nueva literatura alarmista y de carácter pesimista como «The Limits to Growth»; *Only One Earth: The Care and Maintenance of a Small Planet*, se inicia el debate de los efectos e impactos ambientales que ocurren en las aglomeraciones humanas. También, ocurren propuestas muy interesantes como la Arcología del Profesor del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) Paolo Soleri, en el que se enlazan la arquitectura con la ecología, y cuyos principios establecen crear hábitats humanos densamente poblados y de bajo impacto ambiental.

No obstante, con la evolución de la corriente del *Situacionismo* (1950), que es una forma de planificar la ciudad tal y como las personas la viven y sienten, en un proceso de abajo hacia arriba; se empieza a amalgamar un enfoque de construcción social de la naturaleza y el entorno humano. Tal corriente nace en el seno de la geografía de la percepción y el comportamiento. Se le conocería como el construccionismo social y tendría como a un gran exponente a Raymond Williams (1976), que definiría de manera teórica la codificación de conceptos y claves socioculturales. Bajo esta línea serían muy importantes los roles de la lingüística, la construcción de los mapas mentales y la ciencia.

Al incorporar ideas de la ciencia ambiental, la ecología, la sociología, la geografía, la biología, la teología, la filosofía, la psicología, la política, la economía, entre otras disciplinas, se unen las dimensiones sociales, culturales y ambientales de la vida. El construccionismo social usa muchas ideas del pensamiento mundial occidental, pero también incorpora concepciones y otros puntos de vista del mundo, como el conocimiento tradicional de grupos aborígenes, la ecofeminismo, la cosmología hindú o la filosofía africana del Ubuntu. También, está relacionado con la posmodernidad y el concepto del Antropoceno, que ve a los humanos como una fuerza que está redireccionando la historia geológica de la Tierra, que destruye la naturaleza. Su contenido teórico es el que sería empleado en el concepto de desarrollo sostenible y formalizado en el Reporte Nuestro futuro común Brundtland (1987).

Los nuevos enfoques de las ciudades sostenibles

Según Graizbord (2011), es difícil pensar que el proceso de urbanización pueda detenerse y lo más probable es que mantenga una tendencia de crecimiento sostenido.

También, es cierto que con la evolución de las ciudades, los planificadores y urbanistas deban afrontar la complejidad, la diversidad y la incertidumbre de los fenómenos urbanos (Fernández-Güell, 2006; Torres, 2003).

En la actualidad existe toda una gama de tendencias y enfoques en los que se orienta la planificación urbana. Sin embargo, en la actualidad un factor común que se discute entre las sociedades es cómo alcanzar la sostenibilidad en las ciudades. Las formas pueden variar según el modelo de sostenibilidad débil, fuerte o super fuerte propuesto por (Gudynas, 2004). No obstante, la selección de una u otra definirá los sacrificios o reestructuraciones que deben ser implementados por los actores y fuerzas vivas. Las nuevas tendencias del paradigma de la sostenibilidad urbana se concentran en solucionar o abordar retos como: 1) el cambio del modelo productivo, 2) modificar la cultura ambiental y la percepción de la naturaleza por parte de los ciudadanos e 3) instrumentalizar las estrategias y políticas de sostenibilidad generadas en los organismos de integración internacional.

De esta manera se trata de armonizar los objetivos de eficiencia económica, cohesión y equidad social y el equilibrio ecológico. Es importante resaltar que aquellas sociedades con metas de carbono neutralidad que buscan alcanzar la sostenibilidad, requieren confrontar la realidad de la planificación actual, con una nueva concepción de sí mismas, más proactivas y que promuevan en otras el deseo de evolucionar (Martin & Williams, 2016; Romain, 2013). Existen formas urbanas más deseables que otras en términos físicos, sociales y económicos. Una de ellas es la que busca la Unión Europea, y que se conoce como la ciudad compacta. Esta se caracteriza por incentivar altas densidades, usos de suelo mixtos y mayor eficiencia energética. Se trata de reducir las distancias de los viajes al trabajo y maximiza el transporte público masivo. También, promueve el crecimiento de la población urbana dentro de los límites existentes de las áreas urbanas tradicionales, lo que resulta en mayores densidades de población y de edificaciones (Graizbord, 2011). No obstante, presenta varias críticas entre estas, que propicia un aumento de la temperatura de la mancha urbana, al incrementar la red energética. Además, el congestionamiento en el centro de la ciudad elimina las ventajas que otorga la concentración de estructuras y actividades.

Ante las críticas de la ciudad compacta, se ha construido un nuevo modelo denominado Crecimiento inteligente (*smart growth*) en las (*smart cities*) (Lee *et al.* 2008; Sanseverino, 2014). Se caracteriza por limitar la expansión y promover el desarrollo en altura y volumen concentrando vivienda y empleo. Además, prefiere una zonificación mixta, busca dar

una mayor accesibilidad al peatón. A su vez con fuertes incentivos fiscales preserva los espacios para actividades agrícolas y usos recreativos. También, aprovecha la infraestructura existente, mejorándola en lugar de construir una nueva. Este modelo apuesta al desarrollo de aplicaciones de telecomunicación y a la innovación tecnológica para garantizar la accesibilidad de los servicios. También, trata de resolver a la variedad de gustos y demandas, mediante un diseño urbano funcional y atractivo, que pasa de ser de funciones simples hacia aspectos multisensoriales. En este último punto existen serias implicaciones, como las expuestas por Lewis Mumford, hace más de 60 años.

Es importante señalar que en la literatura no existe un acuerdo sobre cuál es el modelo de una ciudad sostenible, aunque si existen una serie criterios que son aplicables para mejorar las condiciones de sostenibilidad de las ciudades. Jabareen (2006) sugiere siete conceptos de diseño de patrones urbanos que son necesarios de abordar para lograr avances reales en el objetivo de construir ciudades más sostenibles. Estos son:

1. *Compacidad*: La compacidad del entorno construido es una estrategia ampliamente aceptable a través de la cual se pueden lograr formas urbanas más sostenibles. La compacidad también se refiere a la contigüidad (y conectividad) urbana, lo que sugiere que el desarrollo urbano futuro debería tener lugar adyacente a las estructuras urbanas existentes.
2. *Transporte sostenible*: El transporte es el mayor problema en los debates medioambientales relacionados con la forma urbana. Es un reflejo de las tecnologías de transporte que dominaron en diferentes etapas del desarrollo de la ciudad. Jordan y Horan (1997), lo define como los servicios de transporte que indiquen los costos sociales y ambientales totales de su provisión; debe respetar la capacidad de carga; y que equilibre las necesidades de movilidad y seguridad con las necesidades de acceso, calidad ambiental y habitabilidad del vecindario.
3. *Densidad*: La densidad es una tipología crítica para determinar formas urbanas sostenibles. Es la proporción de personas o unidades de vivienda a área de tierra. La relación entre densidad y carácter urbano también se basa en el concepto de umbrales viables. En ciertas densidades, el número de personas dentro de un área determinada se vuelve suficiente para generar las interacciones necesarias para que las funciones o actividades urbanas sean viables.
4. *Usos mixtos de la tierra*: Según Barrantes-Sotela (2018), existe un consenso general

entre los planificadores y académicos de que el uso mixto de la tierra tiene un papel importante en el logro de una forma urbana sostenible. La zonificación de uso mixto permite que los usos de la tierra compatibles se ubiquen muy cerca unos de otros y, por lo tanto, disminuyan las distancias de viaje.

5. *Diversidad*: La diversidad de actividades económicas es esencial. Jacobs (1961) popularizó la dimensión de la diversidad, que fue adoptada y aceptada por varios enfoques de planificación, como el nuevo urbanismo, el crecimiento inteligente y el desarrollo sostenible. Es un fenómeno multidimensional que promueve entidades urbanas deseables, que incluyen una variedad de tipos y tamaños de vivienda, densidades urbanísticas, edades, culturas e ingresos. La diversidad representa el contexto social y cultural de la forma urbana.
6. *Diseño solar pasivo*: En general, la idea es reducir la demanda de energía y proporcionar el mejor uso de la energía pasiva de manera sostenible a través de medidas de diseño específicas. Este criterio afecta la forma del entorno construido a través de, por ejemplo, la orientación de edificios y densidades urbanas.
7. *Verdor*: La ecologización de la ciudad, o urbanismo verde, parece ser un concepto de diseño importante para lograr una forma urbana sostenible. Los espacios verdes tienen la capacidad de contribuir de manera positiva en temas clave de las áreas urbanas. Entre los beneficios sugeridos en la literatura están: *a)* contribuciones al mantenimiento de la biodiversidad mediante la conservación y el mejoramiento de la variedad distintiva de hábitats urbanos; *b)* la mejora del entorno físico urbano al reducir la contaminación, moderar los extremos del clima urbano y contribuir a sistemas de drenaje urbano sostenible y rentables; *c)* contribuciones al desarrollo sostenible para mejorar la imagen del área urbana; *d)* mejora de la imagen urbana y la calidad de vida; *e)* aumentar el atractivo económico de una ciudad y fomentar el orgullo de la comunidad.

Según Forman (1997), Wheeler (2004), la ecologización tiene beneficios para la salud y mantiene una función educativa como símbolo o representación de la naturaleza. También tiene como objetivo preservar y mejorar la diversidad ecológica del medio ambiente de los lugares urbanos.

Otro enfoque es a través de la solución de temas críticos o que considera mejoras en los elementos o componentes del sistema urbano que se desean intervenir como el sistema de

transporte, y la movilidad urbana eficiente, la dotación de servicios públicos, reutilización de infraestructuras socio funcionales, preservación de las áreas verdes y simplificación de trámites en virtud de una gobernabilidad integral pero simple.

Los criterios establecidos por Jabareen (2006), serán considerados en el análisis de la morfología del sistema urbano de la presente investigación.

2.4. Políticas de mitigación del cambio climático desde el Ordenamiento Territorial

La posición de Estado costarricense con respecto al cambio climático se ha definido en el ámbito de las negociaciones de las Naciones Unidas, en las que sobresalen principalmente los acuerdos logrados en:

- Convenio de Viena para la protección de la Capa de Ozono (Ley No. 7228 del 6 de mayo de 1991).
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Ley No. 7414 del 13 de junio de 1994).
- Protocolo de reformas al Convenio de Montreal sobre la capa de ozono (Ley No. 7808).
- Aprobación del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Ley No. 8219 del 08 de marzo del 2002).
- Aprobación de la Enmienda de DOHA al Protocolo de KYOTO, “Aprobación del Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” (Tratado Internacional 9357).
- Acuerdo de París del 2015 (Ley No. 9405 y Decreto Ejecutivo 39945-RE).

El gobierno de Costa Rica optó por mantener una posición positiva en estos acuerdos y ha señalado la responsabilidad colectiva de las naciones para mitigar los efectos del Cambio Climático (CC) en el mundo. De ahí la postura de que no solo los países desarrollados deben asumir compromisos de reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), sino también los países de economías emergentes.

Según Araya (2015), tradicionalmente en los acuerdos internacionales solo se orientan a las negociaciones sobre la mitigación de emisiones, por el costo asociado de la

transformación de los modelos de producción económica. Mientras, que en segundo plano están las discusiones sobre la adaptación al cambio climática, en las cuales el país no ha avanzado de manera significativa.

El principal compromiso adquirido por el país en estos acuerdos está alcanzar la C-Neutralidad para el 2021 (Bicentenario de la República). Para lograrlo, ha establecido una serie de políticas como los Planes Nacionales de Desarrollo (2007-2010, 2011-2014 y 2015-2018), la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático, el Plan Nacional de Cambio Climático, la Estrategia Nacional de Cambio Climático y el Plan de Acción de Estrategia Nacional de Cambio Climático.

En la estructura ministerial del Ministerio de Ambiente y Energía (Minae), se formó en el año 2009 la Dirección de Cambio Climático (DCC) y posteriormente en el año 2011 se constituyó mediante Decreto Ejecutivo 36823 el Comité Técnico Interministerial de Cambio Climático que lo compone el Ministerio de Ambiente y Energía (Minae), la Cancillería, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MOPT), Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) y el Instituto Meteorológico Nacional (IMN)⁷. A su vez la DCC promueve una serie de iniciativas estatales como el desarrollo de estrategias de bajas emisiones, el Carbono 2012, Formulación de Acciones Nacionales Apropriadadas de Mitigación (NAMAS) en Transporte y Agricultura, Programa Competitividad y Medio Ambiente, Evaluación de Necesidades Tecnológicas y el Programa REDD++ entre otros.

Sin embargo, no ha sido posible generar leyes específicas sobre el Cambio Climático en Costa Rica, la última iniciativa fue el proyecto de Ley de Cambio Climático (expediente 18860), que fue votado a favor en primer debate, pero que posteriormente fue retirado de la corriente legislativa en el 2014. Si debe mencionarse que la Ley No. 8488 Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo, no se refiere explícitamente al tema de cambio climático, la misma si indica el concepto de mitigación del riesgo asociado a un evento natural. Pero que posteriormente en la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático, el Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2010-2015 y en la Política Nacional de Gestión del Riesgo 2016-2030 del 2015, Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018-2030 (2018) y su Plan de Acción (2018); los temas de mitigación y adaptación ante el Cambio Climático son ampliamente abordados.

⁷Estos dos últimos son instituciones adscritas al Minae.

El «Plan de Acción 2018-2022 de la Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018-2030» en la sección de Contexto ambiental en áreas urbanas, incluye un pequeño apartado sobre la adaptación y mitigación a acciones climáticas. En el artículo 104, se sugiere que las municipalidades mantengan un registro sobre la incidencia y afectación por el fenómeno de islas de calor, con el propósito de establecer medidas de mitigación. Además, establece algunos ejemplos de las posibles medidas a implementar en las ciudades. No obstante, se carece de una formulación metodológica e instrumental que permita establecer o cuantificar la ICU en el ámbito del territorio costarricense.

Según la Contraloría General de República por medio de una auditoría a la DCC establece que la mayoría de las actividades realizadas por esa dirección no tienen carácter vinculante legal y que a pesar de que el gobierno realiza estas iniciativas no las ha oficializado mediante acto administrativo. Es decir, no existe un instrumento formal que permita hacer una valoración real del avance que realiza el país en el tema. Aunque debe responder internacionalmente con indicadores concretos en temas como la reducción de la deforestación con el programa REDD++ que maneja FONAFIFO y el C-Neutralidad 2021 mediante el inventario nacional de emisiones de GEI.

Si bien el país presenta una diversa cantidad de iniciativas en el tema de Mitigación y Adaptación ante Cambio Climático, no cuenta con un marco jurídico nacional que le den sustento a la asignación de competencias institucionales desde el Ordenamiento Territorial, así como los suficientes instrumentos técnicos de gestión y control, que permitan asentar responsabilidad por un eventual incumplimiento de lo acordado por el país ante la comunidad internacional.

Capítulo 3

ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación geográfica

Este proyecto de investigación tiene como área de estudio la centralidad urbana de Heredia delimitada por los ríos Pirro y Burío, así como su zona periférica. La superficie total se estima en 3605.7 hectáreas (Figura 3.2). También se analiza la escala regional, que se define en el sector Oeste del Gran Área Metropolitana de Costa Rica (Figura 3.1), según la delimitación del INVU en el Plan GAM de 1982 (Mora-Ramírez, 2006). El propósito es establecer el patrón climático regional en el que está inmerso el área de estudio.

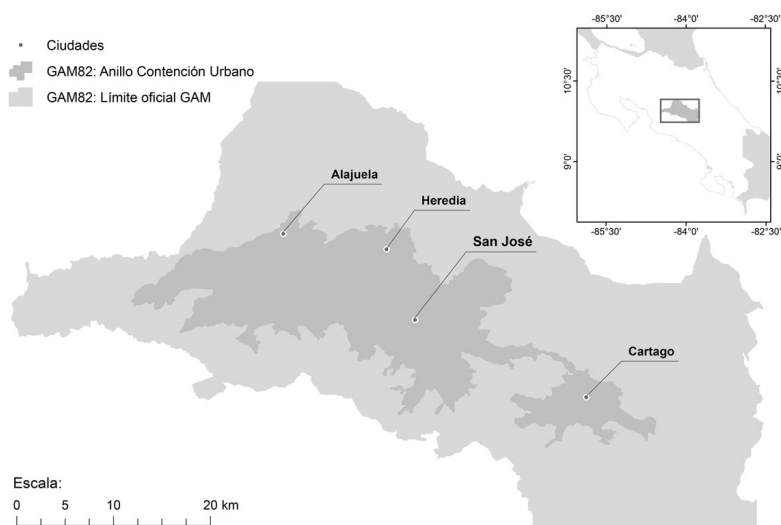
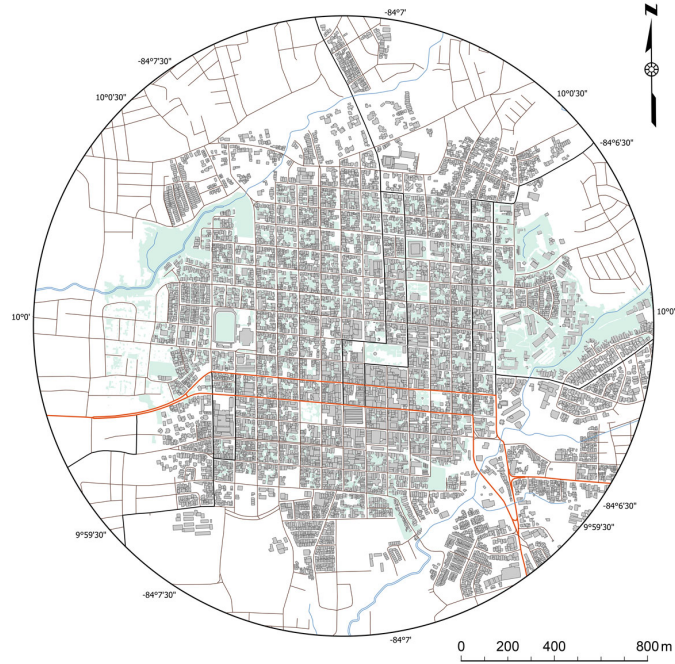
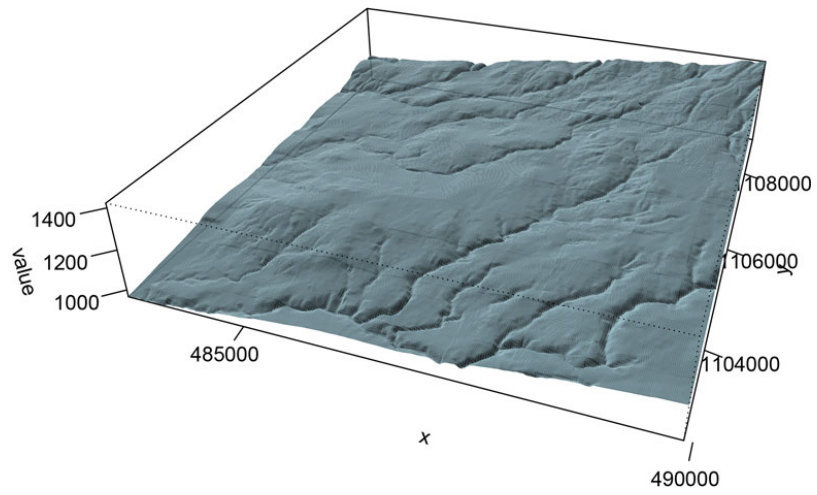


FIGURA 3.1: Área de estudio (Escala Regional).



(A) Área urbana.



(B) Modelo digital del terreno.

FIGURA 3.2: Ciudad de Heredia

3.2. Aspectos históricos

Gudmundson (2013), caracteriza el patrón de asentamiento colonial en Costa Rica como nucleado y compuesto de manera predominante de viviendas. Es decir, no existían centros urbanos antes de la introducción del cultivo de café. Esta descripción aplica para la ciudad de Heredia. Según Meléndez Chaverri (2001), la edificación del templo parroquial de la iglesia Católica Inmaculada Concepción en el año 1714 significó el origen de la ciudad de Heredia. Durante la Colonia es considerado el principal foco de atracción de habitantes del poblado Cubujuquí. Según los registros de la parroquia, en 1719 el poblado de Cubujuquí consistía en una iglesia y ocho casas pajizas, entre los que se estimaba treinta y seis habitantes (Meléndez Chaverri, 1997). En el año 1748 se obligó a los vecinos que habitaban en las áreas más alejadas, a ubicarse en las cercanías del poblado. Mientras que, en el año de 1762, Cubujuquí se conformaba por cuatro manzanas con casas entejadas y viviendas pajizas.

Sin embargo, la metrópoli de la provincia no era Heredia, ya que como era costumbre la capital de una circunscripción es la más antigua de sus poblaciones y en ese caso era la villa de Barva. A mediados de siglo XVIII, los habitantes de Cubujuquí solicitaron a la Audiencia de Guatemala la segregación de San Bartolomé de Barva y el título de villa. De esa manera el presidente del Tribunal y Capitán General Don Alonso Fernández de Heredia autorizó la elección de “la villa de la Inmaculada Concepción de Cubujuquí de Heredia”, el 1 de junio de 1763. Era una práctica generalizada que el Capitán General impusiera su apellido al conceder el título de villa. Este nombre se mantuvo hasta el 1 de noviembre de 1824 en el que fue erigida en ciudad con el nombre de Heredia, en honor al presidente del Tribunal mencionado. De esta manera se ha dado nombre a la provincia y al Cantón Central. En el año de 1775, Heredia contaba con 6572 habitantes, pero incluía Alajuela que era parte de su jurisdicción (Meléndez Chaverri, 1997, 2001).

La actividad cafetalera en Heredia durante la tercera década del siglo XIX y hasta el último cuarto del siglo XX, se considera como uno de los principales factores en el fortalecimiento de las condiciones de la población y el desarrollo de la ciudad. Al inicio y hasta mediados del siglo XX, las actividades económicas estaban subordinadas a la producción agrícola del cultivo del café. La forma cuadrada característica de la ciudad es evidente desde el año de 1927 y se aprecia en el mapa de la figura 3.3. Incluso a pesar de

que Heredia estaba segregada en cuadras constituidas, la ocupación de estas era parcial. El centro administrativo, político, militar y religioso hasta en la actualidad se localiza de manera precisa en el centro de su delimitación del distrito central, lo que implica una intención de planificación urbana. En el mapa de la ciudad de 1958 elaborado por el Instituto Geográfico de Costa Rica (figura 3.4) se evidencia que el sector periurbano era ocupado por parcelas con cultivo de café y nueve beneficios, entre estos destacaban: el Beneficio de Juan León, Beneficio La Macha, Beneficio Pirro, Beneficio La India, Beneficio San Bosco y Beneficio Carbonal.

Con el crecimiento de la población fue necesario la disponibilidad de más terrenos para las residencias, el sector comercial y los servicios. La evolución de la ciudad suscitó un cambio paulatino en las relaciones urbanas (gráfico de la figura 5.2). Tal situación era evidente en el año de 1962, cuando la Dirección General de Estadística y Censo estimó en 372 los negocios comerciales en la centralidad urbana, y se determina un incremento del comercio especializado, característico de una dinámica urbana más compleja (León Sáenz & Peters Solórzano, 2019).

Según Gudmundson (2018), después del año 1970 los productores de café enfrentan serios problemas como la baja en los precios del grano debido a las continuas crisis económicas internacionales, y al modelo de herencia de las propiedades. Este último problema en particular se originó de la segregación de fincas madres en lotes pequeños de índole familiar, y que no sustentaban una unidad mínima de parcela productiva agrícola. Además, la movilidad social de las familias provocó la indisposición de los hijos de los productores en continuar como generación de relevo de sus padres. Al no existir apego por la tierra y la tradición cafetalera, es aparente el inicio de un proceso de sucesión o cambio de la cobertura de la tierra en el área de estudio. Otro aparente problema es mencionado por Gudmundson (2018), y que se describe como un cambio en las características del clima entre los años de 1980 y 1980 indujo que los productores de café “buscaran la montaña” y trasladaran la producción a zonas con mayores altitudes para mejorar la calidad del café, abandonando la renovación *in situ* de los terrenos circundantes a la ciudad. Estas situaciones serán abordadas en el marco de esta investigación.

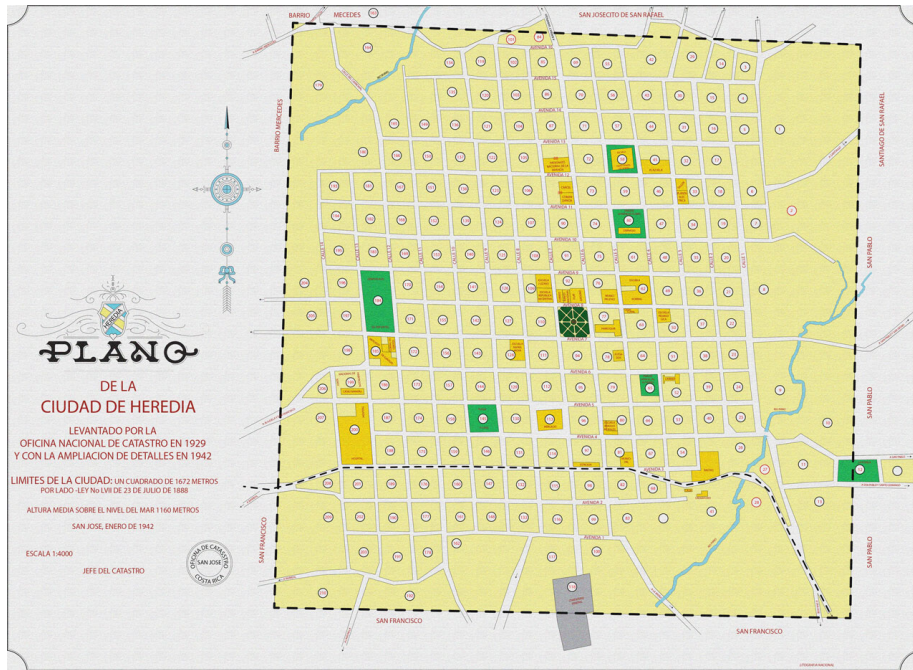


FIGURA 3.3: Heredia: Plano de la ciudad, 1942.
 Digitalización del mapa original por Geóg. Marvin Alfaro Sánchez.



FIGURA 3.4: Heredia: Plano de la ciudad, 1958.
 Elaborado por el IGN.

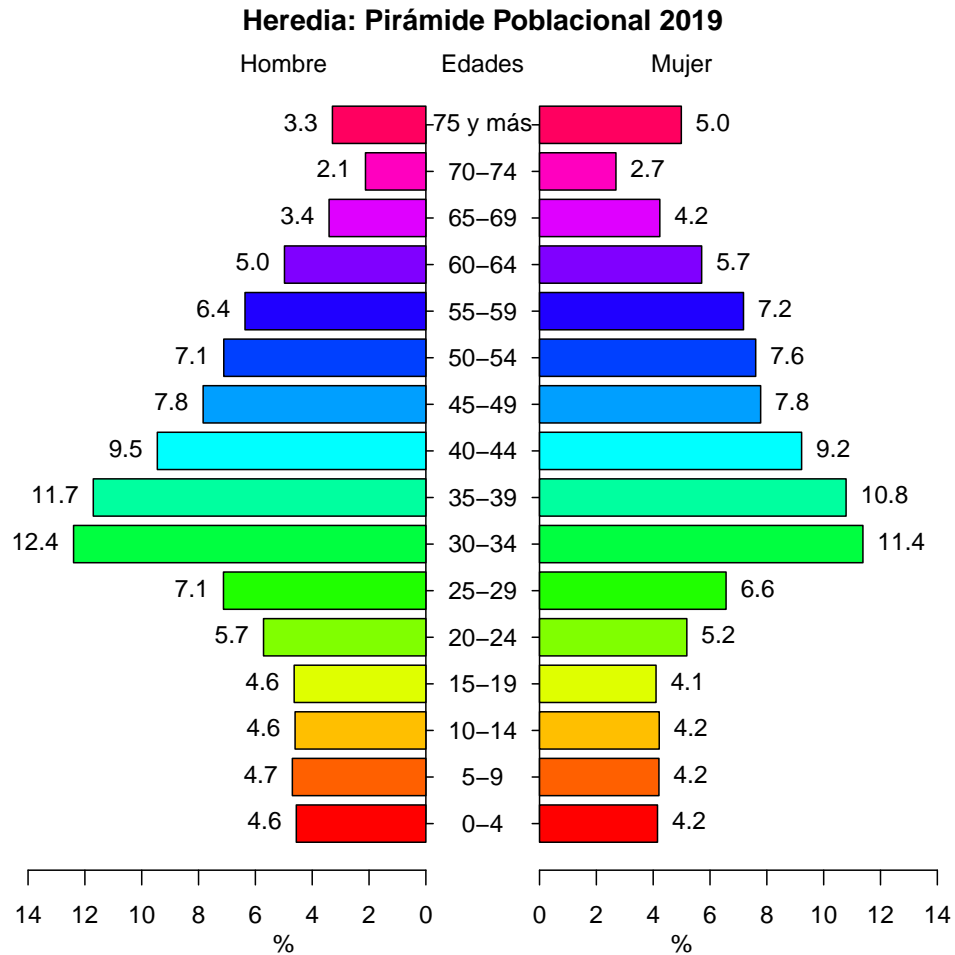
3.3. Características demográficas y socioeconómicas

Al considerar los datos del censo de población del año 2011 y los datos de estimaciones y proyecciones de población emitidos por el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC, 2011, 2019), se estima para el año 2019 un total de población en los distritos de Heredia, Mercedes, San Francisco y Ulloa de 140 749 habitantes. De los cuales 69 288 personas son de sexo masculino y 71 461 personas son de sexo femenino.

Gran parte de la población se concentra en el distrito de San Francisco, que a su vez es el que más problemáticas presenta con respecto a un acelerado crecimiento urbano y cambio de cobertura de la tierra. La media de personas por hogar (3.86) es un poco menor a la media de la GAM (4.04) y prácticamente la mitad de los hogares del Cantón se concentran en San Francisco. La media de habitantes por vivienda en Heredia (3.93) es similar a la de la GAM (3.93) a excepción del distrito de San Francisco donde el número se dispara hasta 4.27 personas por vivienda.

Con respecto a la población económicamente activa (PEA) para el año 2011 se estableció en 56741 personas, con una tasa de ocupación del 57% para una tasa neta de participación del 58.9%. Esto sugiere que la población del cantón de Heredia mantiene una buena o moderada oferta de empleo, que se podría traducir en un desplazamiento hacia otros lugares de la GAM o dentro del mismo cantón. Además, presentan una gran especialidad funcional urbana por la cantidad de servicios y comercios disponibles para sus habitantes. En las áreas centrales se encuentran estructuras de dos pisos y en algunos casos particulares ascienden a tres y cuatro niveles.

FIGURA 3.5: Pirámide poblacional de los distritos en el área de estudio.



Fuente: Elaboración propia con los datos del Censo 2011, así como los datos de estimaciones y proyecciones de población. Se excluye el distrito Vara Blanca. (INEC, 2011, 2019).

3.4. Clima y zona de vida

De acuerdo con los datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en la Universidad Nacional, Santa Lucía (Barva de Heredia) y el Aeropuerto Internacional Juan Santa María; la precipitación anual ronda entre los 1726.8 - 2403.3 mm y se concentra principalmente en 7 meses de mayo a noviembre, con 5 meses secos de diciembre a abril. Mientras que la temperatura promedio anual ronda los 22.4°C.

CUADRO 3.1: Estación San Lucía (Barva Heredia): Resumen Climático.

Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa(%)	Lluvia (mm)	Días con lluvia (mm)
	Max.	Min.	Med.			
ENE	24.3	14.9	19.6	74	16.7	5
FEB	25.2	14.7	20.0	73	23.4	4
MAR	26.3	14.7	20.5	72	42.3	4
ABR	26.8	15.2	21.0	76	112.9	9
MAY	25.9	15.8	20.8	84	319.0	21
JUN	25.3	15.7	20.5	86	328.8	22
JUL	25.1	15.9	20.5	83	207.5	20
AGO	24.5	15.1	19.8	85	255.4	22
SEP	25.0	15.3	20.1	90	421.4	25
OCT	24.0	14.9	19.5	88	440.1	25
NOV	24.5	15.6	20.0	83	183.6	18
DIC	23.4	14.9	19.2	79	52.2	9

Lat.: 10°1' 0"Norte; Lon.: 84°5' 59" Oeste Altitud: 1200 m.s.n.m. Tipo: Manual; Período Lluvia: 1983 - 2015; Temperatura: 1982 - 2015; Humedad: 1998 - 2015.

Lat.: 10°0' 0"Norte Lon.: 84°13' 0" Oeste Altitud: 890 m.s.n.m. Tipo: Automática; Período: 1999 - 2015;

CUADRO 3.2: Aeropuerto Juan Santa María: Resumen Climático.

Mes	Temperatura (°C)			Humedad Relativa(%)	Lluvia (mm)	Días con lluvia (mm)
	Max.	Min.	Med.			
ENE	28.2	18.6	23.4	63	9.1	2
FEB	29.0	18.5	23.7	61	13.0	2
MAR	29.8	18.7	24.2	61	17.7	4
ABR	30.2	19.2	24.7	66	65.4	9
MAY	28.9	19.1	24.0	78	246.0	20
JUN	28.3	19.0	23.6	82	216.8	21
JUL	28.3	19.1	23.7	78	147.2	19
AGO	28.3	18.7	23.5	80	218.6	21
SEP	27.8	18.3	23.0	85	311.9	25
OCT	27.2	18.4	22.8	86	297.5	25
NOV	27.3	18.4	22.8	79	153.6	17
DIC	27.8	18.5	23.1	69	30.0	7

De los datos de Evapotranspiración Potencial (ETP), se obtiene un radio de ETP igual a 1.0552. Por lo tanto, según (Holdridge, 1966), el área de estudio se encuentra en la zona de vida denominada Bosque premontano húmedo (bh-P).

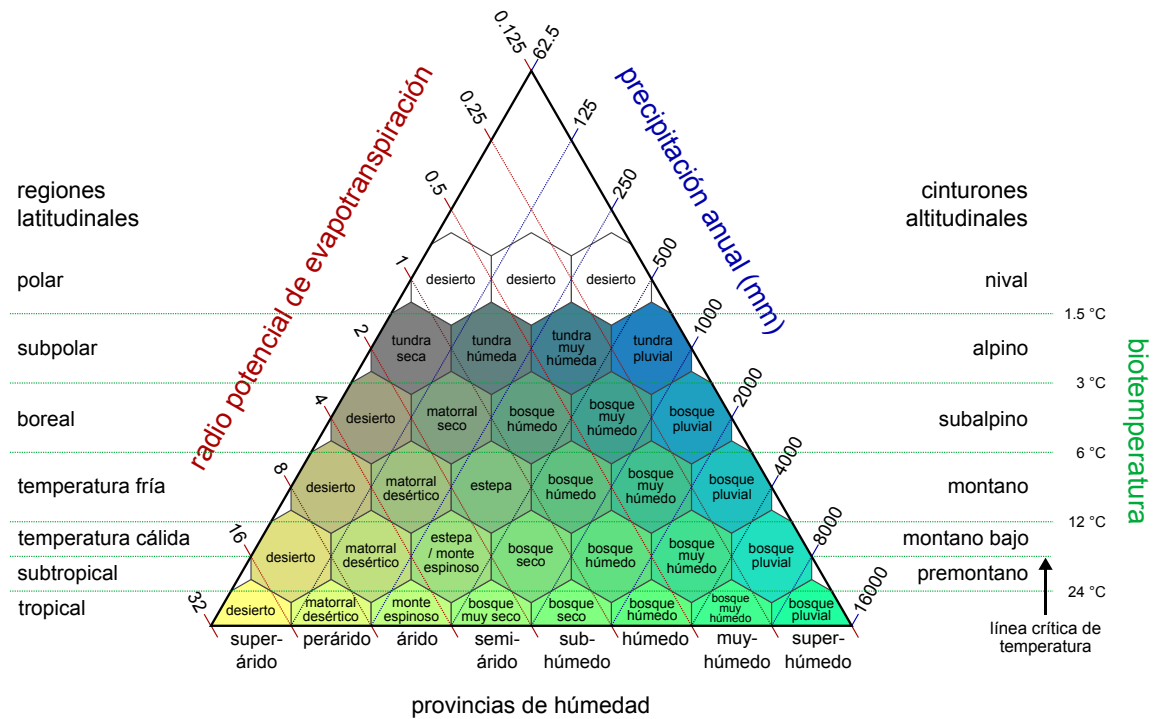


FIGURA 3.6: Sistema de zonas de vida según Holdridge.

3.4.1. Oscilaciones

Es importante observar la tendencia del ENOS, ya que puede explicar el aumento o disminución de la intensidad de la ICU. En la figura 3.7 se observa la fase positiva y negativa del ENOS, según los datos de la NOAA al 2019 (Kobayashi *et al.* 2015; Wolter & Timlin, 1993; T. Zhang *et al.* 2019). Mientras que los puntos en la gráfica representan a fecha de adquisición de las imágenes satelitales utilizadas en la investigación. De tal manera que al procesar la información satelital es posible comprender el posible efecto del ENOS en el análisis de la ICU.

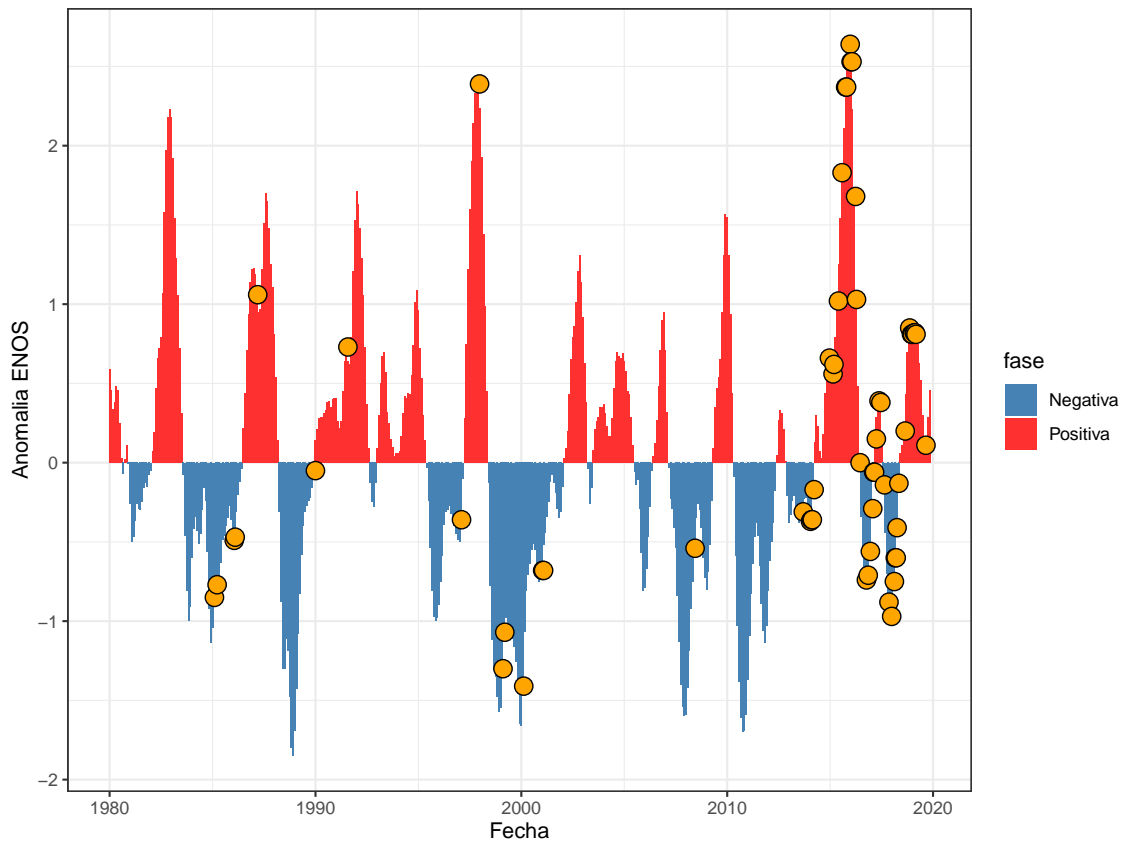


FIGURA 3.7: Anomalías del ENOS y registro temporal de las imágenes landsat.

3.5. Configuración urbana

Heredia presenta un centro urbano bien definido con trama urbana en cuadrícula, con una alta densidad de la edificación con alturas predominantemente de uno o dos pisos. En el distrito central se concentran los servicios y equipamientos que abastecen a los habitantes del cantón y a otros cantones colindantes, como es el caso de San Rafael, San Pablo, Barva, Flores y Santa Bárbara.

En el cuadrante urbano se encuentra la zona histórica, con el parque central como antesala de la iglesia Inmaculada Concepción, el edificio de la Municipalidad de Heredia, el Fortín (torre colonial que es parte de un antiguo fuerte español), el edificio de correos, el Liceo de Heredia, el templo de la música, la casa de la cultura y una serie de edificios que cuentan con interés patrimonial forman el nodo central. Al norte los viejos barrios residenciales como Fátima y Corazón de Jesús, donde el comercio no ha restado importancia ni ha desplazado el uso habitacional original.

Es importante destacar el parque Cleto González y la escuela del mismo nombre. Al sur la zona comercial con los edificios del antiguo y del nuevo mercado, el pequeño comercio instaurado en la zona, la antigua estación del ferrocarril y las paradas de autobuses definen el comportamiento comercial de la ciudad en conjunto con la iglesia de los Ángeles y la iglesia del Carmen. Al oeste la zona deportiva, con el Palacio de los deportes y el estadio de fútbol Eladio Rosabal Cordero. Fuera de la cuadrícula central, al este se encuentra el campus de la Universidad Nacional. Mientras que al sur se localiza las nuevas instalaciones del hospital San Vicente de Paúl.

Esta distribución genera una serie de flujos y recorridos internos con problemas de congestión vial por la elevada cantidad de vehículos, tanto privados como públicos (buses). La terminal de autobuses al Sur del mercado antiguo, por su reducido tamaño solo brinda espacio a un reducido número de rutas. La mayoría de los servicios de ruta de autobuses mantienen las paradas en los laterales de las vías que producen colapsos internos debido a la estrechez de las calles centrales de la cuadrícula y de la gran cantidad de buses que circulan por ellas. Los escasos puntos de acceso y salida a la ciudad constituyen *topics* que limitan el flujo vehicular, en especial en la ruta 3 por el sector Miraflores.

Capítulo 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Tipo de investigación

La presente investigación, hace uso de diferentes elementos y características que la insertan dentro de un estudio de tipo *exploratorio y correlacional*. Según Hernández *et al.* (2010) las razones para señalar que es una investigación de carácter exploratorio, es porque la temática y la relación de variables que se buscan explicar y entender. En este caso la relación del fenómeno de isla de calor urbano con respecto a otros factores que inciden en su formación, no se ha abordado a profundidad en Costa Rica.

La investigación tiene un fundamento correlacional, debido a que el estudio va más allá de una descripción del clima en la centralidad urbana de Heredia. Se propone alcanzar un nivel de análisis que permita discernir la influencia de la dinámica de crecimiento y cambio de la cobertura de la tierra en la formación del fenómeno de ICU. Por lo tanto, tiene un carácter de investigación relacional; al buscar establecer un grado de relación o asociación existente entre las variables estudiadas.

Entre los enfoques, técnicas e instrumentos para abordar el cumplimiento de los objetivos, destacan el manejo cuantitativo de elementos que a meritan procesos de observación, comprensión y sistematización de información. Entre ellos, el uso de índices físico-ambientales y métricas espaciales que implican el análisis e interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, asistido por un levantamiento de campo.

4.2. Variables y Categorías: definición e instrumentación

Para abordar de forma sistemática y coherente el problema de investigación, es necesario determinar los factores más importantes que intervienen en el objeto de estudio. En ese sentido las variables son las características o cualidades de la realidad que son susceptibles de asumir diferentes valores en el objeto de análisis (Sabino, 1992). Mientras que las categorías de análisis son clases o tipos de fenómenos en cuanto a alguna propiedad o variable. Por lo tanto, describen o explican la naturaleza del problema en estudio, razón por la cual se necesita obtener información de estas (Hernández *et al.* 2010). Según los objetivos específicos propuestos en esta investigación las variables y categorías de análisis son:

4.2.1. Objetivo específico 1:

Determinar los principales patrones de cambio de cobertura de la tierra que contribuyen en el fenómeno de ICU.

Variable: Morfología del sistema urbano

1. *Definición conceptual:* Es la identificación de los patrones de distribución espacial de los elementos que conforman un territorio o ciudad, creados y organizados por la sociedad que los habita, y que mantienen una relación funcional entre sí.
2. *Definición operativa:* Es la caracterización de la forma y distribución de las áreas urbanas y naturales, que ayudan a establecer los procesos evolutivos que ocurren en una ciudad o aglomeración urbana. Se considera que el modelo de ocupación y morfología urbana está estrechamente relacionado con el modelo de desarrollo predominante. Para hacer operativo la definición conceptual, se describen los elementos de la morfología urbana en:
 - a) Contorno: Es la forma geométrica de la ciudad que se conforma del límite establecido por el crecimiento urbano. También se define como el perímetro de la mancha edificada de las aglomeraciones urbanas.
 - b) Traza: Es la orientación y sentido que describen la red de transporte y los cuadrantes (cuadras).

- c) Bloques: Describe la forma de los bloques urbanos, que se constituyen del agrupamiento de las parcelas y que están separadas por la trama vial.
 - d) Parcelamiento: Describe la disposición espacial de las parcelas que componen un bloque urbano.
 - e) Tejido urbano: Es la transparencia variable que se establece de una mayor o menor compacidad, y que permite determinar qué tan frecuente se observan espacios sin uso o cobertura edificada. Es decir, es la manera en cómo las diferentes coberturas de uso de la tierra se extienden sobre la masa edificada.
 - f) Apariencia: Son los aspectos tangibles como el tipo de edificación, las actividades, usos urbanos y espacios naturales, que permiten la identificación del centro, los barrios y la periferia de las ciudades.
3. *Instrumentación*: Consistirá en la descripción de la distribución espacial de la población y las actividades que conforman el sistema urbano para establecer sus características más relevantes. Para ello se usarán las siguientes métricas o indicadores:
- a) Índice de forma: Evalúa la complejidad de la forma del área urbana comparándolo con un parche estándar de misma superficie.

$$SI_V = \frac{P_{i,j}}{\sqrt[2]{\pi \times a_{i,j}}} \quad ; \quad SI_R = \frac{0.25 \times P_{i,j}}{\sqrt{a_{i,j}}} \quad (4.1)$$

Donde:

$P_{i,j}$: Perímetro de la unidad espacial.

$a_{i,j}$: Área de la unidad espacial.

- b) *Patrón de asentamiento*: Como parte del análisis del impacto que ejerce el modelo de asentamiento, se determina el patrón de ocupación de la actividad urbana en el área de estudio con respecto a otras áreas de carácter natural. Para esa finalidad es necesario la cobertura de la tierra y la determinación del centro de gravedad de la forma (CG) de los principales asentamientos con su respectivo eje principal (EP) (magnitud y ángulo de rotación) (ecuación 4.12), los cuales se obtienen al comparar la forma estudiada con formas simples como rectángulos, círculos, cuadrados o una región convexa Taud y Parrot (2008).

$$\text{Eje Principal (EP)} = \tan(2\alpha) = 2\mu_{xy}/(\mu_{yy} - \mu_{xx}) \text{ sí } (\mu_{yy} - \mu_{xx}) \neq 0 \quad (4.2)$$

La orientación de EP se expresa en grados en un sentido anti-trigonométrico con el origen ubicado al norte (Coordenadas Norte Azimut). Los datos obtenidos del desplazamiento del CG y el cambio de dirección del EP asociado son fundamentales para cuantificar e identificar los procesos relacionados con la evolución de la ciudad.

También, mediante el análisis de grafos se estudia la composición y la estructura de la red vial de la ciudad de Heredia. Se determinan las siguientes métricas:

Grado de centralidad del nodo

El grado de centralidad de un nodo v , es la fracción de nodos a los que está conectado. Los valores de centralidad de grado se normalizan al dividir por el grado máximo posible en un grafo simple $N - 1$, donde N es el número de nodos en el grafo (G).

$$DC_{(v)} = \frac{d_{(v)}}{(|N| - 1)} \quad (4.3)$$

Donde:

$d_{(v)}$: Grado del nodo.

N : Cantidad de nodos en el grafo.

Grado promedio de los nodos del grafo \bar{k}

$$\bar{k} = \frac{2 \times M}{N} \quad (4.4)$$

Donde:

M : Cantidad de segmentos del grafo.

N : Cantidad de nodos en el grafo.

Proporción de nodos que son callejones sin salida (P_{css})

$$P_{css} = \frac{\sum N_{(d_{(v)} \leq 1)}}{N} \quad (4.5)$$

Donde:

$N_{(d_{(v)} < 1)}$: Cantidad de nodos del grafo con grado ≤ 1 .

N : Cantidad de nodos en el grafo.

Proporción de nodos que son interacciones de cuatro vías (P_{4s})

$$P_{4s} = \frac{\sum N_{(d_{(v)} \leq 1)}}{N} \quad (4.6)$$

Donde:

$N_{(d_{(v)} = 4)}$: Cantidad de nodos del grafo con grado = 4.

N : Cantidad de nodos en el grafo.

Grado promedio de centralidad Θ

$$\Theta = \frac{\sum DC_{(v)}}{N} \quad (4.7)$$

Donde:

DC_v : Grado de centralidad del nodo.

N : Cantidad de nodos en el grafo.

Coefficiente de agrupación

Según Saramäki *et al.* (2007), es la tendencia a la formación de enlaces entre nodos vecinos y refleja la agrupación de los segmentos en vecindarios estrechamente conectados.

$$C_v = \frac{2T_{(v)}}{d_{(v)} \times (d_{(v)} - 1)} \quad (4.8)$$

Donde:

$T_{(v)}$: Número de triángulos a través del nodo v .

$d_{(v)}$: Grado del nodo.

Coefficiente de agrupación promedio (ϑ)

$$\vartheta = \frac{\sum C_{(v)}}{N} \quad (4.9)$$

Longitud media del segmento de la calle (metros) (\tilde{l})

$$\tilde{l} = \frac{\sum Lc}{N_{seg}} \quad (4.10)$$

Donde:

Lc : Longitud del segmento de calle (metros).

N_{seg} : Cantidad de segmentos de calle.

Circunferencia o circuito promedio (ζ)

Es la suma de las longitudes de los segmentos dividida por la suma de la distancia euclidiana en línea recta entre los puntos extremos de la extensión. Se usan todas las coordenadas (x,y) de origen (a) y destino (b) de los segmentos como marco de datos, y luego se calcula la distancia en línea recta (ab).

$$\zeta = \frac{\sum Lc_i}{\sum \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}} \quad (4.11)$$

Para el cálculo estas ecuaciones se utilizan las librerías del lenguaje Python 3.8.2 (Van Rossum & Drake, 2009; Van Rossum & Drake Jr, 1995): networkx (Hagberg *et al.* 2008) y OSMnx (Boeing, 2017).

- c) Densidad de población: Representa la relación numérica existente entre el número de personas que integran una población y la superficie del área de estudio.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Cantidad Habitantes}}{\text{Área de Unidad Espacial}} \quad (4.12)$$

- d) Índice de las actividades económicas: Muestra el peso relativo según el tipo de actividad económica, usualmente se agrupa en una macro clasificación de las actividades de acuerdo con la *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU)* de las Naciones Unidas.

Categoría de Análisis: Cobertura de la tierra

1. *Definición conceptual*: El término cobertura de la tierra se refiere a solo la descripción física de la capa superficial de la tierra, lo que incluye vegetación, áreas sin vegetación y zonas humanas. Mientras que el término uso de la tierra es un concepto cultural, en el que se caracteriza y clasifica las actividades antropogénicas que modifican, manejan, conservan y usan los tipos o estados de coberturas de la tierra (Fisher *et al.* 2005; Ramírez, 2001; Richters, 1995).
2. *Definición operativa*: Es la caracterización y clasificación de entidades complejas con dimensiones espaciales presentes en la superficie terrestre. Es una generalización jerárquica según los elementos superficiales que componen la tierra y el tipo de aprovechamiento o uso antrópico al que se somete.
3. *Instrumentación*: Los datos de las imágenes satelitales en varios períodos temporales son rectificadas y corregidas. Se aplica el siguiente proceso:
 - (a) Composición en falso color (FCC) de las imágenes.
 - (b) Elaboración de polígonos de entrenamiento, usando FCC como capa base para distinguir características heterogéneas entre las entidades.
 - (c) Construcción de colección de sitios de entrenamiento.
 - (d) Clasificación usando un clasificador *Random Forest* (RF):

El clasificador de RF asimila numerosas corridas de procesamiento independiente a las que denomina árboles de decisión para producir los resultados de la clasificación, donde cada árbol se “cultiva” a la máxima profundidad sin poda. Cada árbol se construye con muestras de arranque (muestreo fuera de bolsa) y las variables en cada nodo se seleccionan al azar para introducir aleatoriedad, minimizar la correlación entre “los árboles” y reducir el sesgo de entrenamiento producido por “árboles individuales”. La RF se ha utilizado para diversas aplicaciones de mapeo y regresión, incluida la estimación de biomasa, estimación de la calidad de agua y la clasificación de la cobertura del suelo. Este tipo de clasificador se basa en la siguiente ecuación:

$$p(c|x) = \frac{1}{\sum_{t=1}^T \alpha_t I(t \in S)} \cdot \sum_{t=1}^T \alpha_t \hat{p}_t(c|x) I(t \in S) \quad (4.13)$$

La Ec. 4.13, se usa para obtener la probabilidad de que un punto de datos x

pertenezca a la clase c . Mientras que S es el conjunto de índices de árboles seleccionados al azar (es decir, bolsa de árboles), α_t es el peso del árbol t , es la salida del árbol t que muestra la probabilidad estimada de que la observación x pertenece a la clase c , e $I(t \in S)$ es la función de indicador que muestra si el árbol t está en la bolsa o no.

Las imágenes satelitales provienen de los sensores Sentinel-2 (S2), Landsat 5TM y Landsat 8 OLI. El sensor Sentinel-2 produce imágenes multiespectrales y proviene de los satélites de la misión de observación de la Tierra desarrollada por la *European Space Agency* (ESA) como parte del Programa Copernicus para adquirir observaciones terrestres en apoyo de los servicios ambientales y la gestión de desastres naturales (Drusch *et al.* 2012). La misión incluye dos satélites idénticos, S2-A (lanzado en junio de 2015) y S2-B (lanzado en marzo de 2017), que proporcionan complementariedad para las misiones actuales SPOT y Landsat. El sensor principal es el MultiSpectral Instrument (MSI), un escáner de *pushbroom* que proporciona una amplia cobertura espectral sobre los dominios visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) (que asciende a 13 bandas espectrales), con resolución espacial media (de 10 a 60 m según la longitud de onda) y un amplio campo de visión (290 km) (SUHET, 2015).

Mientras que el sensor Landsat proviene del programa Landsat y es la misión satelital de observación de la Tierra más larga de la historia. El sensor TM (*Thematic Mapper*) es un sensor de escaneo multiespectral que detecta siete bandas espectrales simultáneamente. La banda 6 detecta la radiación infrarroja térmica (calor). Landsat solo puede adquirir escenas nocturnas en la banda 6. Una escena TM tiene un campo de visión instantáneo (IFOV) de 30 metros cuadrados en las bandas 1-5 y 7, mientras que la banda 6 tiene un IFOV de 120 metros cuadrados en el suelo. El sensor OLI (*Operational Land Imager*) utiliza un sensor de barrido que recopila datos de nueve bandas espectrales. Siete de las nueve bandas son consistentes con los sensores *Thematic Mapper* (TM) y *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) que se encuentran en los satélites Landsat anteriores, lo que brinda compatibilidad con los datos históricos de Landsat, al tiempo que mejora las capacidades de medición. Se recolectarán

dos nuevas bandas espectrales, una banda costera / de aerosol de color azul profundo y una banda de cirros infrarrojos de onda corta (Yue *et al.* 2019).

- (e) Evaluación de validación y precisión de la capa de cobertura: Para analizar la matriz de confusión, se usa el indicador estadístico de concordancia Kappa (K) (Cohen, 1960), el cual determina el grado de concordancia que existe por encima del acuerdo esperado al azar, y que indica el peso que de la máxima concordancia posible tiene en los acuerdos observados. Esto supone, establecer la correspondencia entre los resultados de la clasificación supervisada y la cobertura registrada en el terreno, así como la concordancia que se debe esperar por generación aleatoria. Es decir, se delimita el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios. El índice tiene un rango de 0.0 (no hay correlación aparente) a 1.0 (indica correlación perfecta). Según Landis y Koch (1977), sí el coeficiente Kappa es mayor a 0.8 se puede afirmar que es poco probable que la clasificación supervisada realizada sea obtenida por azar (Cuadro 4.1).

$$K = \frac{p - p_c}{1 - p_c} \tag{4.14}$$

Donde:

p : Es el acuerdo relativo observado entre los evaluadores.

p_c : Es la probabilidad hipotética de acuerdo al azar.

CUADRO 4.1: Escala de valoración de Índice Kappa.

Valor de Índice Kappa	Fuerza de la concordancia
0	Sin concordancia
<0.20	Insignificante
0.21 – 0.40	Discreto
0.41 – 0.60	Moderado
0.61 – 0.80	Sustancial
0.81 – 1.00	Casi perfecto

Al aplicar un nivel de confianza al 95 %, se calcula un intervalo de confianza (IC) usando la siguiente ecuación:

$$IC = K \pm 1.96 * \text{Error Std}$$

De manera adicional se utiliza el puntaje de habilidad de Peirce (*Peirce-skill score*) (PSS) (Peirce, 1884; Wandishin & Brooks, 2002). El cual se calcula de la siguiente manera:

$$PSS = POD_{\bar{x}} - POFD_{\bar{x}} = \frac{(ad - bc)}{(a + b)(b + d)} \quad (4.15)$$

Donde el POD es la probabilidad de detección y POFD es la probabilidad de detección falsa. Según Manzato (2007) en una tabla de contingencia binaria, como las creadas en la validación de las clases de la cobertura de la tierra, el uso del puntaje de habilidad de Peirce (PSS) indica el punto con “mayor habilidad” en la curva característica operativa relativa y es el punto que maximiza el valor de pronóstico, por lo que se considera una buena medida escalar del clasificador.

Categorías de coberturas de la tierra

El esquema de categorías de cobertura de la tierra se basa en el sistema de clasificación utilizado por el *U.S. Geological Survey* (USGS) y el *National Land-Cover Data* (NLCD). El sistema se muestra en el cuadro 4.2. Se especifica hasta un nivel II, dado que es necesario que las clases se generalicen para garantizar su persistencia en el período del estudio, y de esa forma poder realizar su comparación mediante un gráfico Sankey.

CUADRO 4.2: Clases de uso/cobertura de la Tierra.

Forestal (For)	<p>Subclases-Definición</p> <p><i>Bosque de alta densidad:</i> Ecosistema con predominancia de vegetación arbórea, en el cual la proporción de árboles (cobertura aérea) es mayor o igual al 66.7%.</p> <p><i>Bosque de baja densidad:</i> Bosque que se encuentra en proceso de regeneración natural, pero que todavía muestra influencia antropogénica como la tala total o parcial, quema u otra actividad de conversión de la tierra, sin que se haya recuperado completamente (Lund, 2000).</p>
Cuerpo de agua (Ca)	<p>Subclases-Definición</p> <p><i>Lagunas:</i> Los lagos y lagunas son depresiones en la superficie terrestre que contienen aguas estancadas, drenadas en muchos casos por ríos.</p> <p><i>Cauce de ríos:</i> Es el lugar concreto por el que transcurre un cauce de agua. Normalmente es sinónimo de lecho del río, pero el cauce incluye las aguas subterráneas, los ríos que circulan por el interior de las cuevas, y las de infiltración.</p>
Cultivos (Cul)	<p>Subclases-Definición</p> <p><i>Café:</i> Cultivo permanente, producido por el árbol del café. Su nombre científico es <i>Coffea arabica L</i>, la primera cosecha de un árbol de café se produce alrededor de los 2 años, tomando hasta 2 ó 3 años más que el árbol alcance su nivel óptimo de producción, entre las variedades más importantes se encuentran: Arábica y Robusta.</p> <p><i>Café arbolado:</i> Practica que se realiza para proteger el cultivo del café de una fuerte exposición a la luz solar, la función fundamental de la sombra en el cafetal es la regulación de las condiciones bajo las cuales el café desarrolla al máximo sus características genéticas.</p> <p><i>Plantación ornamental:</i> Son plantaciones que se adaptan a la mayoría de las áreas y son fáciles de cuidar. Pueden prosperar hasta en las tierras más pobres donde otras plantas no lo hacen, y muy pocas pestes los afectan.</p>
Pecuario	<p>Subclases-Definición</p> <p><i>Pasto (Herb):</i> Pasturas con una cobertura menor al 10% de árboles, principalmente localizados en zonas muy planas de 0 a 8% de pendiente.</p> <p><i>Pasto arbolado (Par):</i> Pasturas con más de un 40% cubierto por árboles dispersos.</p> <p><i>Matorral (Mat):</i> Vegetación de transición arbustiva y de árboles jóvenes; así como áreas de pastura abandonadas con hierbas y árboles pequeños, las cuales se encuentran sometidas a procesos de sucesión natural en diferentes grados, pero sin alcanzar el estado de bosque secundario.</p>
Terreno descubierto (Td)	<p>Conjunto de procesos que provocan la eliminación de los materiales meteorizados superficiales de un terreno dejando al descubierto sus porciones más profundas, anteriormente ocultas.</p>
Urbano (Urb)	<p>Asentamiento humano con alta densidad de población e infraestructura de entorno construido. Las áreas urbanas se crean a través de la urbanización se clasifican por morfología urbana como ciudades, pueblos, conurbaciones o suburbios.</p>

Variable: Cambio de cobertura de la tierra

1. *Definición conceptual*: Los cambios de coberturas de la tierra, representan la manifestación o materialización de las relaciones hombre-ambiente o entre el ambiente y los procesos ligados a la economía social; siendo su análisis un medio para entender los mecanismos de este proceso y constituye una guía útil para la toma razonable de decisiones sobre el uso del territorio (Li *et al.* 2014).
2. *Definición operativa*: Unidades espaciales que presentan un cambio significativo en sus firmas espectrales con respecto a periodos temporales anteriores o posteriores.
3. *Instrumentación*: Con la definición y delimitación de la cobertura de la tierra, es necesario la estimación del cambio ocurrido en el transcurso del período de análisis, para lo cual se establecen las siguientes etapas del proceso.

a) *Cálculo del índice de disturbio*: Según Healey *et al.* (2005), el *índice de disturbio* (DI) fue diseñado para estudiar aquellas firmas espectrales de áreas no forestales que destacan y están asociadas con disturbios por remplazo, así como separar de las mismas las otras firmas espectrales de zonas boscosas.

El DI es una combinación lineal de los tres componentes del *Tasseled Cap*, considerando el supuesto de que las áreas de bosque que experimentaron un reciente cambio a otras coberturas/ usos de tipo antrópicas o áreas descubiertas (suelo expuesto), presentarán un valor alto en *brillo* (\uparrow) y valores bajos en *verdor* (\downarrow) y *humedad* (\downarrow), en relación con áreas que no han sido alteradas por la actividad humana.

El propósito principal de usar un análisis de composición de bandas del *índice de disturbio*, es la detección de cambios a escala regional con respecto a la pérdida de áreas verdes (Arnett *et al.* 2014; Healey *et al.* 2005; Mišurec *et al.* 2016). En este caso particular, el DI se utiliza para estudiar en el área de estudio como la expansión de la cobertura urbana o la pérdida de cobertura verde favorecen el incremento del brillo asociado al albedo de estas superficies, y que puede ser un factor para considerar en el incremento de las temperaturas en las ciudades.

El mismo se estima mediante:

$$\begin{aligned}
 B_r &= (B - B_\mu / B_\sigma) \\
 G_r &= (G - G_\mu / G_\sigma) \\
 W_r &= (W - W_\mu / W_\sigma)
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

Donde:

- B_r, G_r, W_r : Re-escalamiento o estandarización de Brillo, Verdor y Humedad.
- B_μ, G_μ, W_μ : Media de las zonas de bosque en las bandas de Brillo, Verdor y Humedad.
- $B_\sigma, G_\sigma, W_\sigma$: Desviación estándar de las zonas de bosque en las bandas de Brillo, Verdor y Humedad.

Es decir, el proceso de re-escalamiento normaliza los valores de los píxeles en las bandas del *Tasseled Cap*, lo que permite una subsecuente combinación algebraica de cada una de las bandas.

Para el cálculo de las medias y desviaciones estándar de los valores de píxeles de bosque, se selecciona las zonas boscosas de más de 50000 m^2 de una cobertura de la tierra identificadas en el período intermedio (año 2000), información generada mediante una clasificación supervisada y que presentaran un valor de índice de forma (SI) elevado. A esa selección se aplica un muestreo aleatorio simple.

$$n_o = \left(\frac{Z \cdot \sqrt{p \cdot q}}{d} \right)^2
 \tag{4.17}$$

Donde

- n_o : Tamaño de muestra para la población infinita.
- Z : Nivel de confianza deseado, según la tabla normal (NC 95 %).
- p : Probabilidad de éxito. Se considera el 50 %.
- q : Probabilidad de fracaso (1-p).
- d : Error de estimación o error de muestreo.

Para el cálculo de la muestra, se usa un nivel de significancia ($\alpha = 0.02$). Además, se considera una probabilidad máxima de éxito del 50 % y un error de estimación del 2 %.

$$n_o = \left(\frac{1.645 \cdot \sqrt{0.5 \cdot 0.5}}{0.02} \right)^2 \approx 1692$$

Una vez establecido el muestreo simple aleatorio espacial, se procede a extraer los valores para cada una de las bandas (Brillo, Verdor, Humedad), así como de los descriptores estadísticos, de las medidas de centralidad y dispersión (media y desviación estándar). Estos valores, se usan para normalizar cada una de las bandas, en los diferentes períodos establecidos, para el cálculo del Índice de Disturbio. La normalidad de los datos se logra a partir del Teorema del Límite Central, en el que múltiples muestras son usadas con diferentes tamaños de muestra y valores medios son calculados. Con el incremento del tamaño de la muestra se obtiene una distribución normal.

$$DI = Brillo_{(z;t)} - \left(Verdor_{(z;t)} + Humedad_{(z;t)} \right)$$

Una vez, que se obtiene el índice de disturbio para los años en estudio (1986, 2001, 2018); se generará una imagen compuesta temporal (RGB), (Banda roja = 1986); (Banda verde = 2001); (Banda azul = 2018). Esto para facilitar el análisis del cambio temporal de los disturbios presentes en el área de estudio.

La implementación de los cálculos, algoritmos y análisis se realizará en los programas R 4.0.2 (R Core Team, 2019), Python 3.8.2 (Van Rossum & Drake, 2009; Van Rossum & Drake Jr, 1995). Mientras que la representación cartográfica se elaborará con los programas: ArcGIS Pro 2.6.2 y QGIS 3.12.3.

4.2.2. Objetivo específico 2:

Analizar las características térmicas y el patrón de distribución espacial de la ICU en la ciudad de Heredia.

Variable: Temperatura de la superficie terrestre (TST)

1. *Definición conceptual:* Es la temperatura que emite la superficie terrestre en un lugar determinado y que varía según el tipo de coberturas que la componen (Cochran, 2014; Fan *et al.* 2016; Liu & Zhang, 2011). Se rige a partir de los flujos de calor de la

superficie. Es importante destacar que la temperatura de la superficie terrestre no es la misma que la temperatura del aire que se incluye en el informe de las estaciones meteorológicas.

2. *Definición operativa:* Es la temperatura de la superficie terrestre (TST), estimada a partir de la banda termal del sensor Landsat mediante el algoritmo mono-ventana propuesto por Qin *et al.* (2001), Sobrino *et al.* (2004), F. Wang *et al.* (2015).
3. *Instrumentación:* Mediante el uso de sensores remotos y teledetección se puede estimar el comportamiento térmico de las coberturas de la tierra que se manifiestan en el área de estudio. De un conjunto de imágenes multiespectrales de satélite se obtienen los valores de la temperatura de la superficie terrestre (TST) para cada una de estas. Para el desarrollo de este análisis se escoge el sensor Landsat (5 TM, 7 ETM+, 8 TIRS). Entre las principales razones de su selección están: su disponibilidad temporal en el período de estudio y su extendido uso en aplicaciones físico-ambientales. A continuación, se describe el proceso para determinar la TST con una razonable calidad en su estimación (Voogt & Oke, 2003):

a) *Postproceso: Radiancia y reflectancia*

Para esto es fundamental un proceso de corrección atmosférica y convertir los números digitales en valores de radiancia y reflectancia, mediante las siguientes ecuaciones para el sensor Landsat.

Radiancia:

$$L_{\lambda} = \text{Ganancia} \times \text{Valor Pixel} + \text{Valor de compensación}$$

$$L_{\lambda} = \frac{Q_{cal}}{100}$$

Reflectancia:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \sin\theta} \tag{4.18}$$

Donde:

- L_{λ} : Radiancia en unidades de $W/(m^2 * sr * \mu m)$
- d : Distancia Sol-Tierra, en unidades astronómicas.
- $ESUN_{\lambda}$: Irradiancia solar en unidades de $W/(m^2 * \mu m)$
- θ : Elevación del Sol en grados decimales.

b) *Temperatura de brillo superior de la atmósfera*: Una vez que se calcula la radiancia espectral L_λ , la temperatura de brillo a nivel del satélite se puede calcular directamente invirtiendo la función de radiancia de Planck para la temperatura o usando la siguiente fórmula de aproximación propuesta por (Qin *et al.* 2001; Wukelic *et al.* 1989):

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \tag{4.19}$$

Donde T es el valor efectivo en la temperatura del satélite (temperatura de brillo) en grados Kelvin. K1 y K2 son constantes de calibración y están preestablecidas por el sensor (Cuadro 4.3).

CUADRO 4.3: Constantes de calibración preestablecidas según tipo de sensor.

Tipo Sensor	Valor K_1	Valor K_2	Fuente
Landsat 5 TM	607.76	1260.56	Global Land Cover Facility (2004), J. Zhang <i>et al.</i> (2006)
Landsat 7 ETM+	666.09	1282.71	Global Land Cover Facility (2004)
Landsat 8 TIRS	774.8853	1321.0789	U.S Geological Survey (2016)

Unidades de K_1 : $[W/(m^2 * sr * \mu m)]$
 Unidades de K_2 : [K]

Si bien las imágenes satelitales captan el resplandor que viaja a través de la atmósfera. Ese resplandor es atenuado por la absorción de la atmósfera en la longitud de onda. Se sabe que la atmósfera tiene la capacidad de emitir radiación térmica, de tal forma que la emanación atmosférica ascendente se combina con la radiación térmica del suelo para alcanzar el sensor en el espacio. Además, la superficie del suelo también refleja la emisión atmosférica descendente.

Estos impactos atmosféricos en la radiación térmica observada deben considerarse para la estimación de la temperatura de la superficie y sus consiguientes aplicaciones. De tal manera Sobrino *et al.* (2004), J. Zhang *et al.* (2006) indican que es necesario corregir la absorción y re-emisión atmosférica, la emisividad de la superficie y la rugosidad del terreno. Según Alfraihath (2015), Cook (2014), Tsou *et al.* (2017), J. Zhang *et al.* (2006), al ser un proceso

complejo, es común simplificar el mismo mediante el algoritmo de mono-ventana propuesto por (Qin *et al.* 2001).

c) *Algoritmo mono-ventana según Qin et al. (2001), Sobrino et al. (2004), F. Wang et al. (2015)*, se expresa de la siguiente manera:

$$T_{ST} = \frac{a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D] \cdot T_{sensor} - D \cdot T_a}{C} \quad (4.20)$$

Donde:

T_{ST} : Temperatura de la superficie terrestre en K.

T_{sensor} : Temperatura de brillo superior de la atmósfera calculada del sensor + la banda termal
 (10.40 – 12.50 μm) 120 m (banda 6 Landsat 5 TM - Landsat 7 ETM+)
 (10.6 – 11.2 μm) 120 m (banda 10 Landsat 8 TIRS)

T_a : Es la temperatura media efectiva de la atmósfera.

a y b : Se consignan en los cuadros 4.4 y 4.5 para cada tipo de sensor.

CUADRO 4.4: Constantes de calibración preestablecidas sensor Landsat 5 TM - Landsat 7 ETM+ (Qin *et al.* 2001).

Rango de Temperatura (° C)	a	b	R^2
0.35 – 70.35	-67.355351	0.458606	0.9996
10 – 40	63.1885	0.44411	0.9997
30 – 60	71.9992	0.47271	0.9999

Mientras que C y D se calculan de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$C = \varepsilon \cdot \tau \quad (4.21)$$

$$D = (1 - \tau) [1 + (1 - \varepsilon) \tau] \quad (4.22)$$

CUADRO 4.5: Constantes de calibración preestablecidas sensor Landsat 8 TIRS (F. Wang *et al.* 2015).

Rango de Temperatura (° C)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
20 – 70	-70.1775	0.4581	0.9997
0 – 50	-62.7182	0.339	0.9996
-20 – -30	-55.4276	0.4086	0.9996

De esta manera es necesario obtener los parámetros T_a , emisividad (ϵ) y transmitancia (τ) para convertir la temperatura de brillo en la atmósfera a la TST.

- (i) T_a se calcula a partir de ecuaciones lineales correspondientes a cuatro atmósferas estándares (Qin *et al.* 2001) y establecidas en el cuadro 4.6. Esto debido a que se requiere *in situ* de la distribución de la temperatura atmosférica y el contenido de vapor de agua en cada capa del perfil atmosférico. Información que por lo general no está disponible. Para el caso de esta investigación se utiliza la relación lineal establecida para el trópico (*).

$$\begin{aligned}
 T_a &= \frac{1}{w} \sum_{z=0}^m T_z w(z) & (4.23) \\
 T_a &= \sum \frac{T_z \cdot w(z)}{w} \\
 T_a &= \sum T_z R_w(z)
 \end{aligned}$$

De acuerdo con el cuadro 4.6, T_0 es la temperatura del aire cerca de la superficie terrestre, y se obtiene de los datos de las estaciones meteorológicas. Según como describe F. Wang *et al.* (2015), hay dos problemas para adquirir el T_0 por cada píxel con datos meteorológicos locales en el corto tiempo del pase del satélite. El primero consiste en el tamaño de la superficie de una escena de una imagen Landsat, que cubre un área de $185 \times 185 \text{ km}^2$. Por lo tanto, la distribución espacial de T_0 puede ser diferente para varios terrenos, especialmente por la orografía. Para

tener una estimación relativamente precisa de T_a en la escala de píxeles, es necesario espacializar los datos meteorológicos con un modelo digital de elevación del terreno (MDT).

CUADRO 4.6: Relaciones lineales para la aproximación de la temperatura atmosférica media efectiva (T_a) de la temperatura del aire en la superficie cercana (T_0) para 4 tipos de atmósfera estándar (Qin *et al.* 2001; F. Wang *et al.* 2015).

Tipo atmósfera	Ecuación
USA 1976	$T_a = 25.9396 + 0.88045T_0$
Tropical (*)	$T_a = 17.9769 + 0.91715T_0$
Latitud media verano	$T_a = 16.0110 + 0.92621T_0$
Latitud media invierno	$T_a = 19.2704 + 0.91118T_0$

Se considera condiciones de cielo despejado y sin gran turbulencia vertical en la atmósfera.

Mientras que el segundo problema está relacionado con los faltantes de datos en las estaciones meteorológicas. Según Henn *et al.* (2013), que las series de datos estén incompletas es una situación común en la observación meteorológica. Una solución viable es el uso de un filtro estacional de Kalman para completar los datos faltantes en las series de tiempo. En el Apéndice C se indican las estaciones meteorológicas utilizadas y su análisis de completitud.

Además de la temperatura promedio del aire, los conjuntos de datos de las mediciones meteorológicas locales, también, se incluyen los valores de la temperatura máxima diaria y mínima del aire. Para obtener la variación diurna completa de la temperatura del aire cerca de la superficie, es necesario un esquema de interpolación espacial. Se sabe que la variación diurna en la temperatura del aire sigue una curva sinusoidal en un día despejado, similar a otras variables, como la temperatura de la superficie y la radiación solar entrante. Una solución relativamente simple para describir la fluctuación de la temperatura del aire durante el día se presenta al calcular la ecuación 4.24.

$$T_{0,t} = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) \cdot \sin \left[\frac{\pi \left(t + \frac{t_{dl}}{2} - 12 \right)}{(t_{dl} + 2t_{max})} \right] \quad (4.24)$$

Donde:

$T_{0,t}$: Temperatura del aire cerca de la superficie terrestre (1.5 m) en un tiempo t .

T_{min} y T_{max} : Temperatura diaria mínima y máxima del aire cerca de la superficie terrestre en un tiempo.

t_{dl} : La duración del día en horas.

$t_{T_{max}}$: Es el número de horas entre el mediodía solar local y la hora de T_{max} . Esta tiene que establecerse de manera empírica.

El cálculo de la temperatura del aire en la superficie cercana al tiempo de paso del satélite, según la ecuación 4.24, es solo para la ubicación puntual de las estaciones meteorológicas. Para estimar el T_0 de manera continua en el área de estudio es necesario realizar una interpolación espacial.

La temperatura del aire de la estación meteorológica se ajusta a un nivel común, utilizando la siguiente ecuación:

$$T_r = T_{stn} - \Gamma (z_0 - z_{stn}) \quad (4.25)$$

Donde:

T_{stn} [K] : Es la temperatura del aire observada en la estación meteorológica. Se consiga la elevación en la cual se encuentra la estación.

T_r [K] : Es la temperatura del aire en la elevación de referencia.

z_0 : Nivel del mar, o $z_0 = 0$ m.

Γ : Variaciones en la tasa de lapso de la temperatura del aire.

Los valores de las variaciones en la tasa de lapso Γ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$) están dados según el cuadro 4.7 y varía según el mes del año. Otra opción es calcular según los datos de la estación adyacente.

Las temperaturas de la estación de referencia y nivel se interpolan a

CUADRO 4.7: Variaciones en la tasa de lapso de la temperatura del aire, para cada mes del año, en el Hemisferio Norte (Kunkel, 1989), y factores de ajuste de precipitación-elevación.

Mes	Tasa de lapso de la temperatura del aire ($^{\circ}C \cdot km^{-1}$)	Coefficiente de la presión del vapor	Factor de ajuste de la precipitación (km^{-1})
Ene	4.4	0.41	0.35
Feb	5.9	0.42	0.35
Mar	7.1	0.40	0.35
Abr	7.8	0.39	0.30
May	8.1	0.38	0.25
Jun	8.2	0.36	0.20
Jul	8.1	0.33	0.20
Ago	8.1	0.33	0.20
Set	7.7	0.36	0.20
Oct	6.8	0.37	0.25
Nov	5.5	0.40	0.30
Dec	4.7	0.40	0.35

la cuadrícula del modelo utilizando un método de proceso de regresión gaussiana ponderada (Kriging). Los datos de topografía y la tasa de lapso se utilizan para ajustar las temperaturas de la cuadrícula de nivel de referencia a las elevaciones proporcionadas por el conjunto de datos del Modelo Digital del Terreno (MDT), utilizando:

$$T_0 = T_r - \Gamma(z - z_0) \tag{4.26}$$

T_r es la grilla (*ráster*) de la temperatura del aire en la elevación de referencia, z_0 , y T_0 (K) es la grilla (*ráster*) de la temperatura del aire en la elevación del conjunto de datos topográficos del MDT, $z(m)$.

- (ii) *Estimación de la emisividad de la superficie terrestre (EST)*: La emisividad de un objeto es determinada por sus características físico-térmicas. Para la superficie terrestre, los elementos que la componen son los principales factores que determinan su emisividad. Dado que la emisividad es variable con la longitud de onda, el método de umbral del *Normalized difference*

vegetation index (NDVI) propuesto por Alfraihat (2015), Sobrino *et al.* (2004), J. Zhang *et al.* (2006), puede ser usado para su estimación en diferentes superficies terrestres en el rango espectral de 10 a 12 μm .

El NDVI se calcula mediante la ecuación 4.27.

$$NDVI = \frac{NIR - Roja}{NIR + Roja} \tag{4.27}$$

Donde las bandas Roja y NIR representan las mediciones de reflectancia espectral adquiridas en las regiones roja (espectro visible) e infrarroja cercana, respectivamente (Cuadro 4.8).

CUADRO 4.8: Designación de bandas según respuesta espectral, para el cálculo del NDVI.

Sensor	Banda	
	Roja	NIR
Landsat 5 TM	Banda 3 0.63 – 0.69 μm	Banda 4 0.76 – 0.90 μm
Landsat 7 ETM+	Banda 3 0.63 – 0.69 μm	Banda 4 0.77 – 0.90 μm
Landsat 8 TIRS	Banda 4 0.636 – 0.673 μm	Banda 5 0.851 – 0.879 μm

<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>

Al considerar los siguientes casos de NDVI, se determina el valor de emisividad de la superficie terrestre:

a' $NDVI < -0.185$: En este caso, el píxel se considera como un cuerpo de agua. Se supone un valor constante para la emisividad de 0.991

b' $-0.185 \leq NDVI < 0.157$: En este caso, el píxel se considera suelo descubierto o una edificación. Se asigna un valor de emisividad de 0.966 en el caso de suelo y 0.962 para las edificaciones.

c' $NDVI > 0.727$: Los píxeles con valores de NDVI superiores a 0.727 se consideran cubiertos en su totalidad por vegetación. Se supone un valor constante para la emisividad, generalmente de 0.973.

d' $0.157 \leq NDVI \leq 0.727$: Según Alfraihat (2015), Chatterjee *et al.* (2017), Sobrino *et al.* (2004), para este caso el píxel está compuesto por una mezcla de suelo descubierto y vegetación, y la emisividad se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \times \ln(NDVI) \tag{4.28}$$

Otra alternativa es mediante un análisis de histogramas del NDVI. De tal manera se divide los valores del NDVI en 6 clases, las cuales se reclasifican en rangos preestablecidos de la siguiente manera:

CUADRO 4.9: Emisividad según valor del NDVI de la imagen espectral (Alfraihat, 2015; J. Zhang *et al.* 2006), y factores de ajuste de precipitación-elevación.

Rango			Emisividad ε
	NDVI	< -1	$\varepsilon = 0.985$
$-1 \leq$	NDVI	≤ -0.18	$\varepsilon = 0.985$
$-0.18 \leq$	NDVI	≤ 0.157	$\varepsilon = 0.955$
$0.157 \leq$	NDVI	≤ 0.727	$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \times \ln(NDVI)$
$0.727 \leq$	NDVI	≤ 0.8	$\varepsilon = 0.99$
$0.8 \leq$	NDVI	≤ 1	$\varepsilon = 0.99$

(iii) *Estimación de la transmitancia atmosférica (τ)*: La magnitud de la absorción atmosférica es la transmitancia. Su estimación es importante en el cálculo de la TST, debido a que la absorción atmosférica reduce la radiación

térmica que viaja hacia el sensor en el espacio. Existen varios factores que influyen en su variabilidad como la longitud de onda, la longitud de la trayectoria, el ozono, los productos químicos atmosféricos, los aerosoles y el vapor de agua. De los anteriores, el factor más significativo que controla la transmitancia atmosférica en el rango térmico del espectro es el vapor de agua. De ahí la importancia de estimar el contenido de vapor de agua en la atmósfera para el cálculo de la TST (Alfraihat, 2015; Qin *et al.* 2001; F. Wang *et al.* 2015).

El contenido de vapor de agua se puede calcular por varios métodos, pero en este caso se selecciona la propuesta metodológica establecida por Alfraihat (2015), Li *et al.* (2014), F. Wang *et al.* (2015) y que consiste en dos procesos. Primero, se utiliza la ecuación 4.29 para calcular el contenido de vapor de agua a partir de la humedad relativa (HR), dato que proviene de una o un conjunto de estaciones meteorológicas, en los días de registro de las imágenes. Segundo, se implementa los cuadros 4.10 y 4.11 de conversión propuestos por Qin *et al.* (2001) y F. Wang *et al.* (2015), para aproximar el valor de la transmitancia atmosférica.

Ecuación para calcular el contenido de vapor de agua viene dada por:

$$w_i = 0.0981 \times \left(10 \times 0.6108 \times \exp \frac{17.27 * (T_0 - 273.15)}{237.3 + (T_0 - 273.15)} \times HR \right) + 0.1697 \tag{4.29}$$

Donde w_i es el contenido de vapor de agua (g/cm^2), HR es la humedad relativa y T_0 es la temperatura del aire en la superficie.

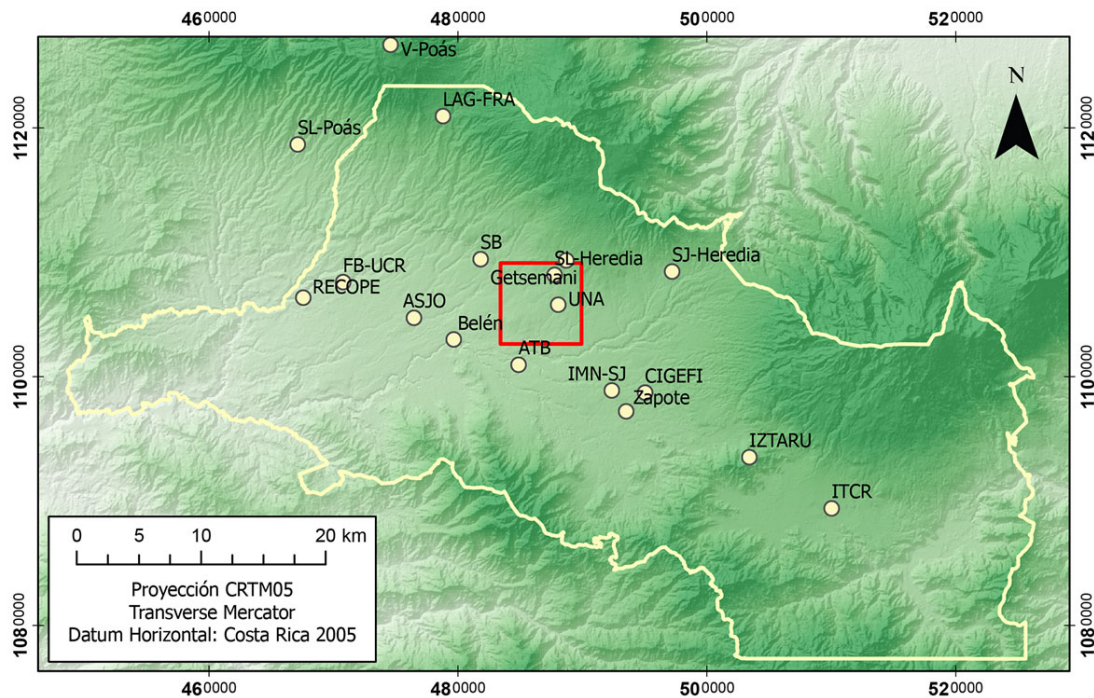
CUADRO 4.10: Estimación de la transmitancia atmosférica para las bandas TIRS del sensor Landsat 8 según (F. Wang *et al.* 2015).

Tipo atmósfera	Contenido de Vapor de agua (w) · ($g \cdot cm^{-2}$)	Ecuación estimada de τ	R^2	Error Estándar
Modelo Tropical (*)	0.2 - 2.0	$\tau_{10} = 0.9220 - 0.0780w_i$	0.983	0.0059
	2.0 - 5.6	$\tau_{10} = 1.0222 - 0.1310w_i$	0.999	0.0033
	5.6 - 6.8	$\tau_{10} = 0.5422 - 0.0440w_i$	0.991	0.0017

CUADRO 4.11: Estimación de la transmitancia atmosférica para la banda 6 TM del sensor Landsat 6 según (Qin *et al.* 2001).

Perfil	Contenido de Vapor de agua (w) · ($g \cdot cm^{-2}$)	Ecuación estimada de τ	R^2	Error Estándar
Alta temperatura del aire	0.4 - 1.6	$\tau_6 = 0.974290 - 0.08007w_i$	0.99611	0.002368
	1.6 - 3.0	$\tau_6 = 1.031412 - 0.11536w_i$	0.99827	0.002539
Baja temperatura del aire	0.4 - 1.6	$\tau_6 = 0.982007 - 0.09611w_i$	0.99463	0.003340
	1.6 - 3.0	$\tau_6 = 1.053710 - 0.14142w_i$	0.99899	0.002375

Para la calibración de los parámetros y variables en el cálculo de la TST se utiliza la información suministrada de las estaciones meteorológicas por el Instituto Meteorológico Nacional, y entregada según oficio No. IMN-DIM-CM-178-0919. En el anexo C se incluye el análisis de completitud de los datos climáticos. Además, en el mapa de la figura 4.1 se ubican las estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación.



Simbología

○ Estaciones Meteorológicas
 Límite de la GAM
 Área de estudio

MDT Value
 3758 m.s.n.m
 0 m.s.n.m

Fuente Cartográfica:

IGN. (2007). División Político Administrativa. San José: CENIGA.
 INVU. (1982). Límite de la Gran Área Metropolitana. San José: Dirección de Urbanismo.
 IMN. (2019). Estaciones meteorológicas. San José: Departamento de Información Meteorológica. Oficio IMN-DIM-CM-178-0919.

Fuente Fotogramétrica:

Ortofotos y Restitución. Escala 1:5.000. San José: Unidad Ejecutora.

Código	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
73123	ITCR	-83.908611	9.8522	1360
84023	FB-UCR	-84.2666	10.0166	840
84046	SJ-Heredia	-84.0255	10.0244	1450
84111	SL-Heredia	-84.11166	10.02194	1200
84124	SL-Poás	-84.3	10.11666	1360
84139	CIGEFI	-84.045277	9.936388	1210
84141	IMN-SJ	-84.069675	9.937947	1181
84169	ASJO	-84.214703	9.99068	913
84181	IZTARU	-83.96888	9.88944	1680

Código	Nombre	Longitud	Latitud	Altitud
84189	LAG-FRA	-84.1935	10.13733	1720
84191	RECOPE	-84.295833	10.005277	740
84193	ATB	-84.138	9.956592	997
84197	SB	-84.165833	10.03333	1070
84199	Belén	-84.18555	9.975	926
84203	Zapote	-84.059166	9.92277	1192
84205	Getsemani	-84.103055	10.0325	1389
84221	V-Poás	-84.232	10.189167	2598
40101	UNA	-84.108959	10.000276	1154

Septiembre 2019

FIGURA 4.1: Ubicación de las estaciones meteorológicas.

Variable: Isla de Calor Urbano.

1. *Definición conceptual:* Se refiere al fenómeno en el que la centralidad de una determinada área urbana (el aire y sus superficies) es más cálida que en su zona periférica no urbanizada (Cochran, 2014; Fan *et al.* 2016).
2. *Definición operativa:* Es la diferencia de la temperatura en la superficie o en el aire, a una altura de la superficie de 1.5 m ($T_{1.5m}$) entre las áreas urbanas y aquellas localizadas en la zona periférica (Estoque & Murayama, 2017; Jin, 2012).

Por la anterior característica, es necesario definir de manera precisa el límite de la aglomeración urbana y su área inmediata mediante un mapa de cobertura de la tierra (Zhao *et al.* 2016).

3. *Instrumentación:* El fenómeno de la ICU en el área de estudio se caracteriza en su intensidad y su distribución espacial en el período temporal de análisis.

a) *Intensidad zonal de la ICU:* Para la medición de la intensidad de ICU, se ha propuesto el uso de sistemas de clasificación de coberturas de la tierra, en las cuales la magnitud o intensidad de la ICU se puede expresar a través de las diferencias de temperatura entre zonas (Estoque & Murayama, 2017; T. Oke, 2006). Se utilizará una escala de rangos continuos.

Se considera las fases del ENOS (El Niño y La Niña) de los años en estudio para determinar la influencia del aumento de la temperatura en fase + de ENOS en el comportamiento de la ICU.

La comparación entre zonas de la ICU se implementa usando dos enfoques:

- 1) ICU_{cat} : En base a la diferencia media de la TST entre los tipos de superficie. Se usan las categorías de clase extraídas en la sección 4.2.1. Este es un método simple y directo, en que solo se requiere computar estadísticas descriptivas para cada categoría de cobertura la TST. Se sugiere agruparlas en dos grandes clases: De características de superficie impermeables y naturales o espacio verdes.
- 2) ICU_{up} : En base a la diferencia media de la TST entre zona urbana y una zona periférica. Para ello se usan las métricas establecidas en la sección 4.2.1. Estas permitirán la elaboración de perfiles del ICU con direcciones en sentido ortogonal y diagonal del centro medio de la ciudad y extendiéndose hacia la zona externa o periférica.

b) *Análisis de regresión*: Según Estoque y Murayama (2017), el análisis de regresión se puede extender al derivar la importancia relativa de las variables explicativas. Para asociar los componentes de temperatura y cobertura de la tierra, es necesario establecer el grado de relación entre las mismas. Según las condiciones necesarias se implementa de la siguiente forma:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in} + \varepsilon_i \quad (4.30)$$

Donde Y_i es la variable respuesta, mientras que β_0 es el coeficiente de intercepción y $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$ son los coeficientes de regresión o pendientes. A su vez, X_1, X_2, \dots, X_{in} son las variables explicativas, y ε_i es el error estándar. También se usará un modelo de regresión logística multinomial para modelar variables de resultado nominales (coberturas de la tierra), en las cuales las probabilidades de registro de los resultados se modelan como una combinación lineal de las variables predictoras. En particular, en el modelo logístico multinomial, la puntuación de carga se puede convertir a un valor de probabilidad, lo que indica la probabilidad de observación (i) elegir el resultado k dadas las características medidas de la observación. Esto proporciona en principio una forma de incorporar la predicción del modelo particular en un procedimiento más amplio que puede involucrar múltiples predicciones para cada categoría, además, se estima la posibilidad de error. Tiene la forma de la siguiente ecuación:

$$f(k, i) = \beta_{0,k} + \beta_{1,k} x_{1,i} + \beta_{2,k} x_{2,i} + \dots + \beta_{M,k} x_{M,i} \quad (4.31)$$

Donde $\beta_{M,k}$ es un coeficiente de regresión asociado con la M -ésima variable explicativa y el k -ésimo resultado.

Cuando se utiliza la regresión logística multinomial, se elige una categoría de la variable dependiente como categoría de referencia. Se determinan los riesgos relativos por separado para todas las variables independientes para cada categoría de la variable dependiente con la excepción de la categoría de referencia, que se omite del análisis. El coeficiente β exponencial representa el cambio en las probabilidades de que la variable dependiente se encuentre

en una categoría particular frente a la categoría de referencia, asociada con un cambio de una unidad de la variable independiente correspondiente.

- c) Mapeo del patrón de distribución: Mediante los Sistemas de Información Geográfica, se elaborará cartografía que represente la distribución espacial de la ICU en el área de estudio.
- d) *Análisis la serie espacio-temporal*: Se prepara un ráster espacio-temporal que será analizado mediante una serie de tiempo.

4.2.3. Objetivo específico 3:

Formular lineamientos estratégicos de planificación urbana sostenible, mediante la consideración de escenarios y tendencias de cambio de la cobertura de la tierra y de variación de la ICU.

Variable: Escenarios de tendencias de cambio de cobertura de la tierra y variación de la ICU

1. *Definición conceptual:* Es una técnica que permite diseñar entornos futuros alternativos que pueden afectar a una ciudad, orientado en las variaciones climáticas y las tendencias de cambio de uso de la tierra.
2. *Definición operativa:* Es la construcción de situaciones o de condiciones probables de ocurrencia en el área de estudio, a partir del análisis y el modelado de variables. Estas situaciones constituyen el agrupamiento de las distintas tendencias de impacto e incertidumbre en el territorio.
3. *Instrumentación:* De la descripción de la morfología urbana y el modelo de desarrollo¹ de la ciudad en su génesis y evolución, se busca identificar las tendencias que producirán las mayores transformaciones. Por el carácter del enfoque sistémico de la investigación, se realiza un análisis del entorno de acuerdo con conceptos prospectivos con un enfoque cuantitativo. Esto conducirá con la construcción de escenarios, y tendrá como base la información generada en los objetivos anteriores. Este proceso de análisis consistirá en:
 - a) Análisis de tendencias en series temporales de las oscilaciones climáticas: Se usarán los datos del El Niño Oscilación del Sur, Oscilaciones del Pacífico, el Ártico y Atlántico Norte para establecer los ciclos y tendencias climáticas históricas, y si es necesario considerarlas en el proceso de construcción de los escenarios, mediante los resultados de descomposición de series temporales y predicción a partir de un modelo de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA).
 - b) Descomposición de series temporales: Los datos de una serie de tiempo pueden contener de manera implícita cuatro elementos: **Tendencia** (T), **ciclos** (C),

¹Se toma en cuenta las dimensiones ambientales, económicas y socio culturales.

estacionalidad (E), y una **componente irregular** (I), aunque no siempre están presentes todos ellos. Para aislar y comprender estos elementos, se puede obtener una mejor idea del comportamiento de cada uno de sus elementos facilitándose el pronóstico. Para llevar a cabo la separación deben tenerse en cuenta las relaciones matemáticas que los unen. Uno de los modelos más utilizados para descomponer una serie de tiempo es el llamado **modelo multiplicativo**, en el cual se supone que la serie es el resultado del producto de sus cuatro componentes (Gentleman *et al.* 2008). El modelo se establece mediante la expresión de la ecuación 4.32:

$$Y = T \times C \times E \times I \quad (4.32)$$

- c) Modelos de simulación: Se usa un modelo *Autómata Celular*, el cual es un método para estimar el valor de una cantidad desconocida utilizando los principios de la estadística inferencial. Con la tendencia de cambio de uso estimada del ID y el ICU se realizará una proyección espacial de distribución aleatoria (*spatial allocation*). La asignación será de acuerdo con un porcentaje de cambio relativo previamente establecido, y a ocurrir en la ventana temporal específica o bajo condiciones preestablecidas.

Los parámetros asociados al modelado de escenarios consideran las coberturas de uso, el relieve, densidad de población, distancia de la red vial y del centro comercial. Se considera una distancia del centro de la celda de prueba (*kernel*) de 3×3 .

$$A_{(i,j)}^t = \begin{bmatrix} a_{(i-1,j-1)}^t & a_{(i-1,j)}^t & a_{(i-1,j+1)}^t \\ a_{(i,j-1)}^t & a_{(i,j)}^t & a_{(i,j+1)}^t \\ a_{(i+1,j-1)}^t & a_{(i+1,j)}^t & a_{(i+1,j+1)}^t \end{bmatrix} 3 \times 3 \text{ vecindad}$$

La dependencia del estado futuro ($t + 1$) de un píxel en el conjunto de reglas de transición (Φ) y el estado actual del píxel se examinó según la siguiente ecuación:

$$a_{i,j}^t = \phi \left(A_{(i,j)}^t \right) \quad (4.33)$$

Tal y como establece Tripathy y Kumar (2019), las reglas de transición (ϕ) son un conjunto de declaraciones condicionales con un valor de umbral, que se representan como:

$$\phi = f(U, B) \quad (4.34)$$

Las reglas de transición son una función de Umbral (U), que es el conjunto de valores umbral para todos los parámetros influenciados y B es el conjunto de valores de las frecuencias acumuladas en el núcleo asociado con cada conjunto de U.

$$U = \{U_{(RV)}, U_{(DCC)}, U_{(DP)}, U_{(Pend)}\} \quad (4.35)$$

$$B = \{B_{(RV)}, B_{(DCC)}, B_{(DP)}, B_{(Pend)}\} \quad (4.36)$$

De esa manera, $U_{(RV)}, U_{(DCC)}, U_{(DP)}, U_{(Pend)}$ son los valores umbrales de proximidad a la red vial (RV), la distancia del centro comercial (DCC), densidad de población (DP) y pendiente (Pend), de manera respectiva. Mientras, que $B_{(RV)}, B_{(DCC)}, B_{(DP)}, B_{(Pend)}$ son los valores que corresponden a la acumulación de los vecinos cercanos (definido según el kernel) de la celda de prueba, para cada elemento que pertenece al conjunto de U.

El diseño de escenarios para las ciudades presenta dificultades debido a la complejidad de los fenómenos urbanos que se desarrollan y que involucran una gran cantidad de variables para su análisis. Para evitar una multiplicación excesiva de variables, se propone el uso de una matriz de impacto - incertidumbre (figura 4.2), en la que se establece aquellas tendencias de cambio que muestren mayor impacto potencial y un mayor grado de incertidumbre (Fernández-Güell, 2006).

Cada escenario estará caracterizado por la combinación de variables con atributos que presenten un suficiente grado de diferenciación, y generaría diferentes situaciones alternativas. Esto permitirá establecer las bases para identificar las oportunidades y las amenazas que afectan la funcionalidad del sistema urbano.

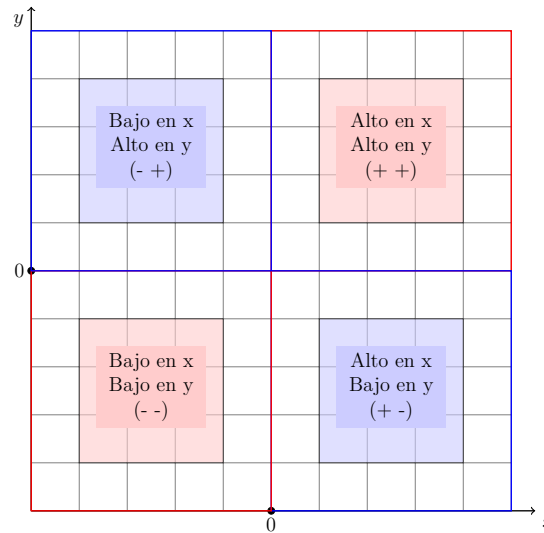


FIGURA 4.2: Propuesta de matriz impacto - incertidumbre

Categoría de análisis: Estrategias de planificación urbana sostenible

1. *Definición conceptual:* Es el conjunto de principios, actividades y medios que se proponen para alcanzar un modelo de ciudad deseado a partir de la situación actual. Según Fernández-Güell (2006), las estrategias urbanas pueden conceptualizarse como la ruta para solventar temas críticos que presenta una ciudad. Bajo el marco teórico del desarrollo sostenible, se establece que son aquellas propuestas que optan por la conservación de los recursos naturales y el mantenimiento de la calidad de vida de la población local, frente a un crecimiento descontrolado basado en el consumo sin límites.
2. *Definición operativa:* Es la formulación de un conjunto de posibles decisiones y acciones, que deben perpetuarse en un largo plazo para cumplir una meta u objetivo.
3. *Instrumentación:* Es la propuesta de una serie de posiciones estratégicas, que se le sugieren a un grupo de actores desarrollar para evitar o propiciar un posible escenario. Serán desarrollados para la consecución de la sostenibilidad en temas críticos relacionados a la investigación.
 - a) Mapa de actores: Se usa la metodología propuesta por Fernández-Güell (2006), Fletcher *et al.* (2003) en la planificación estratégica de ciudades. Corresponde a la identificación de los actores que están involucrados en la planificación

del territorio o que pueden estar interesados en la incidencia del componente climático sobre la ciudad de Heredia. Se usan las siguientes categorías:

- 1) Gobierno local: Establecen las políticas y condiciones locales del desarrollo urbanístico. El rol principal del Municipio es el de mantenimiento y ejecución de planes y programas en coordinación con el gobierno estatal. Tiene jurisdicción sobre su territorio en amplios ejes del desarrollo y en áreas como el abastecimiento de agua, la construcción y mantenimiento de las vías públicas cantonales, el mantenimiento del sistema de alcantarillado y limpieza y otras obras similares, así como el ornato de la ciudad. Mediante su Plan Regulador puede definir y orientar su ordenamiento territorial.
- 2) Sociedad Civil: Conjunto diverso de personas que con categoría de ciudadanos y de forma colectiva, actúan para tomar decisiones en el ámbito público que consideran a todo individuo que se halla fuera de las estructuras gubernamentales. Involucra a los ciudadanos que pueden acutar de manera individual o colectiva en una esfera pública para expresar sus intereses, pasiones e ideas, intercambiar información para objetivos comunes (Buqueras, 2002). Asociado a temas estilos de vida y consumo, promotores iniciales del cambio en la Ciudad.
- 3) Gobierno central o instituciones estatales: Entramado de instituciones que operan bajo el imperio de la ley, y dirigen, orientan y ejecutan la voluntad de los ciudadanos al servicio de estos y en pos del bien común, según la configuración de la distribución político-administrativa establecida en la división de poderes del Estado.
- 4) Academia: Instituciones de Educación Superior o de investigación científica que intercambian con la sociedad civil conocimientos y saberes de diversas maneras, por medio de docencia, investigación y extensión social.
- 5) Empresa privada: Organización con fines de lucro que es propiedad de un grupo de inversionistas o por un particular.

Los actores se agruparán de acuerdo según su tipología de interacción. Para establecer la implicación de los actores se emplea una participación indirecta estructurada. Por lo que se aplican una serie de cuestionarios dirigidos a los

sectores: sociedad civil, gobierno local y sector privado, se obtiene información sobre aspectos de percepción, coordinación e incidencia entre los actores en el tema de la planificación urbana y la adaptación al cambio climático. De manera adicional, se revisan los planes de trabajos e informes de labores de las instituciones públicas sobre el tema en particular como: el Plan de Desarrollo Cantonal de Heredia y el Informe de gestión Municipal 2019 de la Municipalidad de Heredia. Además, para la valoración del papel que desempeña el sector académico se utiliza la información generada por la Red de Cambio Climático y Gestión del Riesgo (2018).

- b)* Selección de temas críticos. Consiste en la jerarquización de temas relevantes asociados a la consecución de sostenibilidad en las ciudades, pero solo abordado en los ejes y variables de la investigación.
- c)* Definición de líneas estratégicas: Son declaraciones conceptuales sobre las condiciones deseadas para un tema concreto de la ciudad. Tienen un carácter cualitativo.
- d)* Análisis de las opciones estratégicas básicas: Es el proceso de considerar el tipo de posición que se podrá adoptar. En una actitud proactiva se consideran los siguientes tipos de estrategias:
 - 1) Estrategias de liderazgo.
 - 2) Estrategias flexibles.
 - 3) Estrategia expectante.

CUADRO 4.12: Matriz de coherencia interna de la investigación

Método: Enfoque y tipo de investigación	Instrumento de investigación	VARIABLES categorías de análisis	Perspectiva teórica
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enfoque Cuantitativo. ▪ Tipo de investigación Correlacional. 	Sensores remotos y teledetección. Trabajo de campo. Monitoreo.	<p>Obj. 1</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Morfología urbana. (Var) 2. Cobertura de la tierra. (CA) 3. Cambio de cobertura de la tierra. (Var) <p>Obj. 2</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Temperatura superficie terrestre. (Var) 2. Isla de Calor Urbano. (Var) <p>Obj. 3</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Escenarios de tendencias de CU/ICU. (Var) 2. Estrategias de planificación urbana sostenible. (CA) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. La ciudad y las aglomeraciones urbanas. 2. El cambio de cobertura de la tierra, tendencias y escenarios. 3. El Clima urbano. 4. Las ciudades sostenibles.

Hipótesis: A una mayor tendencia de cambios de la cobertura natural hacia usos de la tierra antrópicos, aumenta el patrón de la ICU en la ciudad de Heredia.

Capítulo 5

RESULTADOS

5.1. Morfología del sistema urbano

La morfología urbana es un análisis que trata de sintetizar a la ciudad a través de la comprensión de los espacios, las actividades y las relaciones que mantienen estos durante un período de tiempo, y que a su vez permiten establecer el paisaje urbano. Con el objetivo de establecer la morfología urbana, se reportan los resultados de los indicadores propuestos para la ciudad de Heredia.

5.1.1. Índice de forma y patrón de asentamiento

Al calcular el índice de forma para el Área de Estudio se obtiene:

$$SI_R = \frac{0.25 \times P_{i,j}}{\sqrt{a_{i,j}}}$$

$$SI_R = \frac{0.25 \times 7080.919044}{\sqrt{2836391.480804}} = 1.051106$$

El resultado indica que la forma de ciudad tiende a un cuadrado, lo cual es una característica de un trazo de forma regular y típica de un núcleo primitivo. Al analizar el patrón de la red vial mediante un análisis de grafos se obtiene:

A partir del análisis de estructuras se estima el Centro de Gravedad (CG) en las coordenadas (487154.2669 m E; 1105592.7121 m N), el hito localizado en esas coordenadas es el parque Nicolás Ulloa (parque Central). Mientras que el Eje Principal de la distancia típica se estiman los componentes ($x = 619.2542m$) y $y = 651.1972m$ con un ángulo de

CUADRO 5.1: Heredia: Análisis de grafos a la red vial.

Indicador o métrica	Símbolo	Valor
Grado promedio de centralidad	Θ	0.0119
Coefficiente de agrupación promedio	ϑ	0.02254
Longitud media del segmento de la calle	\tilde{l}	84.3719
Circunferencia promedio	ζ	1.01373
Grado promedio de los nodos	k	4.1818
Proporción de nodos que son callejones sin salida	P_{css}	0.0653
Proporción de nodos que son interacciones de cuatro vías	P_{As}	0.4915
Relación Altura de los edificios/Ancho de la calle	$\frac{Alt_{edif}}{A_{calle}}$	0.501

rotación ($\angle = 11.13^\circ$). De esta manera en la actualidad el centro histórico de la ciudad, todavía se mantiene como el centro geométrico de forma y funcional del asentamiento urbano. En la figura 5.1 se representa tanto el CG como el Eje Principal asociado. Esta última métrica es importante ya que en términos de estructura delimita el núcleo urbano. Mientras que las zonas ubicadas a una distancia mayor al Eje principal se pueden considerar como la zona periférica de la ciudad, tal y como se observa en la figura precitada. Con respecto al análisis del catastro del distrito central de Heredia, se establece que el parcelamiento corresponde a un patrón *Tipo X*, en el que se busca la mayor cantidad de fracciones con acceso directo a la vía pública. Mientras que el bloque urbano corresponde a un patrón de trazado hipodámico o en damero (bloque cuadrado) y característico a las ciudades españolas de la conquista.

5.1.2. Densidad de población

El crecimiento de la ciudad de Heredia fue paulatino con el paso del tiempo. La población al inicio creció a un ritmo lento, en 1864 el primer censo en Costa Rica registró 3146 habitantes. En el año 1883, la ciudad alcanza los 4234 habitantes; mientras que en el año 1892 se contabilizaron 6047 personas. A inicios del siglo XX, el patrón de crecimiento de la población se mantuvo estable y en el Censo en el año 1927 la cifra ascendió a 7631 habitantes. En 1950, un nuevo censo determinó la cantidad de personas registradas en las inmediaciones de la ciudad en 11967 habitantes. Para el año de 1963 los registros indican que la población alcanzó las 19259 personas. A su vez en el año 1973, el primer censo

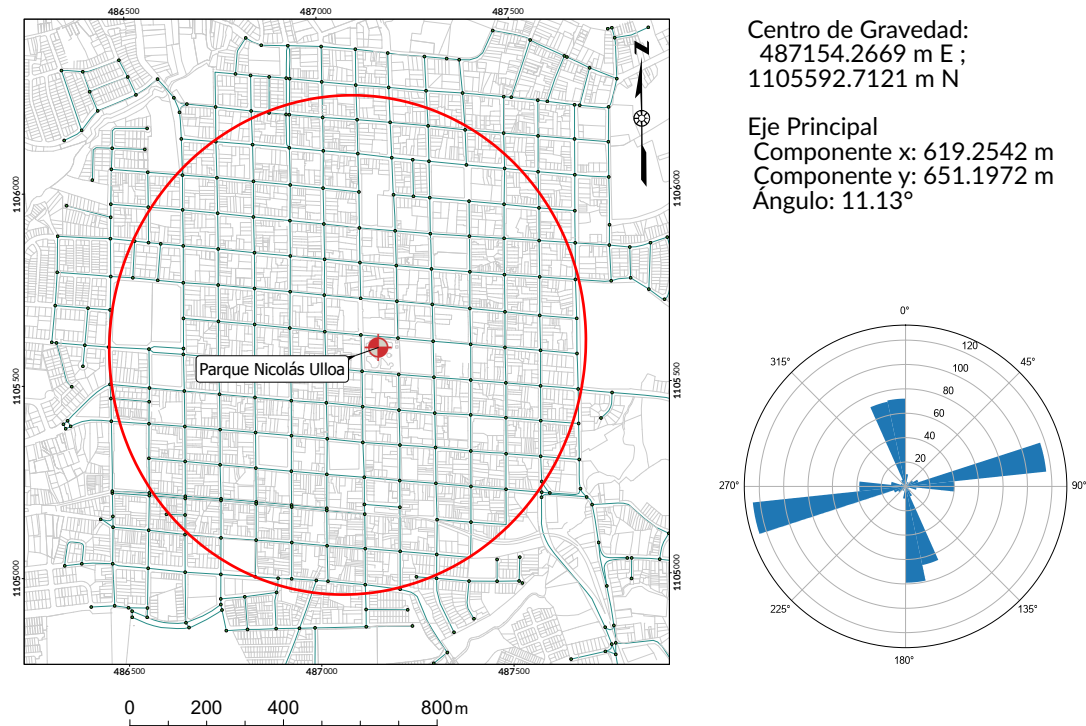


FIGURA 5.1: Heredia: Patrón de asentamiento y orientación de la red vial.

de la Dirección General de Estadística y Censos del Ministerio de Economía, Industria y Comercio establece que la población herediana ascendía a los 22700 pobladores. Mientras que en el censo de 1984 se establece que la población era de 21 440 habitantes.

En los censos de los años 2000 y 2011 elaborados por el Instituto Nacional de Estadística y Censo se evidencia la explosión demográfica en la ciudad de Heredia. En el último año censado se establece una población total de 123616 habitantes. En el gráfico 5.2 se representa la evolución del crecimiento de la población en la ciudad de Heredia.

En el mapa de la figura 5.3, se representa la densidad de población. Este fue elaborado a partir de los datos de las Unidades Mínimas Geoestadísticas del Censo de Población y Vivienda del 2011 (INEC, 2011). Se observa el patrón de concentración de la población en los sectores de la periferia de la ciudad.

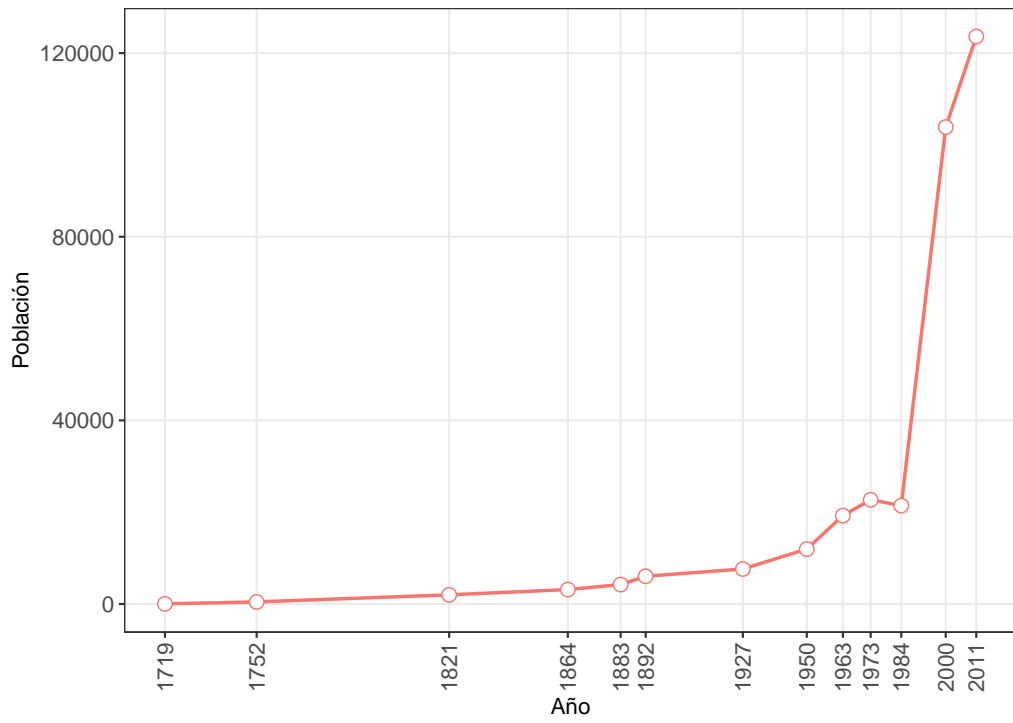


FIGURA 5.2: Heredia: Evolución de la población entre 1719-2011.

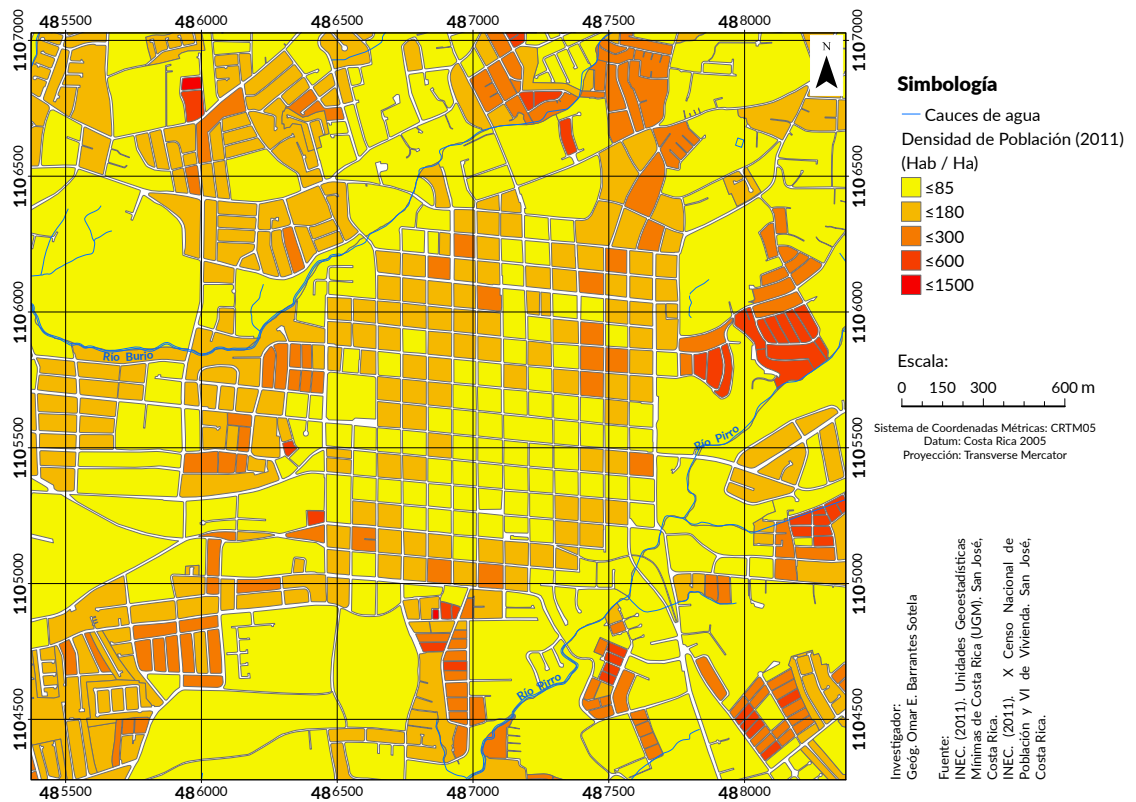


FIGURA 5.3: Heredia: Densidad de Población en el año 2011.

5.1.3. Densidad de las actividades económicas

Con el levantamiento de información sobre las actividades económicas durante el año 2019, se elaboró un inventario detallado de los diferentes comercios y servicios en el distrito central de Heredia. El inventario cuenta con 1810 registros de actividades económicas y actividades complementarias, las cuales se detallan en el cuadro 5.2.

CUADRO 5.2: Heredia: Frecuencia del tipo de actividades económicas.

Tipo	Frecuencia	Porcentaje
Comercio	762	42.10 %
Servicio	741	40.94 %
Otro	120	6.63 %
Mixto	87	4.80 %
Institucional	81	4.47 %
Recreativo/Deportivo	13	0.72 %
Industria	7	0.39 %

Al tomar como paralelo de referencia la Avenida Central de la ciudad de Heredia, que transcurre desde la explanada 11 de abril de la Universidad Nacional hasta el Palacio de los Deportes, se determina que la mayor concentración de las actividades económicas ocurre en el sector sur de la ciudad, entre calle 12 y calle 9. Además, la Universidad Nacional es un nodo de atracción de actividades económicas complementarias a ese centro de enseñanza de educación superior. Otros puntos de interés se establecen al Norte de la Casa de Cultura Alfredo González Flores y el Liceo de Heredia. En términos generales la centralidad de económica ocurre en las cercanías del Parque Central Nicolás Ulloa (Mapa de la figura 5.4).

El levantamiento de campo en el año 2019 refleja que predominan las actividades en edificaciones de un piso (75.43 %). Además, el material más utilizado en las edificaciones es el concreto (62.74 %) y un 75 % se encuentran en buen estado (Cuadro 5.3). Con estos datos, es posible estimar que el dosel urbano de la ciudad de Heredia presenta un perfil bajo de aproximadamente 3.75 m en altura. Además, los datos de densidad de población y de las actividades económicas muestran que al incrementar y fomentar la actividad económica en el área central, la población se ha desplazado hacia la periferia.

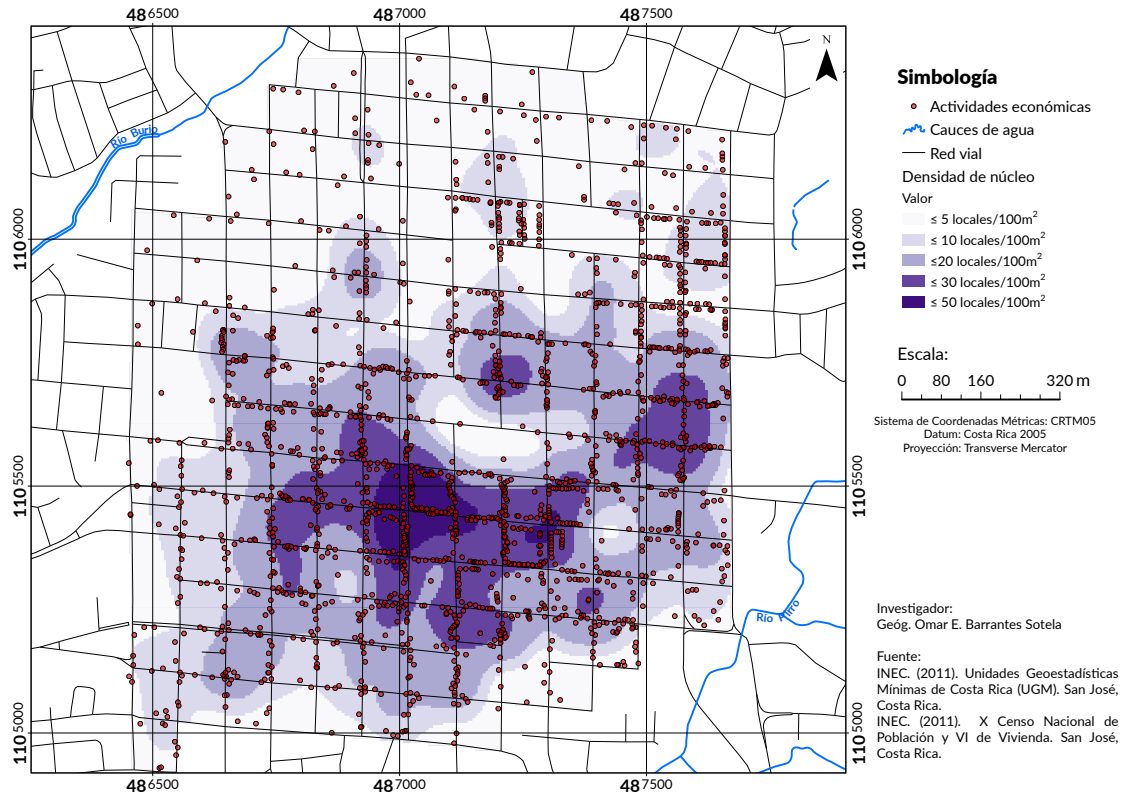


FIGURA 5.4: Heredia: Densidad de Actividades Económicas en el año 2019.

CUADRO 5.3: Heredia: Tipología de las estructuras con actividades económicas.

Material/Estado	1 Piso				2 Pisos				3 Pisos				4 Pisos		Gran Total
	Buena	Mala	Regular	Total	Buena	Mala	Regular	Total	Buena	Mala	Regular	Total	Buena	Total	
Concreto	545	6	222	773	271	1	96	368	12		2	14	2	2	1157
Madera	6	1	16	23		1	4	5			1	1			29
Mixto	478	1	64	543	37		18	55	2	1	1	4			602
Prefabricado	21		9	30			3	3	1			1			34
Otro material	2	1	4	7											7
NA	6		9	15											15
Total	1058	9	324	1391	308	2	121	431	15	1	4	20	2	2	1844

5.2. Cobertura de la tierra

Al pre-procesar las imágenes de satélite con base en lo establecido en el cuadro 4.2, se identifican de manera *a priori* las categorías de cobertura de la tierra presentes en el área de estudio, y que serán el resultado del proceso de clasificación. El algoritmo estadístico o de aprendizaje automático denominado *Random Forest* “aprende” una función de clasificación de un conjunto de muestras de entrenamiento. Esta técnica es un método de aprendizaje conjunto, que combina árboles CART K binarios (árboles de regresión y clasificación) (Pelletier *et al.* 2016).

Se construyen las coberturas de la tierra en dos períodos diferentes. El primero consiste en la identificación de las coberturas en un lapso de 34 años (1985, 2001 y 2019), en imágenes de los sensores Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI de resolución espacial de 30 metros. El segundo período identifica las coberturas en 3 años consecutivos (2017, 2018 y 2019), con imágenes del sensor Sentinel-2 de una resolución espacial de 10 metros.

El análisis de las coberturas a corto plazo permite establecer criterios para calibrar los escenarios de tendencia. Mientras que, en el caso del análisis a largo plazo, este se utiliza para determinar los perfiles térmicos por categoría de la tierra durante todo el registro disponible. Por la resolución espacial de los sensores, se esperan discrepancias con respecto a las áreas de las coberturas determinadas en el corto y largo plazo.

En cada imagen se seleccionaron sitios de entrenamiento y de validación, para constituir una muestra de más de 4500 puntos de muestreo. Estos sitios de muestreo se utilizan tanto para la clasificación como para el proceso de validación de los resultados obtenidos. Las muestras solo se comprobaron y validan en el terreno durante los años 2017, 2018 y 2019. Además, se digitalizan en entidades de polígono con base a su ubicación, para obtener una mayor superficie para la asignación de clases y en función al cuadro 4.2. La técnica consiste en asignar a cada instancia (píxel u objeto en las imágenes) a la clase correspondiente, y posibilita la distinción de los patrones de coberturas de la tierra a través de la representación de los datos y cartografía temática.

5.2.1. Identificación: Largo plazo (1985-2019)

En el cuadro 5.4, se detalla la composición de muestras por asignación de clases.

CUADRO 5.4: Área de estudio: Tamaño de muestras para entrenamiento del clasificador Random Forest (1985-2019).

Clase	Muestra		
	1985	2001	2019
Urb	678	1304	1047
For	607	1181	564
Mat	791	1570	503
Herb	936	852	799
Cul	1858	1638	820

Cobertura de la tierra 1985

Para la imagen del año 1985, el proceso de clasificación por el método *Random Forest* parece alcanzar una elevada precisión en la asignación de las clases ($\overline{PG} = 0.857$, $sd = 0.006$). Los resultados de la clasificación son consistentes, ya que presentan una variación similar entre las rondas de calibración. Según el cuadro 5.5 la mejor ronda de clasificación es la R20. Además, el índice de Kappa que mide la concordancia de la asignación de la clase con respecto a los datos observados (Kappa = 0.876), y el puntaje de habilidad de Pierce (*Peirce-skill score* [PSS = 0.879]), confirman una asignación de clases casi perfecta.

Las medidas de PPV, TPV y las entidades por clase (F1), señalan las categorías con el mejor proceso de asignación. Entre estas sobresalen las áreas urbanas (Urb), matorrales (Mat) y cultivos (Cul). Sin embargo, la clase de foresta (For) muestra un valor muy elevado en el VPP, en el TPV y F1 obtiene valores buenos o moderados. Mientras que con la categoría de pastos (Herb) los valores de la TPV y F1 son muy elevados, el valor en el VPP se considera como bueno. Las categorías de matorrales (Mat), pastos (Herb) y cultivos (Cul) tienden a confundirse con la categoría de foresta (For) dadas las similares características espectrales.

CUADRO 5.5: Área de estudio: Evaluación del clasificador *Random Forest* en 20 corridas, 1985.

Ronda	Precisión General	Índice Kappa	PSS
R_1	0.882	0.846	0.857
R_2	0.887	0.850	0.861
R_3	0.890	0.855	0.861
R_4	0.892	0.860	0.867
R_5	0.883	0.846	0.853
R_6	0.888	0.855	0.864
R_7	0.895	0.862	0.869
R_8	0.886	0.852	0.861
R_9	0.895	0.863	0.872
R_10	0.885	0.849	0.858
R_11	0.890	0.857	0.863
R_12	0.888	0.853	0.862
R_13	0.897	0.865	0.871
R_14	0.901	0.869	0.875
R_15	0.889	0.855	0.865
R_16	0.892	0.859	0.865
R_17	0.887	0.851	0.859
R_18	0.892	0.859	0.869
R_19	0.895	0.863	0.870
R_20	0.906	0.876	0.879
\bar{X}	0.891	0.857	0.865
sd	0.006	0.007	0.006

CUADRO 5.6: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Análisis de precisión por clase, 1985.

Clase	1	2	3	4	5
	Urb	For	Mat	Herb	Cul
VPP	1	0.931	0.833	0.7557	0.972
TPV	0.974	0.606	0.991	0.991	0.852
F1	0.988	0.751	0.906	0.859	0.907

VPP: Valor predictivo positivo.

TPV: Tasa positiva verdadera.

F1: Entidad.

CUADRO 5.7: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Matriz de confusión R_{20} , 1985.

	Urb	For	Mat	Herb	Cul
Urb	329	4	2	0	0
For	0	181	46	48	27
Mat	0	1	417	0	0
Herb	0	0	1	474	0
Cul	0	5	17	79	804

Cobertura de la tierra 2001

En la imagen del año 2001, se obtiene una precisión en la asignación de las clases de $(\overline{PG} = 0.838, sd = 0.006)$. Según el cuadro 5.8 los resultados varían poco, y la mejor ronda de clasificación es la R16. El índice de Kappa es el más bajo (Kappa = 0.796) al comparar entre las tres imágenes seleccionadas, pero muestra una concordancia sustancial. El puntaje de habilidad de Pierce (*Peirce-skill score* [PSS = 0.801]) es alto.

CUADRO 5.8: Área de estudio: Evaluación del clasificador *Random Forest* en 20 corridas, 2001.

Ronda	Precisión General	Índice Kappa	PSS
R_1	0.842	0.801	0.805
R_2	0.830	0.786	0.790
R_3	0.831	0.788	0.794
R_4	0.846	0.806	0.810
R_5	0.839	0.798	0.803
R_6	0.835	0.793	0.798
R_7	0.843	0.803	0.808
R_8	0.837	0.796	0.799
R_9	0.833	0.790	0.796
R_10	0.835	0.793	0.799
R_11	0.835	0.793	0.797
R_12	0.828	0.784	0.788
R_13	0.841	0.799	0.804
R_14	0.847	0.808	0.812
R_15	0.839	0.798	0.802
R_16	0.851	0.813	0.818
R_17	0.831	0.787	0.793
R_18	0.841	0.800	0.805
R_19	0.835	0.794	0.800
R_20	0.839	0.798	0.802
\bar{X}	0.838	0.796	0.801
sd	0.006	0.008	0.007

Al examinar los valores de las medidas de precisión promedio (PPV), recuperación (TPV) y las entidades por clase (F1), se establece que las clases más exitosas en la asignación son las coberturas urbanas (Urb) y de matorrales (Mat), seguido por las clases cultivos (Cul) y forestales (For). En términos generales todas las categorías se asignan de una forma correcta y sin errores significativos.

CUADRO 5.9: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Análisis de precisión por clase, 2001.

Clase	1 Urb	2 For	3 Mat	4 Herb	5 Cul
VPP	1	0.931	0.833	0.7557	0.972
TPV	0.975	0.604	0.979	0.975	0.693
F1	0.987	0.713	0.872	0.753	0.813

VPP: Valor predictivo positivo.
 TPV: Tasa positiva verdadera.
 F1: Entidad.

CUADRO 5.10: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Matriz de confusión R_{16} , 2001.

	Urb	For	Mat	Herb	Cul
Urb	632	9	0	0	0
For	0	358	136	74	24
Mat	1	4	772	2	0
Herb	0	0	7	423	0
Cul	0	4	59	167	601

Cobertura de la tierra 2019

En la imagen del año 2019, se obtiene una precisión en la asignación de las clases de ($\overline{PG} = 0.862$, $sd = 0.007$). Según el cuadro 5.11 los resultados varían poco, y la mejor ronda de clasificación es la R19. El índice de Kappa promedio es (Kappa = 0.825) lo que significa que existe una concordancia sustancial. El puntaje de habilidad de Pierce (*Peirce-skill score* [PSS = 0.827]) es alto.

CUADRO 5.11: Área de estudio: Evaluación del clasificador *Random Forest* en 20 corridas, 2019.

Ronda	Precisión General	Índice Kappa	PSS
R_1	0.858	0.819	0.820
R_2	0.875	0.841	0.842
R_3	0.848	0.808	0.809
R_4	0.859	0.821	0.825
R_5	0.855	0.816	0.817
R_6	0.854	0.814	0.816
R_7	0.864	0.827	0.827
R_8	0.869	0.834	0.834
R_9	0.860	0.822	0.823
R_10	0.866	0.830	0.833
R_11	0.864	0.828	0.829
R_12	0.869	0.834	0.835
R_13	0.866	0.830	0.831
R_14	0.856	0.816	0.816
R_15	0.854	0.815	0.817
R_16	0.863	0.825	0.828
R_17	0.859	0.821	0.823
R_18	0.869	0.834	0.836
R_19	0.876	0.842	0.841
R_20	0.864	0.828	0.829
\bar{X}	0.862	0.825	0.827
sd	0.007	0.009	0.009

Al estudiar los valores de las medidas de precisión promedio (PPV), recuperación (TPV) y las entidades por clase (F1), se establece que las clases más exitosas en la asignación son las coberturas urbanas (Urb) y de matorrales (Mat), seguido por las clases cultivos (Cul) y forestales (For). Se considera que todas las categorías se asignan de forma satisfactoria.

CUADRO 5.12: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Análisis de precisión por clase, 2019.

Clase	1	2	3	4	5
	Urb	For	Mat	Herb	Cul
VPP	0.998	0.897	0.631	0.782	0.993
TPV	0.981	0.609	0.838	0.953	0.779
F1	0.990	0.736	0.725	0.859	0.881

VPP: Valor predictivo positivo.

TPV: Tasa positiva verdadera.

F1: Entidad.

CUADRO 5.13: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Matriz de confusión R_{20} , 2019.

	Urb	For	Mat	Herb	Cul
Urb	502	6	1	0	0
For	0	180	74	11	0
Mat	1	9	216	33	0
Herb	0	0	14	414	0
Cul	0	4	13	66	323

A continuación, se presentan los mapas de las coberturas de los años 1985, 2001 y 2019.

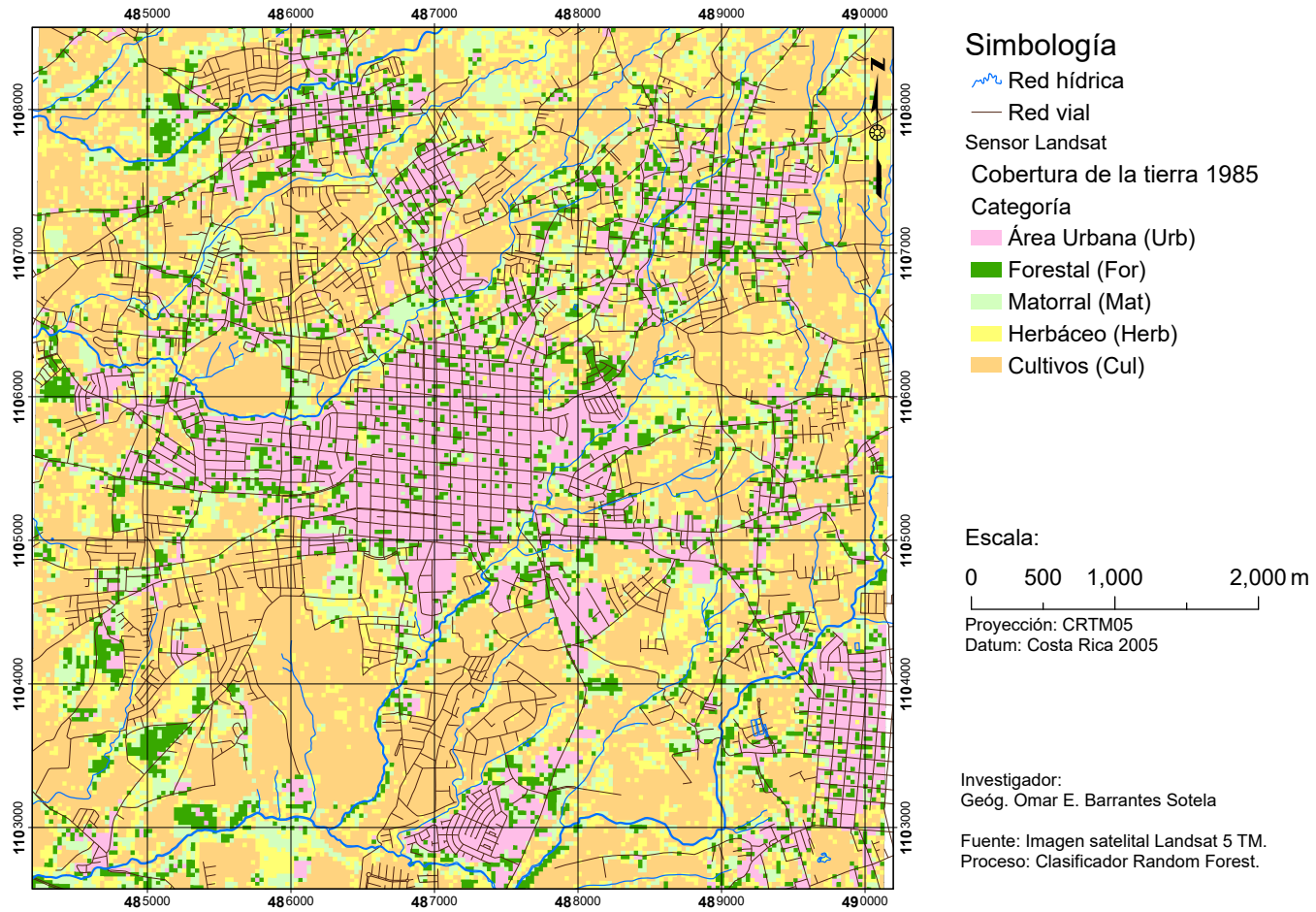


FIGURA 5.5: Heredia: Cobertura de la tierra, 1985.

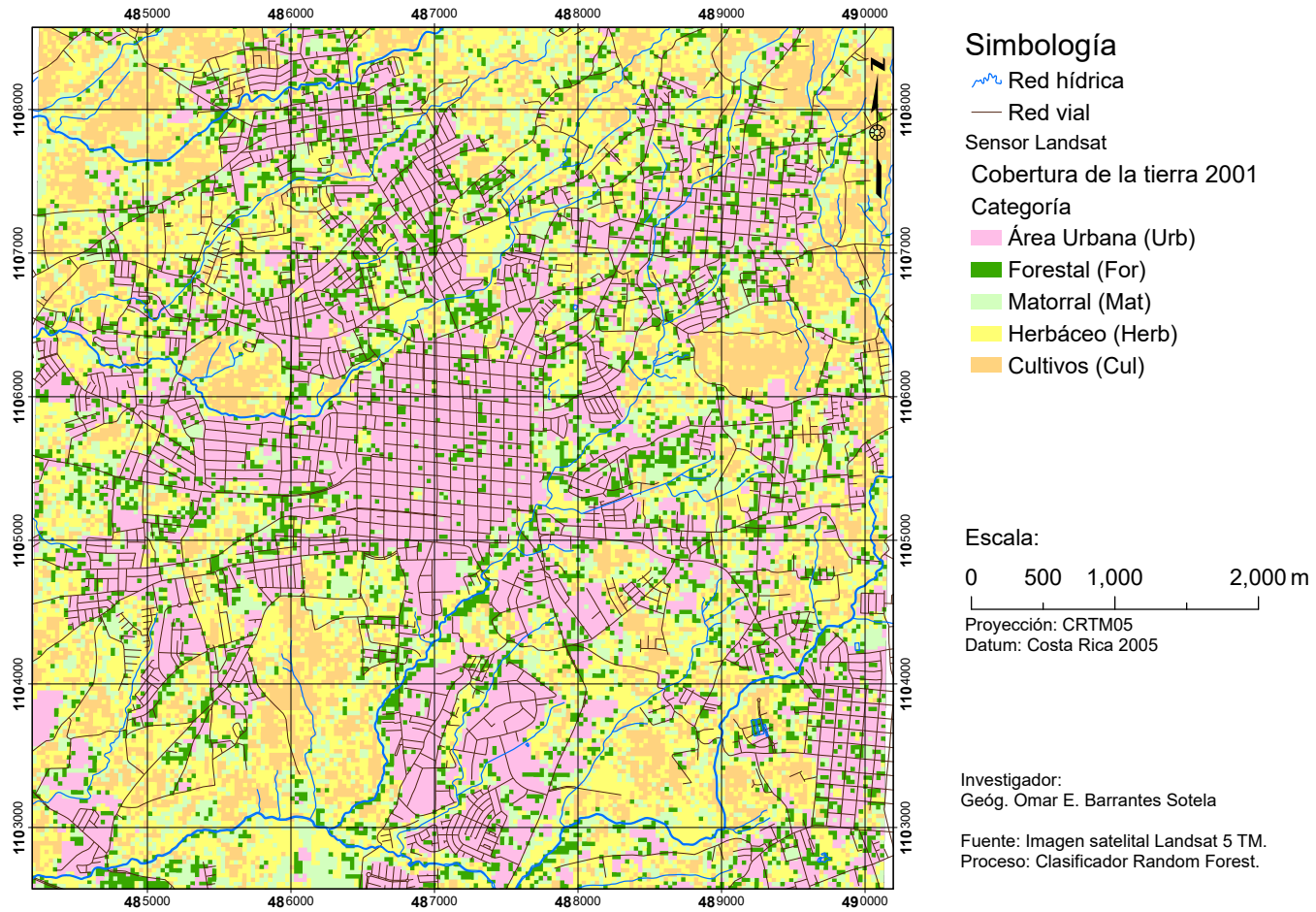


FIGURA 5.6: Heredia: Cobertura de la tierra, 2001.

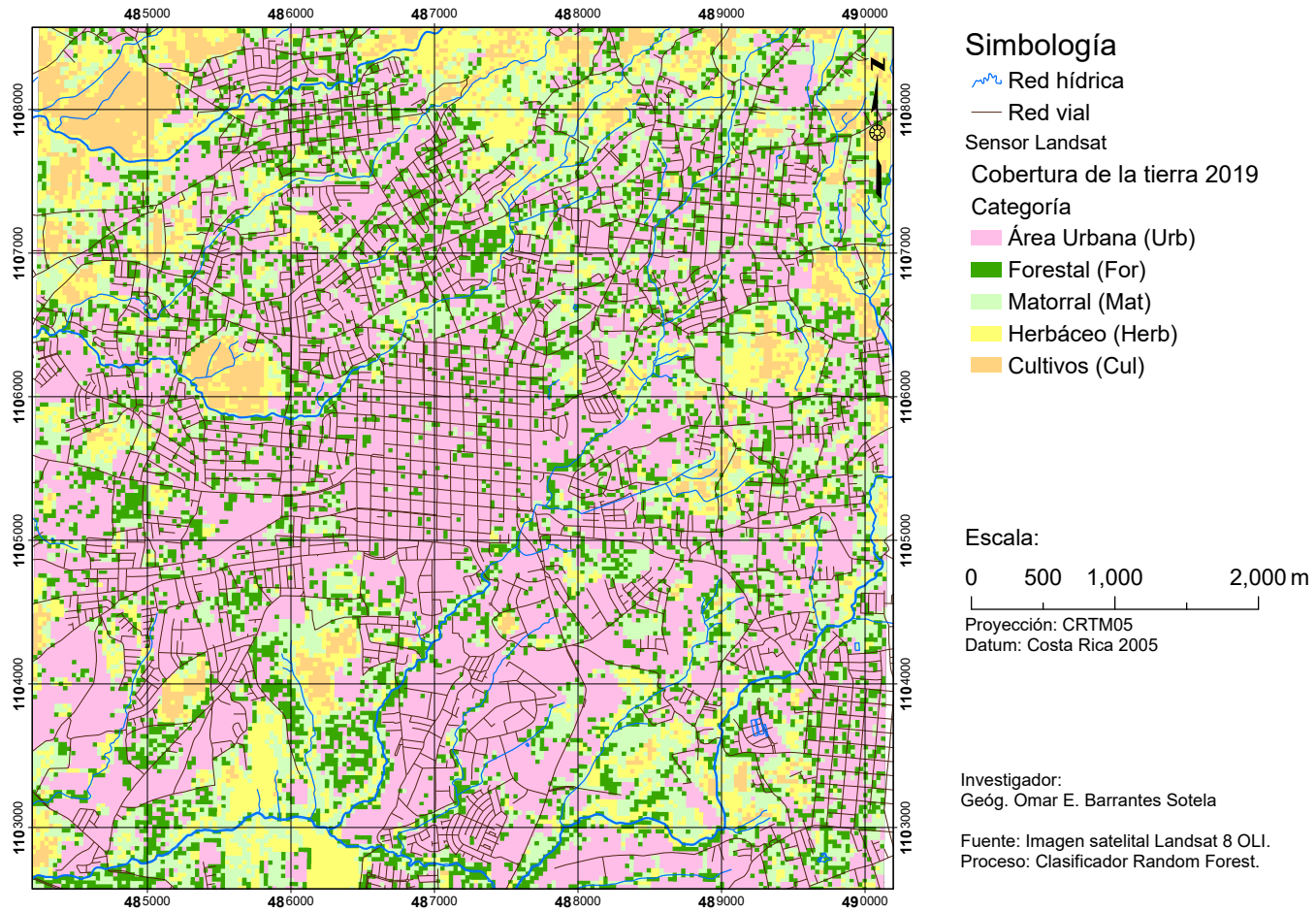


FIGURA 5.7: Heredia: Cobertura de la tierra, 2019.

5.2.2. Identificación: Corto plazo (2017-2019)

En el cuadro 5.14, se detalla la composición de muestras por asignación de clases.

CUADRO 5.14: Área de estudio: Tamaño de muestras para entrenamiento del clasificador Random Forest (2017-2019).

Clase	Muestra		
	2017	2018	2019
Ca	257	92	85
Urb	2333	3452	3452
Td	102	50	50
For	600	671	332
Mat	109	45	45
Herb	307	253	252
Cul	955	3991	3991

A partir de las muestras utilizadas en el proceso de clasificación, se generan los siguientes resultados.

Cobertura de la tierra 2017

Para la imagen del año 2017, el proceso de clasificación por el método *Random Forest* parece alcanzar una elevada precisión en la asignación de las clases ($\overline{PG} = 0.863$, $sd = 0.006$). Se afirma que los resultados de la clasificación son aceptables, ya que presentan una variación similar entre las rondas de calibración. Según el cuadro 5.15 la mejor ronda de clasificación es la R13. Además, el índice de Kappa que mide la concordancia de la asignación de la clase con respecto a los datos observados (Kappa = 0.801), y el puntaje de habilidad de Pierce (*Peirce-skill score* [PSS = 0.804]), confirman una clasificación con resultados de concordancia sustanciales y robustos.

CUADRO 5.15: Área de estudio: Evaluación del clasificador *Random Forest* en 20 corridas, 2017.

Ronda	Precisión General	Índice Kappa	PSS
R_1	0.871	0.811	0.818
R_2	0.865	0.805	0.810
R_3	0.861	0.797	0.803
R_4	0.864	0.802	0.807
R_5	0.860	0.797	0.802
R_6	0.852	0.786	0.790
R_7	0.870	0.808	0.810
R_8	0.862	0.800	0.803
R_9	0.863	0.800	0.801
R_{10}	0.875	0.815	0.814
R_{11}	0.855	0.790	0.791
R_{12}	0.855	0.789	0.796
R_{13}	0.875	0.817	0.816
R_{14}	0.865	0.802	0.810
R_{15}	0.859	0.792	0.796
R_{16}	0.860	0.794	0.799
R_{17}	0.863	0.800	0.797
R_{18}	0.864	0.803	0.810
R_{19}	0.863	0.800	0.807
R_{20}	0.867	0.803	0.807
\bar{X}	0.863	0.801	0.804
sd	0.006	0.008	0.008

A su vez, las medidas de precisión promedio (también conocido como valor predictivo positivo, PPV), recuperación (también conocido como tasa positiva verdadera, TPV) y las entidades por clase (F1), reportan cuales clases de cobertura de la tierra fueron más exitosas en la asignación de clases. Las clases con la mejor asignación de entidades son los cuerpos de agua (Ca), las áreas urbanas (Urb), la foresta (For) y los cultivos (Cul). Mientras que las clases con la peor evaluación son los terrenos descubiertos (Td) y los matorrales (Mat).

CUADRO 5.16: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Análisis de precisión por clase, 2017.

Clase	1 Ca	2 Urb	3 Td	4 For	5 Mat	6 Herb	7 Cul
VPP	1.000	0.960	0.394	0.948	0.166	0.520	0.968
TPV	0.913	0.987	0.265	0.698	0.292	0.947	0.747
F1	0.957	0.973	0.313	0.803	0.223	0.672	0.844

VPP: Valor predictivo positivo.

TPV: Tasa positiva verdadera.

F1: Entidad.

CUADRO 5.17: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Matriz de confusión R_{13} , 2017.

	Ca	Urb	Td	For	Mat	Herb	Cul
Ca	114	19	1	0	0	0	0
Urb	0	1154	13	2	0	0	0
Td	0	37	14	0	0	0	0
For	0	0	2	223	47	19	4
Mat	0	0	2	5	11	20	10
Herb	0	0	0	0	8	152	1
Cul	0	0	0	7	20	74	372

Cobertura de la tierra 2018

Para el año 2018, las métricas parecen indicar que los resultados mantienen una alta significancia con respecto a la precisión alcanzada ($\overline{PG} = 0.871$, $sd = 0.005$). La variación entre las rondas de calibración es reducida, y la mejor ronda de clasificación fue la R16. El índice Kappa (Kappa = 0.799), y el puntaje de habilidad de Pierce (*Peirce-skill score* [PSS = 0.839]), confirman que el proceso de clasificación genera resultados casi perfectos.

CUADRO 5.18: Área de estudio: Evaluación del clasificador *Random Forest* en 20 corridas, 2018.

Ronda	Precisión General	Índice Kappa	PSS
R_1	0.873	0.801	0.839
R_2	0.873	0.801	0.837
R_3	0.878	0.810	0.847
R_4	0.877	0.808	0.845
R_5	0.868	0.794	0.837
R_6	0.871	0.800	0.843
R_7	0.873	0.802	0.846
R_8	0.865	0.790	0.830
R_9	0.868	0.796	0.838
R_{10}	0.874	0.804	0.838
R_{11}	0.865	0.790	0.829
R_{12}	0.871	0.801	0.838
R_{13}	0.865	0.790	0.833
R_{14}	0.868	0.795	0.837
R_{15}	0.874	0.805	0.841
R_{16}	0.881	0.813	0.851
R_{17}	0.876	0.807	0.845
R_{18}	0.868	0.795	0.834
R_{19}	0.867	0.793	0.833
R_{20}	0.863	0.788	0.830
\bar{X}	0.871	0.799	0.839
sd	0.005	0.007	0.006

Las medidas de precisión promedio (PPV), recuperación (TPV) y las entidades por clase (F1), indican que las clases de cobertura de la tierra más exitosas en la asignación de clases son las mismas que las del año 2017. También, se consigna que las clases con las evaluaciones más deficientes son las mismas que las reportadas en el año 2017; terrenos descubiertos (Td) y los matorrales (Mat).

CUADRO 5.19: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Análisis de precisión por clase, 2018.

Clase	1 Ca	2 Urb	3 Td	4 For	5 Mat	6 Herb	7 Cul
VPP	0.987	0.974	0.004	0.854	0.008	0.298	0.981
TPV	0.612	0.919	0.030	0.770	0.028	0.726	0.881
F1	0.737	0.946	0.006	0.808	0.014	0.420	0.930

VPP: Valor predictivo positivo.
 TPV: Tasa positiva verdadera.
 F1: Entidad.

CUADRO 5.20: Evaluación del clasificador *Random Forest*: Matriz de confusión R_{16} , 2018.

	Ca	Urb	Td	For	Mat	Herb	Cul
Ca	25	11	0	0	5	1	0
Urb	1	1610	64	18	14	12	2
Td	0	23	0	1	0	0	0
For	0	0	0	257	63	13	4
Mat	0	0	1	0	3	15	2
Herb	0	0	1	4	3	88	21
Cul	0	3	10	14	36	168	1784

Cobertura de la tierra 2019

Las métricas de la clasificación del año 2019 presentan los mejores resultados al comparar los tres períodos analizados ($\overline{PG} = 0.915$, $sd = 0.003$). La variación entre las rondas de calibración es reducida y constante. La mejor ronda de clasificación fue la R14. El índice Kappa (Kappa = 0.856), y el puntaje de habilidad de Pierce (*Peirce-skill score* [PSS = 0.866]), confirman que se obtienen resultados precisos y casi perfectos en la clasificación.

CUADRO 5.21: Área de estudio: Evaluación del clasificador Random Forest en 20 corridas. 2019

	Accuracy	Kappa	PSS
R_1	0.915	0.856	0.867
R_2	0.914	0.855	0.868
R_3	0.915	0.858	0.873
R_4	0.915	0.857	0.866
R_5	0.912	0.852	0.870
R_6	0.916	0.857	0.865
R_7	0.913	0.853	0.865
R_8	0.910	0.848	0.861
R_9	0.914	0.854	0.862
R_{10}	0.913	0.853	0.859
R_{11}	0.910	0.848	0.859
R_{12}	0.914	0.854	0.865
R_{13}	0.914	0.855	0.867
R_{14}	0.921	0.866	0.875
R_{15}	0.912	0.850	0.862
R_{16}	0.917	0.859	0.866
R_{17}	0.916	0.858	0.866
R_{18}	0.917	0.861	0.869
R_{19}	0.917	0.859	0.867
R_{20}	0.921	0.866	0.874
\bar{X}	0.915	0.856	0.866
sd	0.003	0.005	0.004

Al igual que los años anteriores, se establece que las clases con la asignación de clases más confiables son las mismas que las de los años 2017 y 2018 (Cuadros 5.22 y 5.23).

Además, las clases con la peor evaluación son las mismas que las reportadas en años anteriores.

CUADRO 5.22: Evaluación del clasificador Random Forest: Análisis de precisión por clase. 2019

Clase	1	2	3	4	5	6	7
	Ca	Urb	Td	For	Mat	Herb	Cul
VPP	1.000	0.982	0.050	0.897	0.029	0.356	0.972
TPV	0.745	0.983	0.039	0.361	0.140	0.674	0.942
F1	0.867	0.983	0.05	0.519	0.047	0.457	0.957

VPP: Valor predictivo positivo.

TPV: Tasa positiva verdadera.

F1: Entidad.

CUADRO 5.23: Evaluación del clasificador Random Forest: Matriz de confusión R_{14} . 2019

	Ca	Urb	Td	For	Mat	Herb	Cul
Ca	38	2	2	0	0	1	0
Urb	0	1712	25	2	2	2	0
Td	0	26	3	0	0	0	0
For	0	0	0	56	66	35	10
Mat	0	0	1	2	3	7	7
Herb	0	0	1	0	6	73	30
Cul	0	0	0	0	3	94	1894

A continuación, se presentan los mapas de las coberturas de los años 2017, 2018 y 2019.

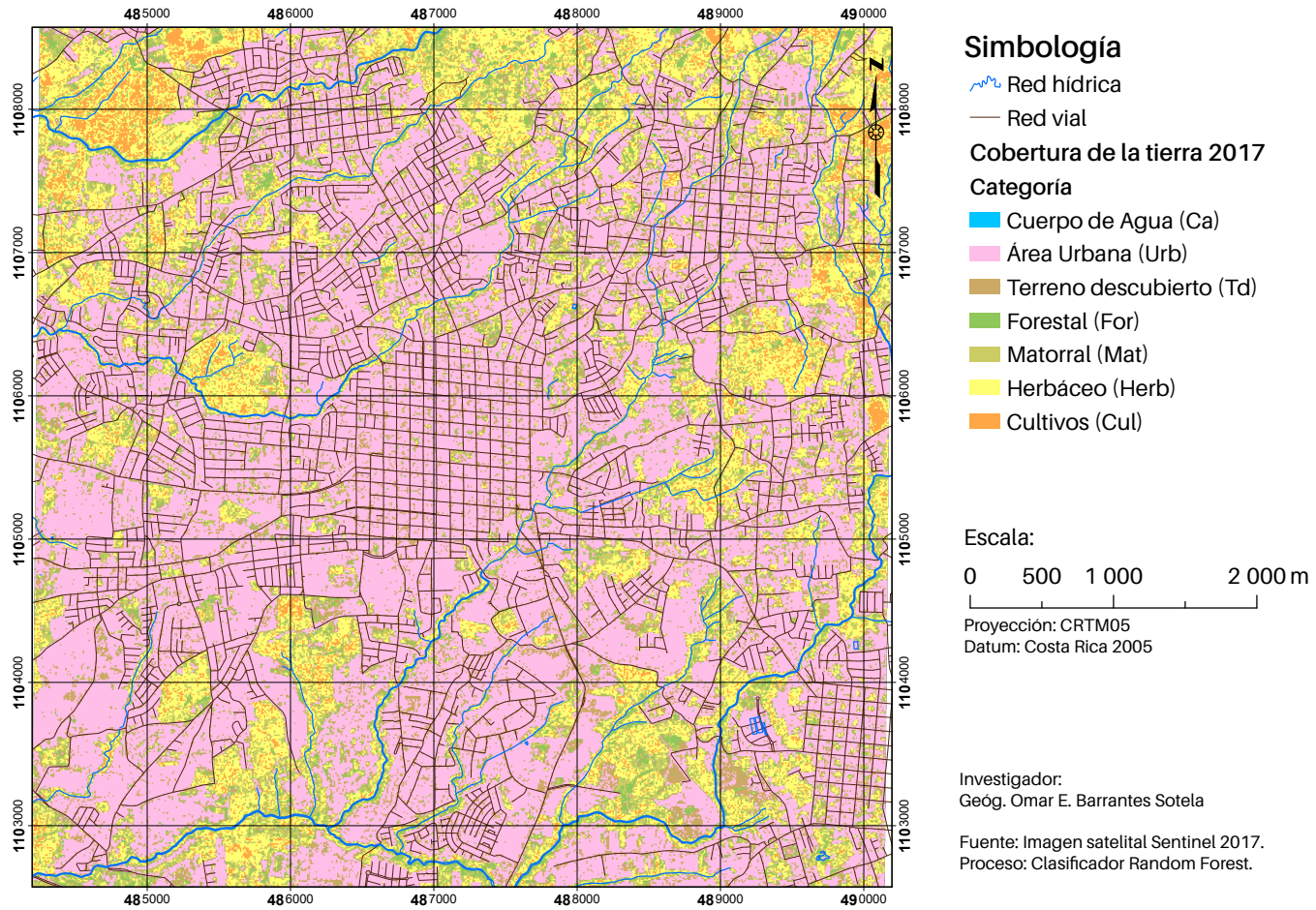


FIGURA 5.8: Heredia: Cobertura de la tierra. 2017

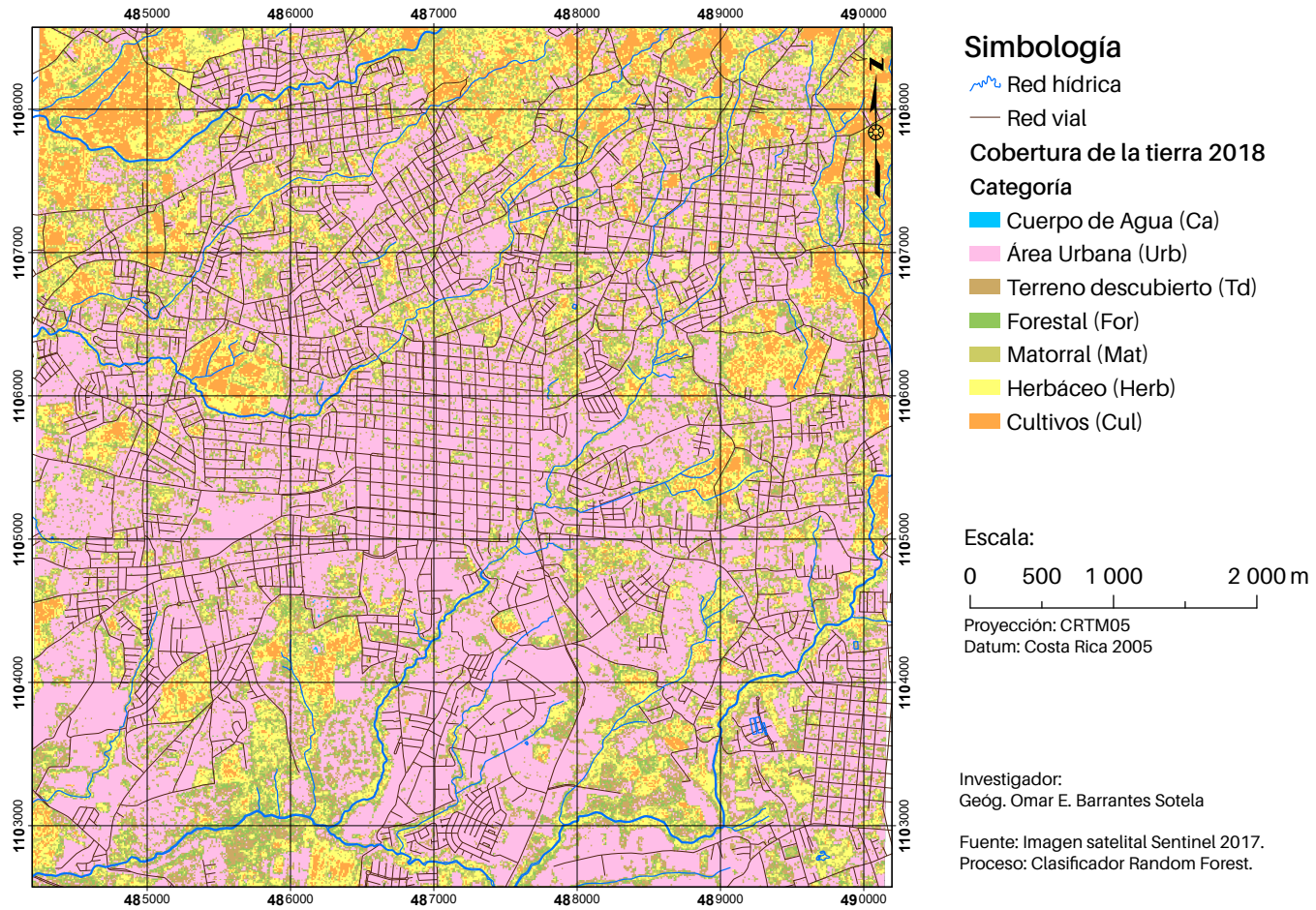


FIGURA 5.9: Heredia: Cobertura de la tierra. 2018

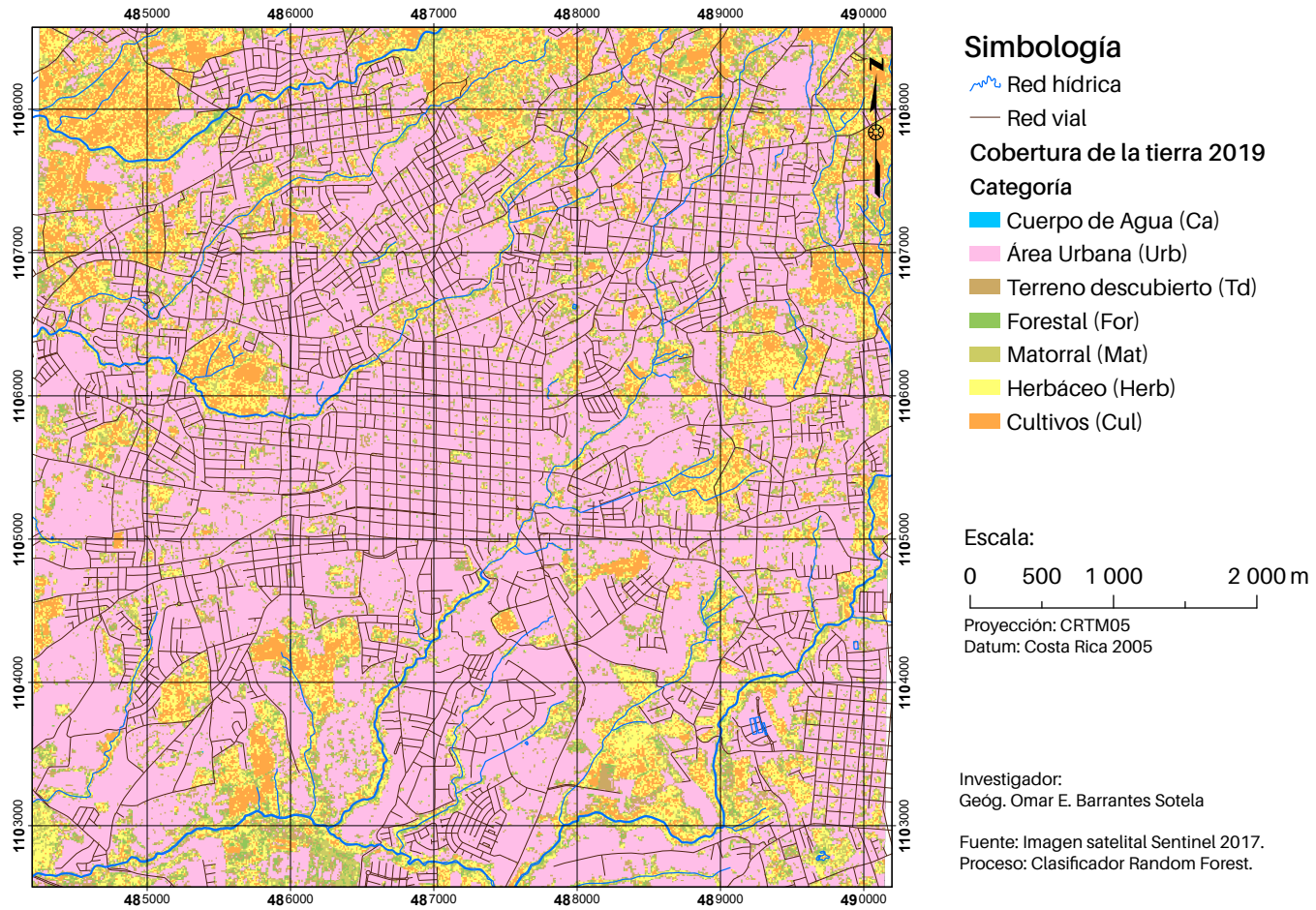


FIGURA 5.10: Heredia: Cobertura de la tierra. 2019

5.2.3. Evaluación del proceso de asignación de las categorías

En general, los índices kappa calculados en el proceso de clasificación para cada año mantiene valores por encima del 80%. Según los parámetros de evaluación, se establece que la precisión del clasificador es de concordancia casi perfecta. Según la literatura, se recomienda que el clasificador presente por lo menos un 85% de precisión en la asignación correcta de categorías (Anderson *et al.* 1976). No obstante, como indica Foody (2008), Olofsson *et al.* (2014) este tipo de consideración puede ser inapropiada. En especial sí se presenta un mosaico de paisaje heterogéneo, en el cual pueden existir una relatividad en el detalle de las categorías. Según Foody (2008), Laba *et al.* (2002), Pontius y Millones (2011), Wundram y Löffler (2008), N. Zhang y Chen (2014), en entornos difusos es sobresaliente reportar valores de precisión superiores al 90%, tal y como ocurre en la matriz de cobertura de la tierra del área de estudio.

Caso: Largo plazo

Según los valores de la evaluación del clasificador por clase en los cuadros (5.6, 5.9, 5.12), se establece que todas las categorías mantienen indicadores de asignación en niveles de consistencia casi perfectos. Las clases con los valores más bajos son pastos (Herb), matorrales (Mat) y foresta (For); y se considera que es el efecto de la generalización del patrón espectral de estas clases por la resolución espacial (30 m) de las imágenes. En general, se considera que los resultados obtenidos del clasificador son muy confiables.

Caso: Corto plazo

Al observar los valores de la evaluación del clasificador por clase en los cuadros (5.16, 5.19, 5.22), se establece que las categorías de Cuerpo de Agua (Ca), Áreas urbanas (Urb), Forestal (For) y Cultivos (Cul); presentan los mejores indicadores de asignación de las clases. Mientras que las clases que generaron la mayoría de los valores falsos positivos (errores de tipo II) en el clasificador fueron: los Terrenos descubiertos (Td) y Matorrales (Mat). Esto puede ser explicado por el patrón espectral difuso que caracteriza esas categorías de análisis, y que limita la fuerza explicativa significativa del estimador de precisión.

Además, fue posible determinar una aparente inconsistencia en la estimación del área urbana. Al comparar la superficie identificada de cobertura urbana en el año 2017 con respecto a los años 2018 y 2019, se obtiene un comportamiento en el que la superficie disminuye en el 2018 y vuelve a aumentar en el 2019. Este patrón es inusual, ya que las

probabilidades de que el área urbana cambie en ganancia de una cobertura de matorral o forestal es muy baja.

Según los valores de la TPV, la asignación de la clase urbana (Urb) en el año 2018 es la más baja (0.919) con respecto a los años 2017 y 2019. Al examinar con mayor detalle la ubicación de las celdas que presentan esta condición, se determina que una cantidad significativa se localiza en el interior de las cuadradas urbanas con presencia de jardines, patios, áreas de parques o plazas.

Este comportamiento se atribuye al error de asignación y clasificación, por la alta sensibilidad del algoritmo clasificador en imágenes con mejor resolución espacial (10 m). Por lo que detecta patrones espectrales variantes que pueden ser asociados a las diferencias temporales en las que se adquirieron las imágenes utilizadas (enero 2017, marzo 2018 y febrero 2019). Un ejemplo de lo anterior, es la respuesta espectral causada por la pérdida y ganancia de dosel de la vegetación caducifolia o semidecídua en el área de estudio. Además, es importante consignar que existe un error del 8.1 % asociado al proceso de asignación y clasificación de la cobertura urbana del año 2018.

Debido a que la cobertura de la tierra generada del Sensor Sentinel-2 se utiliza para establecer el parámetro de la tasa de cambio en la construcción de los escenarios. Se considera un ajuste del factor de cambio al incorporar una estimación de intervalos de confianza en el proceso de Autómata Celular (AC).

5.2.4. Descripción de las coberturas de la tierra

A continuación, se describen las coberturas de la tierra.

CUADRO 5.24: Coberturas de la tierra (Sensor Sentinel): Superficies en [Ha] entre 2017-2019.

Tipo de cobertura	Abrev	2017	2018	2019
Cuerpo de agua	Ca	0.02	0.18	0.02
Urbano	Urb	2016.52	1874.46	2272.71
Terreno descubierto	Td	379.11	386.75	238.6
Forestal	For	197.52	239.89	142.95
Matorrales	Mat	339.98	325.08	188.15
Pastos	Herb	527.8	491.44	403.75
Cultivos	Cul	144.75	287.9	359.52
Total		3605.7	3605.7	3605.7

CUADRO 5.25: Coberturas de la tierra (Sensor Landsat): Superficies en [Ha] entre 1985-2019.

Tipo de cobertura	1985	2001	2019
Urbano	668.34	1114.92	1704.739
Forestal	343.98	440.19	596.2107
Matorral	465.93	602.64	716.0448
Pastos	573.93	900	390.317
Cultivo	1547.46	541.89	192.3287
Total	3599.64	3599.64	3599.64

Cuerpos de agua

Las áreas más importantes están asociados a los ríos Pirro y Burío. Esta clase se considera subestimada con respecto a su superficie, debido a que se mantiene cubierta u oculta por otras entidades, por ejemplo, la cobertura forestal (bosque de ribera) en los cauces. Esta clase no se identifica en el sensor Landsat, por las limitaciones de la resolución espacial.

Áreas urbanas

Las áreas urbanas se conforman en usos residenciales, comerciales y de servicios, acompañados de los servicios públicos institucionales, comunitarios y recreativos. Además,

incluye las redes de transporte vial y ferroviaria. Según reflejan los resultados obtenidos, los espacios urbanos constituyen la base principal o predominante del mosaico paisajístico del área de estudio. Por las características espectrales de la clase, la consistencia de la asignación es casi perfecta.

Terrenos descubiertos

Son terrenos en descanso en el que la capa superficial del suelo es evidente a simple vista. Esta situación ocurre en el caso de los terrenos preparados para la agricultura, por lo general para la sustitución de cultivos de café por recambio o para ser sustituidos por áreas urbanas. Esta clase no se identifica en el sensor Landsat, debido a las limitaciones de la resolución espacial.

Forestal

La cobertura forestal es escasa y fragmentada, incluso se pueden definir como relictos. Lo anterior es producto de la ocupación extensiva de las áreas urbanas, misma que continúa y afecta los pequeños fragmentos de bosque de ribera, localizados principalmente en los ríos Pirro y Burío. El bosque de ribera está en gradación de catena¹, y se extiende lateralmente desde el cauce activo hacia terreno elevado, y que en el mejor de los casos incluye la planicie de inundación activa y las terrazas adyacentes, ya que varias oportunidades se interrumpen por la ocupación de estructuras localizadas en las áreas de protección de los cauces. Además, es posible encontrar pequeñas áreas verdes en los parques, centros de cuadra y en los cultivos de café.

Morales-Cerdas (2017) y Morales-Cerdas *et al.* (2018) identifican al menos 101 árboles representados por 12 familias, 21 géneros y 23 especies. Por abundancia destacan las siguientes especies en las áreas verdes de Heredia: *Tabebuia rosea* (roble sabana), *Spathodea campanulata* (llama del bosque), *Jacaranda mimosifolia* (jacaranda), *Murraya paniculata* (jazmín naranja), *Bauhinia variegata* (árbol de orquídeas moradas), *Citharexylum donnell-smithii* (dama), *Trichilia glabra* (uraca), *Terminalia catappa* (almendro de playa).

¹Localización de las especies vegetales en un sentido transversal al curso del río.

Matorrales

Los matorrales se componen de remanentes de árboles y vegetación con estructura simple dominada por especies pioneras, en las que su composición no alcanza la complejidad suficiente para considerarlos como cobertura forestal, pero es más compleja que la cobertura de pastos. Estos se caracterizan por localizarse en la vecindad a otras categorías naturales o estar inmersas dentro de la lógica urbana. Mantiene una lógica de localización dispersa y heterogénea en el área de estudio.

Por las características del sensor Sentinel-2 y dado los indicadores de evaluación del clasificador, es junto con la categoría de pastos la que aporta el mayor error asociado en el proceso de asignación de clases. No obstante, en el proceso de clasificación del sensor Landsat 5 TM y 8 OLI, la clase se asigna correctamente en un 87 % de los casos.

Pastos

Se distribuyen de forma disgregada en el área de estudio, y según el modelo de elevaciones se concentra en relieves planos (0-15 %) a relieves ondulados (15 - 30%). En el área de estudio este tipo de cobertura verde se utiliza para dar reposo a los terrenos.

En el sensor Landsat 5 TM y 8 OLI, se asigna con una consistencia sustancial. Mientras que, en la clasificación del sensor Sentinel-2 su consistencia de asignación varía entre sustancial a moderada.

Cultivos

Los cultivos mantienen una tenencia de incremento superficial con respecto a los años 2017 y 2018. Estas coberturas se localizan en las zonas de moderada y baja pendiente. El cultivo predominante es el café, el cual amerita una especial atención, ya que históricamente jugó un rol muy importante en la definición de la estructura económica y urbana de la ciudad de Heredia, así como en sus zonas periurbanas. En los últimos años la distribución espacial de los cultivos presenta una particularidad, es posible identificar pequeños parches de cultivos inmersos en la ciudad, y se considera que son remanentes de un acelerado proceso de crecimiento urbano, producto de una expectativa de incrementar el valor de la tierra del mercado inmobiliario.

5.3. Patrón de cambio de cobertura de la tierra

5.3.1. Transformación Tasseled Cap (Kauth-Thomas) y valores de sesgo

Para establecer los patrones de cambio de cobertura de la tierra mediante el cálculo del Índice de Disturbio es necesario establecer la Transformación *Tasseled Cap* (TCT). Este análisis de componentes especiales permite elaborar un perfil espectral a partir de la reducción de factores de una imagen espectral.

Por ejemplo, Huang *et al.* (2002) establece que los cuerpos de agua presentan valores de alta humedad, bajo brillo y verdor. Mientras que los cultivos y cobertura boscosa tienen similares propiedades de humedad, pero difieren en sus respectivos valores de verdor. Con el paso del tiempo las coberturas y el uso de la tierra cambian, y de esa forma cambia la reflectancia de la superficie, así como sus respectivos valores de brillo, humedad y verdor. Los cambios de una cobertura de cultivos o bosque hacia áreas urbanas, significaría un aumento del componente de brillo y una disminución significativa del verdor y humedad. En el cuadro 5.26 se prepara un resumen del comportamiento en los componentes *brillo*, *verdor* y *humedad*, a partir de los cambios observados en la cobertura de la tierra.

CUADRO 5.26: Tasseled Cap: Patrón del indicador de cambio de cobertura.

Cobertura T_0	Cobertura T_1	Brillo (B)	Verdor (G)	Humedad (W)
Forestal	Cultivos	↑	↓	↓
Forestal	Área urbana	↑↑	↓↓	↓↓
Cultivos	Cuerpo de agua	↓	↓	↑
Cultivos	Área urbana	↑	↓	↓
Cultivos	Forestal	↓	↑	↑
Área urbana	Cultivos	↓	↑	↑
Área urbana	Forestal	↓↓	↑↑	↑↑

Para esta investigación se realiza el cálculo para el conjunto de 57 imágenes descritas en los cuadros A.2 y A.3, aunque en esta sección solo se mostrarán los resultados para tres años en particular, y que corresponden a la imagen del inicio del período (1985), a la mitad del período (2001) y al final de la serie de tiempo (2019).

En los cuadros 5.27, 5.28 y 5.29, así como en las figuras 5.11, 5.12 y 5.13 se indican los resultados del análisis TCT. Al observar los datos resultantes para el año 1985, el componente que presenta la mayor amplitud y concentración de los valores normalizados de la distribución es el *verdor*, lo cual sugiere una alta presencia de cobertura verde. Mientras que, si se analizan los valores con las desviaciones positivas significativas del componente *brillo*, resulta más fácil la identificación de las áreas con mayor reflectancia (es decir áreas urbanas). Los valores negativos del componente de *humedad* indican una reducida presencia de humedad (agua) en el suelo.

En el año 2001, los valores normalizados de los componentes en los histogramas varían de forma significativa en comparación al año 1986. La distribución de los valores del componente de *brillo* varía en el tercer y cuarto cuantil (asimetría positiva), con presencia de valores extremos superiores a la derecha y que evidencia el crecimiento de la mancha urbana en el área de estudio. Con respecto al histograma del componente de *verdor*, se identifica un aumento de las celdas con valores inferiores de reflectancia a 0.01, aunque se mantiene una distribución simétrica. Esto puede implicar que los principales parches verdes disminuyen su superficie, pero mantienen una forma estable (aparente efecto borde).

Los datos del año 2019 indican una tendencia de cambio más prominente. La distribución de los datos normalizados del componente *brillo*, aumentó en la amplitud del tercer y cuarto cuantil con respecto a los años anteriores. Además, ocurre un cambio en la simetría del componente *verdor*, la cual presenta una distribución asimétrica negativa. Se identifica que el componente *brillo* presenta una ganancia en detrimento del *verdor* asociado a la imagen. Esto corresponde a un cambio significativo en las superficies de las áreas verdes, que se transformaron en cobertura antrópica, en el que la tendencia de cambio se observa en la densidad de la distribución.

Skewness con ajuste de tamaño de muestra:

$$G_1 = \frac{\sqrt{N(N-1)}}{N-1} \times \frac{\sum_{n=1}^N (Y_i - \bar{Y})^3 / N}{s^3}$$

CUADRO 5.27: Heredia, 1985: Coeficientes de simetría.

Componente	Skewness	Kurtosis
Brillo	2.0965	13.9112
Verdor	-0.4752	2.4115
Humedad	1.1992	7.7536

CUADRO 5.28: Heredia, 2001: Coeficientes de simetría.

Componente	Skewness	Kurtosis
Brillo	2.8036	24.8341
Verdor	-0.0064	1.9655
Humedad	1.83374	13.4010

CUADRO 5.29: Heredia, 2019: Coeficientes de simetría.

Componente	Skewness	Kurtosis
Brillo	2.9522	18.3385
Verdor	0.3742	2.8631
Humedad	-0.4720	6.2700

Para una mejor comprensión de los cambios de las coberturas de la tierra, se procede a estimar el Índice de Disturbio.

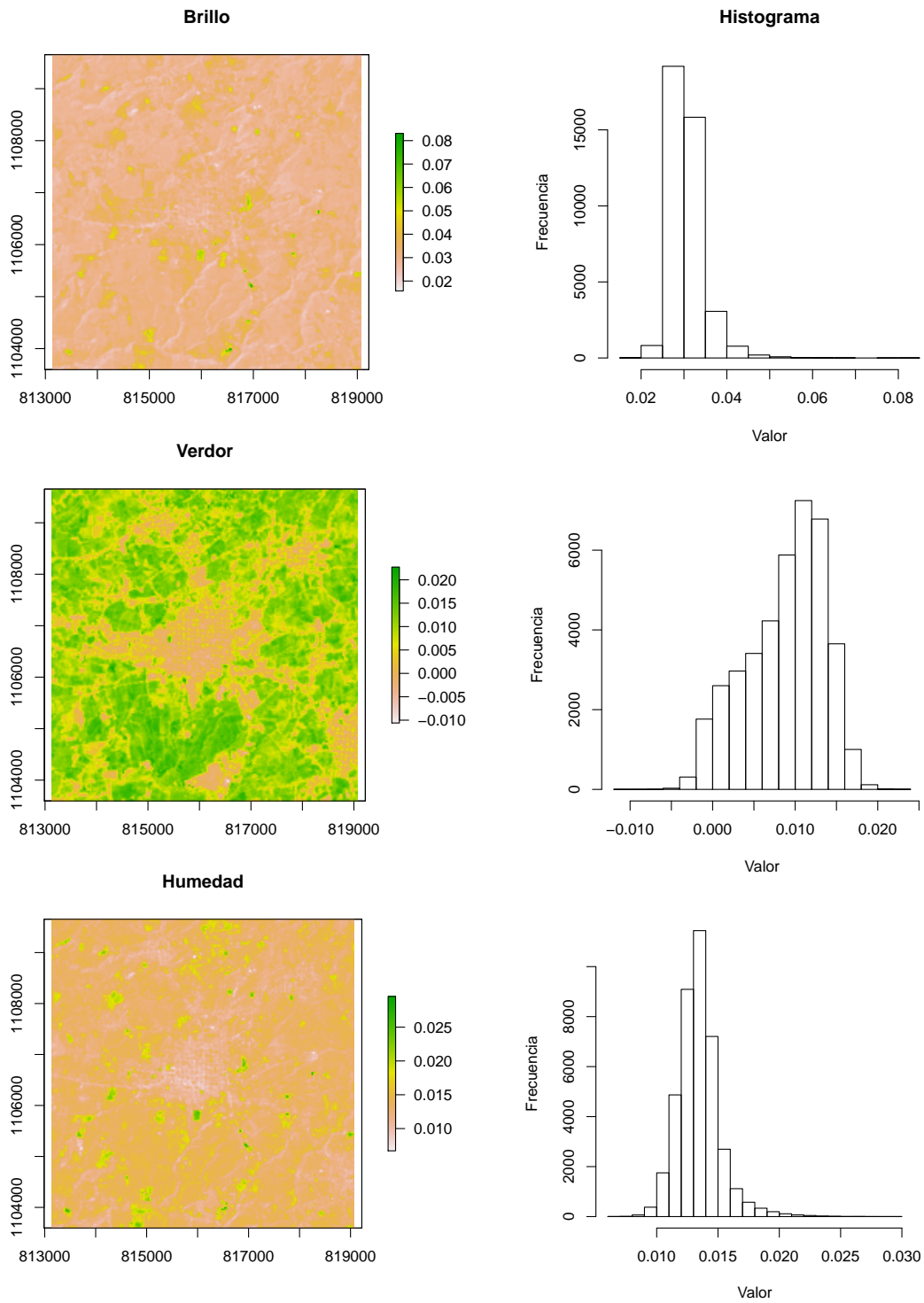


FIGURA 5.11: Heredia, 1985. Tasseled Cap: Brillo, Verdor, Humedad (suelo); con su respectivo histograma. Coordenadas en UTM-16N.

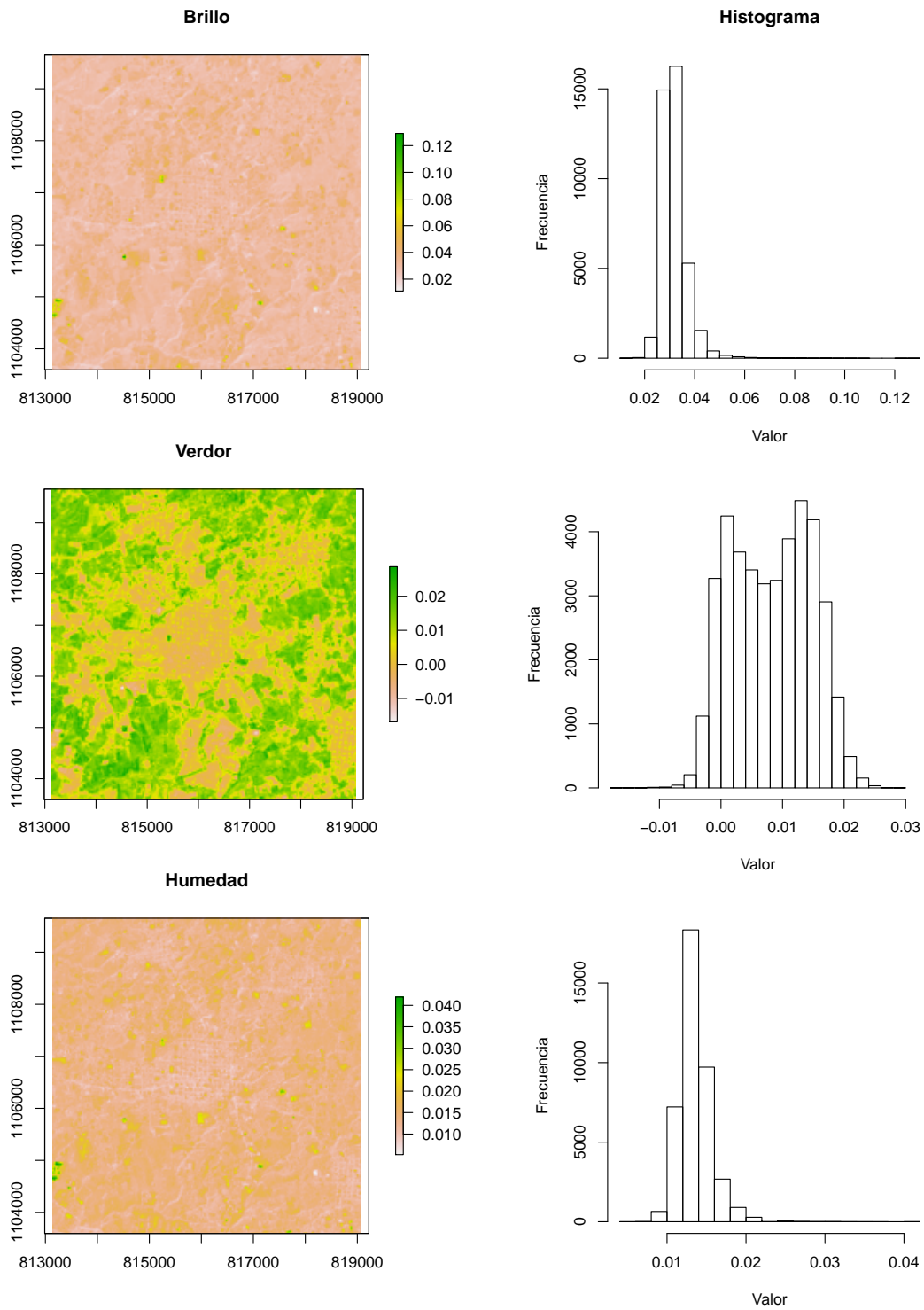


FIGURA 5.12: Heredia, 2001. Tasseled Cap: Brillo, Verdor, Humedad (suelo); con su respectivo histograma. Coordenadas en UTM-16N.

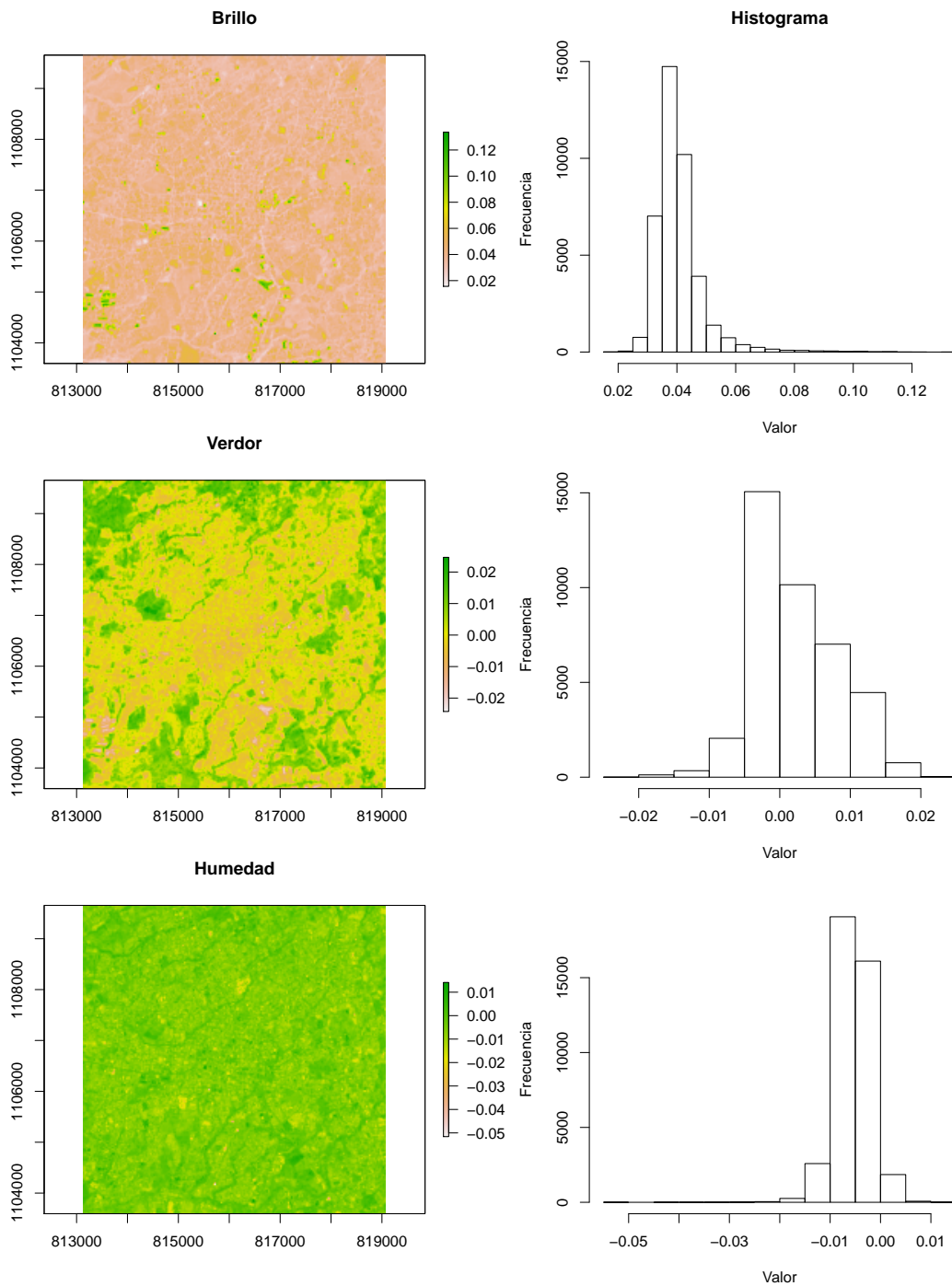


FIGURA 5.13: Heredia, 2019. Tasseled Cap: Brillo, Verdor, Humedad (suelo); con su respectivo histograma. Coordenadas en UTM-16N.

5.3.2. Índice de Disturbio

Al aplicar la ecuación del Índice de Disturbio (DI) de la sección 4.2.1, se obtiene como resultado una mejora para determinar las diferencias entre las áreas que exhiben valores generales altos en todos los índices del TCT con respecto a las zonas que presentan valores de brillo extremo. En la figura 5.14 se presentan los mapas con el DI calculado para los años 1985, 1991, 1997, 2001, 2008, 2014, 2019². Se observan los valores con un alto brillo (áreas urbanas) entre el intervalo de colores amarillos, naranjas y rojos; mientras que los valores representados en los colores verdes se asocian a un bajo brillo y alto verdor (cultivos y áreas verdes).

Para demostrar que, en las zonas con los niveles de brillo más alto, los valores del DI se incrementaron con respecto a cada año observado, se opta por aplicar una prueba no paramétrica pareada de rango con signo de Wilcoxon³, con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Lo anterior basado en los resultados de la prueba de Skewness, que determinó que las series de datos del *Tasseled Cap* cumplen las características de ser una distribución no normalmente distribuida. En las figuras 5.15 y 5.16, se pueden observar los valores extremos del DI.

Pruebas de hipótesis

$$H_0 : \mu_{W_d} = 0$$

$$H_1 : \mu_{W_d} > 0$$

Donde: Prueba estadística W (Bauer, 1972; Wilcoxon, 1945).

$$W = \sum_{n=1}^{N_r} [\text{signo}(x_{2,i} - x_{1,i} \times R_i)]$$

La prueba de Wilcoxon rechaza las hipótesis nulas establecidas (H_0) en los períodos: (1991-1997), (1997-2001), (2008-2014) y (2014-2019) (Cuadro 5.30). En esos intervalos los

²Según la disponibilidad de imágenes Landsat, se trata de representar una periodicidad de entre 5 y 6 años, con el propósito de apreciar los cambios espaciales en las coberturas de la tierra.

³Se considera una prueba pareada, debido a los datos son espaciales y se extraen del mismo lugar, pero en años diferentes.

CUADRO 5.30: Heredia: Prueba estadística Wilcoxon para las diferencias del DI entre 1985-2019.

Prueba W	Pseudo media	P-valor
$W_{1991-1985} = 5403694$	-0.5722981	1
$W_{1997-1991} = 8619149$	1.633194	2.2e-16
$W_{2001-1997} = 7604569$	0.2534196	2.2e-16
$W_{2008-2001} = 1738087$	-0.2055624	0.9999
$W_{2014-2008} = 3334107$	7.516577	2.2e-16
$W_{2019-2014} = 1829559$	0.1251153	2.826e-05

valores del índice de disturbio (DI) se incrementaron. Dado que el p-valor es la probabilidad de observar los incrementos o decrementos en la muestra seleccionada, sobresalen dos períodos, el primero entre (1991-1997) con una diferencia mediana en las celdas del DI en 1.63. El segundo período (2008-2014) destaca aún más, con una diferencia positiva del DI establecida en 7.52. También, existen otros dos intervalos temporales de interés: (1985-1991) y (2001-2008); en los que la hipótesis nula es verdadera. Lo que implica, que la diferencia del DI en las áreas con un brillo extremo tiende a ser negativa.

Para establecer de manera espacial los cambios en las coberturas de la tierra, se usa un análisis compuesto de imágenes de Landsat multitemporales, el cual ha demostrado ser una técnica efectiva de detección de cambios en varios esfuerzos de monitoreo a escala regional. Según Coppin y Bauer (1996), este tipo de análisis se utiliza como marco para comparar las estructuras de datos anteriores.

La lógica aditiva de color para interpretar imágenes multitemporales consiste en la composición de tres imágenes del Índice de Disturbio (DI) en sucesión cronológica. Además, incluye el supuesto: el índice de disturbio (DI) es alto en áreas perturbadas. Por tanto, los píxeles azules tienen un DI alto solo en el tercer año de la composición, lo que indica una perturbación entre el segundo y el tercer año. Las áreas de color cian son altas en el segundo y tercer año de la composición, pero no en la primero, lo que indica una perturbación entre el primer y el segundo año. Los colores amarillentos, señalan colores altos en rojo y verde y más bajos en el azul, e indican zonas perturbadas antes del primer año que se vuelven a vegetar en el tercero. El resultado de esta técnica se puede observar en la figura 5.17.

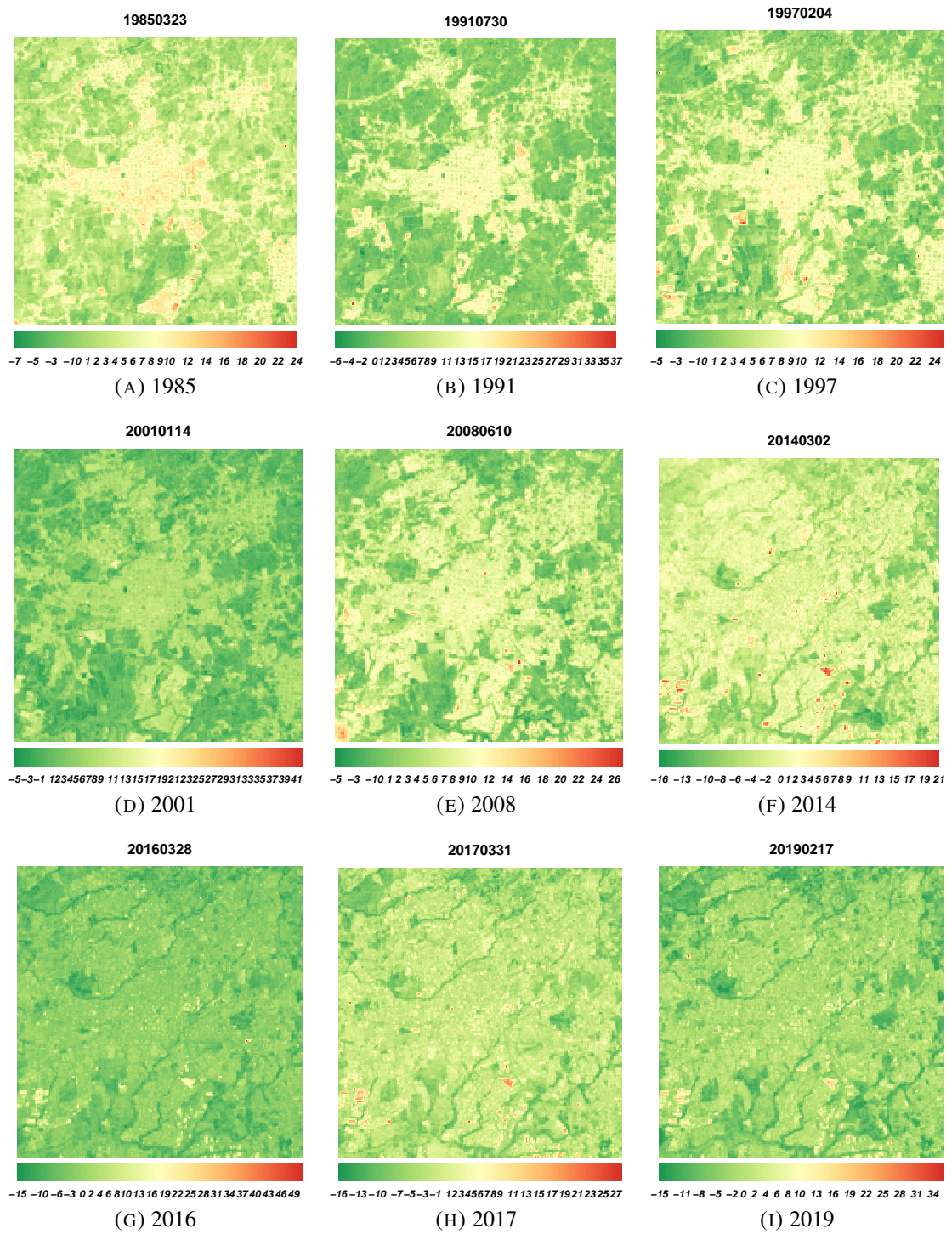


FIGURA 5.14: Índice de disturbio [DI] (1985-2019): Comportamiento espacial y temporal.

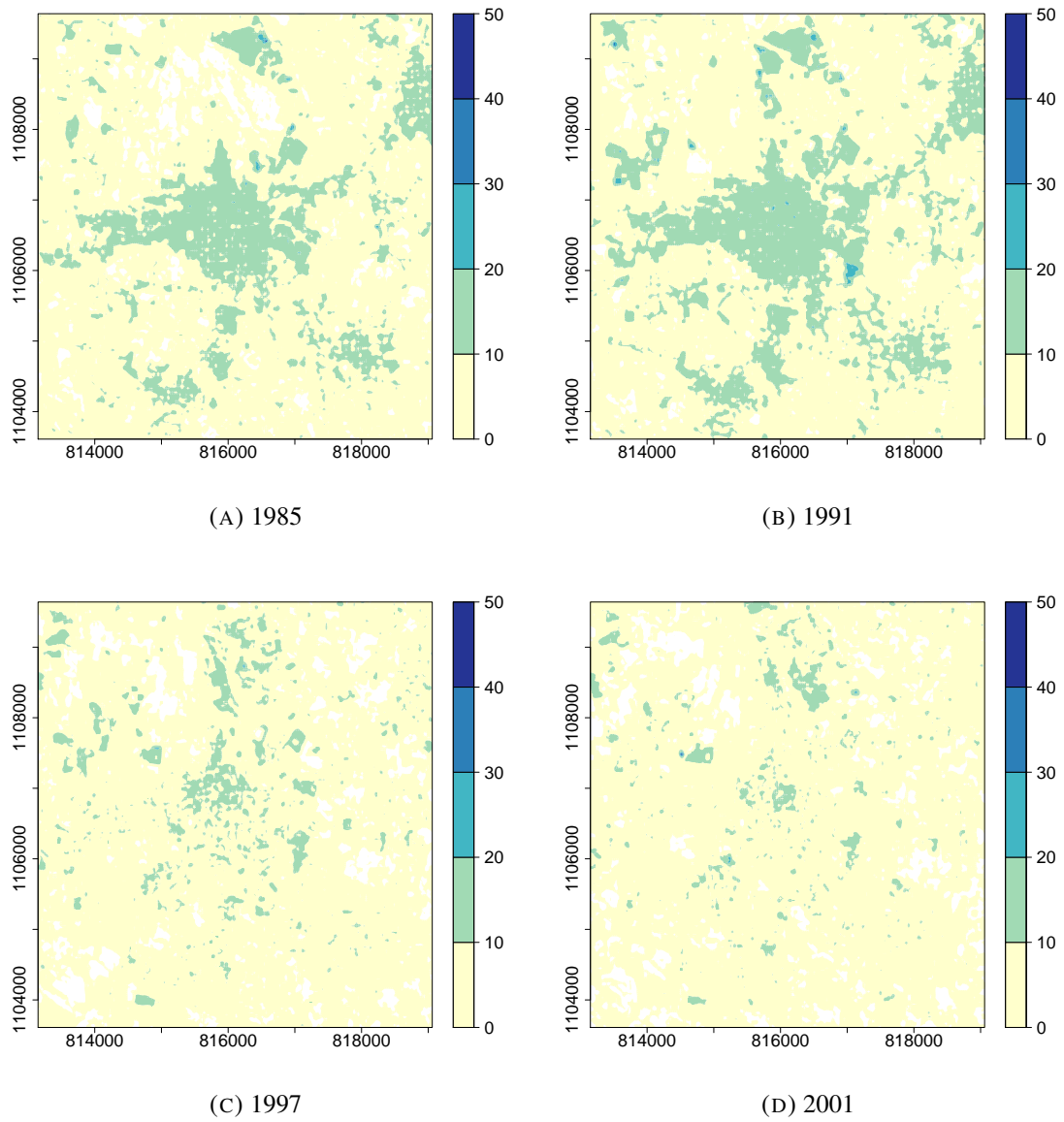


FIGURA 5.15: Índice de disturbio [DI] (1985-2001): Valores extremos asociados al cambio de coberturas verdes por coberturas antrópicas.

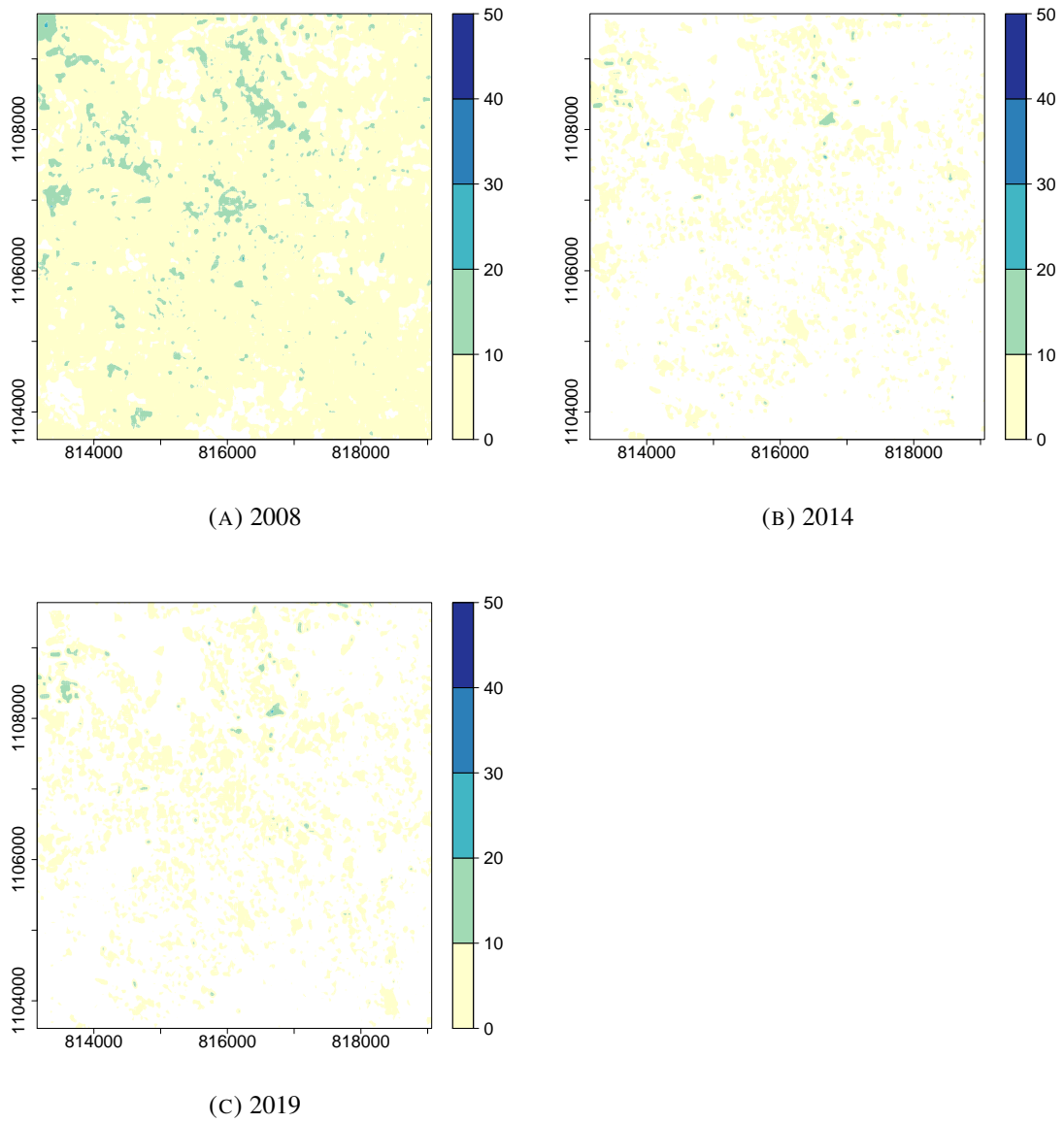


FIGURA 5.16: Índice de disturbio [DI] (2008-2019): Valores extremos asociados al cambio de coberturas verdes por coberturas antrópicas.

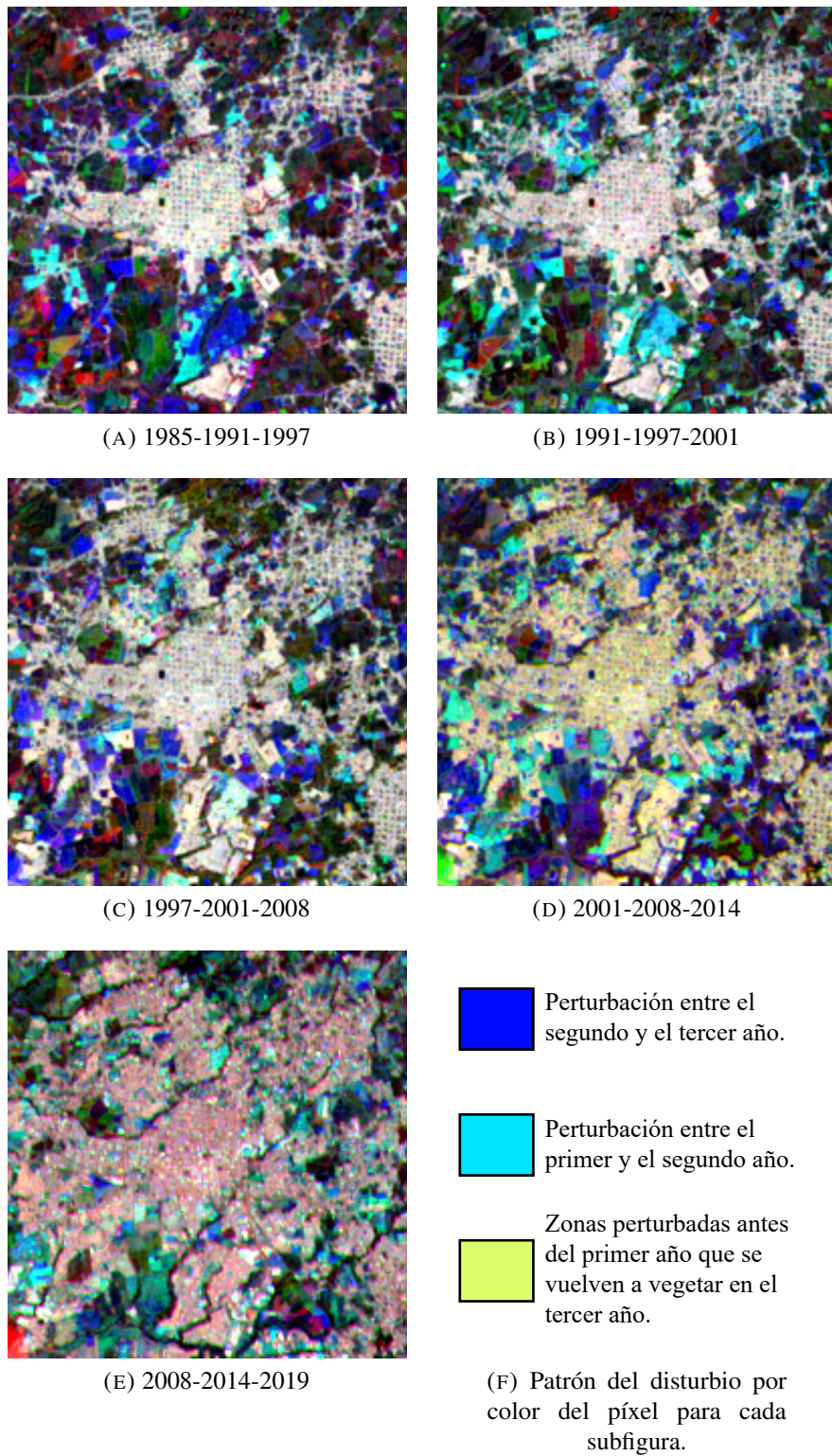


FIGURA 5.17: Determinación de la perturbación espacial y temporal en el DI, por composición RGB entre imágenes.

También, se comparan las superficies obtenidas por año de las coberturas de la tierra en el período de 2017 al 2019 (Figura 5.18).

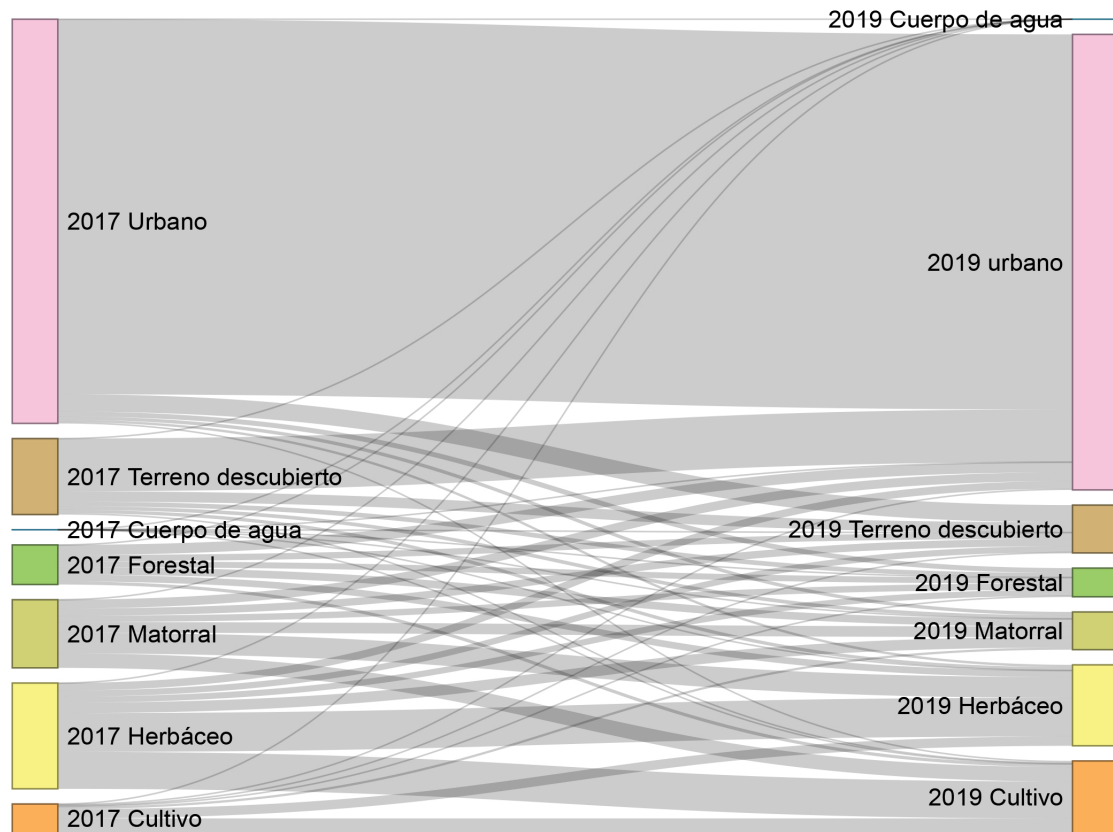


FIGURA 5.18: Evolución del cambio de cobertura de la tierra durante el período 2017 y 2019.

Además, se incluye la evolución de las diferencias entre las superficies de las coberturas de la tierra en el período comprendido entre 1985 al 2019 (Figura 5.19 y Cuadro 5.31).

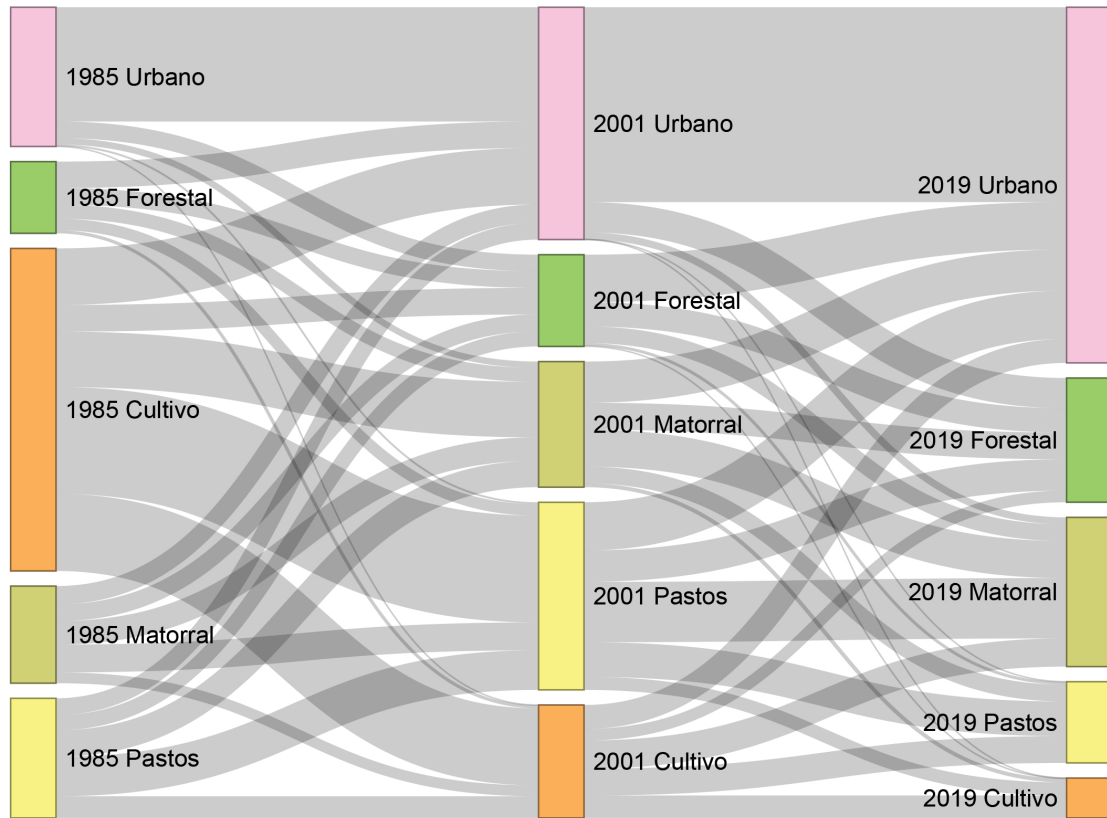


FIGURA 5.19: Evolución del cambio de cobertura de la tierra durante el período 1985 y 2019.

CUADRO 5.31: Coberturas de la tierra: Cambio relativo de la superficie [%].

Tipo de cobertura	$\Delta_{2001-1985}$	$\Delta_{2019-2001}$	$\Delta_{2019-1985}$
Urbano	66.82 %	52.90 %	155.07 %
Forestal	27.97 %	35.44 %	73.33 %
Matorral	29.34 %	18.82 %	53.68 %
Pastos	56.81 %	-56.63 %	-31.99 %
Cultivo	-64.98 %	-64.51 %	-87.57 %

5.4. Patrón de variabilidad climática

5.4.1. Temperatura del aire

El análisis de la temperatura del aire en el área de estudio se realiza a partir de los datos de las estaciones meteorológicas consignadas en los cuadros C.1 y C.2. En el cuadro 5.32 se indican las estadísticas descriptivas, asociados a la variable temperatura.

CUADRO 5.32: Resumen estadístico de las temperaturas

Cod	Estación	Período	Años	Temperatura media del aire					
				Mín.	Media	Máx.	Sd	K	Shapiro-Wilk
40101	UNA	2015 2018	3	13.20	21.15	32.40	2.92	2.58	0.9492
73123	ITCR	1997 2019	22	9.00	18.35	29.20	2.82	2.72	0.9656
84023	FB-UCR	1985 2002	17	13.70	22.69	36.10	3.70	2.46	0.9460
84046	San Josecito-Heredia	1985 2010	25	8.70	17.91	30.50	2.64	3.27	0.9746
84111	Santa Lucía-Heredia	1985 2001	16	8.80	19.85	32.20	3.20	2.80	0.9881
84124	San Luis-Poás	1995 2002	7	10.70	17.99	26.90	2.28	2.94	0.9568
84139	CIGEFI	1999 2019	20	9.00	20.01	31.00	2.56	2.92	0.9667
84141	IMN-SJ	1995 2019	24	12.70	20.17	29.90	2.28	3.05	0.9674
84169	ASJO	1997 2019	22	12.50	22.40	32.80	3.01	2.48	0.9502
84181	Iztaru	2003 2019	16	8.40	16.22	27.40	2.67	3.10	0.9617
84189	Laguna-Fraijanes	2003 2019	16	4.40	16.25	26.40	2.55	2.84	0.9758
84191	RECOPE	1998 2019	21	13.10	23.25	34.10	3.27	2.37	0.9588
84193	A. Tobías Bolaños	2008 2019	11	14.00	21.80	30.90	2.61	2.62	0.9578
84197	Santa Bárbara	2001 2019	18	10.40	21.45	33.20	3.80	2.18	0.9649
84199	Belén	2004 2019	15	14.00	22.53	33.20	2.90	2.58	0.9411
84203	Zapote	2007 2019	12	12.60	20.82	33.10	2.85	2.98	0.9568
84205	Getsemaní	2009 2015	6	12.30	19.25	28.40	2.52	2.61	0.9714
84221	Volcán Poás	2011 2019	8	0.20	11.25	38.80	2.56	9.30	0.9432

Sd: Desviación estándar.

K: Coeficiente de simetría de Curtosis.

Shapiro-Wilk: Prueba estadística de normalidad Shapiro-Wilk.

Es conocido que la tendencia de una serie temporal climática no es lineal, por lo que, para efectos de describir cualquier tendencia o cambio a largo plazo en el nivel de la serie temporal, y cualquier variación estacional o dentro del año, se puede emplear un Modelo Aditivo Generalizado (MAG). Con los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio: UNA (40101), Santa Lucía (84111), Aeropuerto Juan Santamaría (84169), Santa Bárbara (84197), Belén (84199) y Getsemaní (84205); se construyen las correspondientes series temporales (Anexo D) y se analizan para observar su comportamiento estacional, tendencial y aleatorio mediante un MAG que consiste en

una regresión de una función de base polinomial (*spline*) cúbica cíclica que responde a la siguiente forma:

$$y = \beta_0 + f_{estacional}(x_1) + f_{tendencia}(x_2) + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 \Lambda)$$

Donde β_0 es la intersección, $f_{estacional}$ y $f_{tendencia}$ son funciones suavizadas para las características estacionales y de tendencia que interesan. Mientras que, x_1 y x_2 son los datos covariables que proporcionan algún tipo de indicadores de periodicidad para los tiempos dentro del año y entre años. De tal manera, que para la investigación se toma en cuenta la temperatura registrada según el día del año y el número del día contabilizado después del 1° enero de 1985⁴. En el primer proceso se busca determinar la variabilidad intermensual e interanual, mientras que en el segundo se establece la variabilidad en todo el período que abarca la serie de tiempo. Otro aspecto de consideración es que al aplicar la prueba de Shapiro-Wilk a los datos de temperatura de las estaciones se puede afirmar con significancia estadística que el comportamiento de las series temporales corresponde a una distribución de probabilidad normal. A continuación, se muestran los principales resultados en las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio.

Tendencia de la temperatura media del aire

La serie temporal de la estación meteorológica ubicada en la Universidad Nacional consiste en un registro de solo 3 años. Esta situación, dificulta obtener resultados robustos en la variabilidad interanual. El coeficiente de variación interanual (CVI) se estima en 1.18%. Al observar la tendencia en el período registrado 5.21 (B), se identifica un incremento de la temperatura a finales del año 2015. Además, se observa que una tendencia de disminución de la temperatura hasta finales del año 2018. En el caso de la estación 84021, la tendencia secular indica que la temperatura es 0.81 grados más cálida que al inicio del registro.

La estación Santa Lucía (84111) cuenta con un registro de 16 años. El coeficiente de variación anual es de 2.48%, mientras que el coeficiente de variación diario es de 6.30%. El componente de tendencia indica una temperatura media máxima de 20.89°C y una temperatura media mínima de 19.26°C. En la figura 5.22 (B), se observa que en año 1990 ocurrió un incremento positivo en la variación de la temperatura de al menos 1°C. Además,

⁴Establecer un identificador del día permite crear una línea base de referencia, que posibilita comparar series de tiempo con períodos de registro diferente.

la tendencia secular indica que la temperatura media en esa estación al año 2001 es 0.53°C más cálida que al año de 1985.

La estación del Aeropuerto Juan Santamaría (84169), cuenta con uno de los registros más amplios (22 años). La serie temporal muestra un patrón cíclico aperiódico. En la tendencia se registra un máximo de temperatura de 23.04°C y mínimo en 21.21°C . Se estima que el coeficiente de variación interanual (CVI) es de 2.30% . A su vez la tendencia secular indica que la temperatura es 0.81°C más cálida que al inicio del registro. Se destaca, que tanto en los años 2003 y 2015 ocurrió un incremento en la variación de la temperatura (figura 5.23 (B)).

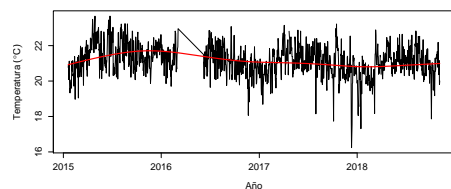
En el caso de la estación Santa Bárbara (84197) tiene un registro de 18 años. La serie temporal presenta un patrón cíclico en el que la variación de la temperatura se incrementa y desciende en cada quinquenio, con un desplazamiento o retraso de 2 a 3 años entre cresta y valle (figura 5.24 (B)). El coeficiente de variación anual es de 1.19% , mientras que el coeficiente de variación diario es de 4.51% . El componente de tendencia indica una temperatura media máxima de 21.90°C y una temperatura media mínima de 21.11°C . La tendencia secular indica que la temperatura es 0.53°C más frío que al inicio del registro.

La estación Belén (84199) cuenta con un registro de 15 años. La tendencia observada de la serie temporal muestra un incremento paulatino de la temperatura media del aire. Variaciones máximas positivas ocurrieron durante los años 2010, 2016 y 2020, mientras que las variaciones máximas negativas sucedieron en los años 2008, 2012 y 2018 (figura 5.25 (B)). El coeficiente de variación anual es de 1.33% , mientras que el coeficiente de variación diario es de 4.59% . El componente de tendencia indica una temperatura media máxima de 23.02°C y una temperatura media mínima de 22.14°C . La tendencia secular indica que la temperatura es 0.48°C más cálida que al inicio del registro.

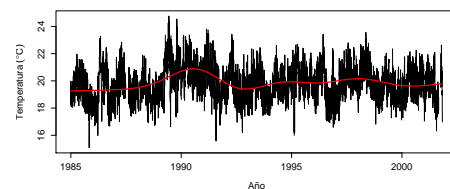
La estación Getsemaní (84205) solo cuenta con un registro de 6 años, y junto con la estación ubicada en la Universidad Nacional son las estaciones con el registro más reducido de datos. La tendencia de la temperatura promedio del aire presentó una máxima variabilidad positiva en el año 2010 y la máxima variación negativa en los años 2011 y 2015. El coeficiente de variación anual es de 1.51% y el coeficiente de variación diario es de 4.67% . El componente de tendencia indica una temperatura media máxima de 19.97°C y una temperatura media mínima de 18.54°C . La tendencia secular indica que la temperatura es 0.41°C más frío que al inicio del registro. Es la estación más cercana al área de estudio

que presenta los valores más bajos de temperatura promedio del aire (figura 5.26 (B)).

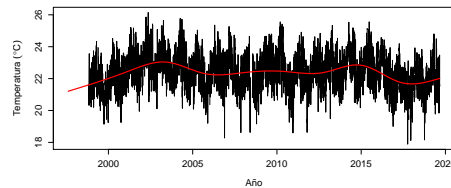
En todas las estaciones, se establece que la máxima variabilidad positiva de la temperatura media del aire en el transcurso del año ocurre entre los meses de marzo y abril (días 100 - 150). Sin embargo, no es el caso de la máxima variabilidad negativa. En las estaciones 84169, 84197, 84199 y 84205 se presenta en el mes de noviembre (alrededor del día 300). Mientras que en las estaciones 40101 y 84111 las variaciones máximas negativas trascurren en los meses de diciembre y enero (días 350 - 0), con la particularidad de que la estación 84111 también muestra un descenso de la variación de las temperaturas en el mes de noviembre (alrededor del día 275) (figuras 5.21 (A), 5.22 (A), 5.23 (A), 5.24 (A), 5.25 (A) y 5.26 (A)).



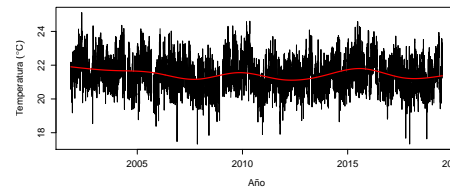
(A) Estación 40101



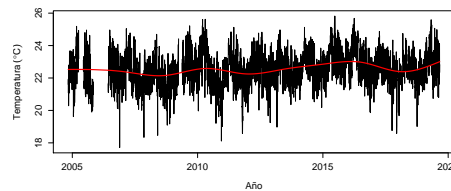
(B) Estación 84111



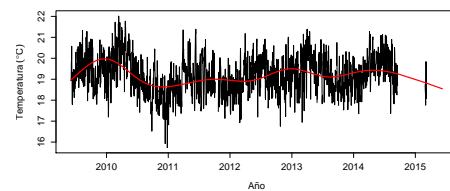
(C) Estación 84169



(D) Estación 84197



(E) Estación 84199



(F) Estación 84205

FIGURA 5.20: Variación de la tendencia de la temperatura.

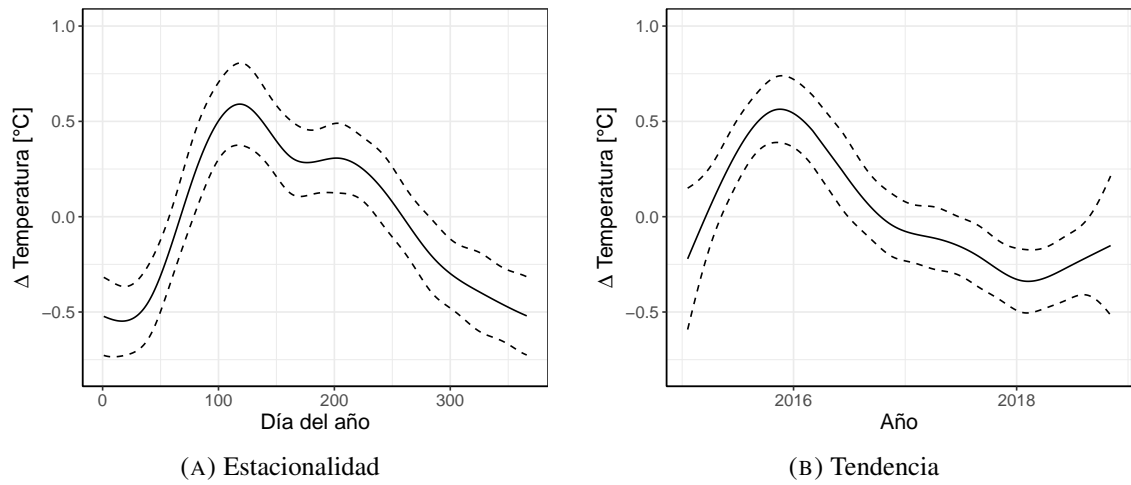


FIGURA 5.21: Estación UNA-Heredia: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.

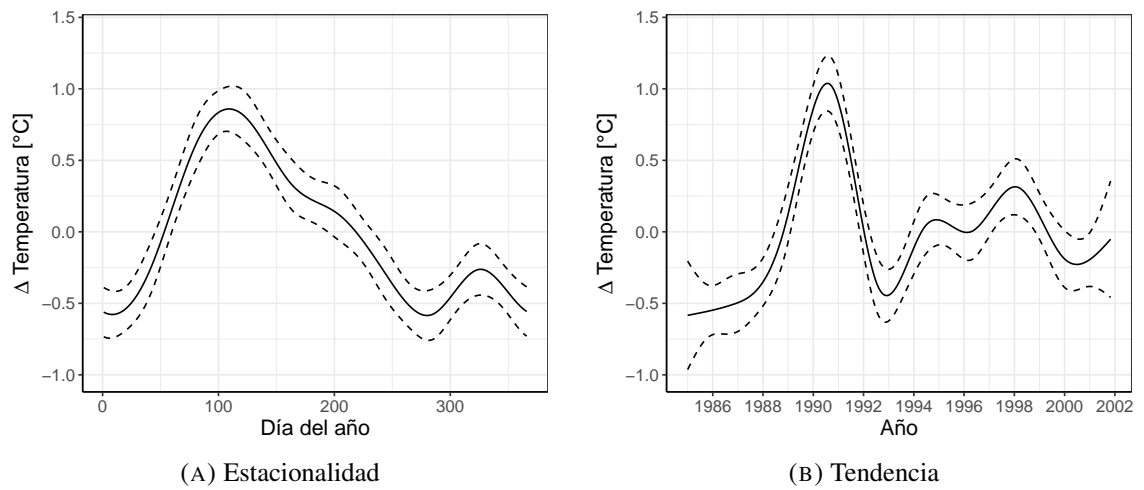


FIGURA 5.22: Estación Santa Lucía: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.

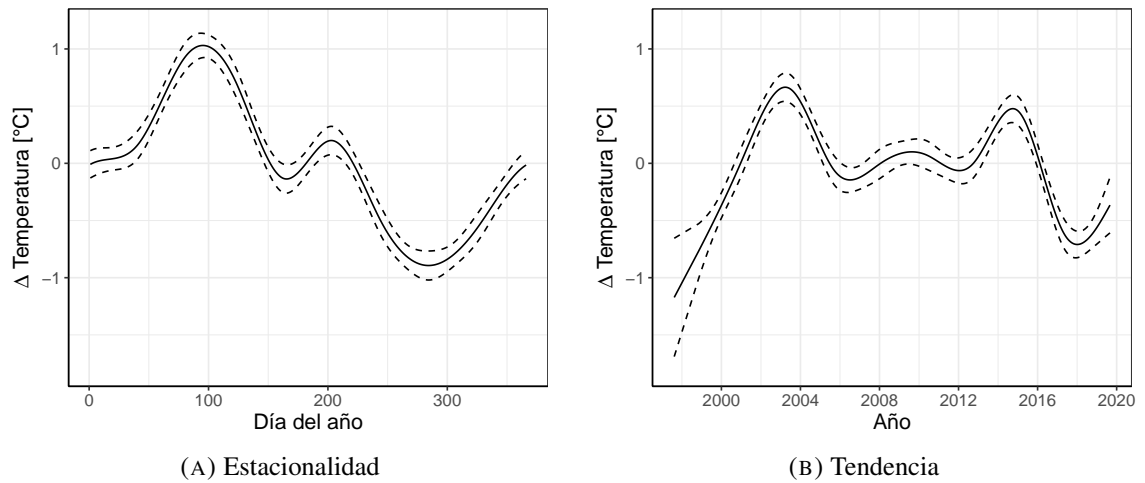


FIGURA 5.23: Estación Aeropuerto Juan Santamaría: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.

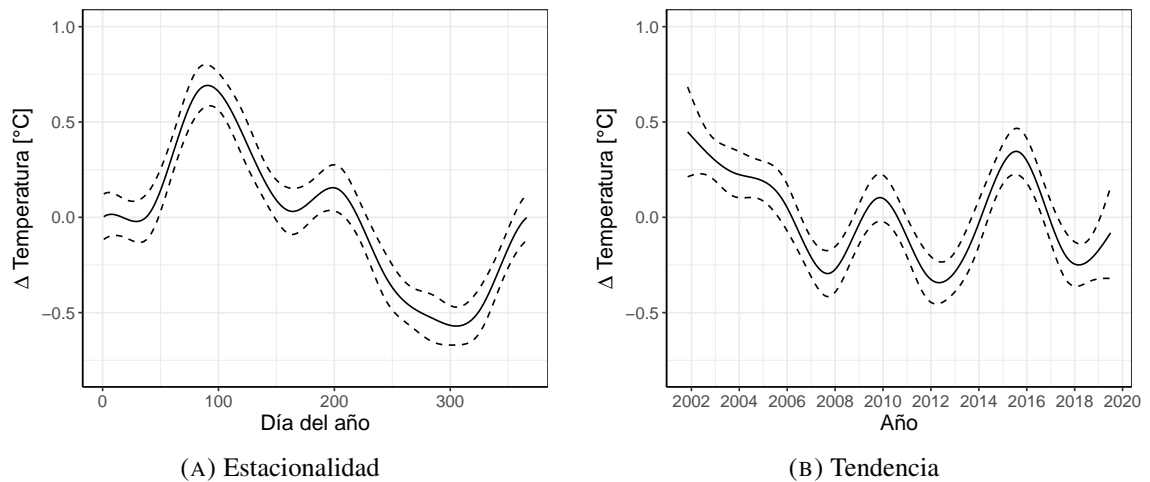


FIGURA 5.24: Estación Santa Bárbara: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.

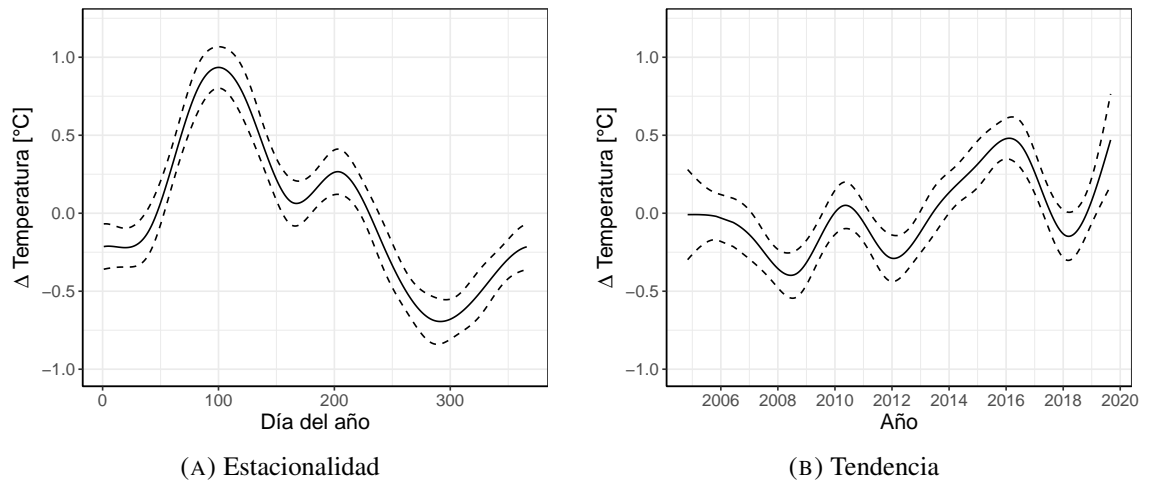


FIGURA 5.25: Estación Belén: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.

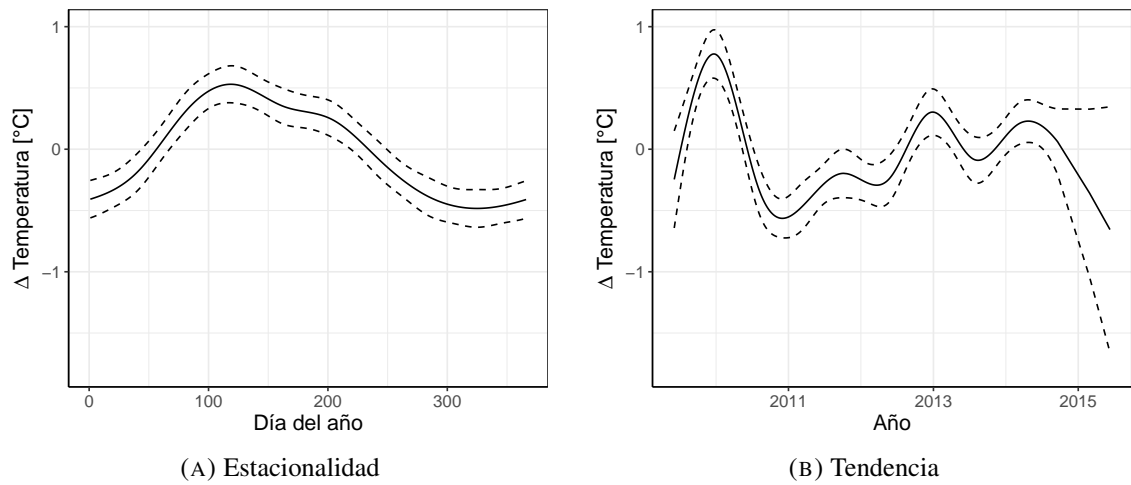


FIGURA 5.26: Estación Getsemaní: Variación de la temperatura por estacionalidad y tendencia.

5.4.2. Viento

En relación con la variable viento, se observan los registros de las estaciones meteorológicas (mapa de la figura 4.1) en función de la velocidad y dirección del viento⁵, y se generan los gráficos de las figuras 5.32, 5.30, 5.30, 5.31 y 5.31. Además, se utiliza la escala de Beaufort (Cuadro 5.33) para describir la fuerza de los vientos y en el Cuadro 5.34 se describe los rangos de la dirección del viento en grados (°).

CUADRO 5.33: Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos

Número de Beaufort	Velocidad del viento [m/s]	Denominación
0	<0.5	Calma
1	0.5 - 1.5	Ventolina
2	1.6 - 3.3	Flojito (Brisa muy débil)
3	3.4 - 5.5	Flojo (Brisa Ligera)
4	5.5 - 7.9	Bonancible (Brisa moderada)
5	8 - 10.7	Fresquito (Brisa fresca)
6	10.8 - 13.8	Fresco (Brisa fuerte)
7	13.9 - 17.1	Frescachón (Viento fuerte)
8	17.2 - 20.7	Temporal (Viento duro)
9	20.8 - 24.4	Temporal fuerte (Muy duro)
10	24.5 - 28.4	Temporal duro (Temporal)
11	28.5 - 32.6	Temporal muy duro (Borrasca)
12	>32.7	Temporal huracanado (Huracán)

Con respecto a la variable viento, es importante describir la ubicación de las estaciones utilizadas. Las estaciones Aeropuerto Juan Santamaría (84169) y Santa Bárbara (84197) está ubicadas al noreste del área de estudio. A su vez, la estación Getsemaní (84205) se localiza al noreste de la ciudad de Heredia. Mientras que la estación de la UNA se ubica dentro del campus Omar Dengo, al interior del área de estudio.

En la ubicación del Aeropuerto Juan Santamaría (84169) (figura 5.30), los vientos mantienen una dirección predominante que viene del este (E) y el sureste (SE). Las mayores velocidades de vientos se registran entre los meses de diciembre y marzo, las cuales se pueden catalogar de brisas fuertes (Número de Beaufort = 6). En el mes de noviembre es

⁵La dirección del viento se informa según la dirección en la que se origina.

CUADRO 5.34: Clasificación de la dirección del viento

Dir. Pred.	Dirección	Rango en Grados (°)
1	Norte	337.6 a 22.5 (°)
2	Noreste	22.6 a 67.5 (°)
3	Este	67.6 a 112.5 (°)
4	Sureste	112.6 a 157.5 (°)
5	Sur	157.6 a 202.5 (°)
6	Suroeste	202.6 a 247.5 (°)
7	Oeste	247.6 a 292.5 (°)
8	Noroeste	292.5 a 337.5 (°)

un mes de transición y marca el inicio de los vientos alisios. Mientras que el mes de abril, se presentan los vientos que marcan el inicio de la estación lluviosa en la vertiente pacífica de Costa Rica. Es en el mes de junio cuando ocurre la menor intensidad del viento.

En la estación Santa Bárbara (84197), las mayores velocidades de los vientos se registran entre los meses de enero a marzo, y consisten en una brisa moderada (bonancible). Durante el resto del año los vientos corresponden a una brisa fresca. Al igual que la estación del Aeropuerto Juan Santamaría, predomina los vientos una dirección proveniente del este (E) y el sureste (SE). En el caso de la estación Getsemaní (84205) predomina la brisa ligera, aunque se registran intensidades de vientos muy duros y duros durante dos períodos. El primero entre los meses de noviembre a abril y el segundo durante los meses de junio a setiembre. La dirección predominante del viento es del Sureste (SE) y Sur (S). Este comportamiento del viento lo explica el Instituto Meteorológico Nacional (2009), en el que el flujo sinóptico predominante influye en la intensidad de las brisas ascendentes (anabáticas). Estas tienden a ser más fuertes en la ladera sur de las montañas, mientras que en las laderas al norte los vientos tienden a ser más débiles.

En la estación de la UNA, los vientos muestran un comportamiento diferente. Se observa dos períodos, el primero que va de diciembre a marzo en el que se pueden catalogar como una brisa moderada. El segundo período va de junio a setiembre y corresponde a brisas ligeras. En los meses de abril, mayo, octubre y noviembre se puede catalogar como vientos de brisa muy débil. La dirección predominante del viento es del noreste (NE) y el este (E) (figura 5.27).

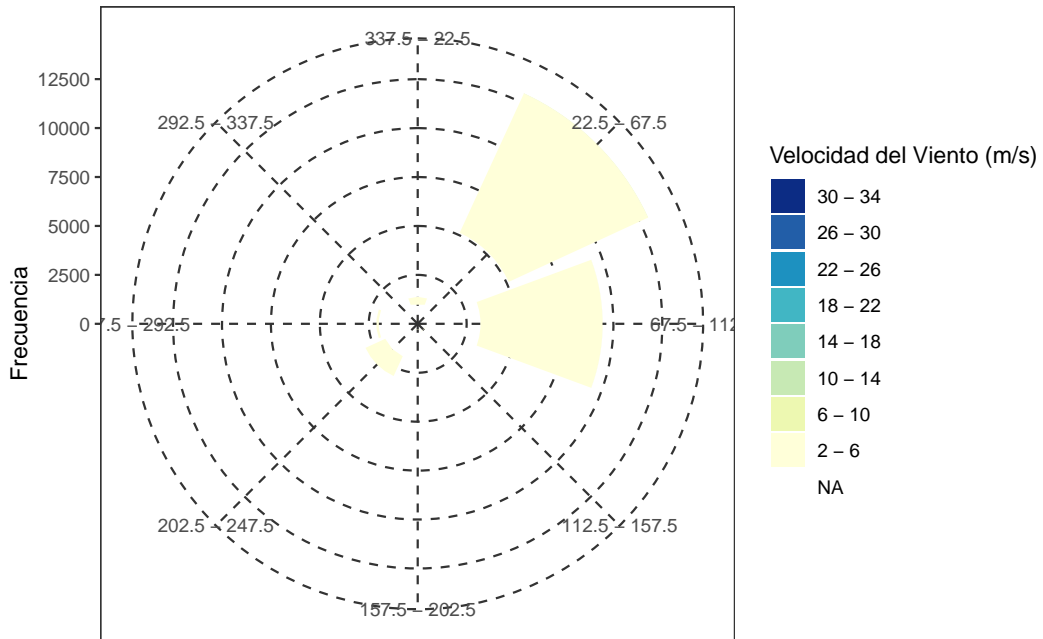


FIGURA 5.27: Estación UNA: Velocidad y dirección promedio anual del viento.

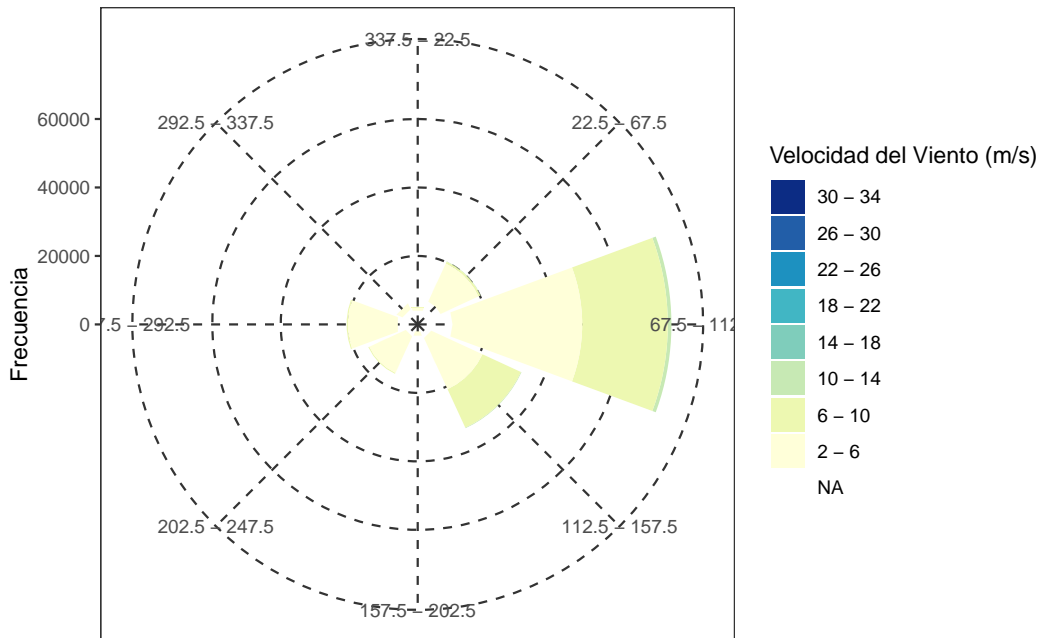


FIGURA 5.28: Estación ASJO (84169): Velocidad y dirección promedio anual del viento.

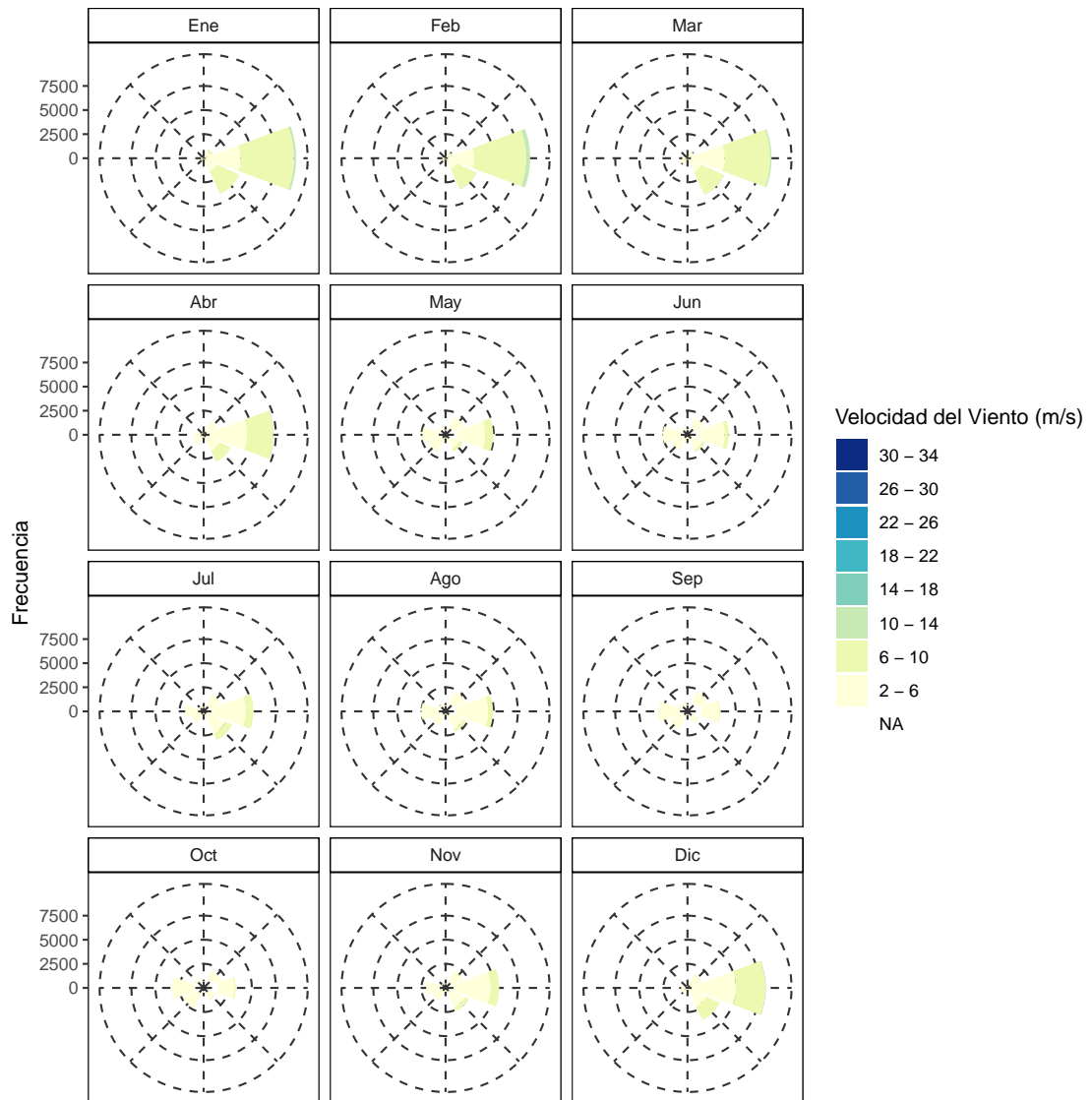


FIGURA 5.29: Estación 84169 AJSO: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.

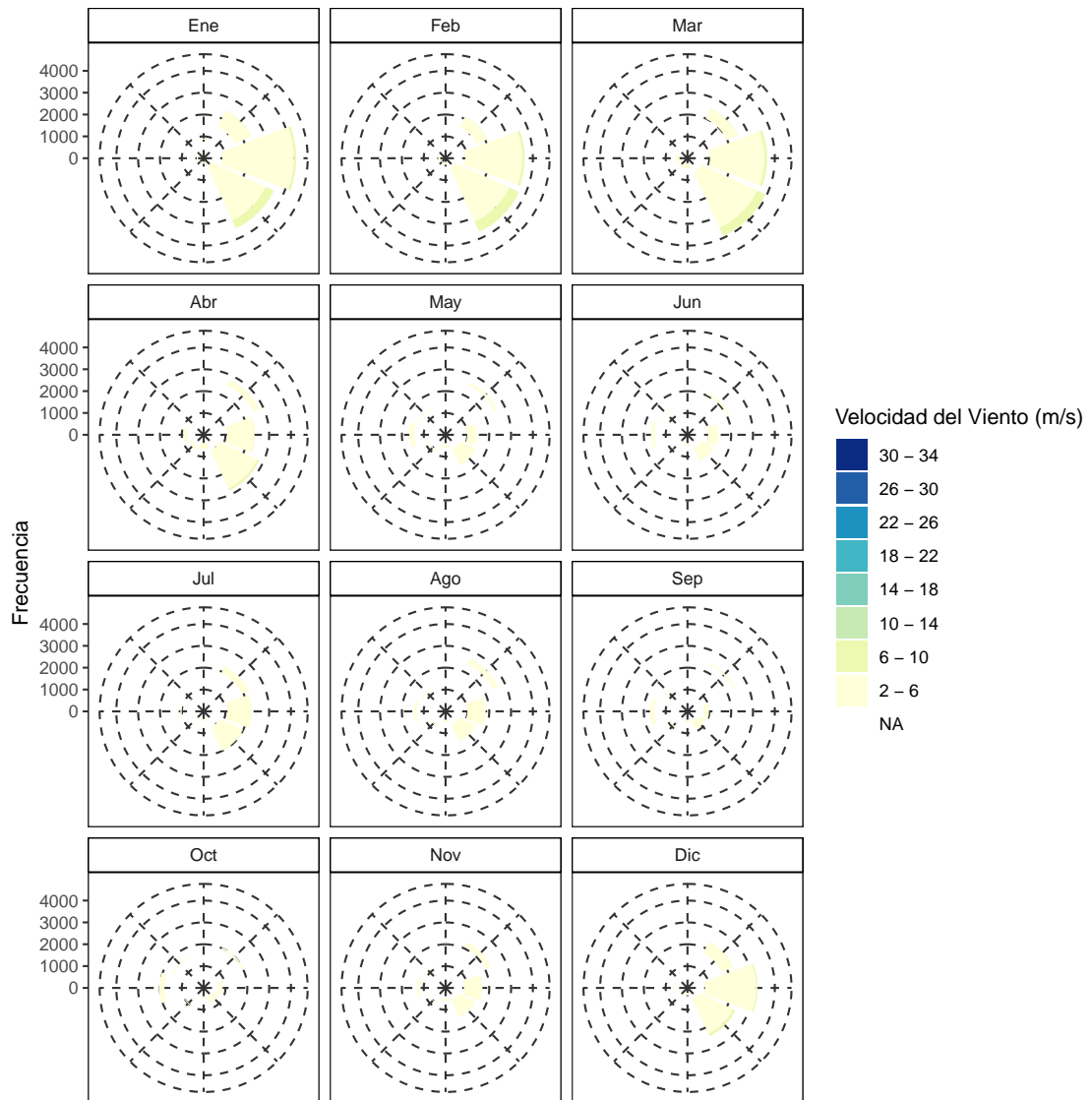


FIGURA 5.30: Estación 84197 Santa Bárbara: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.

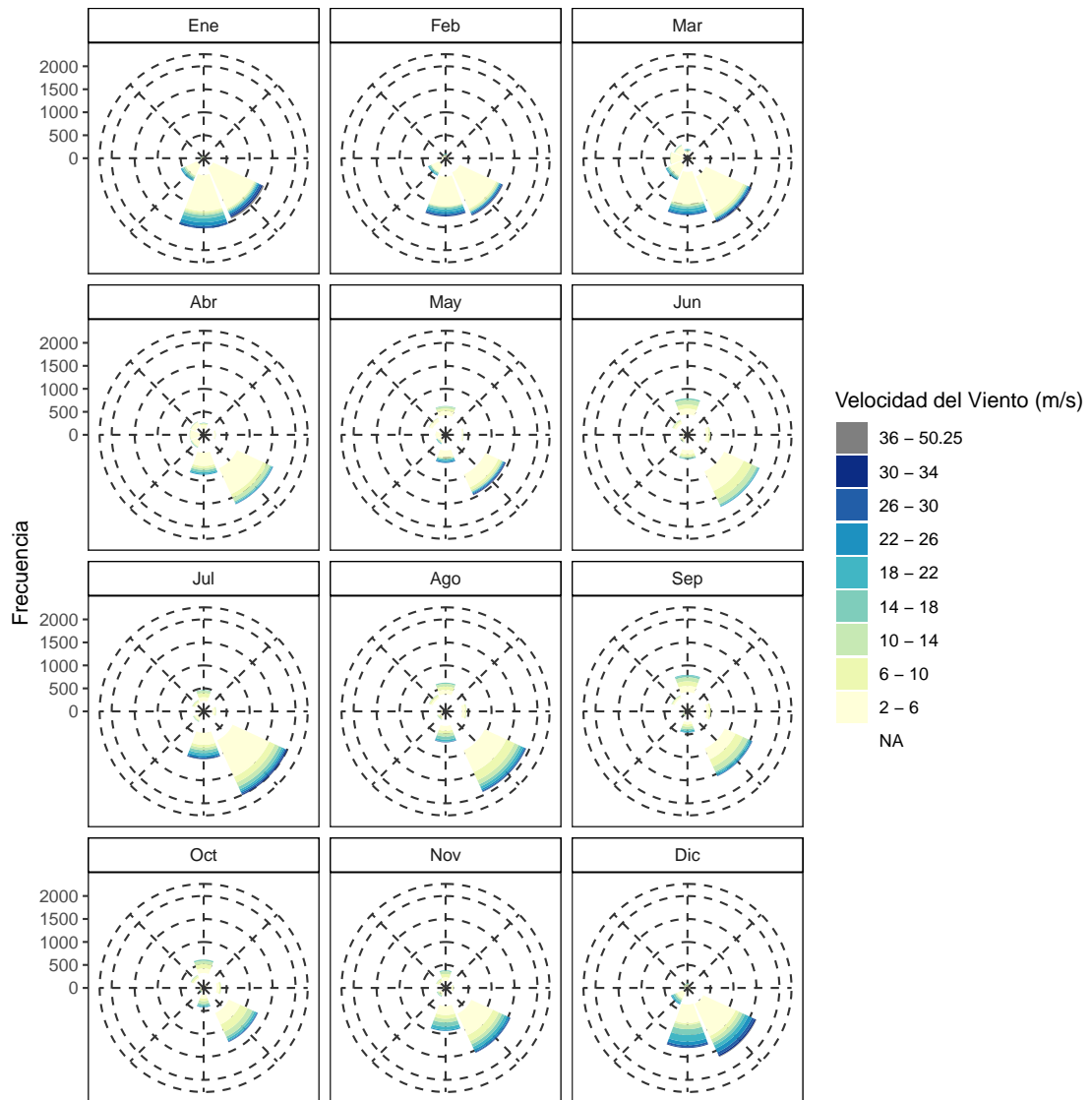


FIGURA 5.31: Estación 84205 Getsemaní: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.

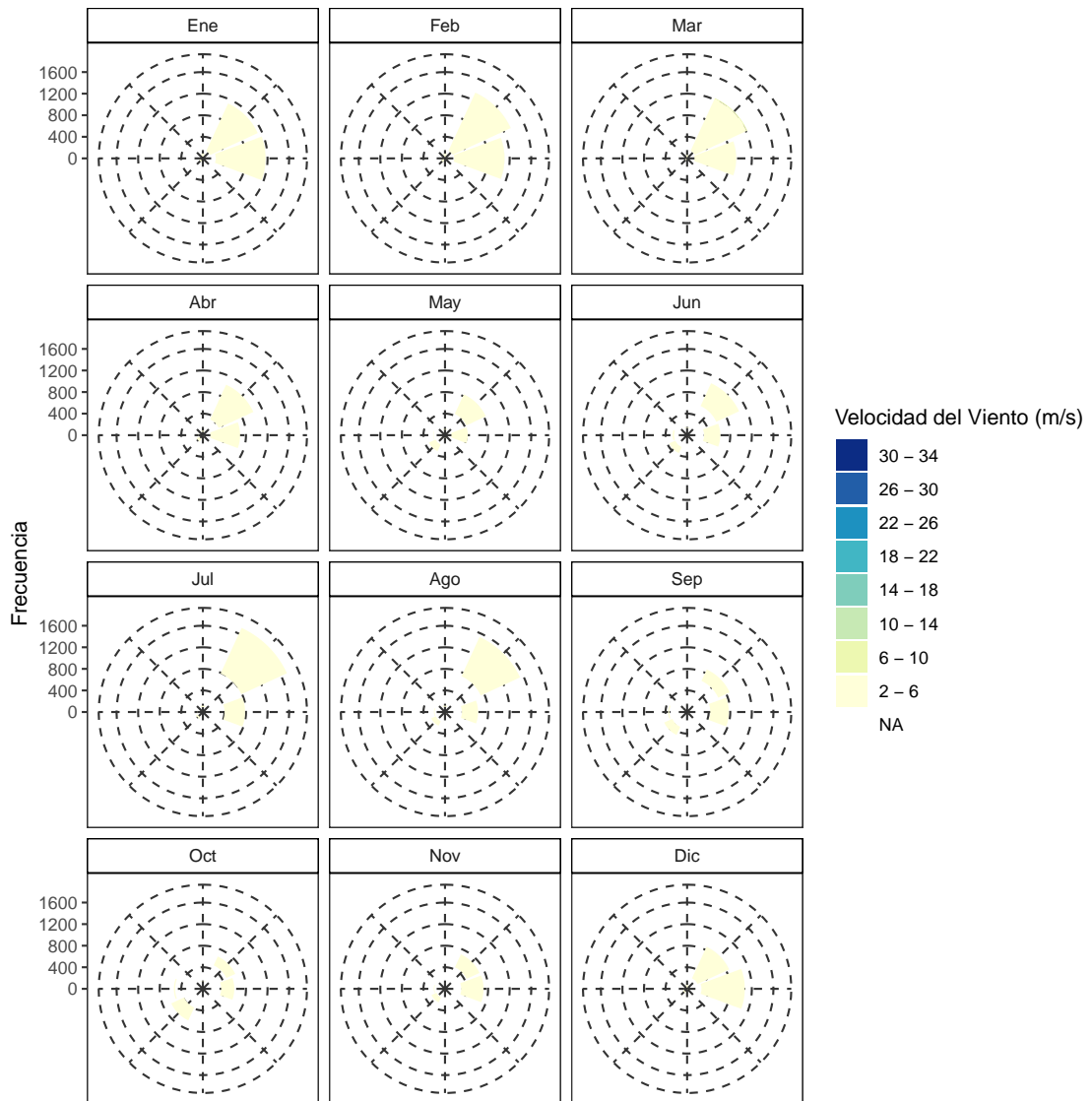


FIGURA 5.32: Estación UNA Campus Omar Dengo: Patrón (velocidad y dirección) del viento según mes del año.

5.5. Temperatura de la superficie

Se presentan las estimaciones realizadas del algoritmo mono-ventana propuesto por Qin *et al.* (2001), Sobrino *et al.* (2004), F. Wang *et al.* (2015) para el área y período temporal en estudio. Estos cálculos se implementaron por medio de una serie de algoritmos e instrucciones en el programa R (R Core Team, 2019). Los principales estadísticos se pueden observar en el cuadro 5.35. En las figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36 se espacializan los resultados obtenidos del proceso de estimación de la temperatura de la superficie terrestre para los años⁶ 1985, 1986, 1987, 1989, 1991, 1997, 1999, 2001, 2008, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 y 2019.

CUADRO 5.35: Heredia: Resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie en las imágenes de satélite (1985 - 2019)

	Año	Mín.	Máx.	Media	Desv. Estándar
1	1985	25.43	42.89	31.02	2.56
2	1986	25.43	42.89	32.07	2.74
3	1987	25.81	42.40	32.15	2.30
4	1989	21.70	39.68	27.81	3.01
5	1991	18.31	34.75	24.85	2.82
6	1997	21.58	36.67	28.47	2.41
7	1999	27.77	49.88	38.02	3.97
8	2001	17.87	38.51	29.69	2.87
9	2008	14.95	37.20	25.22	4.13
10	2013	12.81	44.67	32.89	5.01
11	2014	26.57	42.73	35.47	1.91
12	2015	24.41	44.83	32.40	1.81
13	2016	31.75	47.44	38.78	1.71
14	2017	33.41	52.45	44.02	2.57
15	2018	31.10	47.21	40.65	2.04
16	2019	29.13	47.20	38.86	2.60

Al considerar el patrón de distribución espacial de la TST, se comprueba que esta tiende a ser más elevada y concentrada en la mancha urbana consolidada (figuras 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36). Este comportamiento tiende a intensificarse en el transcurso del tiempo.

⁶A pesar que se realiza el cálculo para todas las imágenes satelitales, solo se presentan los resultados para los años indicados.

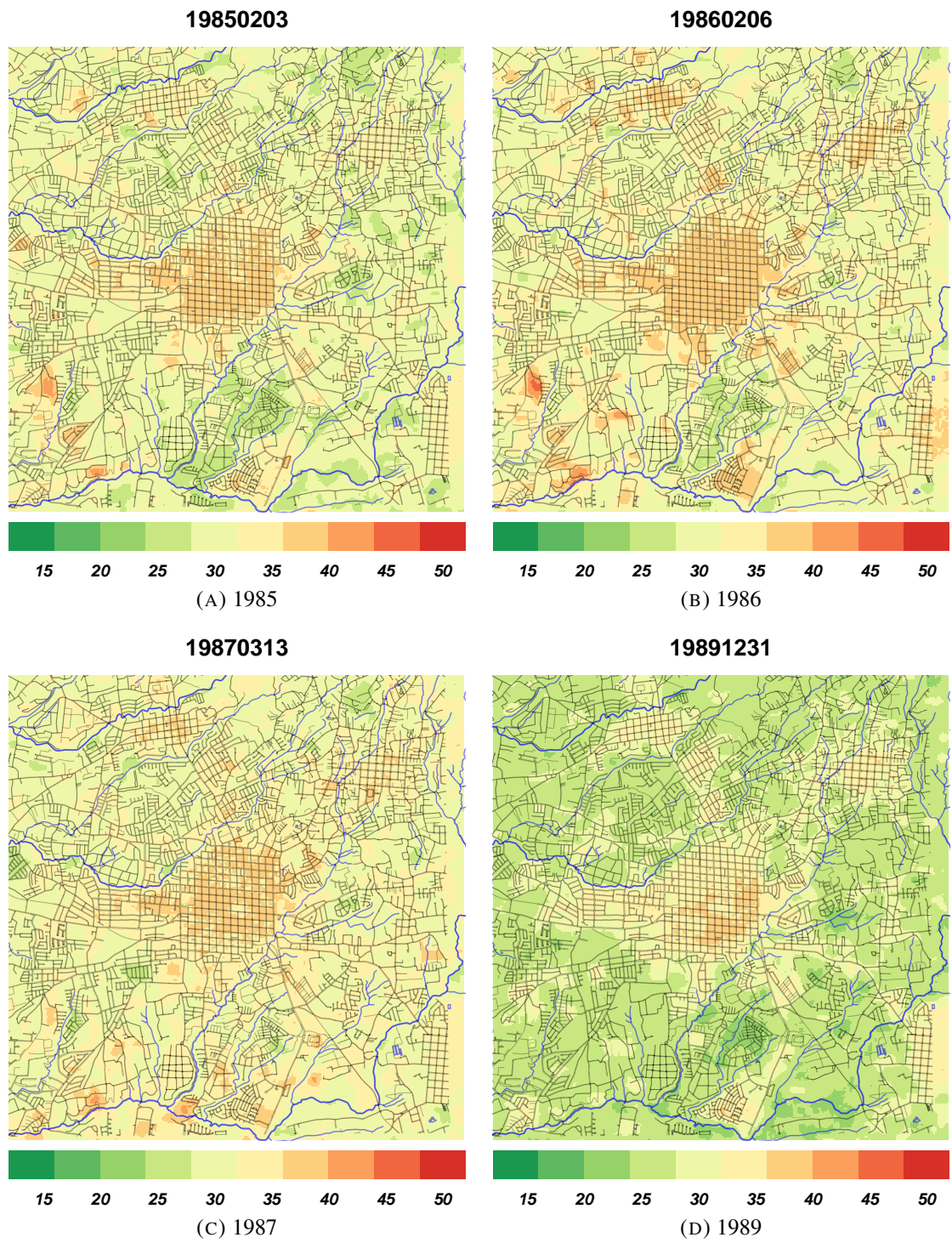


FIGURA 5.33: Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 1985-1989.

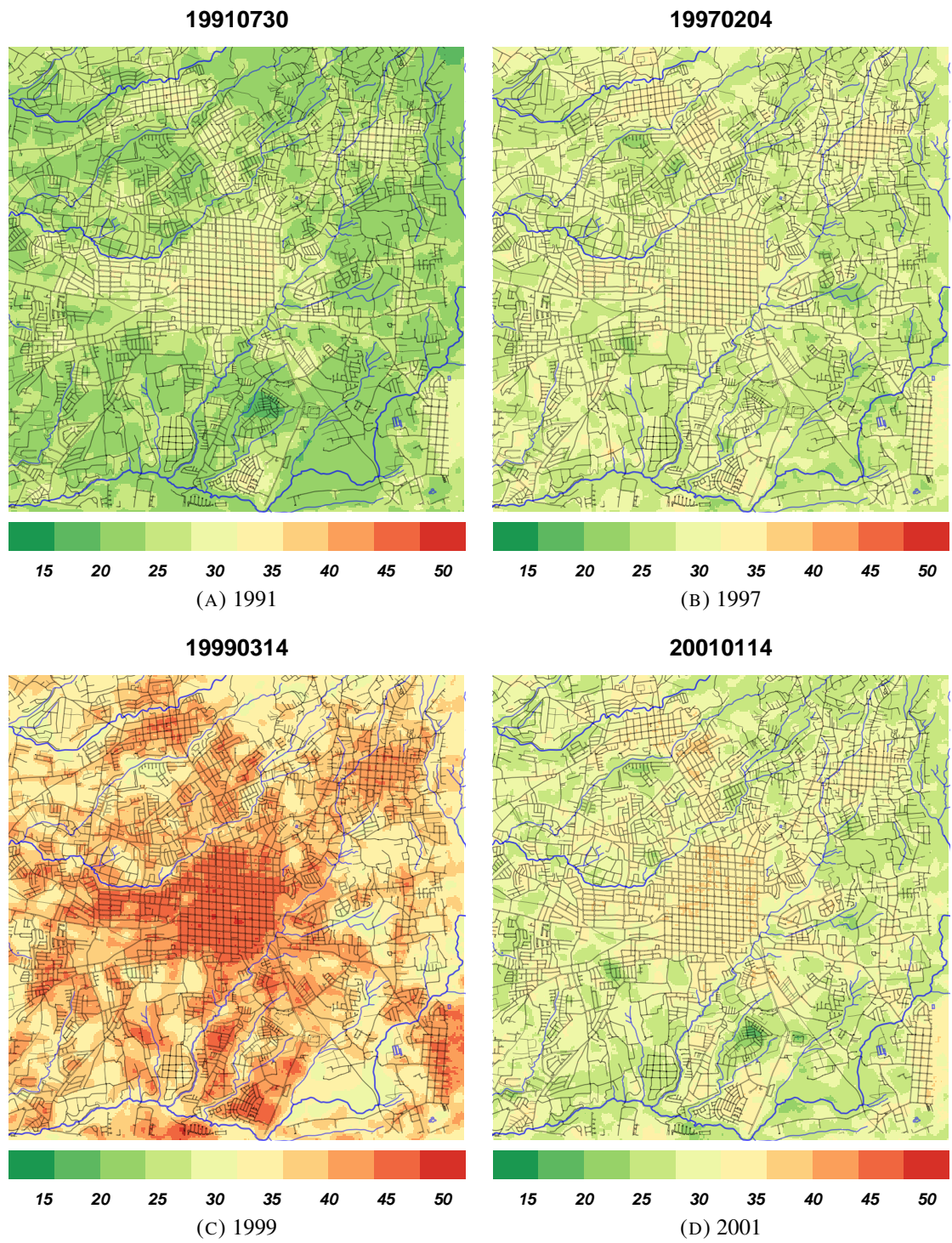


FIGURA 5.34: Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 1991-2001.

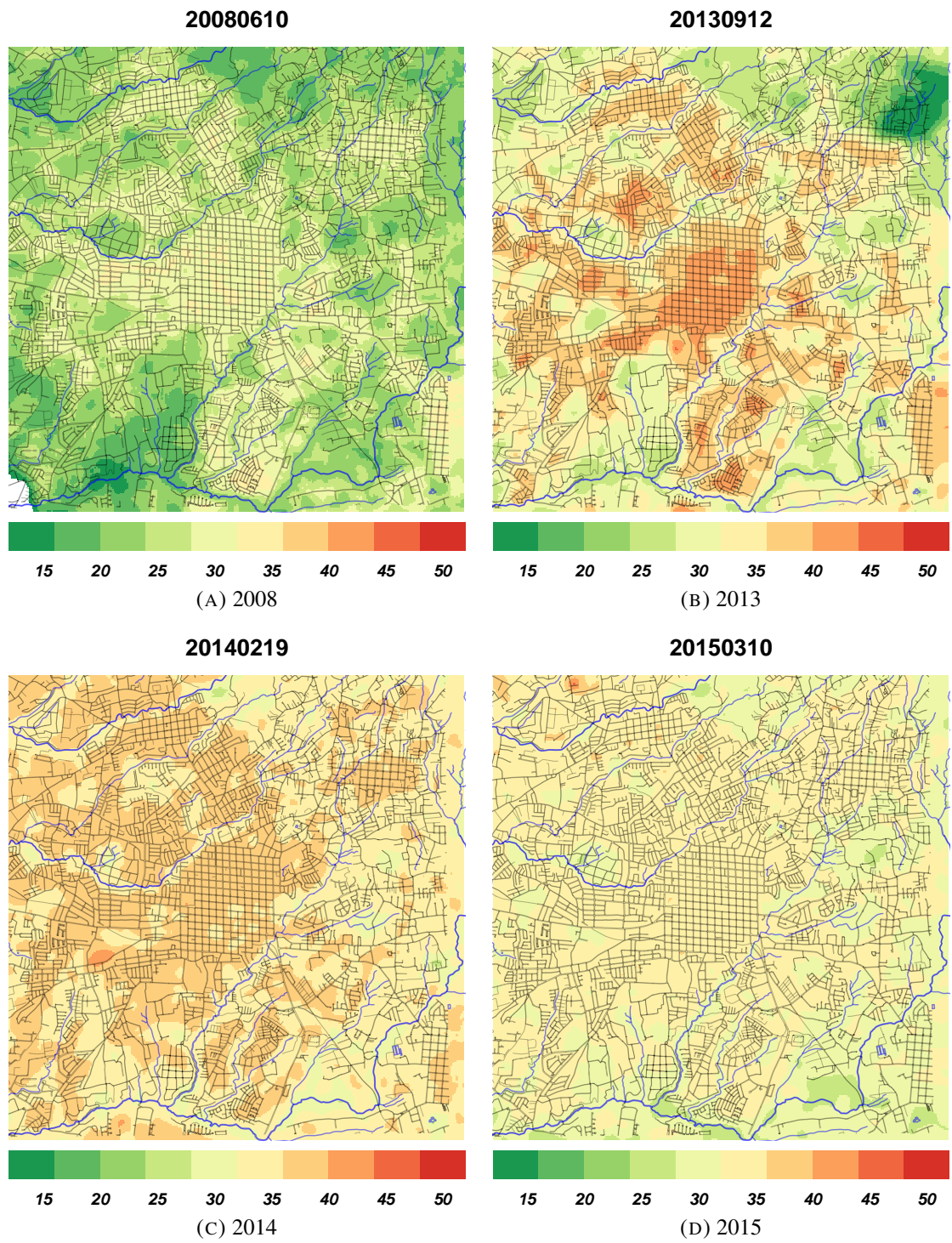


FIGURA 5.35: Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 2008-2015.

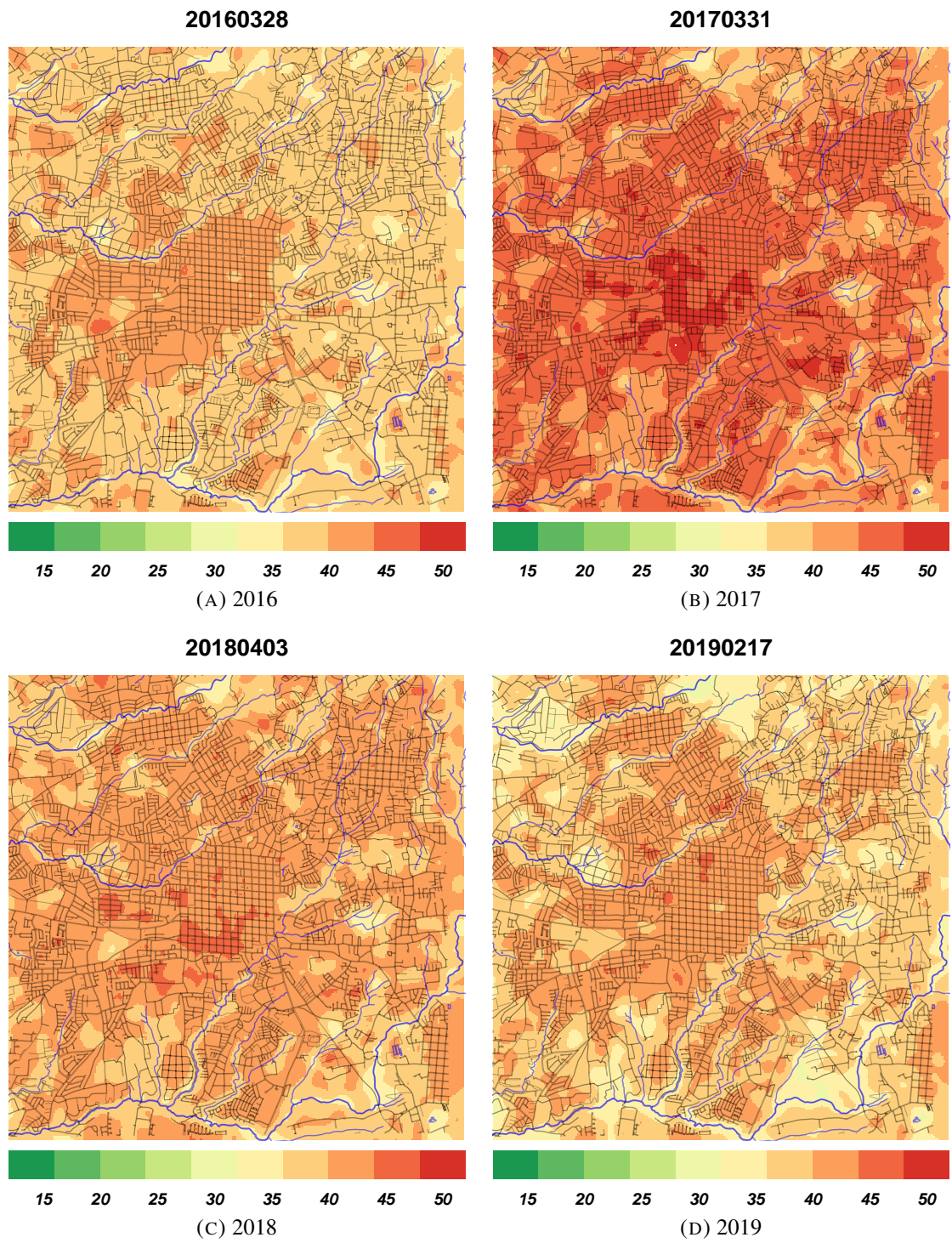


FIGURA 5.36: Temperatura de la superficie terrestre [TST], según fecha indicada en las subfiguras en el período de 2016-2019.

5.6. Isla de Calor Urbano

Con la temperatura de la superficie terrestre (TST) se determina la Isla de Calor Urbano (ICU) en la ciudad de Heredia. Mediante el análisis de intensidad zonal en el que se elabora los perfiles térmicos por categorías de las coberturas de la tierra y de segmentos en dirección zona urbana - periferia, se procede a cuantificar la forma e intensidad de la ICU.

5.6.1. Perfiles térmicos: Categorías de cobertura

CUADRO 5.36: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (1985-02-03)

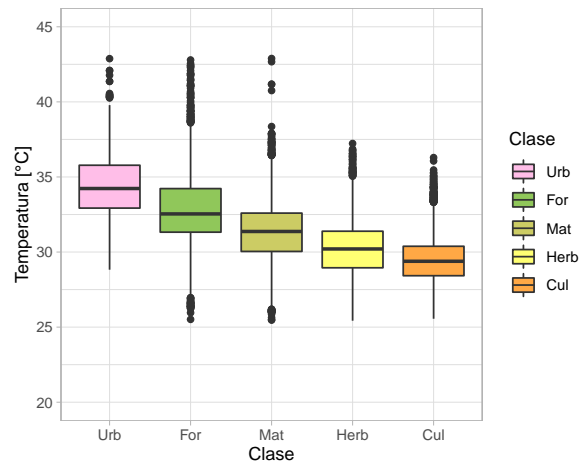
	Categoría	n.obs	\bar{x}	Max.	Min.	Desv. Estándar
1	Urb	7426	34.3084	42.8787	28.9754	1.8789
2	For	3822	32.7475	42.8877	25.5152	2.6020
3	Mat	5177	31.3025	41.1797	25.4481	2.0640
4	Herb	6377	30.2318	37.2366	25.4273	1.8068
5	Cul	17194	29.4357	36.0643	25.8595	1.4216

CUADRO 5.37: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (2001-01-14)

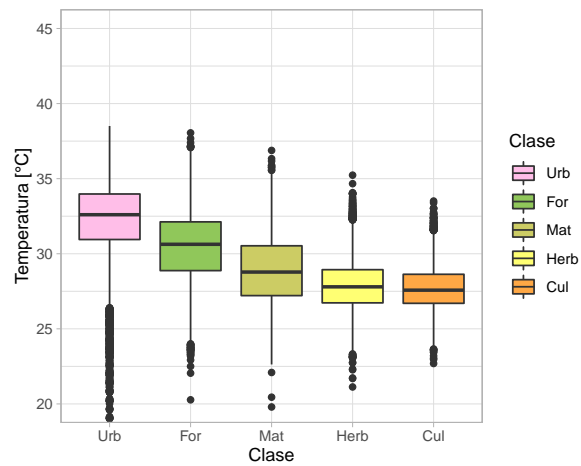
	Categoría	n.obs	\bar{x}	Max.	Min.	Desv. Estándar
1	Urb	12388	32.2487	38.5073	17.8715	2.7026
2	For	4891	30.4705	37.3974	20.2732	2.4970
3	Mat	6696	28.8521	36.2095	19.7956	2.3111
4	Herb	10000	27.9005	34.1663	21.1289	1.6826
5	Cul	6021	27.7389	33.3885	22.6920	1.4720

CUADRO 5.38: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (2019-03-05)

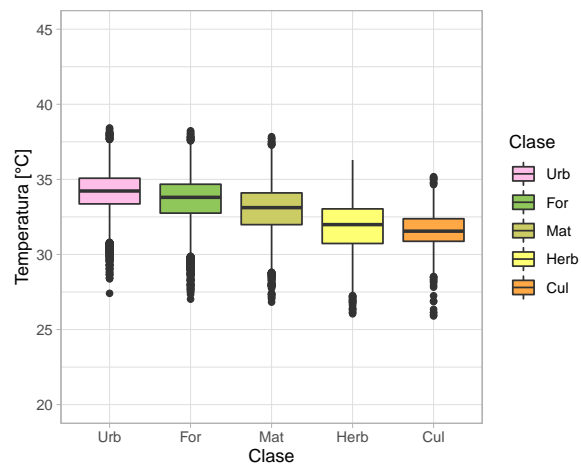
	Categoría	n.obs	\bar{x}	Max.	Min.	Desv. Estándar
1	Urb	18962	34.1701	38.4240	27.4116	1.3087
2	For	6622	33.6049	38.2335	27.3060	1.6575
3	Mat	7956	32.9577	37.8418	26.8260	1.6294
4	Herb	4330	31.8962	36.2864	25.9049	1.6142
5	Cul	2126	31.5930	35.6515	25.9674	1.1551



(A) Perfil 1985



(B) Perfil 2001



(C) Perfil 2019

FIGURA 5.37: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra [cat] (1985-2001-2019)

Para los perfiles por categorías de cobertura de la tierra se usa la clasificación realizada en la sección 5.2.1 para los años 1985, 2001 y 2019. Al sobreponer la capa de información de cobertura de uso con respecto a la capa de la temperatura de la superficie terrestre y al extraer estos valores por clase, se obtienen los cuadros 5.36, 5.37 y 5.38 y la figura 5.37.

Los resultados indican que la cobertura que presenta la temperatura superficial (promedio y máxima) más elevada es la urbana (Urb), seguida de la forestal (For), los matorrales (Mat), los pastos (Herb) y los cultivos (Cul). El en cuadro 5.39 se indican las diferencias promedio de temperatura entre las zonas urbanas con respecto a las otras coberturas. En el año 1985 se registra las mayores diferencias promedio de temperatura. Al contrario, en el año 2019 se registran las menores diferencias entre las clases (Cuadro 5.39).

CUADRO 5.39: Diferencias térmicas promedio en [°C] entre clases de cobertura de la tierra con respecto a la cobertura urbana.

Diferencia entre Clases	1985	2001	2019	Δ Promedio
Urbano-Forestal	1.5609	1.7782	0.5652	1.3014
Urbano-Matorral	3.0059	3.3966	1.2124	2.5383
Urbano-Pastos	4.0766	4.3481	2.2740	3.5662
Urbano-Cultivos	4.8726	4.5097	2.5771	3.9865

Al individualizar los casos, la mayor diferencia térmica ocurre en el año 1985 y corresponde a la cobertura urbana con respecto a la cobertura asociada a los cultivos (predomina el cultivo de café) 4.87 °C. Mientras que en el año 2019 se observa la menor diferencia que corresponde a las clases urbano y forestal, con un valor estimado en 0.56 °C. Al tomar en cuenta el promedio de los tres años (Cuadro 5.39), la diferencia térmica entre la cobertura urbana con respecto a la forestal es de 1.3 °C, mientras que entre lo urbano y las áreas destinadas para cultivos es de 3.99 °C. Al estimar los límites de confianza en un 95 % (nivel de significancia estadística $\alpha = 0.05$) se establece que no existe traslape entre los intervalos de la diferencia térmica de las clases, que sugiera un estimado del parámetro igual.

5.6.2. Perfiles térmicos: Zona Urbana - Zona Periférica

Para la construcción de los perfiles térmicos, se usan 4 transectos que consisten en segmentos que atraviesan el área de estudio y mantienen una lógica propia de una rosa de los vientos. Estos se identifican con una letra del alfabeto. El segmento A mantiene una orientación Sur-Norte, el segmento B va del Suroeste al Noreste, el segmento D presenta una orientación Sureste-Noroeste, mientras que el segmento C va de Oeste-Este. Tal y como se muestra en la figura 5.38.

Al extraer los valores de la temperatura de la superficie terrestre en los segmentos establecidos, se construyen los gráficos de las figuras 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43, 5.44, 5.45 y 5.46. En estas figuras, se observa desde diferentes direcciones la forma de la Isla de Calor Urbano. En las crestas las temperaturas son más cálidas y se asocian a las áreas urbanas. Mientras que en los valles las temperaturas son más frescas y se relacionan a las coberturas de la tierra como cultivos, matorrales y áreas forestales.

Al inicio del período en el año 1985 y hasta aproximadamente el año 2008, el patrón de conformación de crestas y valles supone efecto de intercalación entre las coberturas de la tierra que permiten identificar sectores cálidos y frescos en el área de estudio. Por ejemplo, en el perfil A de 1985 desde los 0 metros hasta los 4000 metros encontramos un aumento paulatino en la gradiente térmica, y que corresponde a las localidades de Lagunilla de Heredia a el centro de la Ciudad de Heredia. A su vez entre los 4000 y 5300 metros de distancia se localiza un área de cultivos de café que separaba a Heredia de Barva, de ahí la gradiente térmica.

Al verificar en la capa de coberturas de la tierra, cada reducción de la gradiente corresponde a la presencia de una cobertura natural como la vegetación presente en los cauces de los ríos o matorrales, e incluso cultivos de café, en los que la temperatura tiende a ser menor. Mientras que en cada aumento de la gradiente corresponde a la presencia de una estructura o edificación.

A partir del año 2014, ocurre un cambio significativo en los perfiles térmicos. En los que la fluctuación entre cresta y valle tiende a ser menor, y se observa un patrón más suavizado. Otro aspecto relevante es que la temperatura de la superficie tiende a aumentar de forma considerable y a ser uniforme en los transectos establecidos. Lo que en años anteriores al 2008 se consideraba valores máximos de la cresta, en los últimos años parece ser el patrón normal y que se puede describir con la forma de una meseta. Este tipo de forma en el perfil

se debe a la falta de elementos o zonas que no regulan el aumento de temperatura y a la ampliación de la mancha urbana.

En el cuadro 5.40 se reportan los valores de la ICU del transecto A. Se escoge este segmento, ya que delimita el cuadrante central de Heredia entre los ríos Pirro y Burío y ofrece una línea base estándar para comparar las diferencias térmicas. En 1985, la ICU de la ciudad de Heredia se distingue con claridad, y se estima una diferencia promedio de 4.6°C entre el centro de urbano y el sector periférico. Mientras que para el año 2019 esta diferencia es de 3.02°C , pero con temperaturas más altas. Los valores de la ICU mayores a 3.5°C pero menores a 5°C se reportan en los años 1985, 1986, 1991, 2001, 2008 y 2013. En los años de 1989 y 1999 la ICU es mayor a 5°C . Una característica particular es que, con la excepción del año 2013, el ENOS se encontraba en una fase positiva o negativa con intensidad fuerte o muy fuerte.

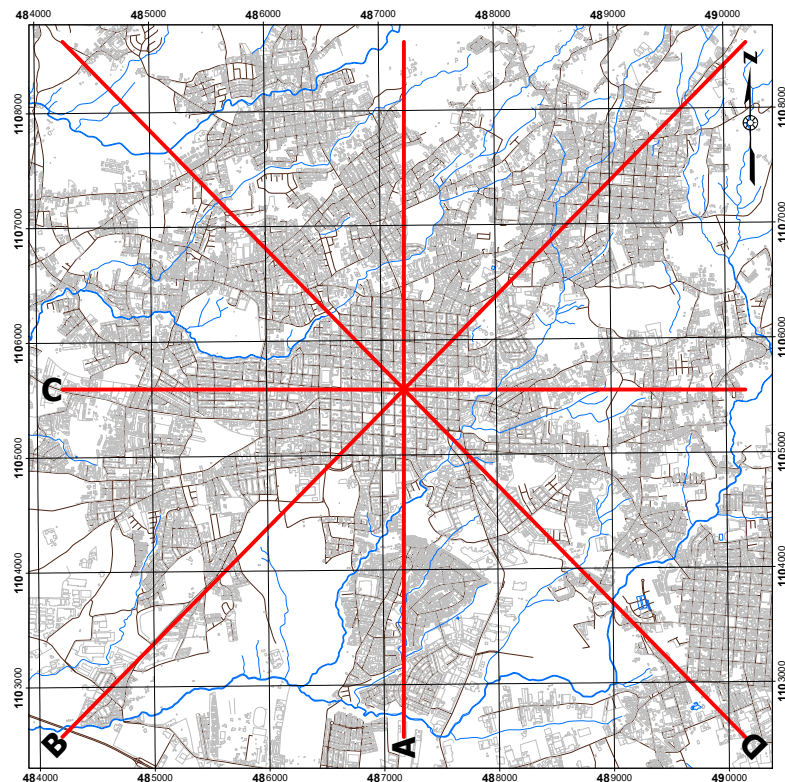
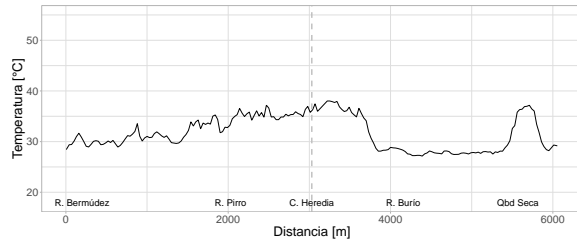
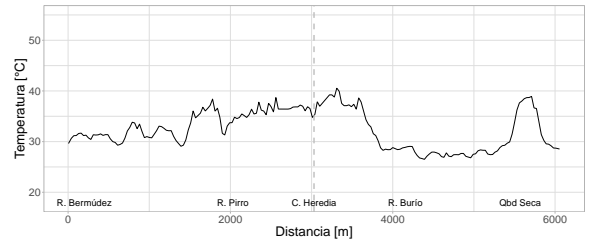


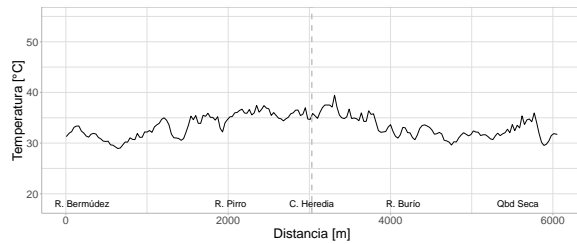
FIGURA 5.38: Heredia: Perfiles de Temperatura.



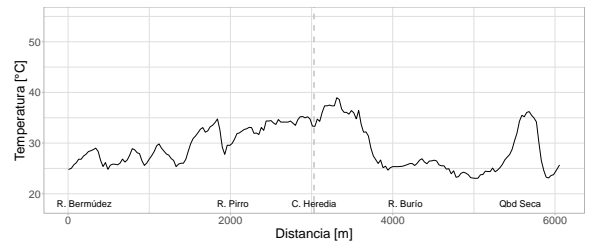
(A) Perfil A 1985



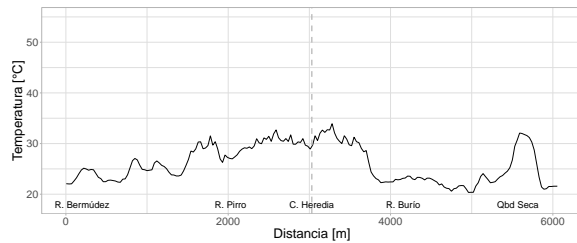
(B) Perfil A 1986



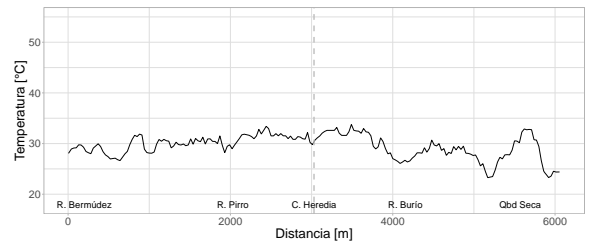
(C) Perfil A 1987



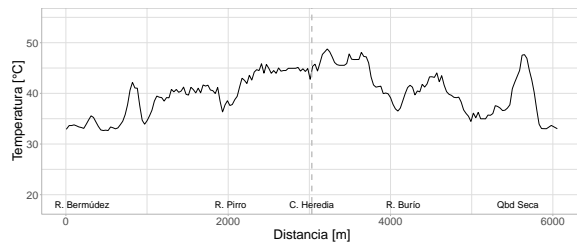
(D) Perfil A 1989



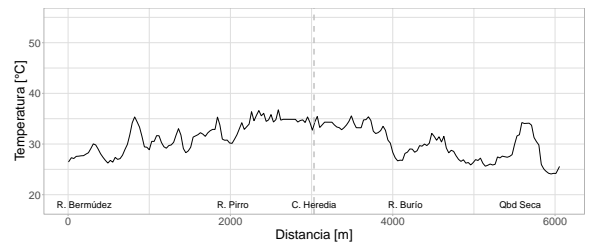
(E) Perfil A 1991



(F) Perfil A 1997

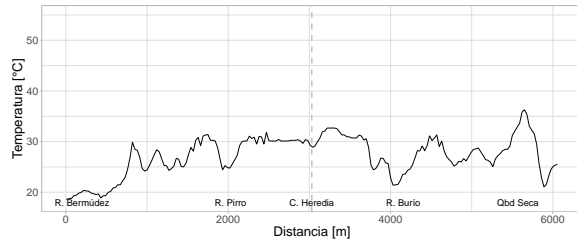


(G) Perfil A 1999

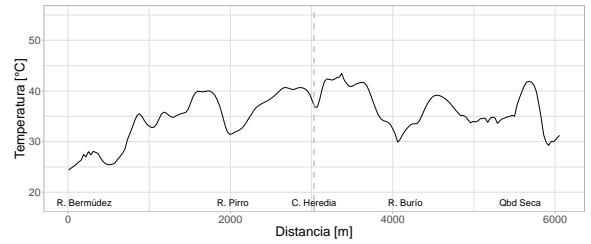


(H) Perfil A 2001

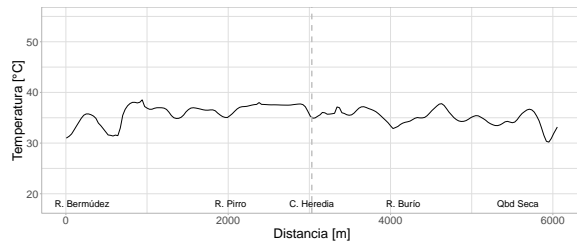
FIGURA 5.39: Perfil térmico A: ICU [up] 1985-2001



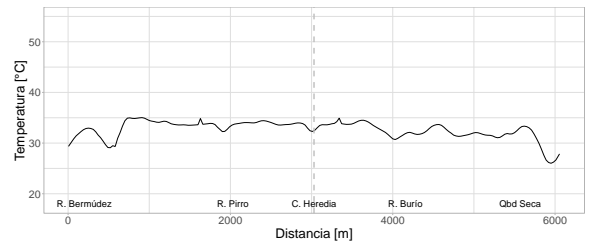
(A) Perfil A 2008



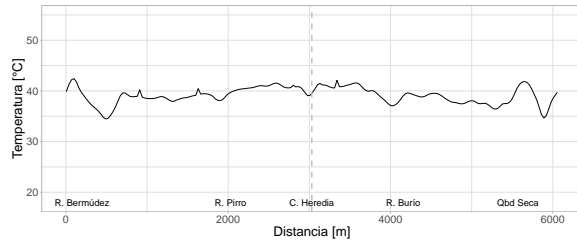
(B) Perfil A 2013



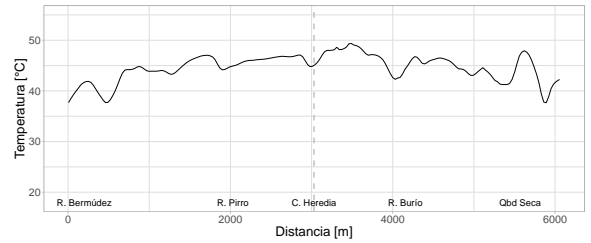
(C) Perfil A 2014



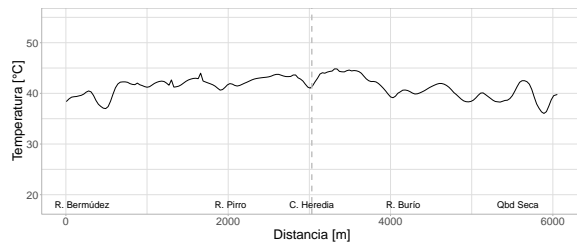
(D) Perfil A 2015



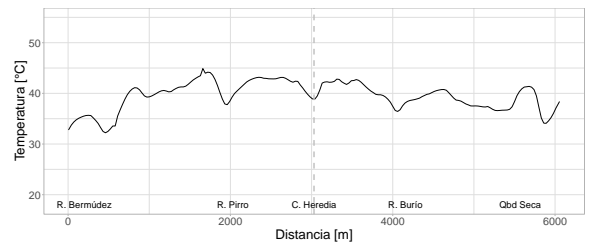
(E) Perfil A 2016



(F) Perfil A 2017

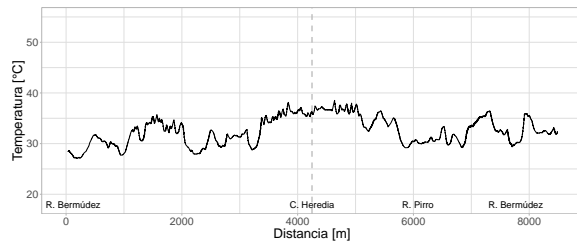


(G) Perfil A 2018

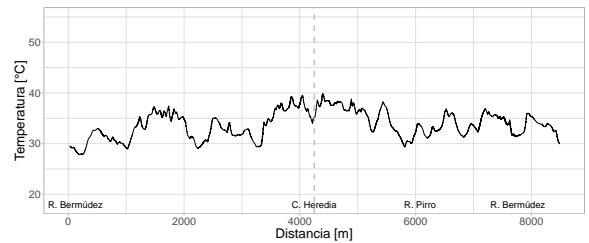


(H) Perfil A 2019

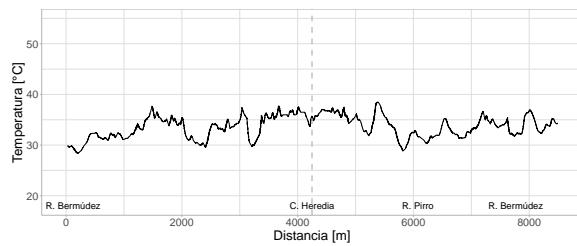
FIGURA 5.40: Perfil térmico A: ICU [up] 2008-2019



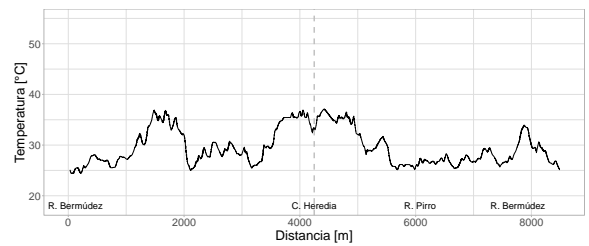
(A) Perfil B 1985



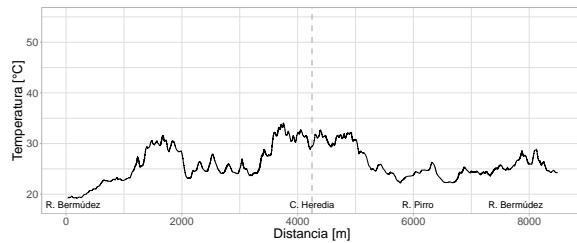
(B) Perfil B 1986



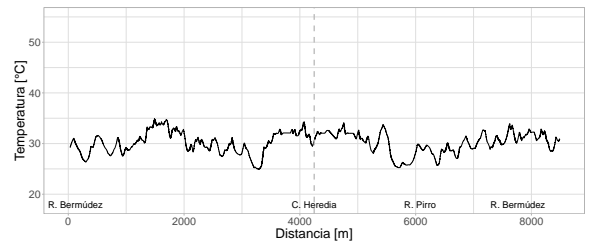
(C) Perfil B 1987



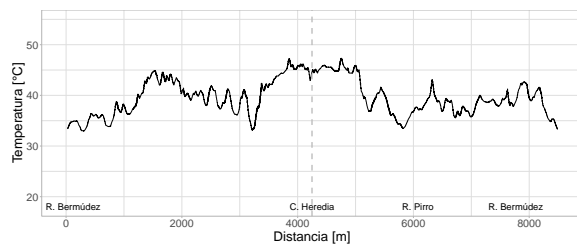
(D) Perfil B 1989



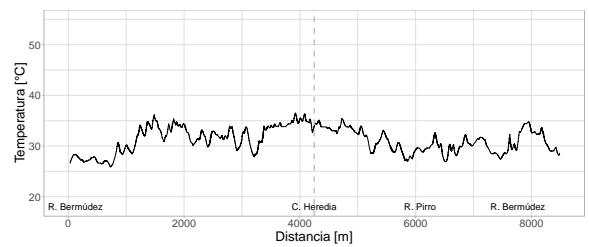
(E) Perfil B 1991



(F) Perfil B 1997

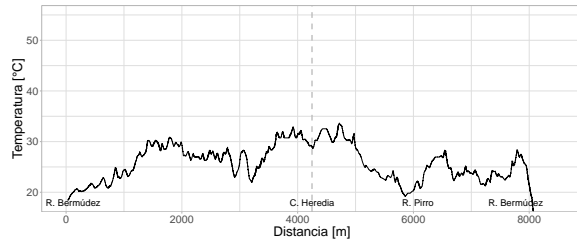


(G) Perfil B 1999

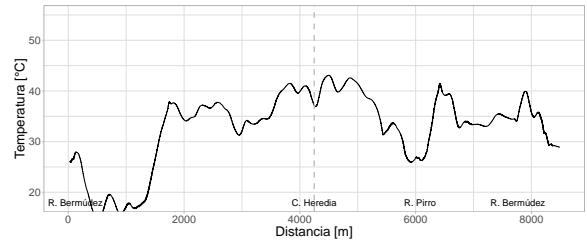


(H) Perfil B 2001

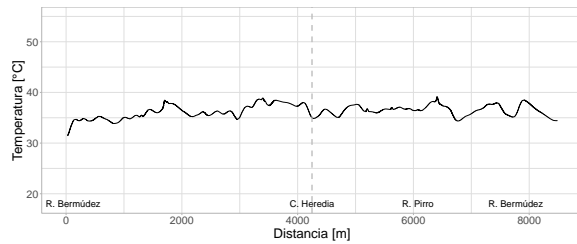
FIGURA 5.41: Perfil térmico B: ICU [up] 1985-2001



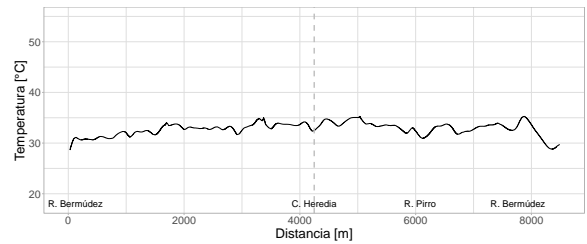
(A) Perfil B 2008



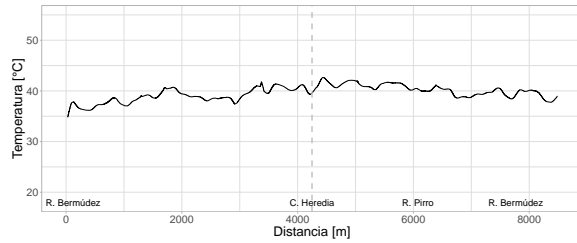
(B) Perfil B 2013



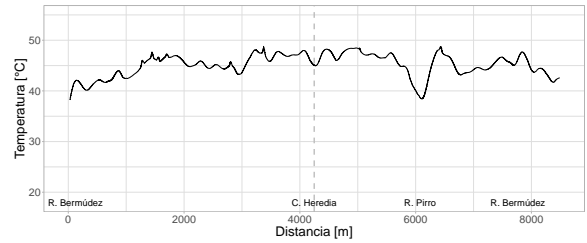
(C) Perfil B 2014



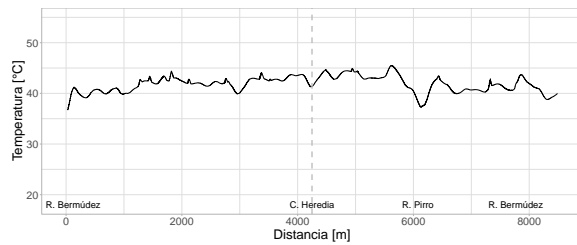
(D) Perfil B 2015



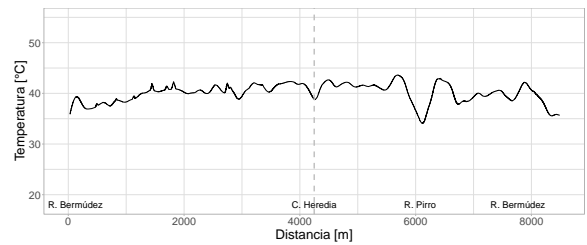
(E) Perfil B 2016



(F) Perfil B 2017

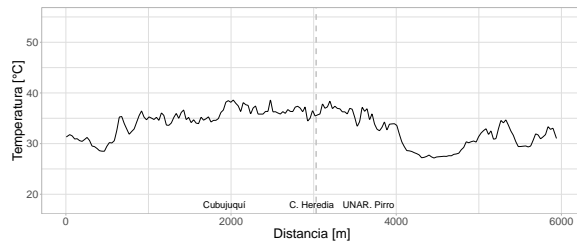


(G) Perfil B 2018

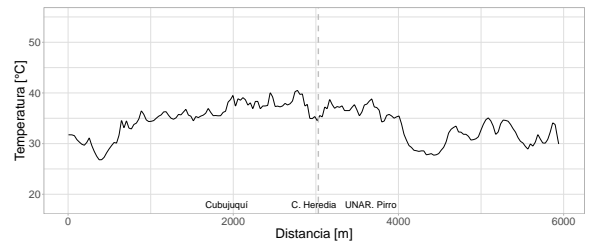


(H) Perfil B 2019

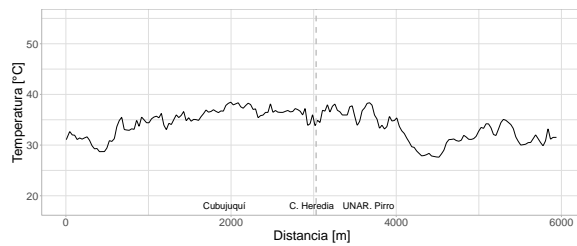
FIGURA 5.42: Perfil térmico B: ICU [up] 2008-2019



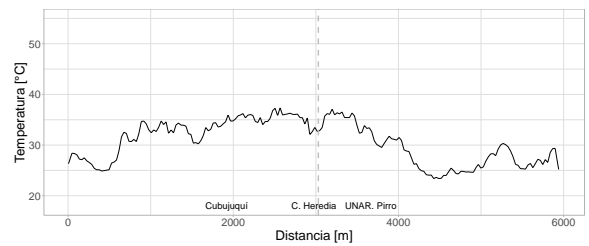
(A) Perfil C 1985



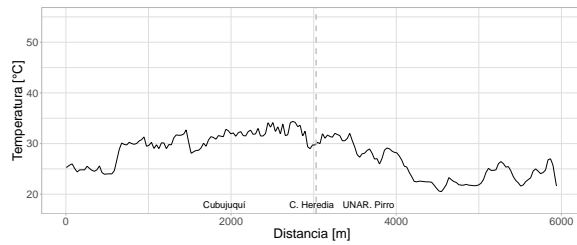
(B) Perfil C 1986



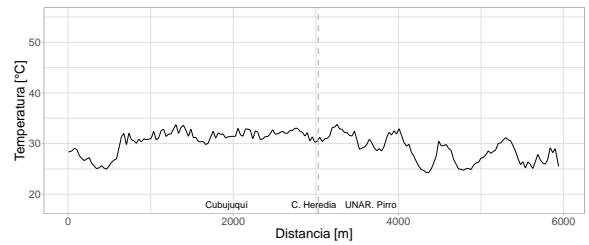
(C) Perfil C 1987



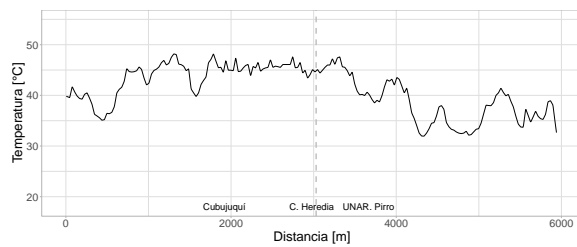
(D) Perfil C 1989



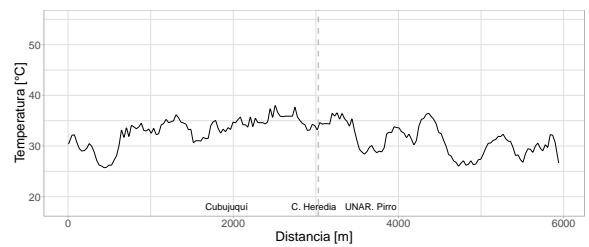
(E) Perfil C 1991



(F) Perfil C 1997

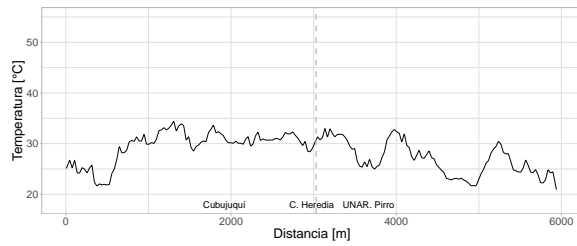


(G) Perfil C 1999

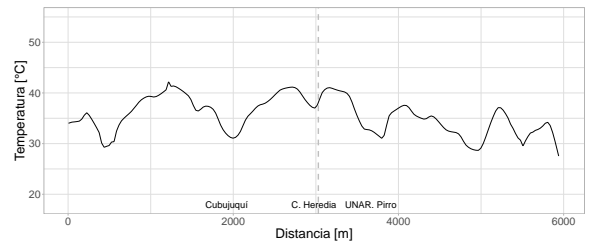


(H) Perfil C 2001

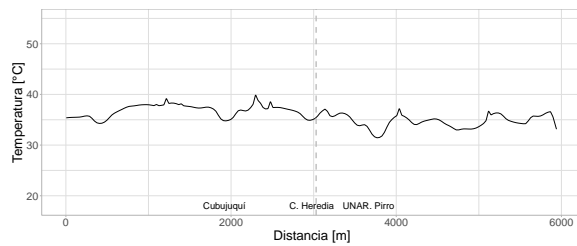
FIGURA 5.43: Perfil térmico C: ICU [up] 1985-2001



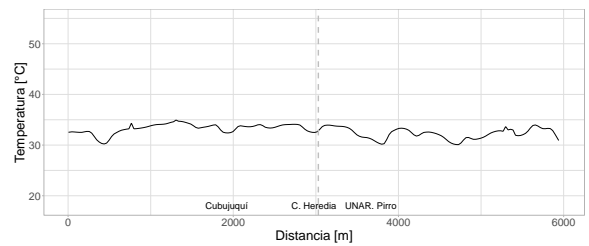
(A) Perfil C 2008



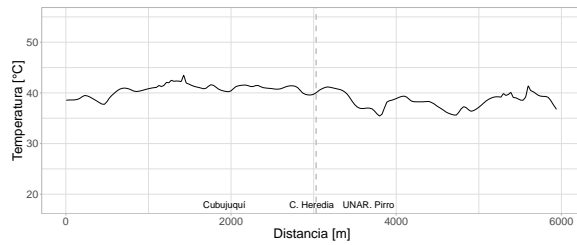
(B) Perfil C 2013



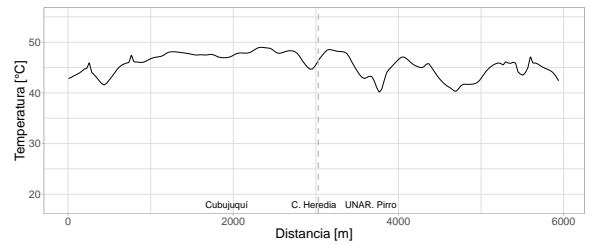
(C) Perfil C 2014



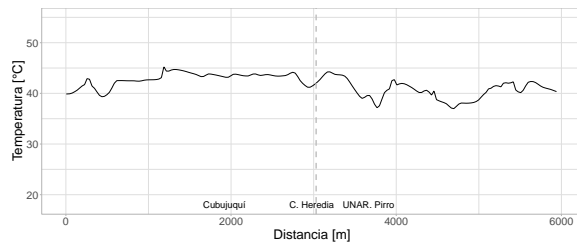
(D) Perfil C 2015



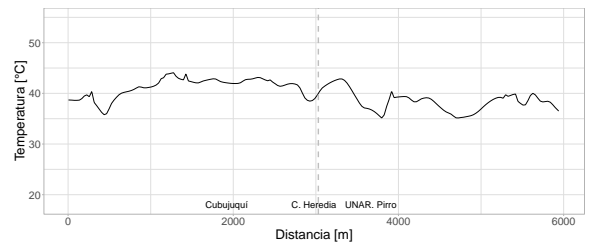
(E) Perfil C 2016



(F) Perfil C 2017



(G) Perfil C 2018



(H) Perfil C 2019

FIGURA 5.44: Perfil térmico C: ICU [up] 2008-2019

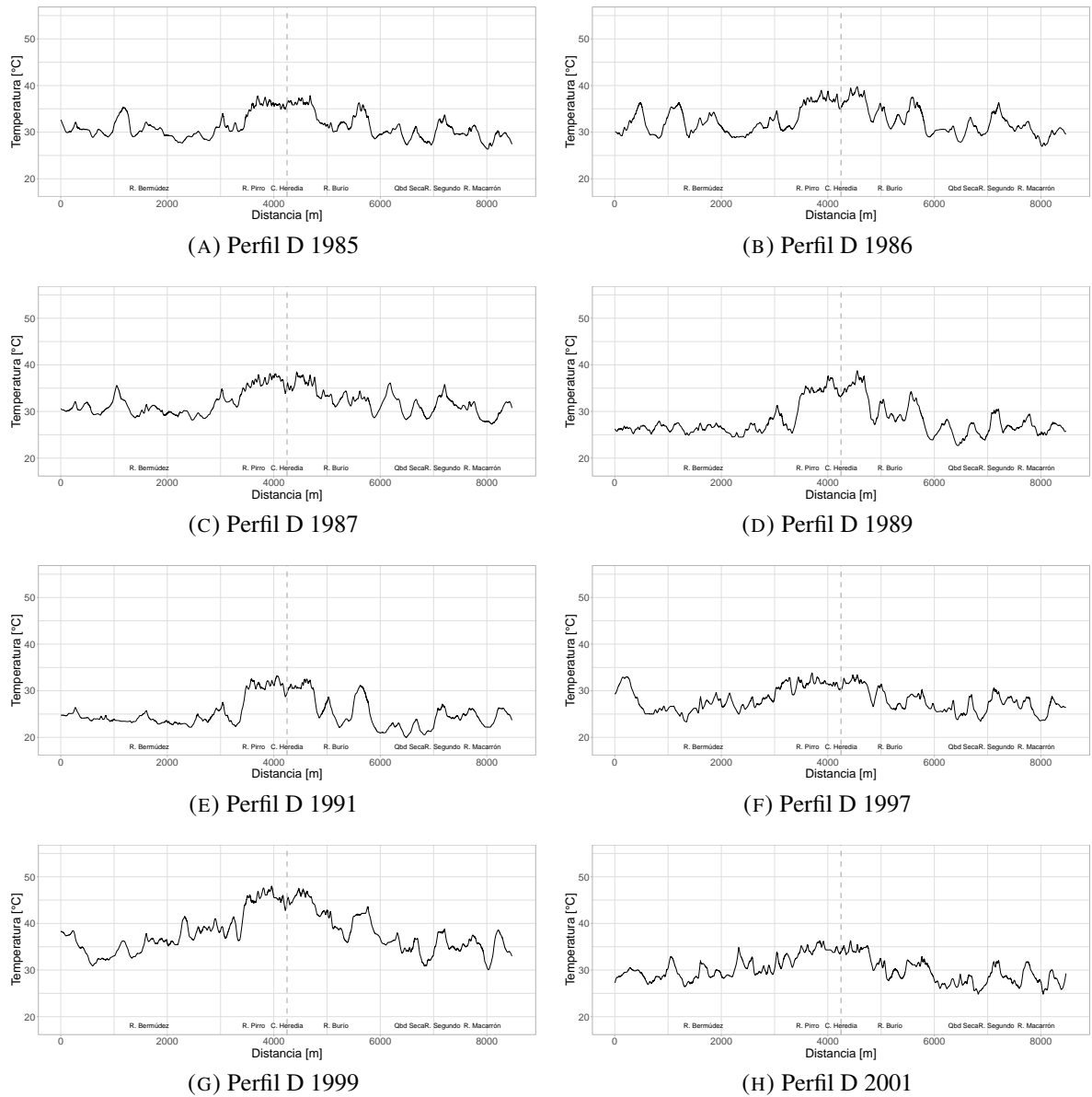


FIGURA 5.45: Perfil térmico D: ICU [up] 1985-2001

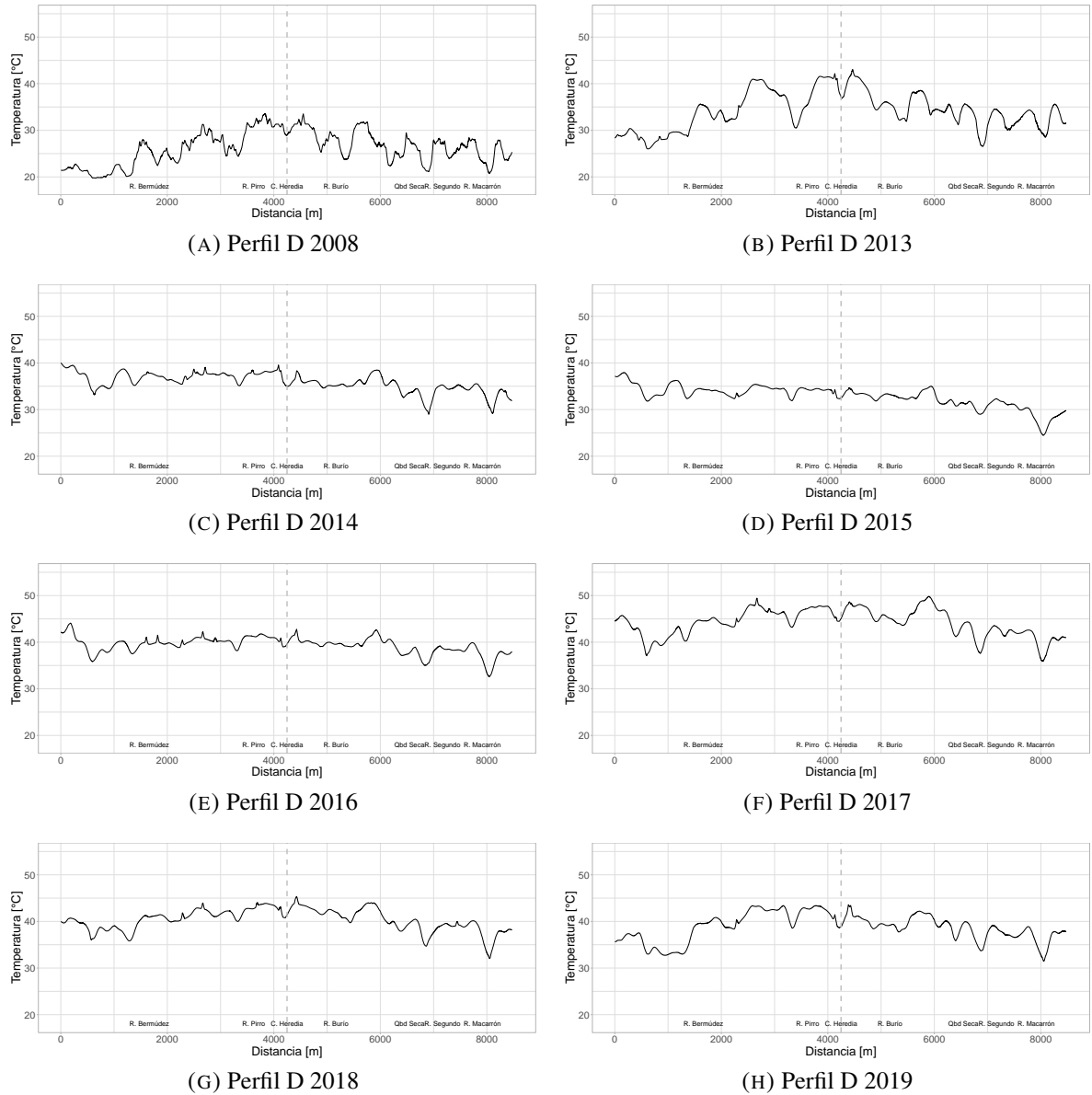
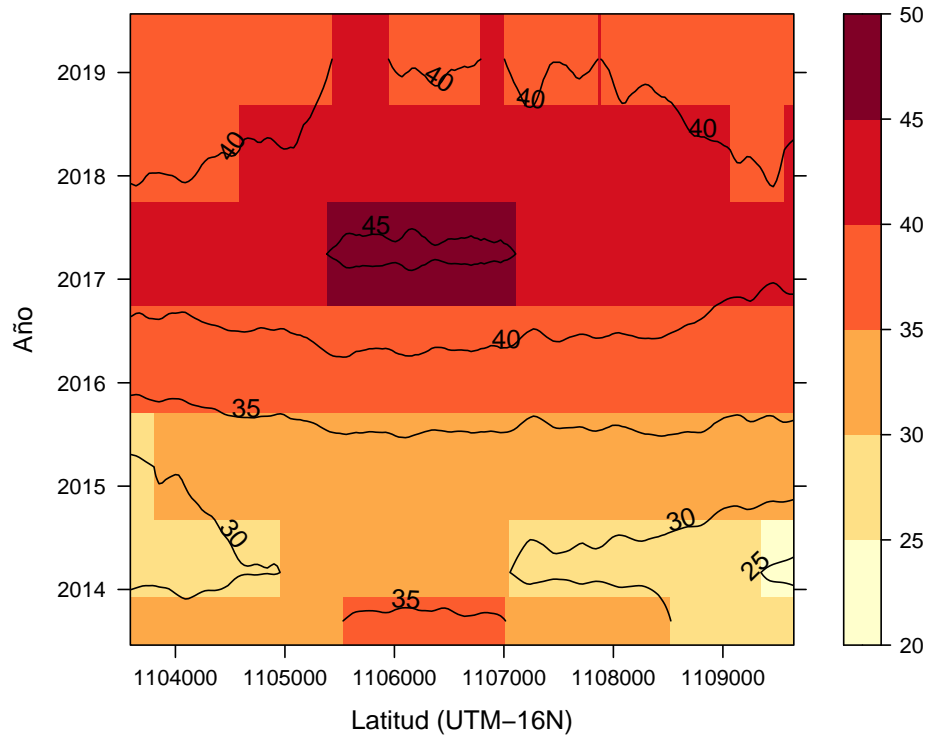


FIGURA 5.46: Perfil térmico D: ICU [up] 2008-2019

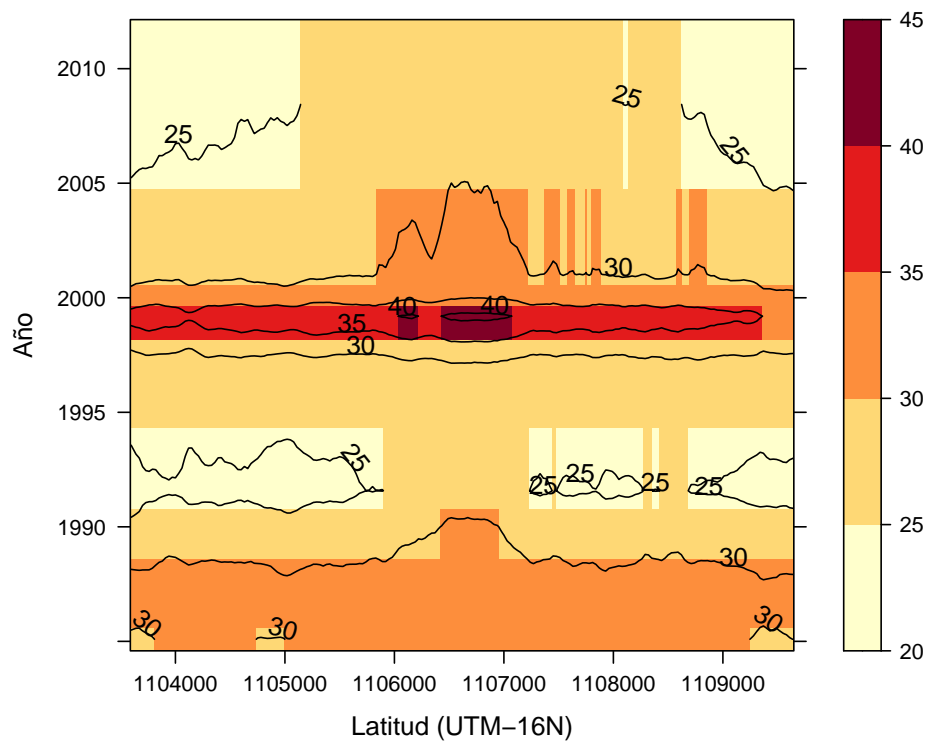
CUADRO 5.40: Intensidad de la ICU - Perfil A: 1985 - 2019.

Año	Temperatura °C		ICU
	Núcleo	Periferia	
1985	34.83	30.23	4.60
1986	35.66	30.91	4.75
1987	35.59	32.18	3.41
1989	33.16	27.35	5.80
1991	29.29	24.49	4.80
1997	31.38	28.60	2.78
1999	44.28	38.05	6.24
2001	33.95	29.16	4.79
2008	29.66	26.05	3.60
2013	38.46	33.87	4.59
2014	36.57	35.01	1.56
2015	33.63	32.21	1.43
2016	40.48	38.44	2.04
2017	46.70	43.61	3.09
2018	42.95	40.41	2.55
2019	41.54	38.52	3.02

El diagrama de Hovmöller (gráfico 5.47) establece el desplazamiento de la ICU durante el periodo de estudio en el componente de latitud. Se observa que las mayores temperaturas se concentran en el centro de la ciudad de Heredia, pero en años recientes este núcleo tiende a desplazarse hacia el sur. En general, la ciudad experimenta un aumento de la temperatura con respecto a los primeros años observados.



(A) Período 2013-2019



(B) Período 1985-2008

FIGURA 5.47: Heredia: Diagrama de Hovmöller de la ICU 1985-2019.

5.6.3. Relación entre las variables TST y DI

Para establecer la relación o influencia de las coberturas de la tierra en la temperatura de la superficie terrestre (TST), se construye un modelo de regresión lineal generalizado. Es importante recordar, que el coeficiente de determinación indica el grado de la variabilidad de los datos, que se explica por la asociación entre las variables. Es decir, un valor igual a $R^2 = 1$ significa que el 100 % de los datos se explicada de la asociación entre las variables, y se presenta como una asociación fuerte de los valores de las variables de la TST y el DI. Al espacializar los resultados del modelo de regresión lineal, se obtiene el mapa de la figura 5.48. Para representar el coeficiente de determinación de la regresión se usa una paleta de colores que va del color verde al rojo. Los valores iguales a 0 en el coeficiente de determinación se representan de color verde, mientras que el color rojo representa los valores iguales a 1.

De lo anterior, los valores de colores rojos y naranjas indican: Al cambiar la cobertura de la tierra propicia un incremento en la TST. Mientras que los valores verdes muestran los siguientes escenarios: (a) las áreas en las que la TST no varió de forma significativa a pesar del cambio del DI, (b) el DI no cambió a pesar de la variación de la TST, (c) o ninguna de las dos variables cambiaron de manera significativa debido a la interacción entre estas.

El mapa de la figura 5.48, evidencia los lugares en los que al aumentar el nivel de antropización inciden en un incremento térmico durante el período temporal analizado. Se identifican zonas en las que previamente se sabía presentaban algún tipo de arborización, los bosques de ribera y áreas de cultivos, y que cambiaron su cobertura. También, se observan los casos de las zonas urbanas que intensificaron su densidad (aumento de DI), y que ocurrió un incremento de la temperatura. De manera subsecuente, se identifican las zonas antrópicas impactadas, pero que no contribuyen a una ganancia o pérdida térmica. Se enlistan las áreas residenciales en la ciudad de Heredia y alrededores. Esa tendencia se observa en los algunos cultivos presentes en las zonas periféricas.

CUADRO 5.41: Coeficiente de determinación según transición entre las coberturas de la tierra

Transición de Cobertura	Promedio R^2	No. celdas
Área Urbana-Área Urbana	0.4204	6029
Área Urbana-Forestal	0.4588	1032
Área Urbana-Herbáceo	0.5554	28
Área Urbana-Matorral	0.4355	337
Cultivos-Área Urbana	0.4835	6816
Cultivos-Cultivos	0.5755	1373
Cultivos-Forestal	0.6158	2456
Cultivos-Herbáceo	0.5926	2651
Cultivos-Matorral	0.6545	3898
Forestal-Área Urbana	0.5363	1926
Forestal-Cultivos	0.3914	46
Forestal-Forestal	0.5352	924
Forestal-Herbáceo	0.4809	212
Forestal-Matorral	0.4899	714
Herbáceo-Área Urbana	0.5430	2226
Herbáceo-Cultivos	0.5181	482
Herbáceo-Forestal	0.5959	1134
Herbáceo-Herbáceo	0.5048	859
Herbáceo-Matorral	0.5873	1676
Matorral-Área Urbana	0.5591	1965
Matorral-Cultivos	0.3409	225
Matorral-Forestal	0.5617	1076
Matorral-Herbáceo	0.3678	580
Matorral-Matorral	0.4911	1331
Promedio	0.5272	Total: 39996

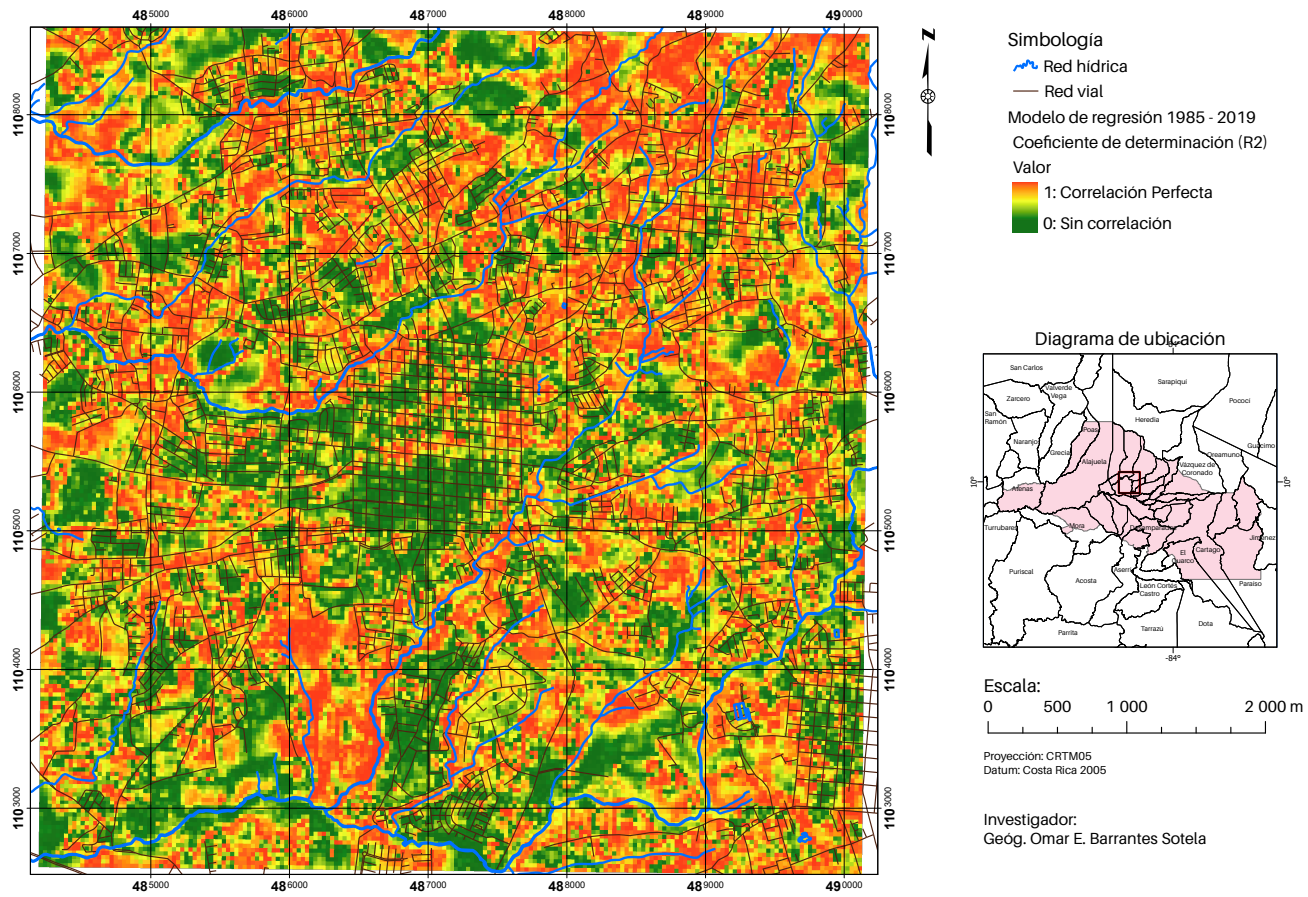


FIGURA 5.48: Heredia: Análisis de regresión lineal Temperatura - DI (1985-2019)

Regresión ponderada multinomial

Para dilucidar de manera específica el papel que juega cada cobertura de la tierra identificada en el área de estudio sobre la temperatura (TST), se realiza un análisis de regresión logística multinomial entre los años 1985, 2001 y 2019. Para el modelado, se escoge la cobertura Forestal (For) como la línea base de comparación con respecto a las otras clases, y se obtienen las siguientes ecuaciones y coeficientes b_{ij} (Cuadros 5.42, 5.43).

$$\ln \left(\frac{P(ct = cultivos)}{P(ct = forestal)} \right) = b_{10} + b_{11} (TST) + b_{12} (DI)$$

$$\ln \left(\frac{P(ct = matorral)}{P(ct = forestal)} \right) = b_{20} + b_{21} (TST) + b_{22} (DI)$$

$$\ln \left(\frac{P(ct = pastos)}{P(ct = forestal)} \right) = b_{30} + b_{31} (TST) + b_{32} (DI)$$

$$\ln \left(\frac{P(ct = urbano)}{P(ct = forestal)} \right) = b_{40} + b_{41} (TST) + b_{42} (DI)$$

CUADRO 5.42: Coeficientes del modelo de regresión multinomial

	(Intercepción)	b(TST)	b(DI)
Cultivos	19.40823	-0.60627	-0.1469
Matorral	8.813476	-0.26452	-0.10316
Pastos	17.86115	-0.56047	-0.14924
Urbano	-9.36569	0.299774	0.11257

CUADRO 5.43: Residuos estandarizados del modelo de regresión multinomial

	(Intercepción)	b(TST)	b(DI)
Cultivos	0.1990466	0.006326425	0.003007885
Matorral	0.1908981	0.005939236	0.002816773
Pastos	0.2015664	0.006405293	0.003082067
Urbano	0.1950153	0.005892487	0.002393252

Desviación residual: 207859.8 AIC: 207883.8

CUADRO 5.44: Riesgo relativo del cambio de la variable predictora (RR)

	(Intercepción)	TST	DI
Cultivos	2.72E+08	0.545297	0.864727
Matorral	6.21E+03	0.769569	0.901283
Pastos	6.07E+07	0.569876	0.859977
Urbano	1.11E-04	1.339043	1.120462

La probabilidad de elegir una categoría de resultado sobre la probabilidad de elegir la categoría de referencia se denomina riesgo relativo. El riesgo relativo se calcula al elevar al exponente el lado derecho de las ecuaciones lineales. En el cuadro 5.44, se establecen las razones de riesgo relativo para un cambio unitario en la variable predictiva.

Se determina que la razón de riesgo relativo (RR) más alta ocurre entre la cobertura urbana versus la cobertura forestal. En este caso, la razón del RR implica que por cada incremento de un grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$) en la temperatura de la superficie terrestre (TST) es 1.33 veces más probable que se deba a una cobertura urbana en comparación con una cobertura forestal. De la misma manera, por cada incremento de 1 unidad en el índice de disturbio (DI), es 1.12 veces más probable que se deba a una cobertura urbana en lugar de una cobertura forestal.

Las categorías de la tierra de cultivos, los pastos y los matorrales contra la cobertura forestal, muestran la menor razón del RR de cambio en los valores de las variables. En los que el incremento de un grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$) en la TST supone una razón de 0.55, 0.57 y 0.77. Si se considera el DI, el RR es de 0.86, 0.86 y 0.9. Estos resultados son consistentes con lo establecido en los perfiles térmicos zonales y de transectos.

En el gráfico de la figura 5.49, se observa la tendencia del cambio de las probabilidades de obtener valores específicos de las variables TST y DI, según una categoría de cobertura de la tierra particular con respecto a la categoría de referencia (cobertura forestal).

Entonces se determina, que existe una probabilidad del:

1. 1.3 %, que una TST de 26°C y un DI de 6, se asocie a una cobertura urbana en lugar de una cobertura forestal.
2. 58 %, que una TST de 31°C y un DI de 11, se asocie a una cobertura urbana en lugar de una cobertura forestal.

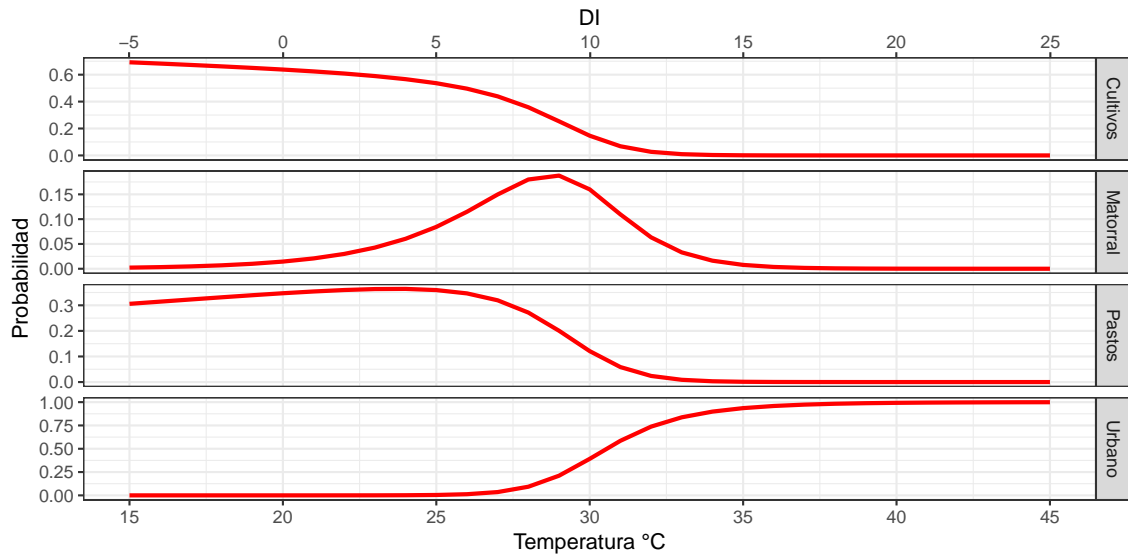


FIGURA 5.49: Probabilidad de incidencia en el TST e DI, según cambio de la cobertura de la tierra en referencia a una cobertura forestal.

3. 96%, que una TST de 36 °C y un DI de 16, se asocie a una cobertura urbana en lugar de una cobertura forestal.
4. 99%, que una TST de 40 °C y un DI de 20, se asocie a una cobertura urbana en lugar de una cobertura forestal.

Es importante tener presente que agregar o eliminar categorías de resultados alternativos no afecta las probabilidades entre los resultados restantes. Estos resultados serán utilizados para la generación de escenarios.

5.7. Escenarios de tendencia

Con los resultados de la variabilidad climática y según el patrón observado de cambio de la cobertura de la tierra y su asociación con el aumento de la temperatura, se construyen los diferentes escenarios mediante un modelo de Autómata Celular (AC). El modelo de Autómata Celular puede replicar el proceso de crecimiento urbano y puede proyectar el crecimiento futuro, sin embargo, es necesario calibrar el modelo de manera consistente (Tripathy & Kumar, 2019).

Para establecer los diferentes escenarios de crecimiento, además de las coberturas de la tierra se utilizan los parámetros de proximidad de la red vial, distancia del centro comercial o administrativo de la ciudad, la pendiente del relieve, la densidad de población y las restricciones de crecimiento. Todos calculados o determinados en secciones anteriores. Una vez, construido el componente de las coberturas de la tierra (Sección 5.7.1), se utiliza los resultados del análisis de regresión de la sección 5.6.3 para simular mediante una distribución de probabilidad Gamma la asignación aleatoria de probabilidades del perfil térmico asociado a cada cobertura de la tierra estudiado. A continuación, se reportan las condiciones, parámetros y resultados de los escenarios utilizados en el modelo de Autómata Celular y perfil térmico.

5.7.1. Componente: Coberturas de la tierra

Escenario 1: Crecimiento urbano tendencial

Simula un patrón de crecimiento urbano observado a partir de los años anteriores (2017-2018-2019), y el cual se establece del factor de cambio que resulta de la diferencia de las superficies de clase en el tiempo en el que se determina cada cobertura de la tierra. Considera que los procesos de urbanización ocurren de forma más fácil de acuerdo con los siguientes criterios: la influencia inmediata del centro comercial de la ciudad de Heredia de 4000 metros, la proximidad a las vías de comunicación en una distancia de 500 m, densidad de población de 200 habitantes por hectárea y hasta una pendiente de 35 %. Incluye restricciones y zonas de protección forestal. Los resultados se presentan en el mapa de la figura 5.50.

Escenario 2: Crecimiento urbano incrementado

Considera criterios de un patrón de urbanización más intenso que el primer escenario. Los procesos de urbanización ocurren de forma más fácil y de acuerdo con los siguientes criterios: La influencia del centro comercial de la ciudad de Heredia es de 8000 metros, la proximidad a la red vial es menor a 500 metros, una densidad de población desde 150 habitantes por hectárea con un ajuste de tasa de crecimiento poblacional del 20 % y una pendiente del relieve de hasta 35 %. No se incluyen las zonas protección o con restricciones. Los resultados se presentan en el mapa de la figura 5.51.

Escenario 3: Arborización en las vías de comunicación

Establece una tendencia desacelerada del crecimiento urbano, con un incremento de la cobertura verde cercana a la red vial. Este crecimiento forestal presenta las siguientes condiciones: una distancia de 5 metros de la red vial, densidad de población observada de 20 habitantes por hectárea, con una pendiente de hasta 40%. Incluye restricciones y zonas de protección forestal. Los resultados se presentan en el mapa de la figura 5.52.

Escenario 4: Arborización al interior de las cuadras

Simula una tendencia de desaceleración del crecimiento urbano, con un incremento de la cobertura verde cercana en los centros de cuadra. Este crecimiento de áreas verdes presenta las siguientes condiciones: una distancia de 20 metros a la red vial, reducción de la densidad de población estimada en un 20% en los centros urbanos y un aumento del 20% en las áreas periféricas, con una pendiente del relieve de hasta 40% e incluye restricciones y zonas de protección forestal. Se trata de establecer las condiciones de un proceso de arborización al interior de los centros de cuadra o estrategias bioclimáticas como edificaciones verdes. Los resultados se presentan en el mapa de la figura 5.53.

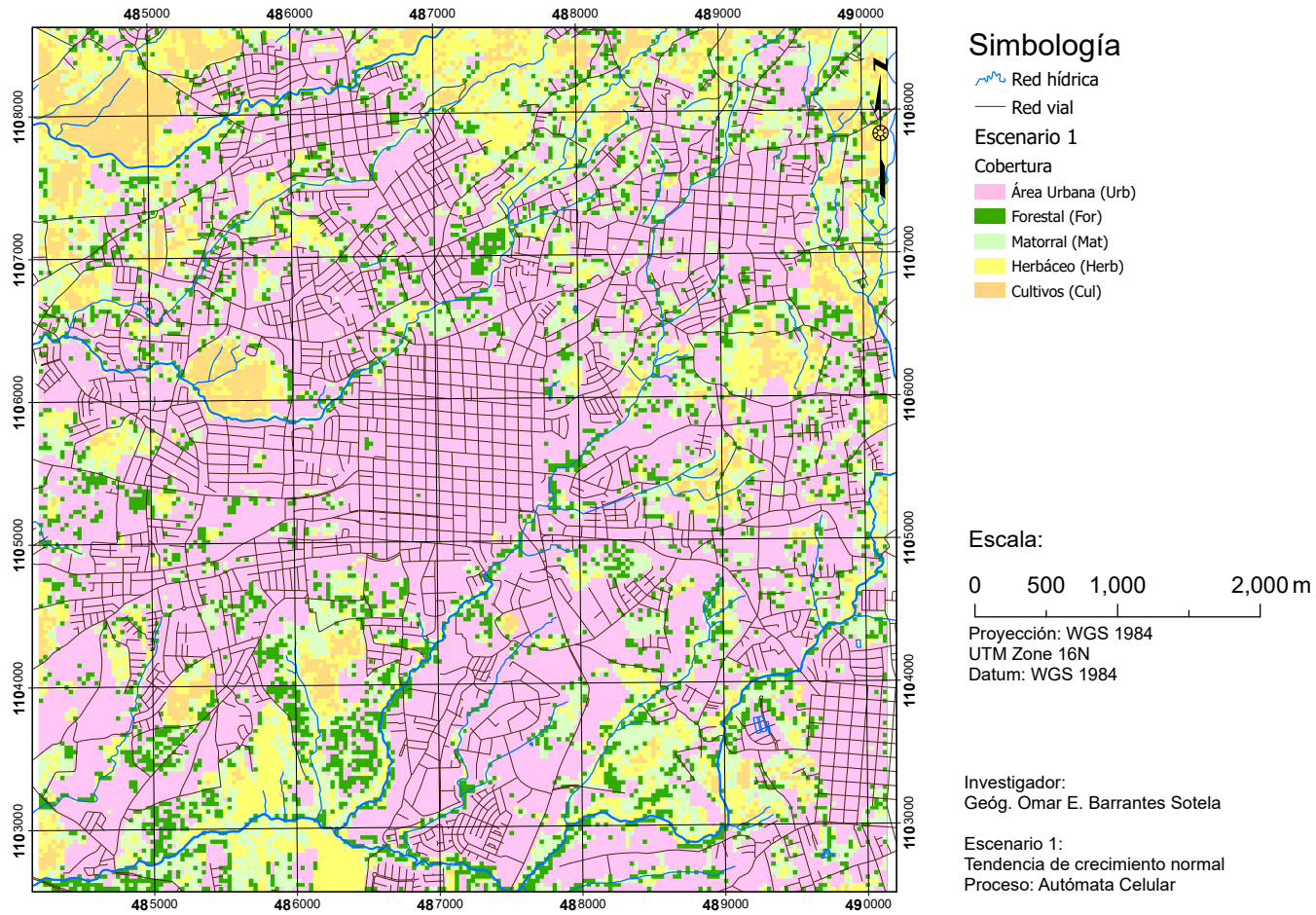


FIGURA 5.50: Escenario 01: Crecimiento urbano tendencial observado

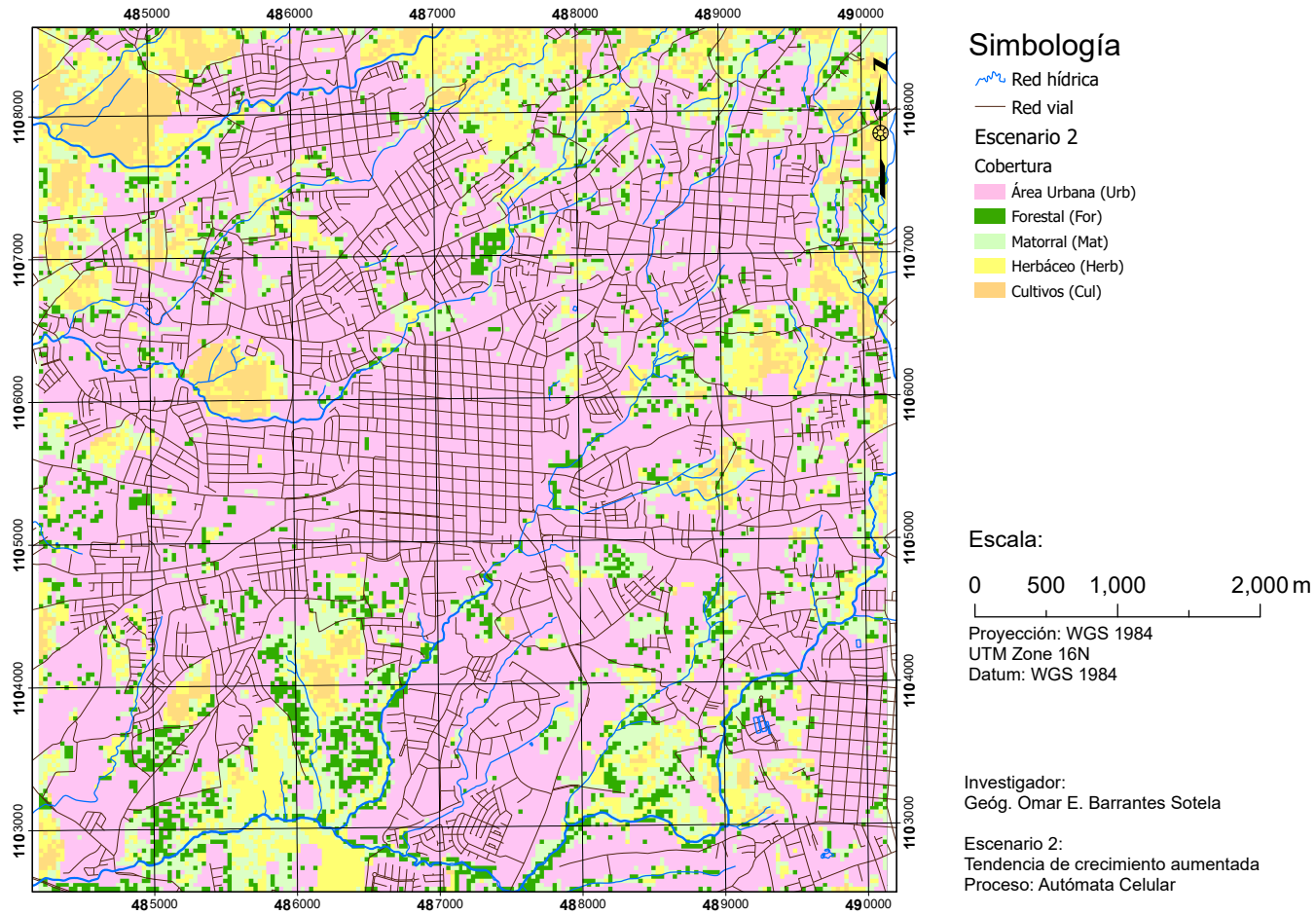


FIGURA 5.51: Escenario 02: Crecimiento urbano incrementado

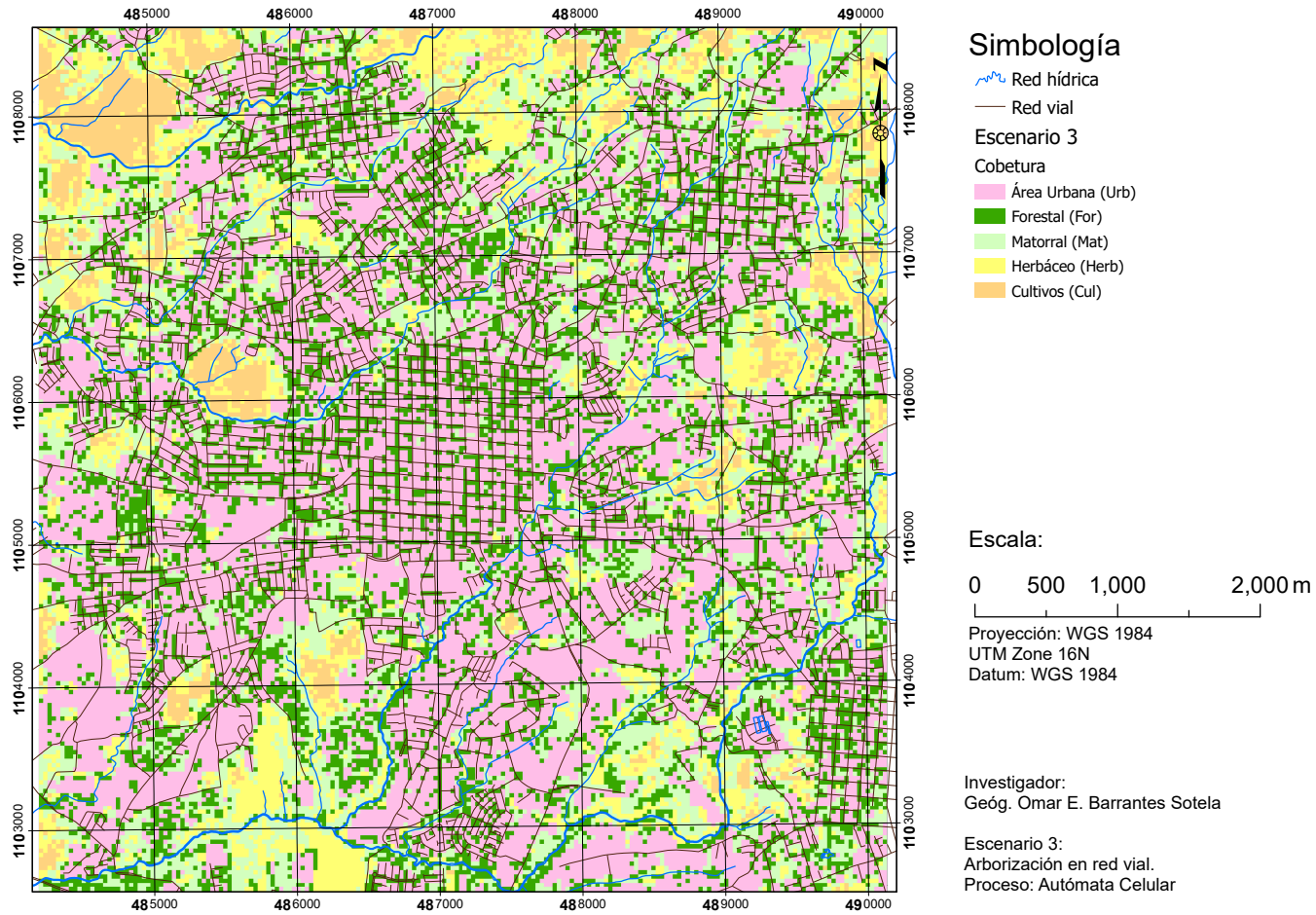


FIGURA 5.52: Escenario 03: Arborización en red vial

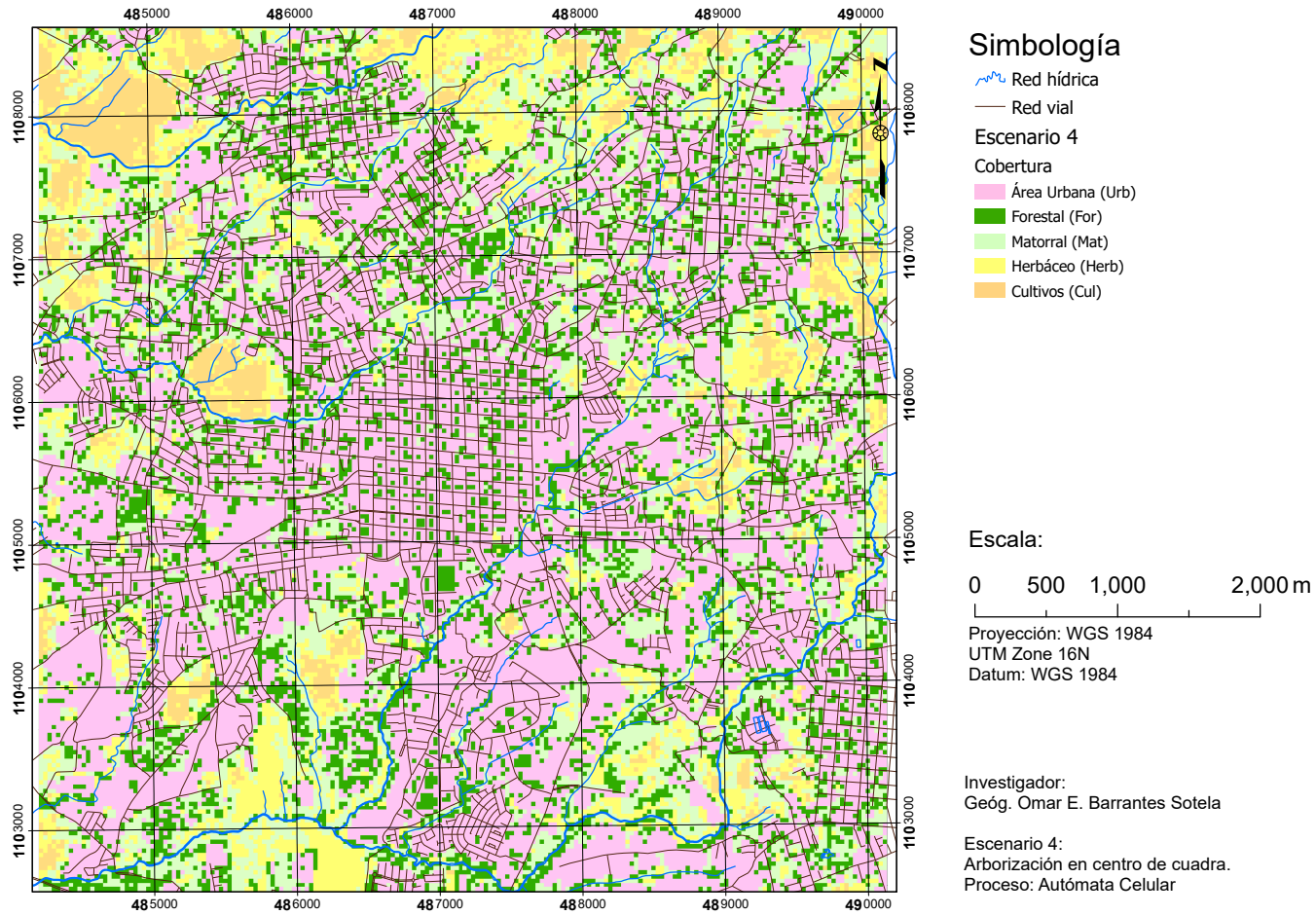


FIGURA 5.53: Escenario 04: Arborización en centros de cuadra

Los valores de superficie las coberturas de la tierra estimadas según cada escenario y las diferencias con respecto a la cobertura de la tierra del 2019 se reportan en los cuadros 5.45 y 5.46. El escenario 1 (tendencial), asigna una mayor cantidad de celdas a las áreas urbanas que el escenario 2 (crecimiento intenso), el cual se generó con criterios que suponían un mayor crecimiento urbano. La situación es interesante en el escenario 1, debido a que la asignación superficial de la cobertura urbana sobrepasa en un 10% la asignación del modelo que supone condiciones críticas.

También se resalta, que bajo los criterios que producen el escenario 4, se favorece la mayor asignación de celdas a una categoría forestal e implica la mayor reducción de las áreas urbanas. De tal forma, los escenarios 1 y 4 son los modelos con resultados extremos y opuestos. Mientras que los escenarios 2 y 3 serían los modelos que modelan condiciones intermedias.

CUADRO 5.45: Coberturas de la tierra según escenarios: Superficies en [Ha].

Tipo de cobertura	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Área Urbana (Urb)	2045.43	1883.34	1826.91	507.06
Forestal (For)	368.10	457.47	500.76	1963.80
Matorral (Mat)	612.54	678.87	691.74	556.74
Pastos (Herb)	382.59	388.62	388.89	381.51
Cultivo (Cul)	190.98	191.34	191.34	190.53
Total	3599.64	3599.64	3599.64	3599.64

CUADRO 5.46: Diferencias superficiales en [Ha] de los escenarios con respecto a la cobertura de la tierra 2019.

Tipo de cobertura	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Urbano	340.69	178.60	122.17	-1197.68
Forestal	-228.11	-138.74	-95.45	1367.59
Matorral	-103.50	-37.17	-24.30	-159.30
Pastos	-7.73	-1.70	-1.43	-8.81
Cultivo	-1.35	-0.99	-0.99	-1.80

5.7.2. Componente Térmico

Para cada escenario del modelo AC, se ingresa una respuesta aleatoria que corresponde a las distribuciones de probabilidad observadas en el gráfico 5.49. Cada categoría de la tierra presenta una función de densidad de distribución de probabilidad sesgada. Por tanto, se generan de manera aleatoria los valores esperados de la temperatura de la superficie terrestre para cada categoría de la tierra, en función de los parámetros obtenidos de la regresión multinomial. Se utiliza la misma metodología de la sección 5.6.2, para establecer en cada escenario los perfiles térmicos por categorías y por transectos. A continuación, los resultados del proceso de simulación.

Según los escenarios modelados, la temperatura de la cobertura urbana es la que presenta los valores más altos, en especial en los escenarios 2 y 1. Sin embargo en los modelos 4 y 3, aunque los valores de temperatura de las coberturas urbanas son más altos con respecto a las coberturas intra-escenarios, son más bajas al considerar todos los escenario (Cuadros 5.47,5.48,5.49 y 5.50). En los escenarios 1 y 2, que consisten en modelar un crecimiento urbano tendencial e incrementado, las temperaturas más bajas ocurren en la cobertura de cultivos. Mientras que la cobertura forestal tiende a disminuir de manera significativa en los escenarios 3 ($\bar{X} = 27.93 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y 4 ($\bar{X} = 27.26 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Sin embargo, en los escenarios 1 y 2, las temperaturas de las coberturas forestales se pueden considerar como temperaturas relativamente altas ($\bar{X} = 35.33 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y 4 ($\bar{X} = 36.94 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

En los gráficos de las figuras 5.55, 5.56, 5.57 y 5.58 se muestran los perfiles térmicos por transectos de los escenarios modelados. Al comparar las tendencias de los perfiles para cada escenario, se indica que las temperaturas modeladas en los escenarios 1 y 2 son mayores a los escenarios 3 y 4. Además, se observa la fluctuación en las crestas de las gráficas asociada a las temperaturas de las coberturas antrópicas, mientras que en los valles se relacionan a las temperaturas de las coberturas naturales. En la figura 5.54 se muestra el comportamiento espacial de la temperatura de cada escenario.

CUADRO 5.47: Escenario 01: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra

	Cobertura	Media	Mín	Máx	Sd
1	Urb	36.32	32.55	39.99	2.15
2	For	35.33	31.95	39.00	2.05
3	Mat	34.87	31.33	37.15	1.47
4	Herb	33.42	30.99	36.05	1.47
5	Cul	30.89	27.48	34.56	2.08

CUADRO 5.48: Escenario 02: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra

	Cobertura	Media	Mín	Máx	Sd
1	Urb	36.94	33.86	39.99	1.77
2	For	35.34	31.95	39.00	2.01
3	Mat	34.87	31.33	37.15	1.47
4	Herb	33.41	30.99	36.05	1.45
5	Cul	30.89	27.49	34.56	2.05

CUADRO 5.49: Escenario 03: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra

	Cobertura	Media	Mín	Máx	Sd
1	Urb	32.38	27.41	37.23	2.83
2	For	27.93	22.41	34.14	3.37
3	Mat	34.87	31.33	37.15	1.48
4	Herb	33.42	30.99	36.05	1.47
5	Cul	29.20	24.50	34.56	2.88

CUADRO 5.50: Escenario 04: Perfil térmico en [°C] por categoría de cobertura de la tierra

	Cobertura	Media	Mín	Máx	Sd
1	Urb	32.43	27.41	37.23	2.84
2	For	27.26	21.31	34.14	3.72
3	Mat	34.88	31.33	37.15	1.49
4	Herb	33.39	30.99	36.05	1.46
5	Cul	29.28	24.50	34.56	2.90

En los cuadros 5.51 y 5.52 se calculan las diferencias térmicas de las coberturas de la tierra de entre cada uno de los escenarios con respecto al último año observado (2019). Esto permite establecer una línea base del comportamiento térmico de cada modelado. El modelo del escenario 2 a pesar de establecer un menor crecimiento urbano con respecto al modelo del escenario 1, si se establece un incremento de la TST del 8.11 % con respecto a los valores observados en el año 2019. Lo anterior es producto del tipo de asignación espacial de las áreas urbanas más denso y con un DI mayor.

En el caso de los escenarios 3 y 4, interesa establecer cual proceso de asignación espacial de las coberturas verdes ofrece las mejores capacidades de reducción térmica. Se determina que el modelo del escenario 3 disminuye en un 5.24 % la temperatura de las áreas urbanas, con respecto al modelo 4 que reduce en hasta un 5.09 %. Sin embargo, el modelo 4 ofrece la mejor reducción térmica en la cobertura forestal, producto de la formación de áreas verdes con núcleos más consolidados.

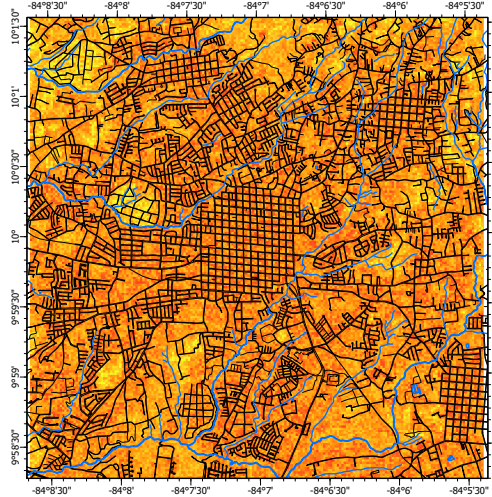
CUADRO 5.51: Diferencias térmicas en [°C] de los escenarios con respecto al año 2019.

	Cobertura	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	Urb	2.15	2.77	-1.79	-1.74
2	For	1.73	1.17	-6.24	-6.91
3	Mat	1.91	0.70	0.70	0.71
4	Herb	1.52	-0.76	-0.75	-0.78
5	Cul	-0.70	-3.28	-4.97	-4.89

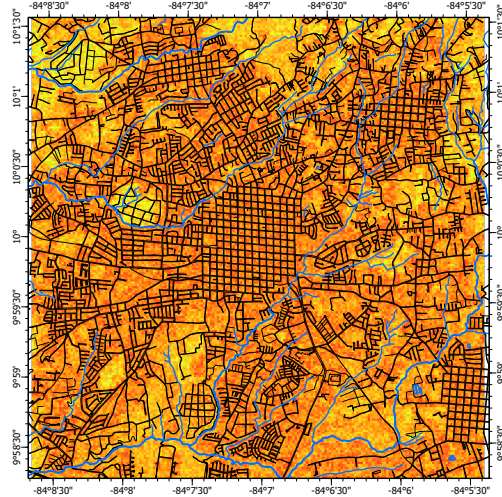
CUADRO 5.52: Diferencias térmicas en [%] de los escenarios con respecto al año 2019.

	Cobertura	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
1	Urb	6.29 %	8.11 %	-5.24 %	-5.09 %
2	For	5.15 %	3.48 %	-18.57 %	-20.57 %
3	Mat	5.79 %	2.12 %	2.12 %	2.15 %
4	Herb	4.76 %	-2.38 %	-2.35 %	-2.45 %
5	Cul	-2.22 %	-10.38 %	-15.73 %	-15.48 %

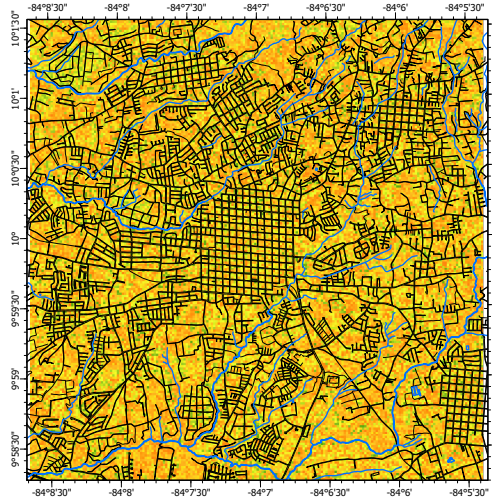
Escenario 01



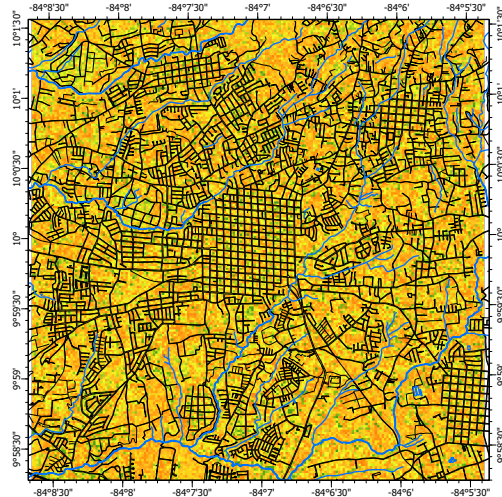
Escenario 02



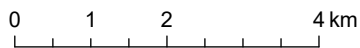
Escenario 03



Escenario 04



Escala:



Red hídrica
Red vial

Temperatura
Valor

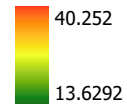


FIGURA 5.54: Escenarios térmicos

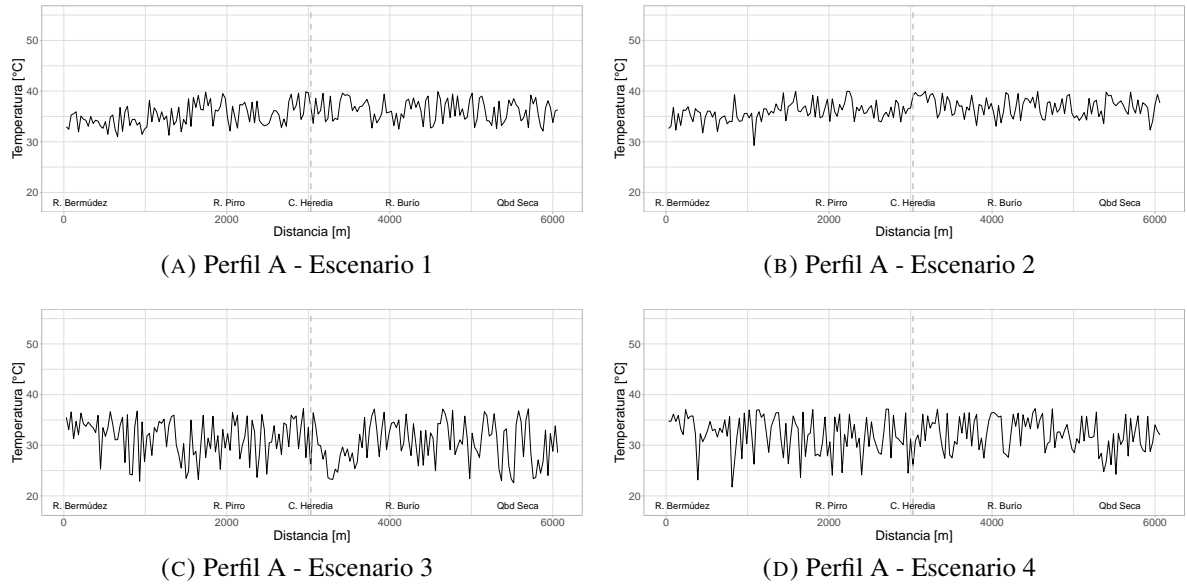


FIGURA 5.55: Perfil térmico A: Escenarios ICU [up]

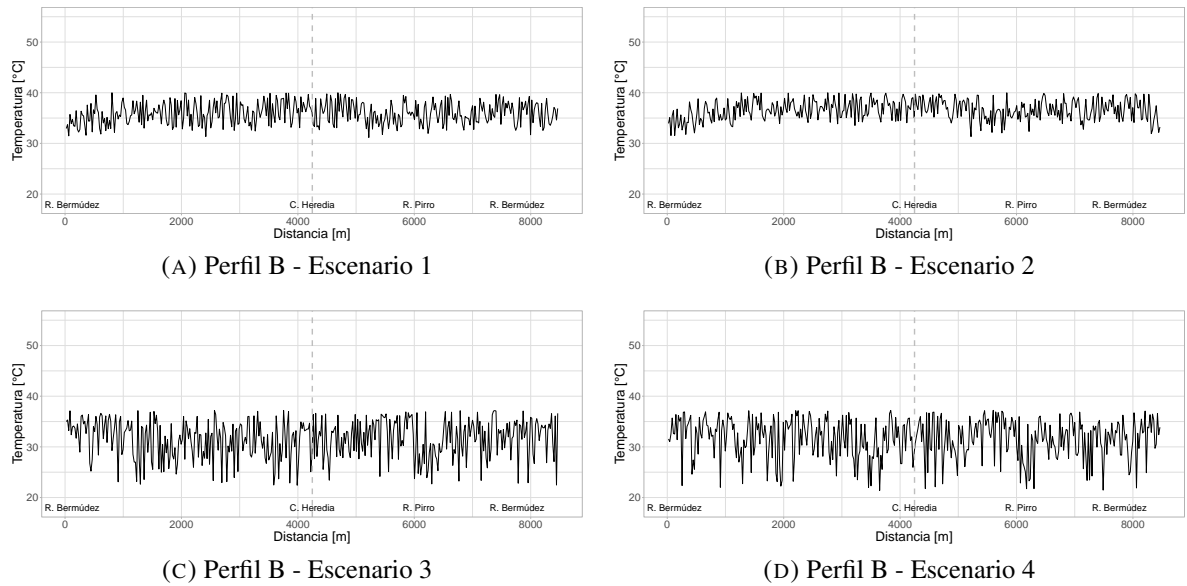


FIGURA 5.56: Perfil térmico B: Escenarios ICU [up]

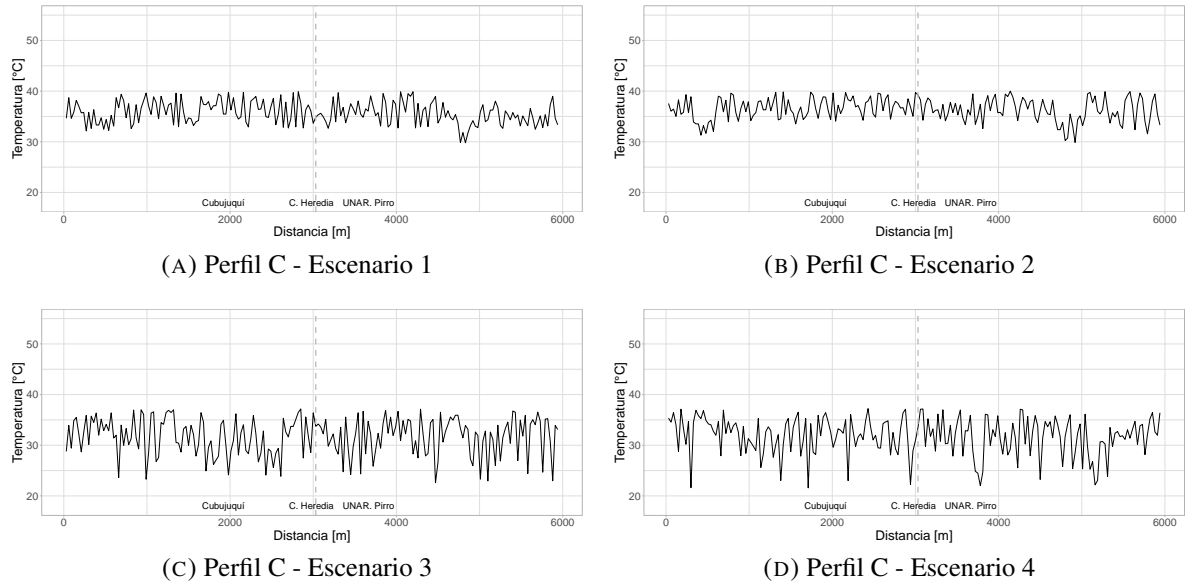


FIGURA 5.57: Perfil térmico C: Escenarios ICU [up]

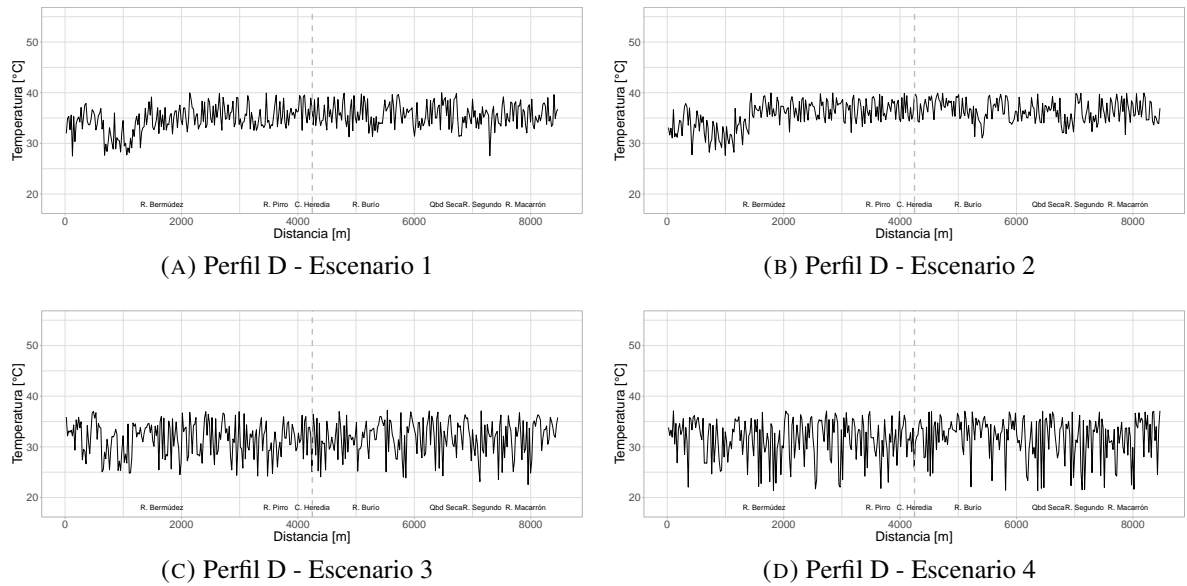


FIGURA 5.58: Perfil térmico D: Escenarios ICU [up]

5.8. Mapeo de actores claves

Se pre-identifican los actores en el Área de Estudio de acuerdo con su incidencia en el tema de estrategias para la reducción de la ICU en la Ciudad de Heredia. Los criterios usados consisten en la revisión de competencias legales, capacidades de influencia o coordinación. En el cuadro 5.53 se indica el listado de actores. Esto permitirá construir lineamientos estratégicos básicos, que posterior pueden desarrollarse en planes operativos o propuestas de gestión urbana climática.

CUADRO 5.53: Actores considerados

Sector	Actor
Gobierno Local	Municipalidad (funcionarios)
Sociedad Civil	Ciudadanos
Instituciones estatales	MINAE (Dirección de Cambio Climático)
	Instituto Meteorológico Nacional
	Secretaría Técnica Nacional Ambiental
	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento
	Comisión Nacional de Emergencia
	Ministerio de Planificación Económica y Política
	Instituto de Fomento y Asesoría Municipal
	Instituto Costarricense de Turismo
Ministerio de Educación Pública	
Academia	Universidad Nacional
Empresa privada	Comerciantes
	Desarrolladores

5.8.1. Percepción de los actores claves

Para establecer las relaciones de los actores mediante un sociograma o mapa social, se procede a construir una matriz de relaciones. La construcción de esa matriz considera la opinión o percepción de los actores, las cuales se determinan mediante la aplicación de una serie de instrumentos como encuestas de opinión.

Se aplican tres diferentes cuestionarios con preguntas que relacionan a los actores. En el Cuadro F.1 (Anexo F), se detallan las características de los instrumentos de encuesta elaborados para registrar la percepción en los siguientes temas: 1. Clima urbano, 2. infraestructura urbana, 3. desempeño institucional, 4. gestión local ante el Cambio Climático, 5. desarrollo sostenible y consumo responsable.

La encuesta a la sociedad civil consiste en una muestra de 840 personas, se define un error de 4% con un nivel de significancia estadística del 2% (Nivel de confianza del 98%). En el caso del sector municipal, la consulta es dirigida a los técnicos municipales de los departamentos encargados de los temas de planificación urbana, desarrollo urbano, control urbano, gestión ambiental y construcción. Se obtuvo la respuesta de 11 técnicos municipales que se desempeñan como directores, coordinadores jefes y asistentes de dirección, con una experiencia promedio estimada de siete años. En el caso del sector privado, se aprovechó el levantamiento de las actividades económicas en la ciudad de Heredia para consultar sobre los temas de interés. Se cuenta con la opinión de 224 encargados de establecimientos comerciales, y se establece un error de 5% con un nivel de significancia estadística del 5% (Nivel de confianza del 95%).

A continuación, se presentan los resultados más relevantes de los instrumentos aplicados y que son pertinentes para establecer los pesos y dirección de las relaciones, así como otras características de los actores.

Desempeño institucional

Se mide la opinión de las diferentes poblaciones meta, sobre las labores que desempeñan las instituciones estatales en su conjunto, y que en el *constructo* social de la población asocia al concepto de “*El Estado*”. Sobre este particular, el rol del Estado en orientar y abordar acciones concretas en adaptación y mitigación del calentamiento de las ciudades se percibe en términos generales como negativo. No obstante, si existe un porcentaje en

los grupos poblacionales que en su opinión considera que existe un trabajo que puede ser evaluado de manera positiva (Cuadro 5.54).

Al consultar sobre el accionar de los Gobiernos municipales, alrededor del 25 % de la sociedad civil y empresa privada afirmó que las municipalidades incluyen o trabajan de alguna manera el tema de calentamiento o cambio climático de las ciudades. Sin embargo, la mayoría de estos dos grupos evalúa su accionar en términos neutrales o negativos (Cuadro 5.55). Caso contrario es la posición de los funcionarios municipales que afirmaron que sus municipalidades sí abordan el tema y se auto evalúan en forma neutra o positiva. Al consultar sobre las distintas iniciativas que emprenden los Gobiernos locales, la población de la sociedad civil reconoce las campañas de separación y recolección de residuos, reciclaje, iniciativas de carbono neutral y talleres de concienciación. Para representar lo anterior, se contabiliza la frecuencia de cada uno de los términos o conceptos registrados para construir la nube de palabras de la figura 5.59.

CUADRO 5.54: Desempeño institucional del Estado costarricense.

¿Cómo considera la labor del Estado, con respecto al tema del calentamiento de las ciudades?			
Sociedad Civil		Empresa Privada	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Deficiente	17.45 %	1) Deficiente	12.95 %
2) Malo	32.73 %	2) Malo	37.95 %
3) Regular	44.61 %	3) Regular	27.68 %
4) Bueno	5.09 %	4) Bueno	21.43 %
5) Excelente	0.12 %	5) Excelente	0.00 %
Funcionarios municipales			
Opinión	Porcentaje (%)		
1) Deficiente	9.09 %		
2) Malo	45.45 %		
3) Regular	27.27 %		
4) Bueno	18.18 %		
5) Excelente	0.00 %		

La opinión de los tres grupos sobre la labor de las universidades ante la temática del calentamiento o el cambio climático de las ciudades es variada, aunque la mayoría de la población mantiene una posición neutral (Cuadro 5.56). Se resalta, que la población

mantiene una opinión más favorable de las universidades con respecto a las posiciones de índole negativa. Entre las principales críticas se reportan que estas instituciones no consideran estudiar el tema en ámbitos urbanos. Según el informe de la Red de Cambio Climático y Gestión del Riesgo (2018) de un total de 2636 Programas, Proyectos y Actividades Académicas desarrollados en la Universidad Nacional entre los años 2012 al 2019, el 2.6% abordaba la temática de cambio climático y solo 3 iniciativas de investigación estaban vinculadas al estudio de las ciudades.

CUADRO 5.55: Gobierno local: desempeño y gestión urbana ante el cambio climático.

¿Cómo calificaría el accionar de su Gobierno local en el tema?			
Sociedad Civil*		Empresa Privada**	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Deficiente	2.55 %	1) Deficiente	1.34 %
2) Malo	4.36 %	2) Malo	11.61 %
3) Regular	15.03 %	3) Regular	9.82 %
4) Bueno	3.39 %	4) Bueno	1.34 %
5) Excelente	0.00 %	5) Excelente	0.00 %
Funcionarios municipales***		Nota: Con base en el porcentaje de personas que consideran que sus Gobiernos locales incluyen el tema de cambio climático o el calentamiento de las ciudades en la Planificación Urbana: * (25.33 %). ** (24.11 %). *** (36.36 %).	
Opinión	Porcentaje (%)		
1) Deficiente	0.00 %		
2) Malo	0.00 %		
3) Regular	9.09 %		
4) Bueno	18.18 %		
5) Excelente	9.09 %		

La coordinación entre las instituciones del Estado, Universidades y los Gobiernos locales, es un tema que debe ser abordado por la institucionalidad. En la población predominan las opiniones negativas o neutras (Cuadro 5.57). Las cuales se fundamentan por falencias de comunicación y acciones de divulgación, así como en consolidar esfuerzos de una forma efectiva. Se cuestiona la cantidad de trámites y la burocracia en iniciativas concretas que incidan en el desarrollo de ciudades mejor adaptadas ante el aumento de las temperaturas y el cambio climático. Al consultar sobre ese particular, un 85.45% de la población civil considera que las ciudades experimentan un aumento de la temperatura

con respecto a años anteriores y un 72.61 % considera que las noches son más cálidas. Un 14.55 % de la población valora que las temperaturas no aumentaron con respecto a años anteriores.

La valoración que realizan los funcionarios municipales sobre la dinámica de la coordinación entre los sectores institucionales es importante, ya que estos están inmersos y participan de forma activa. En estos predomina una percepción negativa (54.55 %) sobre los procesos de coordinación. Un 27.27 % la considera neutral o regular y un 18.18 % de las opiniones son favorables.

Al consultar por instituciones específicas, en promedio las mejores calificadas en términos de relación y coordinación son: CNE, Universidades públicas, MEP e ICT. Mientras que las peores calificadas son la Dirección de Cambio Climático (Minae), Setena, Senara, IFAM, MIDEPLAN, el INVU. Presentan una opinión neutral el IMN y ONG's. En resumen, las entidades que mantienen un rol de evaluadores o que juegan un papel en el proceso de tramitación de las propuestas de ordenamiento territorial presentan mayores dificultades para propiciar una coordinación efectiva con los municipios.

Si bien se espera que los Gobiernos locales gestionen su territorio mediante intervenciones basados en los objetivos del desarrollo sostenible, y en particular para alcanzar las metas de los objetivos vinculados con ciudades sostenibles y acciones por el clima. El 72.73 % de los funcionarios municipales indican que no existe ningún aporte en el desarrollo de capacidades, transferencia tecnológica o de fondos por parte del Estado para hacerle frente al tema. Incluso un 27.27 % de los funcionarios no saben sobre el tema o no respondieron (NS/NR). Al realizar una pregunta de control sobre ¿sí alguna institución ha generado un proceso de capacitación en herramientas útiles para la adaptación y mitigación al cambio climático en la planificación urbana? Un 27.27 % confirma que su municipalidad sí recibió alguna capacitación. El 54.55 % de los casos confirman que no existen procesos de capacitación sobre la materia y un 18.18 % de los funcionarios indica desconocer o no responden. De las respuestas positivas, se indican los esfuerzos de la Comisión Nacional de Emergencia y Ministerio de Ambiente y Energía en capacitar sobre el Inventario de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y en impartir talleres sobre el uso de nuevas tecnologías renovables.

CUADRO 5.56: Academia: desempeño y labor ante el calentamiento o el cambio climático de las ciudades.

¿Cómo considera la labor de las Universidades Públicas, con respecto al tema del calentamiento de las ciudades?

Sociedad Civil		Empresa Privada	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Deficiente	4.12 %	1) Deficiente	13.84 %
2) Malo	15.52 %	2) Malo	23.21 %
3) Regular	52.12 %	3) Regular	37.05 %
4) Bueno	25.58 %	4) Bueno	23.21 %
5) Excelente	2.67 %	5) Excelente	2.68 %

Funcionarios municipales	
Opinión	Porcentaje (%)
1) Deficiente	9.09 %
2) Malo	18.18 %
3) Regular	45.45 %
4) Bueno	27.27 %
5) Excelente	0.00 %

CUADRO 5.57: Institucionalidad: coordinación de esfuerzos entre entes estatales.

¿Cómo considera que es la coordinación entre las Instituciones del Estado, las Universidades y el Gobierno Local, entorno al calentamiento de las ciudades?

Sociedad Civil		Empresa Privada	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Malo	37.33 %	1) Malo	41.52 %
2) Regular	58.67 %	2) Regular	51.79 %
3) Bueno	4.00 %	3) Bueno	6.70 %

Funcionarios municipales	
Opinión	Porcentaje (%)
1) Malo	54.55 %
2) Regular	27.27 %
3) Bueno	18.18 %

FIGURA 5.59: Gestión urbana: Iniciativas ante el calentamiento y el cambio climático en las ciudades impulsadas por los Gobiernos locales.



Sociograma de los actores

Según Moreno (1934), un sociograma es un método de evaluación que representa los vínculos o la jerarquía entre los sujetos que conforman una o varias agrupaciones. Se usan los cuestionarios aplicados a los sectores y mediante preguntas de respuesta múltiple se consulta sobre los niveles de coordinación, incidencia y el poder que se perciben de cada entidad con respecto a las diferentes instituciones u organizaciones. A partir de estas respuestas, se construye la matriz de relaciones y se representan en el grafo de la figura 5.60.

Los nodos mantienen una relación más fuerte según la distancia establecida entre estos en el sociograma (Figura 5.60). A medida que los nodos se alejan entre sí, la intensidad o peso relacional disminuye. Además, los nodos ubicados en el centro se caracterizan por mantener relaciones más consolidadas, que aquellos que están en los bordes o que se mantienen aislados. Mientras que los diferentes colores simbolizan la formación de grupos en la red. En este caso los nodos de color azul, significan actores que son satélites a los grupos conformados.

Los resultados de este análisis indican que en los tres aspectos estudiados los actores involucrados mantienen una relación consolidada. Lo que indica que el accionar institucional y participativo se percibe como consolidado. Es decir, los diferentes actores se relacionan de alguna manera con otros. Los niveles de relación pueden disminuir, pero no se encuentran nodos aislados y comparten más de 4 segmentos relacionales e indicativo de un tramado compuesto, aunque esto no significa que la calidad de las relaciones esté en un nivel deseado.

Al observar el patrón relacional sobre las actividades de *coordinación*, la población percibe que existe un núcleo institucional que coordina entre sí y que incluye a la sociedad civil, así como otras organizaciones. El análisis de núcleos o de conformación de grupos indica que en el caso del Ministerio de Educación Pública y el Instituto de Fomento y Asesoría Municipal mantienen relaciones específicas y son excluyentes entre estas. Destaca que los propósitos o funciones de estas dos entidades concierne al campo de la educación y capacitación, situación que es contradictoria y que se repite al establecer las relaciones de *poder* entre los actores. Con respecto a la *incidencia* entre las entidades se establece un patrón entrelazado más complejo, por lo que se percibe por la población que los actores inciden de alguna u otra manera entre estos o a través de otro actor cercano.

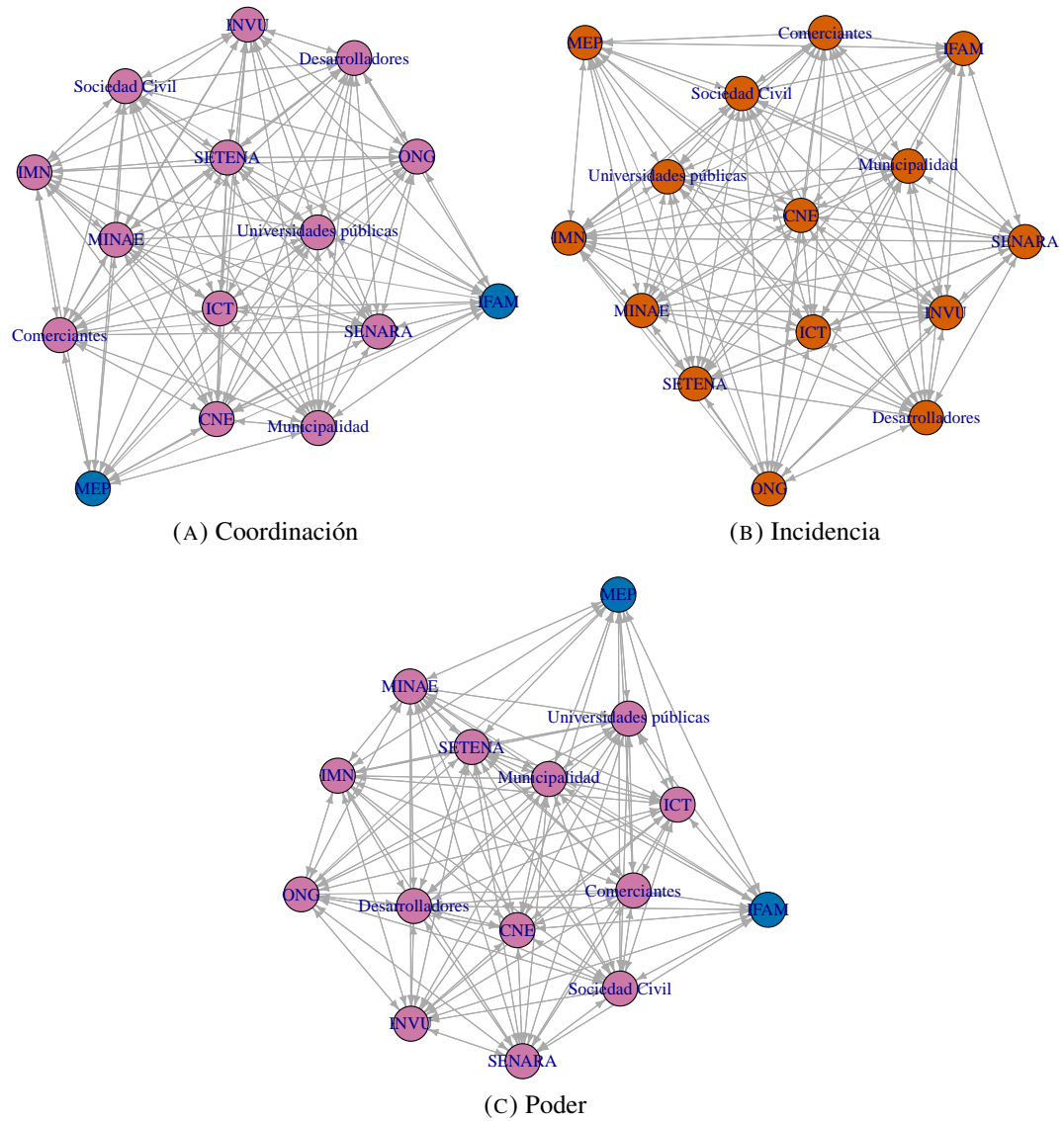


FIGURA 5.60: Análisis de los núcleos de las relaciones entre los actores. Los nodos de color azul, indican un comportamiento de satélite a los grupos conformados.

Infraestructura urbana: Parques, Áreas Verdes y Edificaciones

En este particular se aborda la opinión de la población sobre el inmobiliario urbano, así como de las estructuras presentes en la Ciudad. Al consultar sobre la infraestructura urbana asociada a reducir los efectos del incremento de la temperatura en el área de estudio, en la población predomina la percepción que la cantidad de espacios verdes y parques es insuficiente (Cuadro 5.58). Incluso la mayoría de los funcionarios municipales son del mismo criterio. También, se externa la preocupación en la calidad de estos espacios, los cuales según la opinión general debe mejorar (Cuadro 5.59).

CUADRO 5.58: Adaptación climática: cantidad las áreas verdes en la ciudad.

¿Considera que la cantidad de áreas verdes en la ciudad son suficientes?			
Sociedad Civil		Empresa Privada	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Si	8.97 %	1) Si	21.88 %
2) No	87.52 %	2) No	74.11 %
3) NS/NR	3.52 %	3) NS/NR	4.02 %
Funcionarios municipales			
Opinión	Porcentaje (%)		
1) Si	36.36 %		
2) No	63.64 %		
3) NS/NR	0.00 %		

Otra consulta relevante, es sobre sí los edificios en la ciudad presentan condiciones para la mitigación y la adaptación al incremento de las temperaturas (Cuadro 5.60). Según la opinión de la población, un 61.82 % de las personas que conforman la sociedad civil señalan que tales características no están contempladas en las edificaciones. Un 68.75 % de la población asociada a la Empresa Privada precisa la misma percepción que la sociedad civil, mientras que el 100 % de la consulta a los funcionarios municipales refuerza la posición. Por lo tanto, estos aspectos deben ser incorporados en las líneas de acción estratégica.

CUADRO 5.59: Adaptación climática: calidad de las áreas verdes y recreativas en la ciudad.

¿Se debe mejorar la calidad de los parques y áreas verdes?			
Sociedad Civil		Empresa Privada	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Si	88.36 %	1) Si	91.52 %
2) No	9.09 %	2) No	7.14 %
3) NS/NR	2.55 %	3) NS/NR	1.34 %
Funcionarios municipales			
Opinión	Porcentaje (%)		
1) Si	100.00 %		
2) No	0.00 %		
3) NS/NR	0.00 %		

CUADRO 5.60: Adaptación climática: calidad de las áreas verdes y recreativas en la ciudad.

En términos generales ¿Considera que los edificios están adaptados ante un aumento en la temperatura?			
Sociedad Civil		Empresa Privada	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Si	11.76 %	1) Si	14.73 %
2) No	61.82 %	2) No	68.75 %
3) NS/NR	26.42 %	3) NS/NR	16.52 %
Funcionarios municipales			
Opinión	Porcentaje (%)		
1) Si	0.00 %		
2) No	100.00 %		
3) NS/NR	0.00 %		

Patrón de consumo responsable

Por último, se consulta a la población de la sociedad civil, sí ante la posibilidad de un incremento de la temperatura o un cambio sustancial del clima cambiaría su conducta de consumo por otro más responsable y orientado al desarrollo sostenible. Los resultados en términos generales son positivos, ya en la mayoría de los ítems consultados se observa la disposición de cambiar por parte de la población (Cuadro 5.61).

CUADRO 5.61: Adaptación climática: Consumo responsable y actitudes orientadas a la sostenibilidad.

Estaría dispuesto a cambiar su comportamiento de consumo ante un incremento de la temperatura o cambio del clima en los siguientes temas:			
Patrón de consumo de alimentos.		Uso de tecnologías más limpias.	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Poco probable	15.88 %	1) Poco probable	6.67 %
2) Probable	55.39 %	2) Probable	41.09 %
3) Muy probable	28.73 %	3) Muy probable	52.24 %
Reducción en el consumo de agua.		Uso de transporte público.	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Poco probable	12.73 %	1) Poco probable	9.82 %
2) Probable	44.36 %	2) Probable	34.79 %
3) Muy probable	42.91 %	3) Muy probable	55.39 %
Estilo de vida.		Separación y reciclaje de residuos.	
Opinión	Porcentaje (%)	Opinión	Porcentaje (%)
1) Poco probable	16.00 %	1) Poco probable	2.55 %
2) Probable	50.30 %	2) Probable	32.36 %
3) Muy probable	33.70 %	3) Muy probable	65.09 %

Capítulo 6

DISCUSIÓN

6.1. El sistema urbano

Según los datos obtenidos en el análisis de la morfología urbana de la ciudad de Heredia, presenta una forma cuadrangular en la que el centro administrativo y funcional está localizado en el centro del distrito central. El índice de forma de 1.05 es cercano al valor teórico de 1, mientras que la longitud media de cuadras es de 84.37 metros con un parcelamiento tipo \times de trazado hipodámico. Indicativo de una forma regular asociada a morfologías urbanas españolas clásicas. Al comparar la forma del núcleo en los planos históricos con el patrón actual, se determina que no ocurren cambios significativos.

La mayor ocupación residencial del distrito central ocurre al Norte en los barrios de Fátima, La India y Corazón de Jesús. En el sector sur en los barrios San Vicente y El Carmen. Al este en Jardines Universitarios I, el cual es el complejo residencial de mayor densidad de habitantes por hectárea. Mientras que en las zonas periféricas destacan los barrios de Mercedes Sur, Mercedes Norte, Cubujuquí, Estadio, Rancho Chico, San Francisco¹, Bernardo Benavides, Guayabal, La Puebla, Guararí y Lagunilla. Otros sectores habitacionales importantes que pertenecen a otros cantones y son colindantes a Heredia son: Miraflores, María Auxiliadora, Jardines Universitarios II, Bajo Los Molinos, Burío, Carbonal, Montebello. Según los mapas de cobertura de la tierra, la mayoría de estos barrios ya estaban constituidos antes del año 1985, y predomina en su composición la vivienda² unifamiliar de un piso.

¹San Francisco no estaba constituido en el año de 1985.

²Predominan los techos de zing o concreto.

Se establecen dos polos de atracción de actividades económicas, el primero se desarrolla en el centro histórico y el segundo al oeste de la Universidad Nacional (Figura 5.4). La lógica general de concentración y especialización de comercios y servicios gira entorno a la institucionalidad de la ciudad, es decir próximos al gobierno local, instituciones estatales, centros educativos, servicios básicos, telecomunicaciones y financieros (Figura 5.4). Solo se contabilizan 7 industrias lo que es normal, ya que a medida que los núcleos urbanos se consolidan expulsan este tipo de actividades hacia la periferia. El sector más antiguo del núcleo urbano y sus áreas cercanas presentan una textura homogénea en un radio de 400 metros, con características estructurales similares en las que predominan las estructuras de concreto y una altura de 1 o 2 pisos en los edificios.

Un dato interesante es que las edificaciones más antiguas del casco histórico mantienen un diseño clásico de patio interno. Este tipo de patrón constructivo de hecho era utilizado por los españoles como estrategia para reducir la temperatura de las estructuras. Al alejarse del centro, la textura puede considerarse abierta y diversa, lo que evidencia procesos de regeneración urbana más recientes. El perfil urbano es muy simple y predomina un dosel “basal”, en el que apenas sobresalen 16 edificaciones de 4 pisos. Esta es una característica importante, ya que la teoría establece que el dosel urbano y el consumo energético mantienen una fuerte correlación (Shahmohamadi *et al.* 2010).

Según los registros del plano catastral de 1927, el trazado actual de la red vial de la ciudad corresponde al diseño original y es evidente que no ha sido adaptado a las necesidades de movilización de la población (Figuras 3.3 y 5.1). Las razones son las siguientes: 1) A pesar de contar con una proporción de nodos con interacciones de cuatro vías del 49.15% del total de la red, la configuración de los sentidos viales no es la adecuada dada la cantidad de puntos de acceso. 2) La superficie de rodamiento de las vías es en promedio de 7.485 m, por lo que su capacidad es limitada. 3) Predomina el uso de 6 puntos de accesos y salidas al cuadrante central, situación que favorece los embotellamientos o congestiones viales al convertirse en “*topics*”³, en especial los puntos del río Pirro y antiguo Hospital San Vicente Paul, esto conlleva a la contaminación del aire por el incremento de

³La rama más general, fundamental de la geometría, que no considera longitudes, áreas o volúmenes en su carácter de ser medibles, ni distingue líneas rectas de curvas, ni plano de superficies curvas o dobladas, sino que estudia solo la manera en que las partes de los lugares están continuamente conectadas. En el estudio del transporte y la movilidad urbana, el término hace referencia a sitios específicos, que se caracterizan por su limitada conectividad.

las emisiones de combustibles fósiles y aumento de la temperatura.

6.2. Cambio de las coberturas de la tierra

Para establecer los procesos de cambio y evolución de las coberturas de la tierra en entornos urbanos y áreas periurbanas, fue necesario utilizar un algoritmo de clasificación eficiente de imágenes obtenidas por sensores remotos. Esta tarea es difícil debido a la alta complejidad espectral y espacial que presentan las ciudades costarricenses. Los resultados experimentales en la ciudad de Heredia demostraron que por medio del clasificador *Random Forest* se logró asignaciones de clase muy precisas (0.85 - 0.95) en imágenes de escala intermedias como 1:25000 (Sentinel 2) y 1:50 000 (Landsat 8). Sin embargo, las asignaciones de clases de la tierra con patrones espectrales difusos como las categorías de matorrales y terrenos descubiertos deben emplearse otro tipo de aproximaciones para incrementar la tasa de éxito en su asignación. En términos generales los resultados obtenidos del algoritmo de clasificación fueron consistentes y robustos cuando se emplean en imágenes de la misma resolución espacial y espectral.

De los mapas de las figuras 5.5, 5.6 y 5.7 se observa el cambio de las superficies de las respectivas coberturas de la tierra entre los años 1985 al 2019. La evolución de las categorías utilizadas en términos de ganancia-perdida entre clases se observa en la figura 5.19. El proceso más evidente es el crecimiento urbano sostenido, debido a la pérdida de las áreas que eran destinadas principalmente al cultivo de café. Este resultado es consistente con la teoría, en el que la probabilidad más alta de cambio ocurre entre las superficies agropecuaria que se transforman a urbanas.

Si bien, la razón más factible de tal transición es la disminución de la rentabilidad del suelo agrícola. En la década de los años ochenta y hasta mediados de los años noventa se presentan ciertos factores que facilitaron el incremento de la superficie urbana. Estos se pueden agrupar como factores *in situ* y *ex situ*. Entre los factores *in situ* destacan: a) la falta de renovación de los viejos cultivos de café, y que según reporta Gudmundson (2018), el sector prioriza en mantener una producción cada vez menos eficiente en lugar de un descanso agrícola de los suelos. b) El aumento de las temperaturas afectó la calidad del grano en las zonas cafetaleras tradicionales adyacentes a la ciudad de Heredia. Este incremento térmico se evidencia a nivel local en el gráfico de la figura 5.22 entre los

años de 1988 y 1992, y que coincide con una fase positiva del ENOS (Figura 3.7). c) La explosión demográfica entre 1973 y 1985 (Figura 5.2), descrita por Rosero Bixby (1997) como el segundo baby boom costarricense. Este incremento poblacional representaría una considerable presión sobre el mercado de trabajo, los salarios y la vivienda. Aunque es contradictorio, el déficit habitacional aumentó a pesar del aumento de la dinámica constructiva en el mismo período.

Mientras que los factores *ex situ* se identifican: a) los bajos precios internacionales del grano del café. La *International Coffee Organization* (2015) reportó para el año 1990, que el café costarricense cotizaba la libra en menos de 58.49 centavos de dólar americano. b) La política de vivienda implementada en la Administración Arias y que favorecía la sustitución y el cambio de uso de la tierra, incluso en clara oposición de los lineamientos del Plan GAM de 1982 (Pujol-Mesalles & Pérez-Molina, 2012).

A inicios del siglo XXI, el cambio de la matriz de coberturas de la tierra es evidente. La matriz agrícola predominante desde 1840 es sustituida por una urbana. Con el detrimento de la actividad agrícola cafetalera, ocurre la regeneración paulatina de las áreas boscosas, aunque limitadas a relictos al interior de la ciudad y a las zonas de protección de los causes de los ríos y quebradas. Por ejemplo, durante los años 2015 y 2017, se desarrollaron campañas de reforestación en los causes organizados por la Municipalidad de Heredia, la Empresa de Servicios Públicos, Universidad Nacional y otros grupos organizados (Flores, 2017).

También, se ven favorecidos los terrenos en espera o descanso como pastos y matorrales, que en el pasado fueron cultivos de café. Ahora en una dinámica más asociada a la generación de plusvalía para la urbanización. Con el transcurso de los años, esta dinámica solo se intensifica aún más. El año 2019, los restantes cultivos de café en el área de estudio pueden considerarse como unidades espaciales fragmentadas, que en realidad no tienen una función productiva. Al contrario, presentan características de terrenos en descanso a la espera de ser absorbidos por el desarrollo inmobiliario. Aunque existen algunas excepciones como la



FIGURA 6.1: Remanente de cultivo de café (2019-12-17).

Finca Cafetalera Santa Inés, que se puede considerar como el último gran remanente de lo que fuera la época dorada del café en la Ciudad de las Flores.

Es importante señalar, que en este período se identifica la transformación de áreas urbanas a zonas verdes. Aunque *per se* no es una sustitución de coberturas en algunos de los casos, sino que se debe al aumento de la superficie del dosel de las especies arbóreas por la renovación de espacios públicos o recreativos como parques y plazas, e incluso en espacios privados como patios o jardines (Figura 5.17).

Para entender más los procesos espaciales de los cambios y evolución de las coberturas de la tierra, se calcula el índice de disturbio (DI) a partir de 57 imágenes satelitales. Al estimar las diferencias del índice entre los años subsecuentes de manera cronológica, significa establecer la naturaleza reflectiva y la potencial emisión térmica de los materiales de la superficie terrestre para cuantificar la magnitud del cambio experimentado. Además, el análisis del índice de disturbio (DI) no solo establece la magnitud de la transformación, también indica la dirección o el sentido en el que ocurren los cambios de la cobertura de la tierra en el tiempo.

Las condiciones de agrupamiento espacial indican, que la mayoría de los disturbios de superficies con verdor que pasaron de valores de brillo moderadas o altas, ocurrieron en el exterior o en la periferia de la ciudad de Heredia. Mientras que el incremento de las superficies de brillo moderado a alta, se dieron al interior del anillo de contención. Si se toma en cuenta la línea cronológica de las diferencias de los valores observados en el Índice de Disturbio (Cuadro 5.30), se caracteriza que los nuevos espacios urbanos son aglomeraciones de tipo pre-suburbio (predominan las urbanizaciones y condominios) a los alrededores de la ciudad (Figura 5.17).

Al incorporar la dimensión temporal, los valores máximos del DI se registran en los años 1985, 1991 y 1997 (Figuras 5.15, 5.16 y 5.17). Es en esos años cuando ocurren las transformaciones más drásticas. En los años subsiguientes los disturbios extremos ocurrieron de manera más focalizada. También, se observa un proceso de regeneración de la cobertura verde al interior de la ciudad entre los años 2001 y 2014 (Figura 5.17 (D)). El período temporal entre los años 2008 al 2019 se asocia a un proceso de consolidación de la mancha urbana.

Se pueden establecer dos procesos espaciales determinantes y pueden describirse como: expansión y densificación urbana. El primero se asocia al crecimiento paulatino de los

poblados periféricos y en los bordes de la ciudad, que absorben o transforman las otras coberturas circundantes. Mientras que el segundo proceso, ocurre de la formación de una aglomeración urbana más densa de aquellas áreas que fueron transformadas. Entre los períodos de cambios máximos del DI, posteriormente son sucedidos por cambios puntuales y que tienen a ser dispersos. Con respecto a la funcionalidad, primero aparecen las soluciones o complejos habitacionales, que luego atraen servicios y comercios asociados o complementarios a esa dinámica.

6.3. Isla de Calor

La dinámica de evolución de las coberturas de la tierra tiene un impacto en el comportamiento térmico de la ciudad y sus inmediaciones. Al calcular la correlación de las variables TST y DI se establece que es positiva y de fuerza moderada. Es decir, cuando el DI presenta valores altos, la TST también se incrementa. Se estima en promedio un coeficiente de determinación del 0.53 (Cuadro 5.41 y Figura 5.48), esto significa que el 53 % de la variación de los datos se explica por la asociación de las variables DI y TST. Al examinar aspectos como la dependencia espacial la relación entre las variables varía según la tipología de la cobertura de la tierra y su ubicación en la matriz, de ahí la importancia del análisis de la forma e intensidad de la ICU.

Al cruzar los resultados de la TST con respecto a las coberturas de la tierra de los años 1985, 2001 y 2019, se determina el perfil térmico por categoría nominal. Además, al usar como referencia la cobertura urbana se reportan las diferencias térmicas entre las clases. El resultado se observa en los cuadros 5.36, 5.37 y 5.38. Los límites de confianza de las estimaciones estadísticas indican que las áreas urbanas son más cálidas que las otras coberturas. Las menores diferencias se registran entre las coberturas urbanas y arbóreas. Este dato es interesante, ya que la literatura reporta que por lo general entre estas dos clases se estima ocurra la mayor diferencia térmica. Al contrario, las diferencias térmicas entre las zonas antrópicas con respecto a las categorías de matorrales y los cultivos son las que muestran los menores diferenciales. Se destaca que las diferencias entre las clases forestales, matorral, pastos y cultivos con respecto a la clase urbano disminuyen su valor en el transcurso del tiempo. En la figura 5.37 se observa como desde 1985 y hasta el 2019, la amplitud de las temperaturas del segundo Q_2 y tercer Q_3 cuartil se reduce en cada categoría.

Al considerar las razones por las cuales las temperaturas de las zonas verdes (forestales) registran valores de temperatura similares a las áreas urbanas, se infiere que es producto de la relación de subordinación en forma, tamaño, ubicación y funcionalidad. Las áreas verdes al caracterizarse como fragmentos o incluso relictos, presentan superficies reducidas con formas simétricas, ubicadas al interior o en los bordes del área urbana; y no parecen producir el efecto de reducción térmica que describen Chatterjee *et al.* (2017), Liu y Zhang (2011), Madanian *et al.* (2018).

Se identifica que las áreas verdes naturales más extensas se localizan cerca de los cauces de ríos y quebradas. Según las características de la matriz del paisaje en los años ochenta y noventa del siglo pasado, se determina que las coberturas de matorrales y cultivos asumían las funciones de reducción térmica, que la literatura le atribuye a las coberturas forestales o naturales. Por tanto, la reducción de su superficie también reduce las capacidades del sistema urbano-periurbano de regular su pluma térmica.

Al analizar las diferencias térmicas entre el núcleo urbano y su periferia (Figuras 5.39, 5.40, 5.41, 5.42, 5.43 5.44, 5.45 y 5.46) se establece la forma e intensidad de la ICU en el período de estudio. Los perfiles térmicos son una excelente estrategia para observar el comportamiento de la ICU en el transcurso del tiempo. La forma al inicio del período (1985) y hasta el 2013 de la ICU corresponde a una tendencia de perfil insular descrita por T. Oke (2002) y Gartland (2008), en la que se distinguen los picos o crestas, las mesetas y los acantilados. También, en los perfiles se identifican los “oasis” y que se localizan en los valles de la curva representada en los gráficos. No obstante, a partir del año 2014 ese patrón insular tiende a subsidirse y a suavizar la curva del perfil, hasta conformar una estructura similar a una meseta. Este proceso ocurre de la evolución de un área urbana de características más rurales a una más consolidada, aunque con un dosel urbano poco desarrollado. Al principio, existe una marcada diferencia entre su sector central y periférico, por lo que la ICU es en general más cálida. El crecimiento urbano transforma los sectores periféricos y amplía la distancia de influencia de la ICU, en la que ocurre una mayor acumulación y liberación energética.

Los principales oasis se localizan en los cauces⁴ y destacan: Río Pirro, Río Burío, Río Bermúdez, Quebrada Guararí y Quebrada Tropical. Además, se observa el aporte de la reducción de la temperatura de las siguientes áreas verdes y recreativas: Parque

⁴Concavidad en el terreno por que transcurre un río u otra corriente de agua.

Ulloa⁵, Parque Juan de Jesús Flores (Los Ángeles), Parque José María Zeledón Brenes (El Carmen) y El Parque Alfredo González Flores. Otros puntos destacados son Jardines Estudiantiles y la Hondonada 5 de octubre en la Universidad Nacional. En estos sitios se observa una reducción promedio de la temperatura de entre 0.5°C hasta 2.6°C con respecto a áreas vecinas, aunque en algunos lugares particulares puede registrarse una reducción de hasta 5°C. Las ubicaciones con los valores de temperatura más elevados corresponden a las coberturas con un alto valor de DI, entre estos destacan las plazas y plazoletas, edificaciones con techos de zinc o de concreto. Otro aporte térmico que es significativo es la capa asfáltica de la red vial. En este aspecto, se concuerda con los resultados obtenidos por Arce y Acevedo (2014).

La ICU muestra una intensidad y distribución espacial variada según la dinámica urbana, así como las condiciones climáticas que imperen. El análisis de la estacionalidad y tendencia del patrón climático de las estaciones meteorológicas indica dos momentos en el año en el que ocurren las mayores diferencias térmicas positivas estacionales. El primero se produce alrededor de los días 80 - 120 del año, con una máxima variación positiva en el día 100 (inicio del mes de abril). Las variaciones de la temperatura van desde 0.5°C hasta un 1°C según la estación meteorológica. En este caso, la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) es usual que se localice entre las coordenadas geográficas 7°Norte y 90°Oeste. Además, imperan los días despejadas con poca nubosidad y con vientos reducidos. Aunque también, depende del aporte de frentes fríos provenientes del Ártico y del Atlántico.

El segundo momento tiende a ocurrir alrededor de los días 180 - 220, con la máxima variación positiva en el día 200 (segunda o tercera semana del mes de julio) de 0.5°C. Este período se asocia a lo que en Costa Rica se conoce como los veranillos de “San Juan” y “La Primera Canícula”. La ZCIT se desplaza hacia el Sur producto del desplazamiento relativo de los sistemas de alta presión sobre el océano Atlántico, lo que provoca una disminución de la inestabilidad y la humedad, que asemejan más las condiciones de la estación seca. Otra característica importante es que ocurre un aumento del viento del este (E), sureste (SE) y noreste (NE), además, la precipitación tiende a disminuir en la vertiente Pacífico. De los dos casos expuestos interesa el primero momento, ya que es el que presenta las condiciones climáticas óptimas para que el ICU se presente su mayor intensidad. Es decir,

⁵Punto central en los transectos.

cielos despejados, mayor temperatura del aire, menor cantidad de humedad, menor cantidad de precipitación y disminución de la velocidad del viento.

También, es importante asociar los patrones de tendencia de la ICU con respecto al El Niño Oscilación del Sur (ENOS). La influencia de este fenómeno en las condiciones climáticas, inciden en un aumento o decrecimiento de la intensidad de la ICU en el área de estudio. En especial los intervalos de los años 1987-1988^(**), 1991-1992^(**), 1997-1998^(***), 2002-2003^(***) y 2015-2016^(***), que presentaron intensidades extremas⁶ en su fase positiva. A su vez, los años 1988-1989, 1998-2001 y 2007-2008 se determinó que el fenómeno de La Niña mantuvo una intensidad fuerte. Se observa que cuando existe un aumento de la intensidad de la ICU debido a condiciones asociadas a un tiempo atmosférico o evento de ENOS extremo, los “oasis” tienen a estabilizar los cambios abruptos en la temperatura en sus alrededores. A diferencia de los espacios con un DI alto que tienden a registrar variaciones positivas muy elevadas.

En los años más recientes (2016-2017-2018-2019) se reporta que la ICU es más intensa en el sector sur y suroeste de la Ciudad. El análisis de morfología urbana establece que en esta zona la densidad de actividades es de 20 locales comerciales por cada 100 m² y con una densidad poblacional de 180 habitantes por hectárea. Lo anterior es importante de tener en cuenta para la planificación urbana, así como en las acciones de monitoreo y gestión de la ICU ante eventos extremos de ENOS. En este y otros sectores de la ciudad es necesario establecer planes de intervención de su diseño urbano, que involucre diversas estrategias bioclimáticas para regular la temperatura de la superficie. En particular para la atención de afecciones respiratorias y golpes de calor en población vulnerable o que por alguna razón puede ser expuesta a condiciones térmicas severas.

6.3.1. Escenarios

A partir de un modelo de Autómata Celular (AC), se construyen cuatro escenarios de tendencia del cambio de la cobertura de la tierra. La asignación de las unidades es aleatoria y bajo parámetros establecidos. El primer escenario supone condiciones de un crecimiento urbano según la tendencia observada de años recientes. El segundo escenario incluye las

* Según el Índice Oceánico del Niño, el ENOS fue de intensidad moderada.

⁶ ** Según el Índice Oceánico del Niño, el ENOS fue de intensidad fuerte.

*** Según el Índice Oceánico del Niño, el ENOS fue de intensidad muy fuerte.

condiciones de un cambio acelerado y crecimiento sin restricciones. Mientras que el tercer y cuarto escenario incorporan dos procesos espaciales de recuperación de zonas verdes.

En términos generales los criterios utilizados para la asignación de clases en el modelo AC rindió resultados aceptables. Sin embargo, es necesario mejorar la probabilidad de asignación del comportamiento térmico de la función construida a partir del modelo de regresión ponderada multinomial. Por ejemplo, al incorporar más variables que aumenten los valores del coeficiente de determinación, así como reducir el “ruido” aleatorio. Incluso en futuras investigaciones puede ser incorporado al modelo el coeficiente convectivo de transferencia de calor de los materiales.

Los escenarios de los modelos 1 y 2 establecen el comportamiento de la ICU ante un probable aumento de la superficie urbana y un incremento del DI asociado a ese crecimiento. De mantener el ritmo de crecimiento y el efecto de disturbio actual en la ciudad, podría resultar en un incremento de hasta 8% de la temperatura, es decir casi 3°C con respecto a los valores estimados en el 2019 (Cuadro 5.52).

La situación sería más grave para todo el sistema urbano, si se considera que la proyección del incremento de la temperatura global relativa se estima en 1.5°C para el año 2040 por Allen *et al.* (2019). Mientras que las estimaciones de Alvarado *et al.* (2012) indican que Costa Rica es uno de los puntos calientes de cambio climático más prominente de las zonas tropicales. Según el IMN, las simulaciones del modelo PRECIS bajo el supuesto del escenario de emisiones A2, el país experimentará un aumento de la temperatura media anual de 0.90 °C en el año 2020 hasta 3.36°C en el año 2080 con respecto a línea base estimada del período 1950-2000 (WorldClim, (Hijmans *et al.* 2005)) (Alvarado *et al.* 2012).

Se establece que no solo es necesario gestionar la tasa de crecimiento urbano, también es importante considerar la estructura urbana y las superficies que pueden incrementar la intensidad de la ICU. Mediante el uso de materiales con propiedades térmicas favorables es posible manipular el flujo del aire para garantizar que el aire fresco circule por la ciudad, y lo que a su vez puede ser beneficioso para la reducción de la contaminación en la peflosfera.

Además, es factible establecer una relación entre desarrollo horizontal y vertical de la ciudad para ajustar el intercambio de radiación de los elementos. En el caso de la ciudad de Heredia su dosel urbano tiene poco desarrollo vertical, por lo tanto, todavía no se deberían formar flujos de aire asociados a una dinámica de cañón urbano. Sin embargo, al calcular

la relación vertical de la altura promedio de los edificios y el ancho promedio de las calles resulta en un valor de 0.5. Según T. Oke (2002), se clasifica como un cañón de estela inferida, es decir la estela del viento originada por los edificios ubicados a sotavento son perturbados por los edificios situados a barlovento. Para los efectos de planificación, la relación de desarrollo vertical/horizontal⁷ puede ser un criterio para considerar en futuras propuestas de regulación de alturas, orientación y retiros de los edificios, así como en los planes de ampliación vial.

Los escenarios 3 y 4 modelan un incremento horizontal de las áreas verdes. El modelo 3 implica la inclusión en el transcurso de las vías públicas de áreas verdes, mientras que el modelo 4 simula adecuar los centros de cuadra para que alberguen áreas verdes o de descanso. Los resultados determinan que las dos estrategias de restauración y arborización permiten la reducción promedio de la temperatura de las coberturas urbanas en aproximadamente un 5.09% (1.74°C). Pero también, supone una rotunda mejoría en las temperaturas de las zonas forestales de hasta un 21% (6.91°C) con respecto a los resultados obtenidos para el 2019 (Cuadro 5.52). Tales efectos son impresionantes, si se tiene en cuenta la tendencia actual de la ciudad de Heredia.

En términos de reducción de la temperatura, el modelo 4 se comporta relativamente mejor que el modelo 3. Al examinar la viabilidad, la implementación de bulevares y reverdecimiento de las vías públicas mediante arborización puede tener un costo menor, que generar centros de cuadra verdes y abiertos; para lo cual es necesario una redistribución y reparcelamiento de las cuadras. Aunque en el último caso, es posible proponer alternativas más accesibles como convertir los techos de los edificios en áreas verdes o recubrirlos con capas que eviten la acumulación de energía. Sin embargo, debe garantizarse la sostenibilidad a largo plazo mediante la constitución de un parque urbano, en el que no domine una visión estética o de oportunidad sino un enfoque restaurativo. Hasta la fecha dicha provisión de servicio ecosistémico es inexistente en las propuestas de ordenamiento territorial del cantón.

Los cuerpos de agua y su zona de protección forestal son áreas que deben recuperarse no solo debido a sus efectos climáticos urbanos positivos, en particular contra el efecto de la ICU. También, como elementos de conectividad que dan funcionalidad ecosistémica a la ciudad, que podrían conectarse con otro tipo de zonas verdes como cultivos urbanos. Es

⁷Relación entre altura promedio de los edificios y el ancho promedio de la calle.

necesario desarrollar un nuevo enfoque de planificación de los entornos urbanos naturales, al incorporar el uso de la teoría de la sucesión en la restauración ecológica, y la fase de sucesión adaptativa. Es particular, en aquellos espacios que fueron perturbados y se encuentran en un estado de heterogeneidad (Barrantes-Sotela, 2019).

6.4. Líneas estratégicas

De acuerdo con los resultados obtenidos en la investigación, se establecen los siguientes temas críticos necesarios para el abordaje de las ICU. Los cuales se indican a continuación:

1. Configuración urbana: la disposición de la infraestructura y el patrón del diseño urbano afecta la temperatura y el microclima entre las edificaciones. La relación de desarrollo vertical/horizontal, así como el Factor de Visibilidad del Cielo (FVC) (*Sky View Factor*) establecen la dinámica de los cañones urbanos que modifican el comportamiento de la ICU. Los edificios altos y estructuras continuas pueden bloquear el flujo del aire y el movimiento del viento y proporcionar varias superficies para que los niveles reflejen y absorban la luz solar que hace que el área urbana sea más cálida. Es importante considerar la orientación de los edificios.
2. Superficie: el material de la superficie terrestre es el factor principal que afecta al ICU. El aumento de la emisividad y la velocidad del viento disminuirán el tamaño de la isla de calor urbana, lo que significa que durante las noches despejadas y sin nubes se producen las mayores diferencias de temperatura centro-periferia. Dado que los materiales de la superficie urbana tienen una capacidad térmica relativamente alta, el uso de materiales que absorben durante el día la radiación de onda corta aumenta la ICU.
3. Áreas verdes: la cantidad, calidad y disposición espacial de las áreas verdes y la vegetación afectan la temperatura en la ciudad. Se establece que disponer de parques o áreas verdes de grandes proporciones normalmente son 2°C más fríos que las áreas urbanizadas, incluso esta diferencia de temperatura puede alcanzar hasta 5°C. La falta de vegetación en el área urbana disminuye la evapotranspiración, la sombra y los efectos de enfriamiento de la vegetación que calientan la ciudad y favorecen la ICU.

4. Actividad humana: las actividades humanas inciden en el aumento de la temperatura, la climatización de los edificios, el tráfico y las actividades económicas. El calor entra en el medio ambiente directa e indirectamente. Además del calor y la humedad que liberan estas actividades, también contaminan el aire y afectan la radiación entrante y saliente.

Al establecer la dinámica y percepción de los actores en los temas de ICU y el cambio climático, un elevado porcentaje reconoce que la ciudad presenta serias limitaciones e identifica con claridad los desafíos climáticos, así como las posibles consecuencias de no aplicar medidas correctivas. Se debe aprovechar que existe una posición favorable de la población ante la implementación de acciones o estrategias orientadas en abordar los temas críticos expuestos anteriormente.

De esta manera, las líneas estratégicas definen marcos de acción. Su función es, por lo tanto, ayudar a los planificadores a formular juicios prácticos sobre la búsqueda de múltiples propósitos en situaciones locales cambiantes y facilitar las discusiones con los ciudadanos y otros actores (Hersperger *et al.* 2018). Bajo ese enfoque los lineamientos estratégicos deben seguir los conceptos de diseño urbano de ciudades sostenibles, incluso serían de ayuda para alcanzar las metas de los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Estos pueden ser considerados como elementos claves en los planes municipales tales como: plan regulador urbano cantonal, reglamentos de zonificación, planes de adaptación al cambio climático, planes de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, guías de diseño y de estándares de construcción verde. A continuación, se establecen los lineamientos:

Tema: Configuración urbana.

Lineamientos:

1. Incentivar la reconfiguración de las cuadras con aperturas diagonales arborizadas.
2. Promover el uso de patios o jardines internos de las edificaciones y centros de cuadra.
3. Estimular los diseños de los edificios en orientaciones y alturas que procuren un enfriamiento natural.
4. Promover la conectividad de espacios públicos.
5. Aumentar la relación altura edificada y ancho de la vía.
6. Implementación de bulevares y ciclo vías arborizadas.
7. Promover el rescate de diseños arquitectónicos históricos y culturales.
8. Recuperar los derechos de vía o ampliar el existente.
9. Generar infraestructura para la movilidad sostenible y la intermodalidad.

Aportan en los logros de alcance de los siguientes ODS:

11. Ciudades y comunidades sostenibles.
 13. Acción por el Clima.
-

Tema: Superficie.

Lineamientos:1. *Infraestructura*

- a) Promover el uso de materiales diversos y de baja reflectancia en los edificios.
- b) Utilizar cubiertas o pinturas de color claro o térmicas en el techado.
- c) Estimular la implementación de paredes verdes.
- d) Propiciar la implementación de techos de teja, verdes o recubiertos.
- e) Implementar y regular el uso de elementos y mobiliario urbano sostenible.
- f) Establecer regulaciones sobre la sombra de áreas descubiertas.

2. *Red vial*

- a) Sustituir el uso de asfalto en las vías por otro tipo de pavimentación reflectante y permeable.
- b) Diseñar aceras con superficies verdes y permeables.
- c) Promover la arborización de una sección del derecho de vía.

Aportan en los logros de alcance de los siguientes ODS:

- 11. Ciudades y comunidades sostenibles.
 - 13. Acción por el Clima.
-

Tema: Áreas verdes.

Lineamientos:

1. Aumentar la cantidad y calidad de zonas verdes en la ciudad.
2. Iniciar un proceso de arborización controlado y gestionado con criterios científicos.
3. Recuperación de zonas de protección de causes.
4. Incentivar proyectos de reforestación.
5. Garantizar el aprovisionamiento de áreas verdes con funcionalidad ecosistémica.
6. Incentivar el uso de superficies verdes en los diseños de construcción de los espacios públicos y recreativos.
7. Implementar mecanismos de protección de árboles en espacios públicos.

Aportan en los logros de alcance de los siguientes ODS:

3. Salud y bienestar.
 11. Ciudades y comunidades sostenibles.
 13. Acción por el Clima.
 15. Vida de ecosistemas terrestres.
-

Tema: Actividad humana.

Lineamientos:

1. Evitar el uso de climatización artificial.
2. Disminuir el consumo energético.
3. Propiciar el uso de tecnologías limpias.
4. Fomentar el uso de medios de transporte alternativos (caminatas, bicicletas, patinetas, otros).
5. Incentivar el uso de transporte público y la intermodalidad.
6. Fomentar los programas o talleres de educación climática.

Aportan en los logros de alcance de los siguientes ODS:

3. Salud y bienestar.
 4. Educación de calidad.
 11. Ciudades y comunidades sostenibles.
 12. Producción y consumo responsables.
 13. Acción por el Clima.
 15. Vida de ecosistemas terrestres.
-

Capítulo 7

IMPLICACIONES EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Estudiar las ciudades es en muchos casos una labor difícil, al tratarse de sistemas complejos. Incluso en los procesos de planificación es una práctica común separar el estudio de los espacios naturales, de los urbanizados. Este tipo de prácticas viene en desuso gracias a la perspectiva que ofrece el desarrollo urbano sostenible, que parte de la consideración de la ciudad como un ecosistema que consiste en relaciones y dinámicas intrínsecas entre otro tipo de espacios y entidades, que pueden ocurrir dentro y fuera de esta.

Las ciudades sostenibles son una construcción social compleja y dinámica, en la que los diferentes componentes ambientales, sociales, culturales, políticos y económicos de las sociedades humanas están altamente interrelacionadas. Además, buscan el equilibrio y el bienestar de todos los seres que habitan un espacio definido, tanto en el tiempo presente como futuro. También, debe respetar la diversidad cultural y debe garantizar el derecho de participación de cada uno de los actores sociales; así como el derecho de la representación y defensa que los ciudadanos pueden ejercer sobre la naturaleza.

Por su puesto la ciudad no es ajena de presentar problemas asociados a su misma dinámica. Un gran porcentaje de las actividades antrópicas tienden a producir desbalances en el sistema urbano al operar por encima de la capacidad de carga. En especial cuando existe competencia del aprovechamiento y consumo de los recursos disponibles.

La ICU en las ciudades se puede considerar como el resultado del desbalance producto del éxito de ciertos agentes en la acumulación de capital, que en exceso consumen y transforman recursos como la tierra, las áreas naturales y el aire. Cuantificar los efectos de

este fenómeno no solo ofrece indicios claros sobre lo que puede estar mal en la dinámica urbana, también es un indicador sobre el estado de la sostenibilidad de la ciudad. Esta es una de las razones por la que el estudio de los efectos de la ICU es un tema recurrente en la discusión sobre la sostenibilidad y la habitabilidad de las ciudades.

El aumento de la temperatura en la ciudad de Heredia puede desencadenar una serie de problemas que pueden ser evitados de darse una gestión pública local que mediante la construcción, interpretación y seguimiento de indicadores implementen una serie de prácticas derivadas a partir de un extenso conjunto de información científica, que tienden a relacionarse con el desarrollo socioeconómico y ambiental de sus habitantes. Esta investigación trata de aportar en ese aspecto.

Un alcances de este trabajo en relación con el Desarrollo Sostenible, es la construcción de un abordaje teórico y metodológico para el registro y monitoreo del fenómeno de ICU en las ciudades costarricenses, y cómo a partir de esos datos se pueden establecer lineamientos específicos que permitan construir un Plan de Gestión Urbano que integre la variable climática, tal y como indica el «Plan de Acción 2018-2022 de la Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018-2030». Además, se espera que los resultados contribuyan al cambio de valores en la sociedad, incida en la educación ambiental y climática, y a su vez inicie un espacio de deliberación-participación. Para que a través de la política gubernamental sea posible la propuesta de acciones concernientes a evitar no solo la ICU, sino aspirar a construir una ciudad cada día más sostenible.

Sin olvidar que, la naturaleza de los valores está arraigada en su función de adaptación, por lo que la naturaleza de los cambios de valores probablemente también refleje una función adaptativa. Por lo tanto, si existen cambios sustanciales en el medio ambiente, se pueden producir nuevos valores adaptativos, comportamientos, actitudes y afiliaciones sociales. Lo cual puede ser aprovechado, para utilizar metodologías para fortalecer los valores en sociedades y comunidades con graves problemas ambientales y climáticos o para fortalecer incluso valores deseables a los esfuerzos del desarrollo sostenible.

El tema de la investigación se enmarca en los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible: 3. Salud y bienestar, 4. Educación de calidad, 7. Energía asequible y no contaminante, 9. Industria, innovación e infraestructura, 11. Ciudades y comunidades sostenibles, 12. Producción y consumo responsables, 13. Acción por el Clima, 15. Vida de ecosistemas terrestres. Por lo que se espera contribuir en el alcance de esos.

Capítulo 8

CONCLUSIONES

En la investigación se realizan los siguientes hallazgos.

1. Desde la fundación de la ciudad, el núcleo urbano se localiza en el parque Nicolás Ulloa. Se determinan dos polos económicos que atraen y concentran la mayor cantidad de comercios. El primero se asocia a las funciones institucionales, político y administrativas del centro urbano. El segundo se vincula a la dinámica que ejerce la Universidad Nacional. En los sectores periféricos y periurbanos predominan las áreas residenciales de viviendas unifamiliares.
2. La ciudad de Heredia mantiene una forma urbana clásica con retícula hipodámica y un parcelamiento con patrón en \times . El perfil urbano es simple y de poca altitud, en el que predomina edificaciones de un piso y un ancho de las vías promedio de 7.5 metros. Con el paso del tiempo, el dosel urbano se extiende en longitud, pero con poca verticalización.
3. La matriz agrícola en el que predominaba la producción tradicional de café se transforma a una urbana. Según las diferencias del DI, se establecen dos períodos en los que ocurren la mayor cantidad de transformaciones en términos del brillo de las coberturas de la tierra. El primero entre 1991-1997 y el segundo período entre el 2008-2014.
4. El análisis de los disturbios (DI) permite identificar y establecer dos procesos espaciales en la transformación de las coberturas en la ciudad, estos se definen como: expansión y densificación urbana. Al inicio, los cambios de las coberturas verdes a antrópicas son agrupados y concentrados, luego aparecen cambios puntuales y dispersos; estos últimos se agrupan a los núcleos que tienden a densificarse y expandirse.

5. Se estima un crecimiento urbano de 30.48 hectáreas por año entre 1985 al 2019. Es decir, un incremento del 155.07% con respecto a 1985, en detrimento de las áreas de cultivos de café, foresta, matorrales y pastos. Las áreas con mayor pérdida de superficie son los cultivos de café, los cuales disminuyeron en un 87.57% con respecto a 1985. La presión del recurso tierra puede asociarse al incremento exponencial de la población en la ciudad de Heredia.
6. El abandono de la actividad agrícola cafetalera favorece que las parcelas productivas se transformen en matorrales con la intención de generar plusvalía de los terrenos, para luego ser urbanizados.
7. Se recupera de manera paulatina las zonas de protección de los cauces y árboles al interior de la ciudad, lo que supone un incremento de su superficie en un 73.33%. No obstante, el proceso de regeneración es disperso en el área de estudio.
8. Existe una correlación de las variables TST y DI, y se estima un coeficiente de determinación del 0.53. La asociación es positiva y de fuerza moderada. Además, existe una asociación entre los efectos que presentan el tipo de superficie, el tamaño, la forma y ubicación de las coberturas con respecto a la capacidad influir en la temperatura.
9. Los perfiles térmicos por categorías nominales determinan que la menor diferencia térmica ocurre entre las coberturas urbana y forestal. Al contrario, las diferencias térmicas entre las áreas urbanas con respecto a las categorías de matorrales y los cultivos son las que muestran los menores diferenciales térmicos.
10. En los años ochenta y noventa del siglo pasado, las coberturas de matorrales y cultivos asumían las funciones de reducción térmica, que la literatura le atribuye a las coberturas forestales o naturales. Por tanto, la reducción de su superficie también reduce las capacidades del sistema urbano-periurbano de regular su pluma térmica.
11. En los perfiles térmicos entre los años 1985 al 2008, se observa una marcada diferencia entre el núcleo urbano y los sectores periféricos. Se determina una asociación entre la forma del perfil de la ICU y el proceso de expansión de las áreas urbanas.
12. La intensidad de la ICU disminuye en términos de diferencia entre el núcleo -periferia, pero las temperaturas promedio entre las dos secciones tiende a aumentar con el paso del tiempo. La ICU evoluciona de una forma insular en la que se

distinguen los principales elementos, a una de curva suavizada similar a la forma de una meseta.

13. Se observa que la intensidad de la ICU tiende aumentar significativamente cuando el ENOS ocurre en intensidades fuerte o muy fuerte, tanto en fase positiva como negativa. Además, la mayor intensidad del fenómeno se presenta entre el intervalo de los días 80 - 120 del año, con un punto máximo cercano al día 100 (finales del mes de marzo e inicio del mes de abril). Lo anterior por las condiciones de cielo despejado, aumento de la temperatura, disminución de la humedad relativa y disminución de la velocidad del viento.
14. Los principales oasis reducen la TST promedio de las áreas circundantes en hasta 2.6°C y se localizan en los cauces de los principales afluentes, así como en los parques y zonas verdes de la ciudad. Además, tienen a estabilizar los cambios abruptos en la temperatura en sus alrededores. A diferencia de los espacios con un alto DI que tienden a registrar variaciones positivas muy elevadas.
15. En los últimos cuatro años del período temporal, se reporta que la ICU es más intensa en el sector sur y suroeste de la Ciudad. Sector que presenta una densidad de 20 locales comerciales por cada 100 m^2 y con una densidad poblacional de 180 hab/ha.
16. Al establecer los modelos de escenarios de tendencia se establece que de continuar el patrón de crecimiento urbano y sustitución de la cobertura verde por otra con un mayor DI; la TST podría aumentar en hasta 2.77°C en las coberturas antrópicas. Mientras que, en los escenarios de arborización urbana en la ciudad, la TST puede reducirse hasta en 1.79°C en las áreas antrópicas y hasta 6.91°C en las áreas verdes.
17. La población percibe que las principales causas del aumento de las temperaturas de la ciudad se deben a la contaminación del aire, a la deforestación y falta de áreas verdes.
18. Según la percepción de la población, en la ciudad deben implementarse mejores condiciones y características en las zonas verdes existentes y aumentar su cantidad. Además, se percibe que la coordinación de las instituciones sobre los temas climáticos en la planificación y el ordenamiento territorial debe ser más eficaz y eficiente.
19. La población percibe que los principales retos en la ciudad son las acciones pertinentes al Cambio Climático y la Gestión Ambiental del Territorio. Además, existe una posición favorable al cambio de los patrones de consumo, en el caso de

ser necesario.

20. Se establecen los principales lineamientos en función de los temas considerados como críticos en la reducción de la temperatura de la ciudad. Estos son la configuración urbana, la superficie, áreas verdes y actividad humana.
21. Comprender la relación entre la ICU y las configuraciones urbanas es fundamental para apoyar la planificación urbana y así diseñar prácticas sostenibles efectivas para mitigar y adaptar a las ciudades costarricenses.

Bibliografía

- Alfrahhat, R. (2015). *Urban heat island analysis using Landsat TM A Case study of the city of Chicago* (Tesis doctoral). Chicago State University.
- Allen, M., Dube, O., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M. & Zickfeld, K. (2019). Framing and Context [In Press]. En V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor & T. Waterfield (Eds.), *Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (pp. 49-91). IPCC.
- Almusaed, A. (2011). *Biophilic and Bioclimatic Architecture*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-534-7>
- Alvarado, L., Contreras, W., Alfaro, M. & Jiménez, E. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica* (inf. téc.) [Proyecto 61152. Mejoramiento de las capacidades nacionales para la evaluación de la vulnerabilidad y adaptación del sistema hídrico al cambio climático en Costa Rica]. Instituto Meteorológico Nacional. San José.
- Álvarez-Vergnani, C. (2015). *Estrategia de adaptación climática en Costa Rica: bases para la gestión estatal e institucional* (inf. téc. N.º 8). Friedrich Ebert Stiftung (FES). San José.
- Anderson, J. R., Hardy, E. E., Roach, J. T., Witmer, R. E. & Peck, D. L. (1976). A Land Use And Land Cover Classification System For Use With Remote Sensor Data. A revision of the land use classification system as presented in U.S. Geological Survey Circular 671, 964, 41.

- Angel, S., Parent, J., Civco, D. L., Blei, A. & Potere, D. (2011). The dimensions of global urban expansion: Estimates and projections for all countries, 2000–2050. *Progress in Planning*, 75(2), 53-107. <https://doi.org/10.1016/j.progress.2011.04.001>
- Araya, M. (2015). Agenda internacional de cambio climático de Costa Rica: prioridades y resultados. En *Vigésimo Primer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*.
- Arce, M. & Acevedo, V. (2014). *Análisis Comportamiento término y su relación con el uso de suelo en la formación del fenómeno Islas de Calor, en la aglomeración urbana de Heredia*. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Arnett, J. T. T. R., Coops, N. C., Gergel, S. E., Falls, R. & Baker, R. H. (2014). Detecting Stand-Replacing Disturbance using RapidEye Imagery: a Tasseled Cap Transformation and Modified Disturbance Index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40(1), 1-14.
- Barrantes-Sotela, O. (2018). Modelos de zonificación urbana y su implementación en Costa Rica. En G. Marafon, L. Quirós-Arias & M. Alvarado-Sánchez (Eds.), *Estudos Territoriais no Brasil e na Costa Rica* (pp. 261-288). Editora Da Universidade Do Estado Do Rio de Janeiro.
- Barrantes-Sotela, O. (2019). Aportes desde la conservación genética al mejoramiento de las áreas verdes en la ciudad. *Revista Geográfica de América Central*, 1(64), 43-57. <https://doi.org/10.15359/rgac.64-1.2>
- Bauer, D. F. (1972). Constructing Confidence Sets Using Rank Statistics. *Journal of the American Statistical Association*, 67(339), 687. <https://doi.org/10.2307/2284469>
- Bettini, V. (1998). *Elementos de Ecología Urbana* (M. Peinado-Lorca, Ed.) [Traducción]. Simancas Ediciones, S.A.
- Boeing, G. (2017). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>
- Bosque, J., Chuvieco, E., Navalpotro, P. & Sancho, J. (1991). Factores en la dinámica de la ocupación del suelo (Comarca de los Montes, Castilla la Mancha, España). En *Proceedings III Conferencia Latinoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica*.

- Brown, M. A. & Southworth, F. (2008). Mitigating climate change through green buildings and smart growth. *Environment and Planning*, 40, 653-676. <https://doi.org/10.1068/a38419>
- Brundtland, G. H. (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. *United Nations Commission*, 4(1)arXiv arXiv:1011.1669v3, 300. <https://doi.org/10.1080/07488008808408783>
- Buqueras, I. (2002). *Más sociedad, menos y mejor estado: pasado, presente y futuro de la sociedad civil*. Editorial Complutense.
- Capelli de Steffens, A. & Píccolo, M. C. (2001). La isla de calor estival en Temuco, Chile. *Papeles de Geografía*, 1781(33), 49-60. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/105637.pdf>
- Castán Broto, V. & Bulkeley, H. (2013). A survey of urban climate change experiments in 100 cities. *Global Environmental Change*, 23(1)arXiv arXiv:0811.2183v2, 92-102. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.005>
- Chatterjee, R. S., Singh, N., Thapa, S. & Sharma, D. (2017). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Retrieval of land surface temperature (LST) from landsat TM6 and TIRS data by single channel radiative transfer algorithm using satellite and ground-based inputs. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 58, 264-277. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.017>
- Chaverri-Polini, P. (2014). *Cambio climático y ordenamiento territorial en Costa Rica: de la indolencia a la transformación de la Gran Área Metropolitana (GAM)* (inf. téc. N.º 1). Friedrich Ebert Stiftung (FES). San José.
- Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección espacial* (3.ª ed.). RIALP.
- CNE. (2015). *Política Nacional de Prevención de Gestión del Riesgo 2016-2030*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias.
- Cochran, N. E. (2014). *Detection of Urban Heat Islands in the Great Lakes Region wuth Globe Student Surface Temperature Measurements* (Master of Art Degree in Geography December). University of Toledo. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc%7B%5C_%7Dnum=toledo1418421488

- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Consejo Nacional de Planificación Urbana. (2018). Plan de Acción 2018-2022 de la Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018-2030 [Decreto Ejecutivo No. 41136-MIVAH-PLAN-MINAEMOPT]. https://www.mivah.go.cr/Documentos/politicas_directrices_planes/PNDU-2018_Politica_Plan_Pags_001-028.pdf
- Contreras, A., Salas, J., Velasquez, G. & Quevedo, H. (2008). Determinación de la isla de calor urbano en ciudad juarez mediante programa de cómputo. *CULCYT/Clima urbano*, (26).
- Cook, M. (2014). *Atmospheric Compensation for a Landsat Land Surface Temperature Product* (Tesis doctoral July). Rochester Institute of Technology.
- Coppin, P. & Bauer, M. (1996). Digital change detection in forested ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews*, (13), 234-237.
- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (2009). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU)* (inf. téc.) [Serie M, No. 4/Rev. 4]. Naciones Unidas. Nueva York.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Du, H., Wang, D., Wang, Y., Zhao, X., Qin, F., Jiang, H. & Cai, Y. (2016). Influences of land cover types, meteorological conditions, anthropogenic heat and urban area on surface urban heat island in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *Science of The Total Environment*, 571, 461-470. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.012>
- Estoque, R. C. & Murayama, Y. (2017). Monitoring surface urban heat island formation in a tropical mountain city using Landsat data (1987–2015). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 133, 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.09.008>

- Ezquiaga Domínguez, J. (2010). *Estrategias de adaptación y mitigación del Cambio Climático en planificación espacial. Selección y análisis de buenas prácticas y formulación de criterios de aplicación en el planeamiento territorial y urbanístico del la CAPV* (inf. téc.). Dirección General de Ordenación del Territorio del Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco.
- Fan, Y., Li, Y., Wang, X. & Catalano, F. (2016). A New Convective Velocity Scale for Studying Diurnal Urban Heat Island Circulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(10), 2151-2164. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0099.1>
- Fernández-Güell, J. M. (2006). *Planificación estratégica de Ciudades* (2.ª ed.). Editorial Reverté.
- Ferrelli, F., Bustos, M. L. & Piccolo, M. C. (2016). Modificaciones en la distribución espacial de la temperatura y la humedad relativa como resultado del crecimiento urbano : el caso de la ciudad de Bahía Blanca , Argentina. *16*(April), 51-61.
- Fisher, P. F., Comber, A. J. & Wadsworth, R. (2005). Land use and Land cover: Contradiction or Complement. *Re-presenting GIS*, (August 2015), 85-98.
- Fletcher, A., Guthrie, J., Steane, P., Roos, G. & Pike, S. (2003). Mapping stakeholder perceptions for a third sector organization. *Journal of Intellectual Capital*, 4(4), 505-527. <https://doi.org/10.1108/14691930310504536>
- Flores, B. (2017). Iniciativa "Heredia Respira"logrará plantar 20 mil árboles en la provincia. *La República*.
- Folch, R. (2003). *El territorio como sistema: conceptos y herramientas de ordenación* (inf. téc.). Institut d'Edicions de la Diputació de Barcelona. Barcelona.
- Foody, G. M. (2008). Harshness in image classification accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 29(11), 3137-3158.
- Forman, R. T. T. (1997). *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press.
- Frenkel, A. & Ashkenazi, M. (2008). Measuring urban sprawl: how can we deal with it?. *Environment & Planning B: Planning & Design*, 35(1), 56-79.
- Gartland, L. (2008). *Heat islands*. Earthscan.
- Gentleman, R., Hornik, K. & Parmigiani, G. (2008). *Applied Spatial Data Analysis with R*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78171-6>
- Global Land Cover Facility. (2004). Landsat Technical Guide. *Science*, 6-7.

- González, M. & Saenz, E. (1996). *Crecimiento urbano y planificación local: El caso de la ciudad de Cartago* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Costa Rica.
- Graizbord, B. (2011). Sostenibilidad urbana: ¿Frase vacía o estrategia de desarrollo. En *Megaciudades y cambio climático* (p. 21). Colegio de Mexico. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt14jxphx.6>
- Gudmundson, L. (2013). *Costa Rica antes del Café: Sociedad y economía en vísperas del Boom exportador*.
- Gudmundson, L. (2018). *Costa Rica después del Café: La era cooperativa en la historia y la memoria*.
- Gudynas, E. (2004). *Ecología, economía y ética del desarrollo sostenible* (5.^a ed.).
- Guedes, G., Costa, S. & Brondízio, E. (2009). Revisiting the hierarchy of urban areas in the Brazilian Amazon: a multilevel approach. *Population and Environment*, 30(4-5), 159-192. <https://doi.org/10.1007/s11111-009-0083-3>
- Guill, V. (2016). Un Acercamiento a Caracterizar La Isla De Calor En Cuenca. En *CONAMA2016*.
- Hagberg, A. A., Schult, D. A. & Swart, P. J. (2008). Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX (G. Varoquaux, T. Vaught & J. Millman, Eds.). En G. Varoquaux, T. Vaught & J. Millman (Eds.), *Proceedings of the 7th Python in Science Conference*.
- Harvey, D. (2013). *Rebel Cities: From The Right To The City To The Urban Revolution*. Verso.
- Healey, S. P., Cohen, W. B., Zhiqiang, Y. & Krankina, O. N. (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 97(3), 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009>
- Henn, B., Raleigh, M. S., Fisher, A. & Lundquist, J. D. (2013). A Comparison of Methods for Filling Gaps in Hourly Near-Surface Air Temperature Data. *Journal of Hydrometeorology*, 14(3), 929-945. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-027.1>
- Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación* (1.^a ed.). Mc Graw Hill.
- Hernández-Sánchez, L. (2014). *Mercado de la tierra y vivienda en el Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica* (inf. téc. N.º 21) [Vigésimo primer informe

- Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible]. Estado de la Nación. San José.
- Herrera, J. (2011). *Informe Anual de Calidad del Aire: Gran Área Metropolitana de Costa Rica* (inf. téc. N.º 4). Laboratorio de Análisis Ambiental, UNA. Heredia.
- Hersperger, A. M., Oliveira, E., Pagliarin, S., Palka, G., Verburg, P., Bolliger, J. & Grădinaru, S. (2018). Urban land-use change: The role of strategic spatial planning. *Global Environmental Change*, 51(March), 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.05.001>
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G. & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Holdridge, L. (1966). The life zone system. *Adansonia*, 6(2), 199-203.
- Howard, E. (1902). *Garden cities of To-morrow* (2.^a ed.). Swan Sonnenschein & Co., Ltd.
- Huang, C., Wylie, B., Yang, L., Homer, C. & Zylstra, G. (2002). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), 1741-1748. <https://doi.org/10.1080/01431160110106113>
- Imhoff, M., Zhang, P., Wolfe, R. & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
- INEC. (2011). *Censo de Población y Vivienda 2011* (inf. téc.) [Sistema de Consultas]. Instituto Nacional de Estadística y Censo. San José. <http://www.inec.go.cr>
- INEC. (2019). *Estimaciones distritales de población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia, cantón, distrito y sexo* (inf. téc.). Instituto Nacional de Estadística y Censos. San José.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2009). *Sobre algunos fenómenos meteorológicos en Costa Rica* (inf. téc.). MINAET. San José.
- International Coffee Organization. (2015). Historical Data on the Global Coffee Trade.
- Jabareen, Y. R. (2006). Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts. *Journal of Planning Education and Research*, 26(1), 38-52. <https://doi.org/10.1177/0739456X05285119>
- Jacobs, J. (1961). *The death and life of great American cities*. Random House.

- Jacobson, M. & Ten Hoeve, J. (2012). Effects of urban surfaces and white roofs on global and regional climate. *Journal of Climate*, 25(3), 1028-1044. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00032.1>
- Jin, M. S. (2012). Developing an Index to Measure Urban Heat Island Effect Using Satellite Land Skin Temperature and Land Cover Observations. *Journal of Climate*, 25(18), 6193-6201. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00509.1>
- Jordan, D. R. & Horan, T. A. (1997). Intelligent Transportation Systems and Sustainable Communities: Findings of a National Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1588(1), 70-76. <https://doi.org/10.3141/1588-09>
- Kala, J., Evans, J. P., Pitman, A. J., Schaaf, C. B., Decker, M., Carouge, C., Mocko, D. & Sun, Q. (2014). Implementation of a soil albedo scheme in the CABLEv1.4b land surface model and evaluation against MODIS estimates over Australia. *Geoscientific Model Development*, 7(5), 2121-2140. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2121-2014>
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. & Kiyotoshi, T. (2015). The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 93(1), 5-48. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- Kunkel, K. E. (1989). Simple Procedures for Extrapolation of Humidity Variables in the Mountainous Western United States. *Journal of Climate*, 2(7), 656-670. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<0656:SPFEOH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<0656:SPFEOH>2.0.CO;2)
- Laba, M., Gregory, S. K., Braden, J., Ogurcak, D., Hill, E., Fegraus, E., Fiore, J. & DeGloria, S. D. (2002). Conventional and fuzzy accuracy assessment of the New York Gap Analysis Project land cover map. *Remote Sensing of Environment*, 81(2/3), 443.
- Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- Lee, R. W., Gosling, G. D. & Irvin, K. (2008). Applying Smart Growth Principles and Strategies to Resolving Land Use Conflicts Around Airports. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=876467>
- León Sáenz, J. & Peters Solórzano, G. (2019). *El comercio y los mercados en Costa Rica: historia económica de Costa Rica en el siglo XX* (1.^a ed., Vol. 4). Editorial de la Universidad de Costa Rica.

- Li, C.-f., Shen, D., Dong, J.-s., Yin, J.-y., Zhao, J.-j. & Xue, D. (2014). Monitoring of urban heat island in Shanghai, China, from 1981 to 2010 with satellite data. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(10), 3961-3971. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-1053-8>
- Liu, L. & Zhang, Y. (2011). Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and. *Remote Sensing*, 3(7), 1535-1552. <https://doi.org/10.3390/rs3071535>
- Loridan, T. & Grimmond, C. (2012). Characterization of energy flux partitioning in urban environments: Links with surface seasonal properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), 219-241. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-038.1>
- Lund, H. (2000). Definitions of Old Growth, Pristine, Climax, Ancient Forests, and Similar Terms [[Geo-2- 408]]. <http://home.att.net/~gklund/pristine.html>
- Madanian, M., Soffianian, A. R., Soltani Koupai, S., Pourmanafi, S. & Momeni, M. (2018). The study of thermal pattern changes using Landsat-derived land surface temperature in the central part of Isfahan province. *Sustainable Cities and Society*, 39(March), 650-661. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.03.018>
- Maestría en Desarrollo Sostenible. (2000). Documento de creación de la Maestría en Desarrollo Sostenible.
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, (84), 70-72.
- Manzato, A. (2007). A note on the maximum Pierce skill score. *Weather and Forecasting*, 22(5), 1148-1154. <https://doi.org/10.1175/WAF1041.1>
- Martin, P. & Williams, J. (2016). *Legal Aspects of Sustainable Development* (V. Mauerhofer, Ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26021-1>
- Martínez, J. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, 83-99. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17632456006>
- Meadows, D. H. (1972). The Limits to Growth. *The Club of Rome*, 211. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1972.tb05230.x>
- Meléndez Chaverri, C. (1997). *Heredia ... Historia, Tradiciones y Vivencias* (1.^a ed.). EUNA.
- Meléndez Chaverri, C. (2001). *Añoranzas de Heredia* (2.^a ed.). EUNA.

- Menon, S., Akbari, H., Mahanama, S., Sednev, I. & Levinson, R. (2010). Radiative forcing and temperature response to changes in urban albedos and associated CO₂ offsets. *Environmental Research Letters*, 5(014005), 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014005>
- Mišurec, J., Kopačková, V., Lhotáková, Z., Campbell, P. & Albrechtová, J. (2016). Detection of Spatio-Temporal Changes of Norway Spruce Forest Stands in Ore Mountains Using Landsat Time Series and Airborne Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 8(2), 1-20.
- MIVAH-MIDEPLAN-MINAE-MOPT-INVU-IFAM-CNFL-AyA-CNE. (2018). Política Nacional de Desarrollo Urbano 2018-2030 [Decreto Ejecutivo No. 41136-MIVAH-PLAN-MINAEMOPT]. https://www.mivah.go.cr/Documentos/politicas_directrices_planes/PNDU-2018_Politica_Plan_Pags_001-028.pdf
- Monclús, F. J. (2000). La ciudad dispersa. *EURE (Santiago)*, 26(77). <https://doi.org/10.4067/S0250-71612000007700007>
- Morales-Cerdas, V. (2017). *Indicadores de calidad ambiental a partir del criterio áreas verdes urbanas: aplicación en dos ciudades de Costa Rica*. Universidad Nacional. Heredia.
- Morales-Cerdas, V., Piedra-Castro, L., Romero-Vargas, M. & Bermúdez-Rojas, T. (2018). Indicadores ambientales de áreas verdes urbanas para la gestión en dos ciudades de Costa Rica Indicadores ambientales de áreas verdes urbanas para la gestión en dos ciudades de Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1421-1435.
- Mora-Ramírez, J. (2006). *Plan Regional Metropolitano GAM* (Versión digitalizada y actualizada de 1983, inf. téc.). Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU) - PRUGAM. San José.
- Moreno, J. L. (1934). *Who Shall Survive?* Beacon House.
- Nguyen, L. & Henebry, G. (2016). Urban Heat Islands as Viewed by Microwave Radiometers and Thermal Time Indices. *Remote Sensing*, 8(10), 831. <https://doi.org/10.3390/rs8100831>
- Odum, E. (1971). *Fundamentals of Ecology*. Saunders.
- Offerle, B., Eliasson, I., Grimmond, C. S. B. & Holmer, B. (2007). Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*, 122(2), 273-292. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9099-8>

- Oke, T. R. (1973). City Size and the Urban. *Atmospheric Environment Pergamon Press*, 7, 769-779. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702189>
- Oke, T. (2002). *Boundary Layer Climates* (Routledge, Ed.). Taylor & Francis. <https://books.google.co.cr/books?id=9fyJAgAAQBAJ>
- Oke, T. (2006). *Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (inf. téc.). University of British Columbia. Vancouver.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E. & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- Pachauri, R., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. a., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., ... Ypersele, J.-P. V. (2014). *IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report* (inf. téc.). IPCC.
- Peirce, C. (1884). The numerical measure of the success of predictions. *Science*, (4), 453-454.
- Pelletier, C., Valero, S., Inglada, J., Champion, N. & Dedieu, G. (2016). Assessing the robustness of Random Forests to map land cover with high resolution satellite image time series over large areas. *Remote Sensing of Environment*, 187, 156-168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.010>
- Pontius, R. G. & Millones, M. (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
- ProDUS-UCR. (2007). *Estudio de análisis y prospección del sistema urbano de la Gran Área Metropolitana GAM* (inf. téc.). PRUGAM.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2018). Objetivos del Desarrollo Sostenible. <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- PRUGAM. (2008). *Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica: Diagnóstico Plan PRUGAM 2008-2030* (inf. téc. N.º 1). Entidad Gestora del Proyecto PRUGAM-MIVAH-MIDEPLAN. San José.

- Pujol-Mesalles, R. & Pérez-Molina, E. (2012). *Impacto de la planificación regional de la Gran Área Metropolitana sobre el crecimiento urbano y el mercado inmobiliario* (inf. téc. N.º 18) [Décimo octavo informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible]. Estado de la Nación. San José.
- Qin, Z., Karnieli, A. & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat {TM} and its application to the Israel-Egypt border region. *Int. J. Rem. Sens.*, 18(18), 3719-3746.
- R Core Team. (2019). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Ramírez, I. (2001). Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Anganguero, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. *Investigaciones geográficas*, 39-55.
- Ranagalage, M., Estoque, R. C. & Murayama, Y. (2017). An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(7), 189. <https://doi.org/10.3390/ijgi6070189>
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fife, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R. J., Sumi, A. & Taylor, K. E. (2007). Climate Models and Their Evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 591-662. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.06.045>
- Red de Cambio Climático y Gestión del Riesgo. (2018). *Análisis inicial de la producción estudiantil, cursos ofrecidos y proyectos académicos en la Universidad Nacional (UNA) relacionado con las temáticas de cambio climático y gestión del riesgo de desastres* (inf. téc. N.º 1). Universidad Nacional. Heredia.
- Richters, E. (1995). *Manejo del uso de la tierra en América Central: hacia el aprovechamiento sostenible del recurso tierra*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Rodríguez, J. C. (2011). Planificación urbana en perspectiva: Una mirada a nuestra formación en teoría de la planificación urbana. *Quivera*, 13(2), 232-258.

- Romain, M. (2013). Zoning and urban development control. En *European Network for Housing Research 2013 conference: overcoming the crisis*. European Network for Housing Research.
- Rosero Bixby, L. (1997). Boom Demográfico en Costa Rica. *La Nación*, 14A.
- Rubiera Morollón, F., González Marroquin, V. M. & Pérez Rivero, J. L. (2016). Urban sprawl in Spain: differences among cities and causes. *European Planning Studies*, 24(1), 207-226.
- Sabino, C. (1992). *El proceso de investigación*. Ed. Panapo.
- Sanseverino, E. R. (2014). *Smart Rules for Smart Cities* (E. Riva Sanseverino, R. Riva Sanseverino, V. Vaccaro & G. Zizzo, Eds.; Vol. 12). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06422-2>
- Santos-Cerquera, C., Escamilla-Herrera, I. & Guarneros-Avilés, L. (2013). Expansión urbana al Norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: ¿Un triángulo de deterioro ambiental sin posibilidad de desarrollo sustentable? En R. del Pont Lalli (Ed.), *La Política de Ordenamiento Territorial en México* (pp. 571-597). CIGA, UNAM, INECC-SEMARNAT.
- Saramäki, J., Kivelä, M., Onnela, J.-P., Kaski, K. & Kertész, J. (2007). Generalizations of the clustering coefficient to weighted complex networks. *Phys. Rev. E*, 75, 027105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.027105>
- Schmidt, S. & Buehler, R. (2007). The planning process in the US and Germany: A comparative Analysis. *International Planning Studies*, 12(1), 55-75. <https://doi.org/10.1080/13563470701346592>
- Sellers, W. (1965). *Physical climatology*. University of Chicago Press.
- Shahmohamadi, P., Che-Ani, A. I., Ramly, A., Maulud, K. N. & Mohd-Nor, M. F. (2010). Reducing urban heat island effects: A systematic review to achieve energy consumption balance. *International Journal of Physical Sciences*, 5(6), 626-636.
- Shen, T., Chow, D. H. C. & Darkwa, J. (2013). Simulating the influence of microclimatic design on mitigating the Urban Heat Island effect in the Hangzhou Metropolitan Area of China. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(1), ctt050. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt050>

- Slater, G. A. (2010). *The ability of urban parks to reduce air temperatures of surrounding neighbourhoods: A study of 4 Toronto parks* (Tesis de maestría). University of Guelph.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C. & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4)arXiv 1480307, 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- SUHET. (2015). *SENTINEL-2 User Handbook* (2.^a ed., inf. téc.). European Space Agency. https://earth.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Taha, H. (2017). Characterization of Urban Heat and Exacerbation: Development of a Heat Island Index for California. *Climate*, 5(3), 59. <https://doi.org/10.3390/cli5030059>
- Tasumi, M., Allen, R. G. & Trezza, R. (2008). At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 51-63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:2\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51))
- Taud, H. & Parrot, J. (2008). La urbanización difusa de la Ciudad de México: Otras miradas sobre un espacio antiguo. En J. Delgado (Ed.). IG-UNAM.
- Tello, E. (1996). Ciudades sostenibles: un cambio de rumbo. *Mientras tanto*, (64), 35-61. <http://www.jstor.org/stable/27820253%20Ciudades%20sostenibles>
- Torres, P. (2003). La metrópolis: equilibrio interno y proyección global. En P. Folch (Ed.), *El territorio como sistema: Conceptos y herramientas de ordenación* (pp. 121-137). Diputación de Barcelona.
- Tripathy, P. & Kumar, A. (2019). Monitoring and modelling spatio-temporal urban growth of Delhi using Cellular Automata and geoinformatics. *Cities*, 90(January), 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.01.021>
- Tsou, J., Zhuang, J., Li, Y. & Zhang, Y. (2017). Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. *Urban Science*, 1(1), 10. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010010>
- U.S Geological Survey. (2016). *LANDSAT 8 (L8) Data Users Handbook* (inf. téc.). Department of the Interior. U.S Geological Survey. Sioux Falls. <http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- Van Rossum, G. & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace. <https://doi.org/10.5555/1593511>

- Van Rossum, G. & Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam.
- Verón, E. (2010). Estimación De La Isla De Calor En Santa Teresita, Partido de la Costa, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica de América Central*, (45), 129-148.
- Voogt, J. & Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wackernagel, M. (1996). ¿Ciudades sostenibles? *Ecología Política*, (12), 43-50. <http://www.jstor.org/stable/20742894>
- Wandishin, M. S. & Brooks, H. E. (2002). On the relationship between Clayton's skill score and expected value for forecasts of binary events. *Meteorological Applications*, 9(4), 455-459. <https://doi.org/10.1017/S1350482702004085>
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A. & Zhao, S. (2015). An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268-4289. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>
- Wang, X. (2012). *Urban sprawl and sustainable development in China* (Tesis doctoral). <https://search-proquest-com.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/docview/1314435875?accountid=28692>
- Ward, B. & Dubos, R. (1983). *Only One Earth: The Care and Maintenance of a Small Planet*. W. W. Norton & Company.
- Warren, C. R. (2009). *Designed by Zoning: Evaluating the Spatial Effects of Land Use Regulations* (Dissertation/Thesis) [Copyright - Copyright ProQuest, UMI Dissertations Publishing 2009; Last updated - 2015-08-22; First page - n/a]. University of California, Berkeley.
- Wheeler, S. (2004). *Planning for Sustainability*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203300565>
- Wheeler, S. (2010). A new conception of planning in the era of climate change. *Berkeley Planning Journal*, 23(1), 18-26.
- Wilcoxon, F. (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*, 1(6), 80-83.

- Wolter, K. & Timlin, M. S. (1993). Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index.
- Wukelic, G., Gibbons, D., Martucci, L. & Foote, H. (1989). Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper thermal band. *Remote Sensing of Environment*, 28(100), 339-347. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90125-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90125-9)
- Wundram, D. & Löffler, J. (2008). High-resolution spatial analysis of mountain landscapes using a low-altitude remote sensing approach. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 961-974. <https://doi.org/10.1080/01431160701352113>
- Yue, W., Liu, X., Zhou, Y. & Liu, Y. (2019). Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities. *Science of the Total Environment*, 671, 1036-1046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.421>
- Zhang, J., Wang, Y. & Li, Y. (2006). A C++ program for retrieving land surface temperature from the data of Landsat TM/ETM+ band6. *Computers and Geosciences*, 32(10), 1796-1805. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.001>
- Zhang, N. & Chen, Y. (2014). A case study of the upwind urbanization influence on the urban heat Island effects along the Suzhou-Wuxi corridor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(2), 333-345. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0219.1>
- Zhang, T., Hoell, A., Perlwitz, J., Eischeid, J., Murray, D., Hoerling, M. & Hamill, T. M. (2019). Towards Probabilistic Multivariate ENSO Monitoring. *Geophysical Research Letters*, 46(17-18), 10532-10540. <https://doi.org/10.1029/2019GL083946>
- Zhao, S., Zhou, D. & Liu, S. (2016). Data concurrency is required for estimating urban heat island intensity. *Environmental Pollution*, 208, 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.037>

Apéndice A

Imágenes satelitales

CUADRO A.1: Imágenes multiespectrales Sentinel-2 utilizadas en la clasificación a detalle mediante *Random Forest*. Proyección UTM 16 N (WGS84). Resolución espacial 15 m.

Sensor	ID	Fecha
Sentinel-2A	S2A_MSIL1C_20160302T155402	2016-03-02 T 15:54:02
Sentinel-2A	S2A_MSIL1C_20170126T160501	2017-01-26 T 16:05:01
Sentinel-2B	S2B_MSIL1C_20180317T160509	2018-03-17 T 16:05:09
Sentinel-2A	S2A_MSIL1C_20190205T160511	2019-02-05 T 16:05:11

CUADRO A.2: Imágenes multiespectrales Landsat 5 TM utilizadas en el TST y Tasseled Cap. Proyección UTM 16 N (WGS84). Resolución espacial 30 m.

Sensor	ID	Fecha
Landsat5 TM	LT50150531985034XXX01	1985-02-03 T 15:24:49.8800880Z
Landsat5 TM	LT50150531985082AAA09	1985-03-23 T 15:24:49.1250810Z
Landsat5 TM	LT50150531986021XXX03	1986-01-21 T 15:21:39.8800630Z
Landsat5 TM	LT50150531986037XXX18	1986-02-06 T 15:21:18.4820190Z
Landsat5 TM	LT50150531987072AAA09	1987-03-13 T 15:16:13.4700000Z
Landsat5 TM	LT50150531989365CPE02	1989-12-31 T 15:17:22.1990940Z
Landsat5 TM	LT50150531991211XXX03	1991-07-30 T 15:17:53.4600310Z
Landsat5 TM	LT50150531997035AAA00	1997-02-04 T 15:19:01.0850060Z
Landsat5 TM	LT50150531997355CPE03	1997-12-21 T 15:29:19.4450000Z
Landsat5 TM	LT50150531999041CPE00	1999-02-10 T 15:33:37.2360000Z
Landsat5 TM	LT50150531999073AAA01	1999-03-14 T 15:33:26.5410130Z
Landsat5 TM	LT50150532000044AAA02	2000-02-13 T 15:28:23.5800940Z
Landsat5 TM	L505053_053200101114	2001-01-14 T 15:34:15.7300130Z
Landsat5 TM	LT50150532001030XXX01	2001-01-30 T 15:34:22.7940500Z
Landsat5 TM	LT50150532008162CHM00	2008-06-10 T 15:42:13.4510810Z

CUADRO A.3: Imágenes multispectrales Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas en el TST y Tasseled Cap. Proyección UTM 16 N (WGS84). Resolución espacial 30 m.

Sensor	ID	Fecha
Landsat8 OLI	LC80150532013255LGN00	2013-09-12 T 15:56:24.6939557Z
Landsat8 OLI	LC80150532014018LGN01	2014-01-18 T 15:55:33.7077470Z
Landsat8 OLI	LC80150532014034LGN00	2014-02-03 T 15:55:26.8705255Z
Landsat8 OLI	LC80150532014050LGN00	2014-02-19 T 15:55:13.398480Z
Landsat8 OLI	LC80150532014082LGN02	2014-03-23 T 15:54:46.2203390Z
Landsat8 OLI	LC80150532014354LGN02	2014-12-20 T 15:54:32.5660960Z
Landsat8 OLI	LC80150532015053LGN01	2015-02-22 T 15:54:13.4720590Z
Landsat8 OLI	LC80150532015069LGN01	2015-03-10 T 15:54:03.4773560Z
Landsat8 OLI	LC80150532015149LGN01	2015-05-29 T 15:53:29.5091280Z
Landsat8 OLI	LC80150532015213LGN01	2015-08-01 T 15:54:02.1773190Z
Landsat8 OLI	LC80150532015277LGN02	2015-10-04 T 15:54:26.1291940Z
Landsat8 OLI	LC80150532015293LGN01	2015-10-20 T 15:54:28.0839950Z
Landsat8 OLI	LC80150532015357LGN01	2015-12-23 T 15:54:33.3874220Z *
Landsat8 OLI	LC80150532016008LGN01	2016-01-08 T 15:54:28.7007850Z
Landsat8 OLI	LC80150532016024LGN01	2016-01-24 T 15:54:29.8063800Z
Landsat8 OLI	LC80150532016088LGN01	2016-03-28 T 15:54:06.4322640Z
Landsat8 OLI	LC80150532016104LGN01	2016-04-13 T 15:54:00.7884030Z
Landsat8 OLI	LC80150532016168LGN01	2016-06-16 T 15:54:0.67707920Z
Landsat8 OLI	LC80150532016280LGN01	2016-10-06 T 15:54:41.852957Z
Landsat8 OLI	LC80150532016312LGN02	2016-11-07 T 15:54:44.9881400Z
Landsat8 OLI	LC80150532016360LGN01	2016-12-15 T 15:54:39.1196850Z
Landsat8 OLI	LC80150532017026LGN01	2017-01-26 T 15:54:30.2236900Z
Landsat8 OLI	LC80150532017042LGN00	2017-02-11 T 15:54:22.1525950Z
Landsat8 OLI	LC80150532017058LGN00	2017-02-27 T 15:54:16.9721550Z
Landsat8 OLI	LC80150532017090LGN00	2017-03-31 T 15:53:59.7393450Z
Landsat8 OLI	LC80150532017138LGN00	2017-05-18 T 15:53:53.2449740Z
Landsat8 OLI	LC80150532017170LGN00	2017-06-19 T 15:54:08.7486330Z
Landsat8 OLI	LC80150532017234LGN00	2017-08-22 T 15:54:29.7633640Z
Landsat8 OLI	LC80150532017314LGN00	2017-11-10 T 15:54:41.1241000Z
Landsat8 OLI	LC80150532017362LGN00	2017-12-28 T 15:54:35.2663050Z
Landsat8 OLI	LC80150532018045LGN00	2018-02-14 T 15:54:13.6229860Z
Landsat8 OLI	LC80150532018061LGN00	2018-03-02 T 15:54:06.4011610Z
Landsat8 OLI	LC80150532018077LGN00	2018-03-18 T 15:53:57.5594010Z
Landsat8 OLI	LC80150532018093LGN01	2018-04-03 T 15:53:50.5904000Z
Landsat8 OLI	LC80150532018125LGN00	2018-05-05 T 15:53:32.3212839Z
Landsat8 OLI	LC80150532018237LGN00	2018-08-25 T 15:53:55.7465190Z
Landsat8 OLI	LC80150532018317LGN00	2018-11-13 T 15:54:21.1568099Z
Landsat8 OLI	LC80150532018349LGN00	2018-12-15 T 15:54:17.1141090Z
Landsat8 OLI	LC80150532018365LGN00	2018-12-31 T 15:54:17.3796350Z
Landsat8 OLI	LC80150532019032LGN00	2019-02-01 T 15:54:11.0144950Z
Landsat8 OLI	LC80150532019048LGN00	2019-02-17 T 15:54:08.9914050Z
Landsat8 OLI	LC80150532019064LGN00	2019-03-05 T 15:54:04.4111220Z
Landsat8 OLI	LC80150532019240LGN00	2019-08-28 T 15:54:36.3129820Z

Apéndice B

Propiedades de radiancia de materiales naturales

Las siguientes características definen varios elementos según su radiancia.

Superficie	Rasgos principales	Albedo [α]	Emisividad [ϵ]
Suelo	Oscuro, húmedo	0.05 -	0.90 -
	Iluminado, seco	0.40	0.98
Desierto		0.20 - 0.45	0.84 - 0.91
Pasto	Alto (1.0 m)	0.16 -	0.90 -
	Corto (0.02m)	0.26	0.95
Cultivos agrícolas, tundra		0.18 - 0.25	0.90 - 0.99
Huertos		0.15 - 0.20	
Bosques			
	Deciduos		
	Descubierto	0.15 -	0.97
	Cubierto de hojas	0.20	0.98
	Coníferas	0.05 - 0.15	0.97 - 0.99
Agua	ángulo de zenit pequeño	0.03 - 0.10	0.925 - 0.97
	ángulo de zenit largo	0.10 - 1.00	0.92 - 0.97
Nieve	Vieja	0.40 -	0.82 -
	Fresca	0.95	0.99
Hielo	Mar	0.30 - 0.45	0.92 - 0.97
	Glaciar	0.20 - 0.40	

CUADRO B.1: Propiedades radiativas de materiales naturales. **Fuente:** (T. Oke, 2002; Sellers, 1965)

Superficie	Rasgos principales	Albedo [α]	Emisividad [ϵ]
Caminos	Asfalto	0.05 - 0.20	0.95
Muros	Concreto	0.10 - 0.35	0.71 - 0.90
	Ladrillo	0.20 - 0.40	0.90 - 0.92
	Piedra	0.20 - 0.35	0.85 - 0.95
	Madera		0.90
Techos	Alquitrán y grava	0.08 - 0.18	0.92
	Azulejo	0.10 - 0.35	0.90
	Pizarra	0.10	0.90
	Paja	0.15 - 0.20	
Ventanas	Hierro corrugado	0.10 - 0.16	0.13 - 0.28
	Vidrio claro (\angle zenit $< 40^\circ$)	0.08	0.87 - 0.94
	Vidrio claro (\angle zenit entre $40^\circ - 80^\circ$)	0.09 - 0.52	0.87 - 0.92
Pintura	Blanca, Cal blanca	0.50 - 0.90	0.85 - 0.95
	Roja, café, verde	0.20 - 0.35	0.85 - 0.95
	Negra	0.02 - 0.15	0.90 - 0.98
Áreas urbanas ¹	Rango	0.10 - 0.27	0.85 - 0.96
	Promedio	0.15	≈ 0.95

CUADRO B.2: Propiedades radiativas de típicos de áreas y materiales urbanos. **Fuente:** (T. Oke, 2002; Sellers, 1965)

Apéndice C

Estaciones Meteorológicas

Con los registros de las estaciones meteorológicas se establece la temperatura del aire en el momento en el que los sensores Landsat registraron las imágenes satelitales. Esto con el propósito de realizar los cálculos para estimar la Temperatura superficial. Además, se utilizan para establecer la línea climática base y el patrón de variabilidad. En la investigación se utilizan los datos de las siguientes estaciones meteorológicas.

CUADRO C.1: Estaciones meteorológicas

Código	Estación	Administración	Long.	Lat.	Altitud
40101	UNA	UNA	-84.109	10.00028	1154
73123	ITCR	IMN	-83.9086	9.8522	1360
84023	FB-UCR	IMN	-84.2666	10.0166	840
84046	San Josecito-Heredia	IMN	-84.0255	10.0244	1450
84111	Santa Lucía-Heredia	IMN	-84.1117	10.02194	1200
84124	SL-Poas	IMN	-84.3	10.11666	1360
84139	CIGEFI	IMN	-84.0453	9.936388	1210
84141	IMN-SJ	IMN	-84.0697	9.937947	1181
84169	A. Juan Santamaría	IMN	-84.2147	9.990681	913
84181	IZTARU	IMN	-83.9689	9.88944	1680
84189	LAGUNA-FRAIJANES	IMN	-84.1935	10.13733	1720
84191	RECOPE	IMN	-84.2958	10.00528	740
84193	A. Tobias Bolaños	IMN	-84.138	9.956592	997
84197	Santa Bárbara	IMN	-84.1658	10.03333	1070
84199	Belén	IMN	-84.1856	9.975	926
84203	Zapote	IMN	-84.0592	9.92277	1192
84205	Getsemani	IMN	-84.1031	10.0325	1389
84221	Vólcan Poás	IMN	-84.232	10.18917	2598

A continuación se establece los faltantes de datos en las estaciones meteorológicas, y se escogen aquellas que pueden ser estandarizadas por medio de un filtro de normalización de Kalman. Una vez realizado el análisis estadístico, se procede a establecer la línea de

tendencia con respecto a la serie de tiempo en estudio. Se establece como criterio de selección las estaciones meteorológicas que: a) mantienen un registro lo suficientemente extenso y b) están localizadas en la cercanía del área de estudio. En los cuadros C.2 y C.3, se detalla las estaciones meteorológicas utilizadas y el análisis de completitud de los registros.

C.1. Análisis de completitud de las estaciones meteorológicas

CUADRO C.2: Estaciones meteorológicas IMN: Análisis de completitud de los registros de la variable temperatura.

Cod	Estación	Long	Lat	Altitud	Período	Años	Registros				
							Total	Completos	Incompletos	% Incompletos	
40101	UNA	-84.109	10.00028	1154	2015	2018	3	30947	30941	6	0.02
73123	ITCR	-83.90861	9.8522	1360	1997	2019	22	187800	187342	458	0.24
84023	FB-UCR	-84.2666	10.0166	840	1985	2002	17	149760	145896	3864	2.65
84046	San Josecito-Heredia	-84.0255	10.0244	1450	1987	2010	23	202368	190029	12339	6.49
84111	Santa Lucía-Heredia	-84.11166	10.02194	1200	1985	2001	16	147504	143913	3591	2.50
84124	San Luis-Poás	-84.3	10.11666	1360	1995	2002	7	61512	61359	153	0.25
84139	CIGEFI	-84.04528	9.936388	1210	1999	2019	20	176304	175773	531	0.30
84141	IMN-SJ	-84.06968	9.9379472	1181	1995	2019	24	201936	201382	554	0.28
84169	ASJO	-84.2147	9.9906805	913	1997	2019	22	180312	180010	302	0.17
84181	Iztaru	-83.96888	9.88944	1680	2003	2019	16	128928	128329	599	0.47
84189	Laguna-Fraijanes	-84.1935	10.13733	1720	2003	2019	16	141048	140605	443	0.32
84191	RECOPE	-84.29583	10.005277	740	1998	2019	21	176208	175734	474	0.27
84193	A. Tobías Bolaños	-84.138	9.95659166	997	2008	2019	11	90768	90606	162	0.18
84197	Santa Bárbara	-84.16583	10.03333	1070	2001	2019	18	148032	147442	590	0.40
84199	Belén	-84.18555	9.975	926	2004	2019	15	121776	121550	226	0.19
84203	Zapote	-84.05917	9.92277	1192	2007	2019	12	72912	72547	365	0.50
84205	Getsemani	-84.10306	10.0325	1389	2009	2015	6	48528	47473	1055	2.22
84221	Volcán Poás	-84.232	10.1891666	2598	2011	2019	8	39888	39252	636	1.62

CUADRO C.3: Estaciones meteorológicas IMN: Análisis de completitud de los registros de la variable humedad relativa.

Cod	Estación	Long	Lat	alt	Período	Años	Registros			
							Total	Completos	Incompletos	% Incompletos
40101	UNA	-84.109	10.00028	1154	2015 2018	3	30947	30941	6	0.02
73123	ITCR	-83.9086111	9.8522	1360	1997 2019	22	188256	186918	1338	0.72
84023	FB-UCR	-84.2666	10.0166	840	1985 2002	17	152472	148861	3611	2.43
84046	San Josecito-Heredia	-84.0255	10.0244	1450	1985 2010	25	219792	202271	17521	8.66
84111	Santa Lucía-Heredia	-84.11166	10.02194	1200	1985 2001	16	147552	143024	4528	3.17
84124	San Luis-Poás	-84.3	10.11666	1360	1995 2002	7	55968	55768	200	0.36
84139	CIGEFI	-84.045277	9.936388	1210	1999 2019	20	176256	175852	404	0.23
84141	IMN-SJ	-84.069675	9.9379472	1181	1995 2019	24	201936	201307	629	0.31
84169	ASJO	-84.2147027	9.9906805	913	1997 2019	22	180312	179641	671	0.37
84181	Iztaru	-83.96888	9.88944	1680	2003 2019	16	128496	123054	5442	4.42
84189	Laguna-Fraijanes	-84.1935	10.13733	1720	2003 2019	16	141072	139692	1380	0.99
84191	RECOPE	-84.295833	10.005277	740	1998 2019	21	176208	175776	432	0.25
84193	A. Tobías Bolaños	-84.138	9.95659166	997	2008 2019	11	90768	90637	131	0.14
84197	Santa Bárbara	-84.165833	10.03333	1070	2001 2019	18	148176	146622	1554	1.06
84199	Belén	-84.18555	9.975	926	2004 2019	15	121776	121126	650	0.54
84203	Zapote	-84.059166	9.92277	1192	2007 2019	12	72888	72551	337	0.46
84205	Getsemani	-84.103055	10.0325	1389	2009 2015	6	48528	47339	1189	2.51
84221	Volcán Poás	-84.232	10.1891666	2598	2011 2019	8	38232	37159	1073	2.89

Apéndice D

Series de tiempo

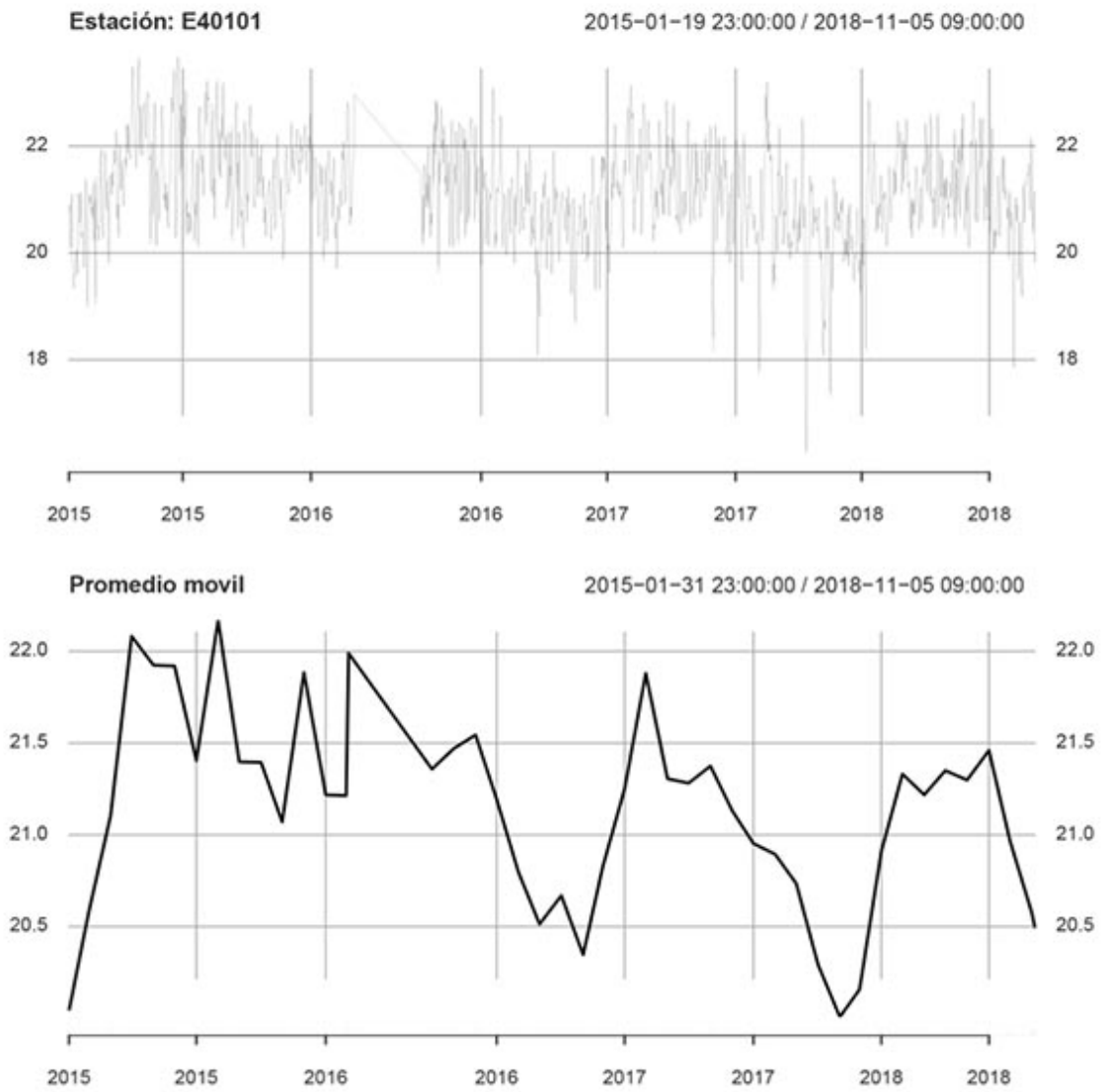


FIGURA D.1: Estación Meteorológica Universidad Nacional (40101): Serie temporal temperatura 2015 - 2018.

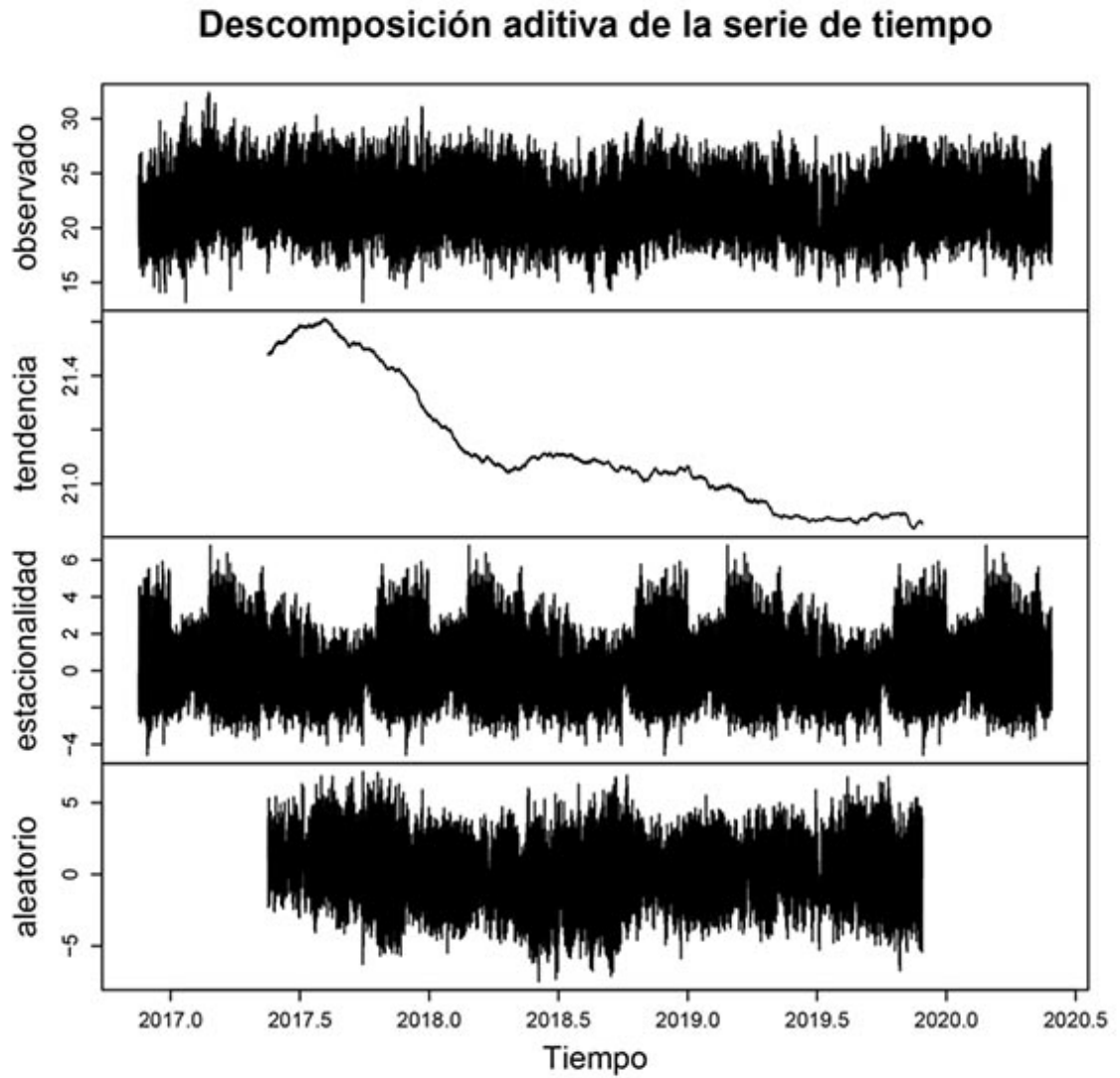


FIGURA D.2: Estación Meteorológica Universidad Nacional (40101):
Descomposición de serie de tiempo temperatura.

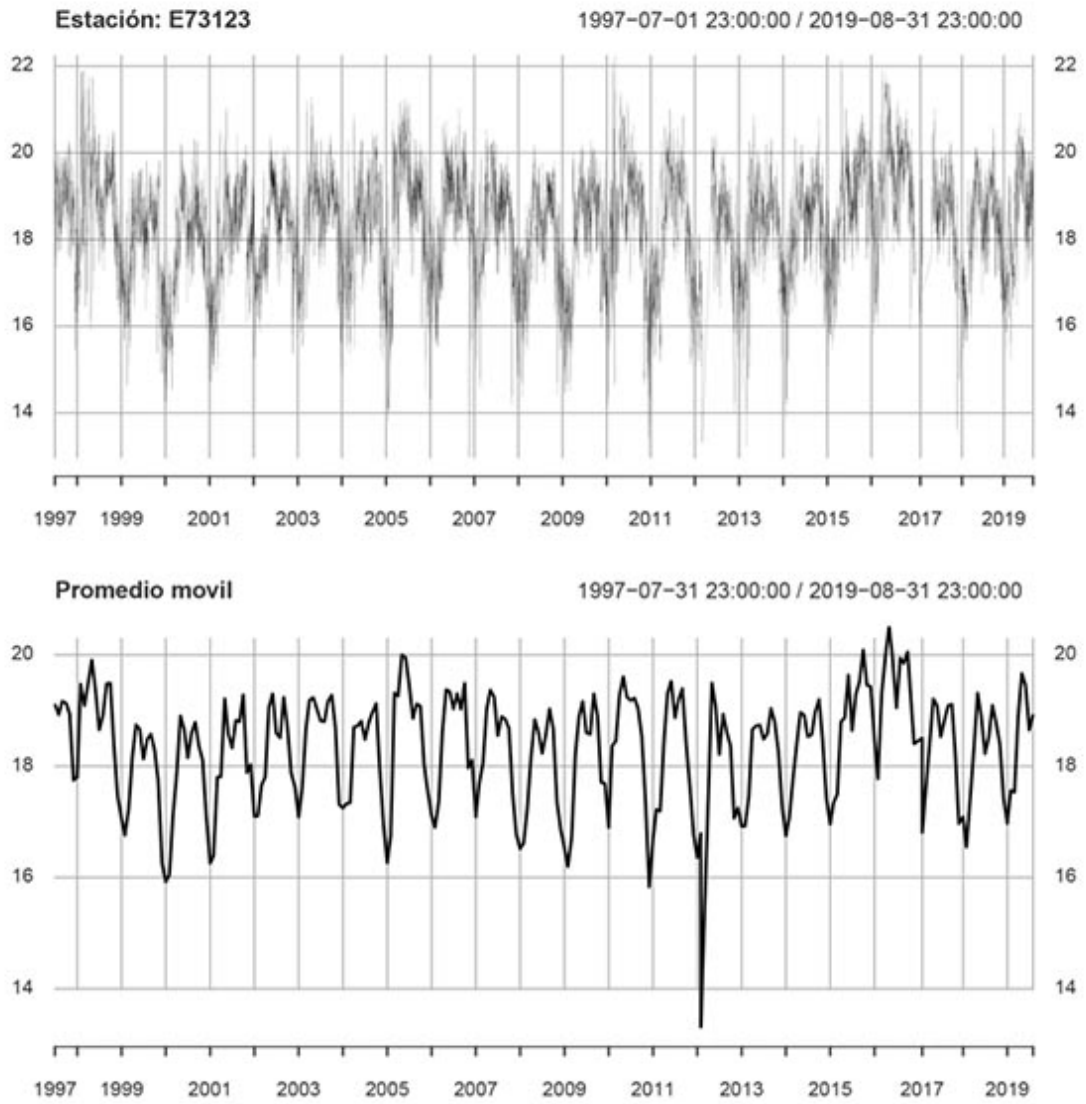


FIGURA D.3: Estación Meteorológica ITCR (73123): Serie temporal temperatura 1997 - 2019.

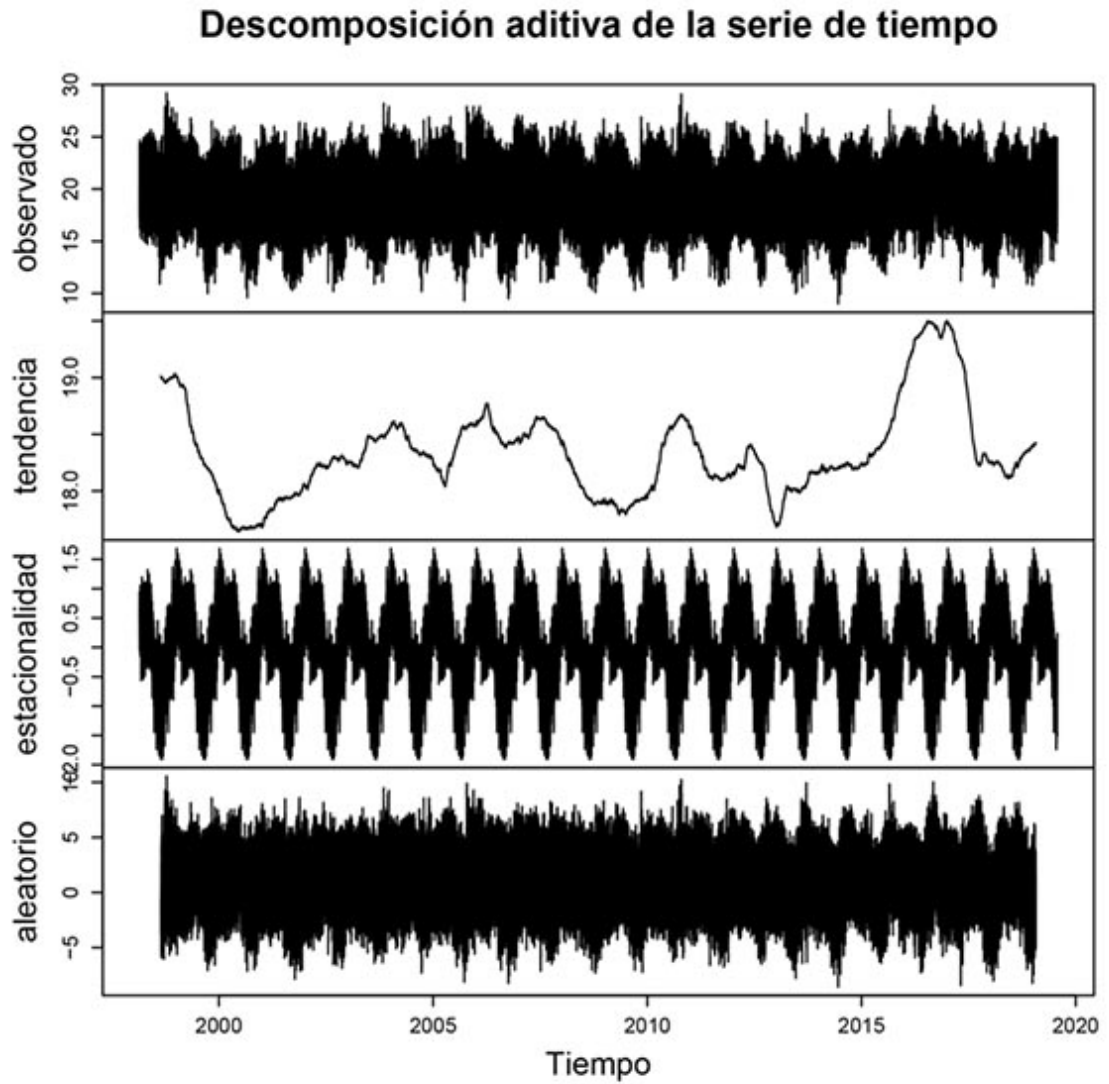


FIGURA D.4: Estación Meteorológica ITCR (73123):Descomposición de serie de tiempo temperatura.

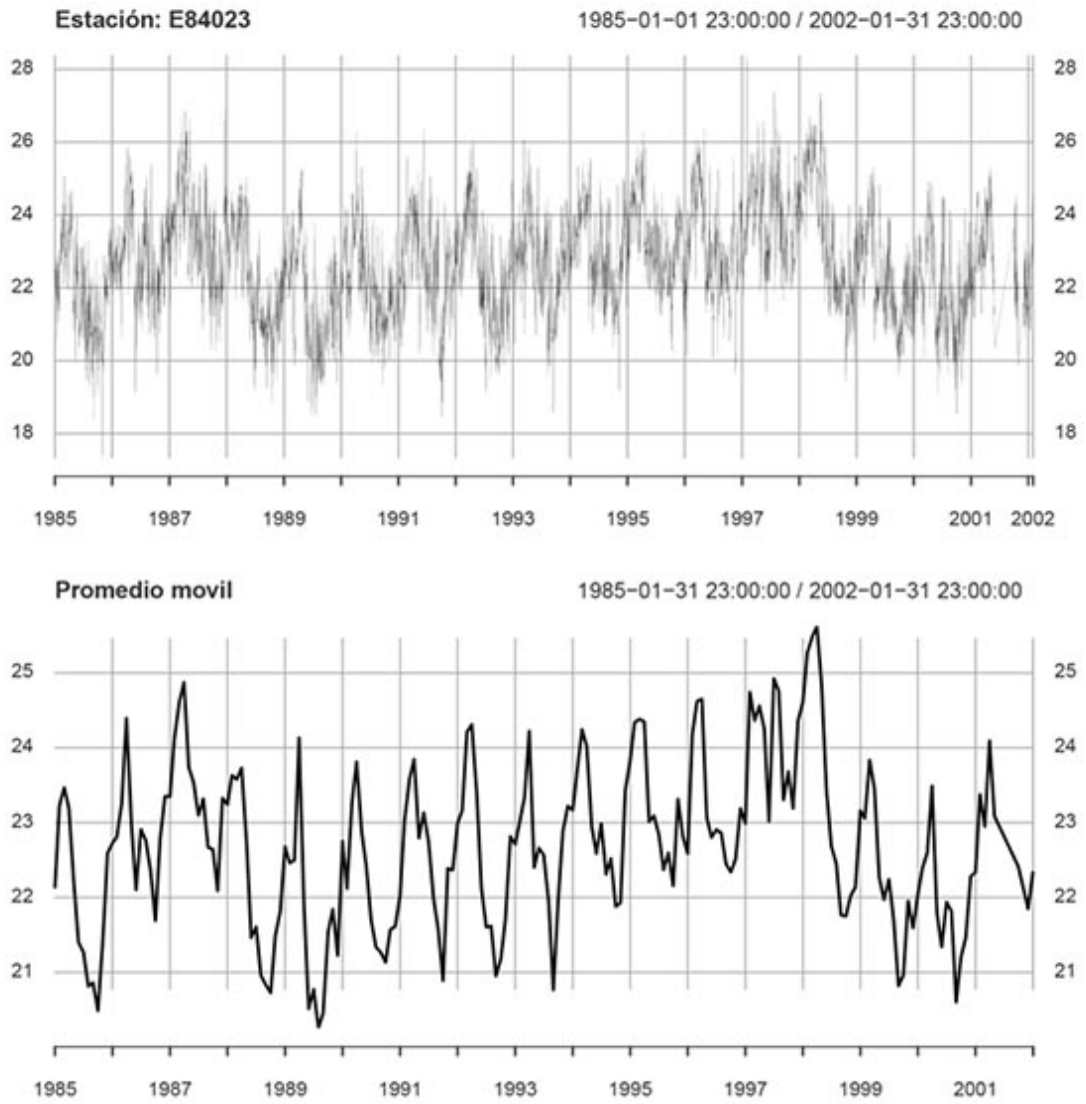


FIGURA D.5: Estación Meteorológica Fabio Baudrit - UCR (84023): Serie temporal temperatura 1985 - 2002.

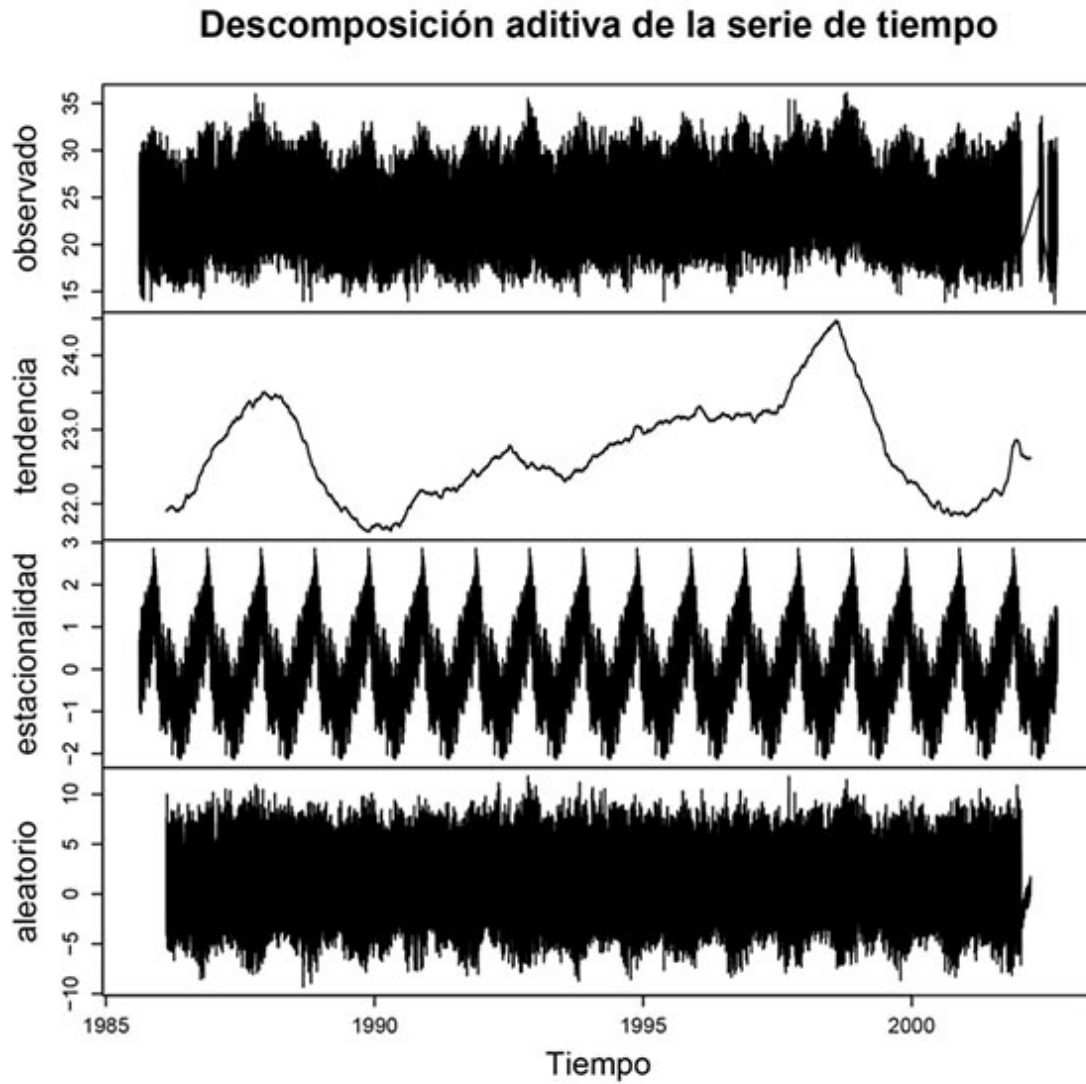


FIGURA D.6: Estación Meteorológica Fabio Baudrit - UCR (84023):Descomposición de serie de tiempo temperatura.

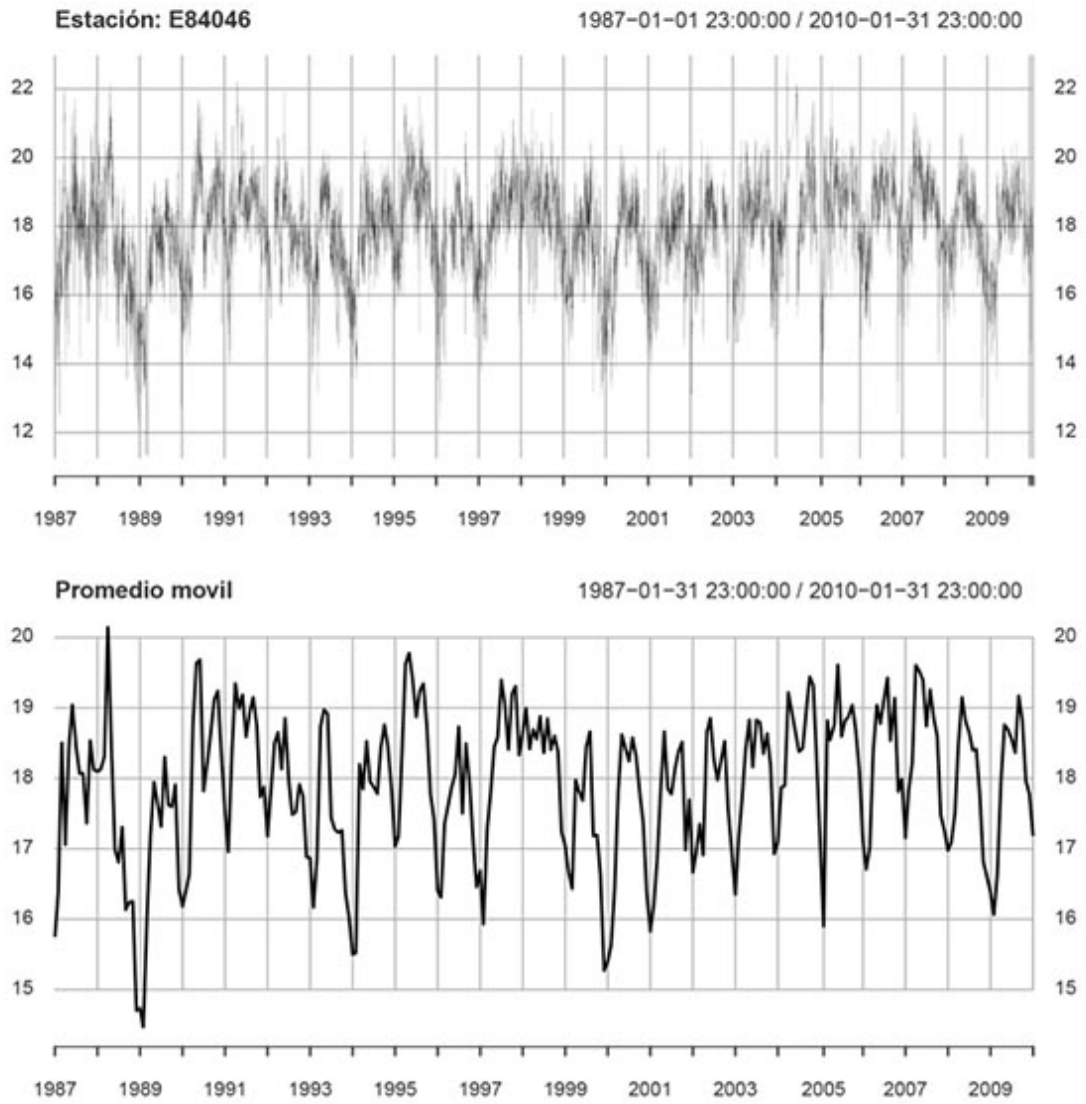


FIGURA D.7: Estación Meteorológica San Josecito - Heredia (84046): Serie temporal temperatura 1987 - 2010.

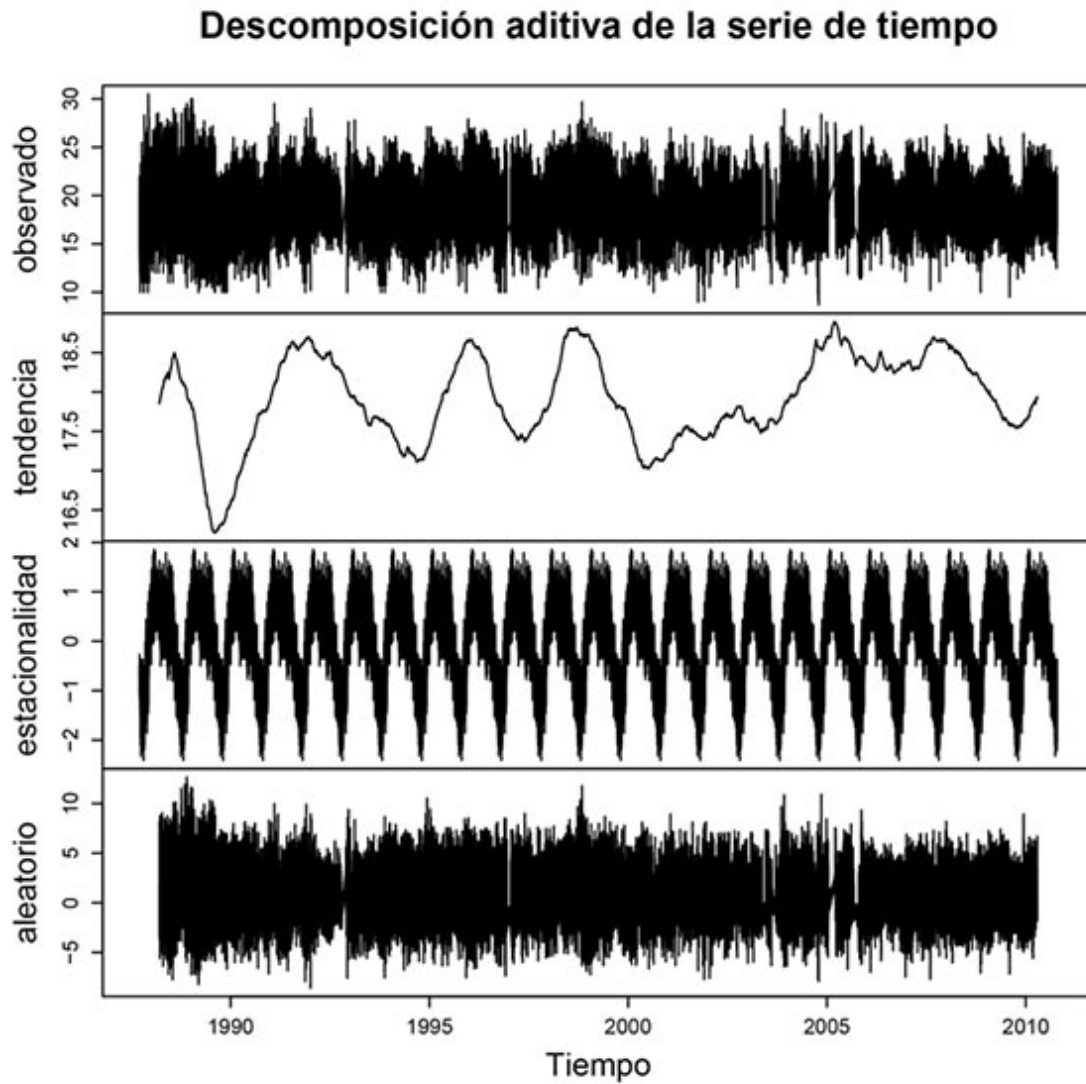


FIGURA D.8: Estación Meteorológica San Josecito - Heredia (84046):Descomposición de serie de tiempo temperatura.

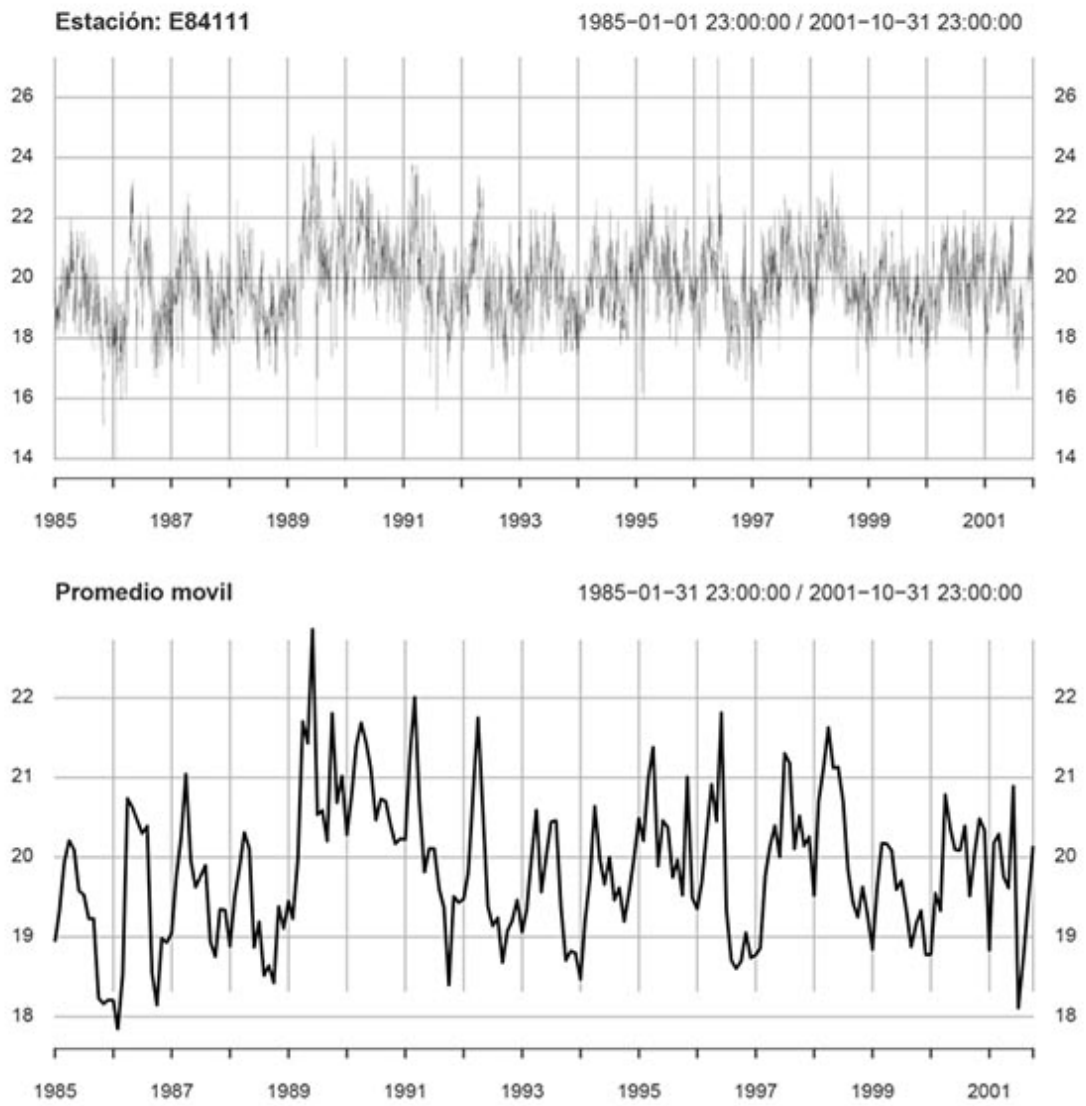


FIGURA D.9: Estación Meteorológica Santa Lucía - Heredia (84111): Serie temporal temperatura 1985 - 2001.

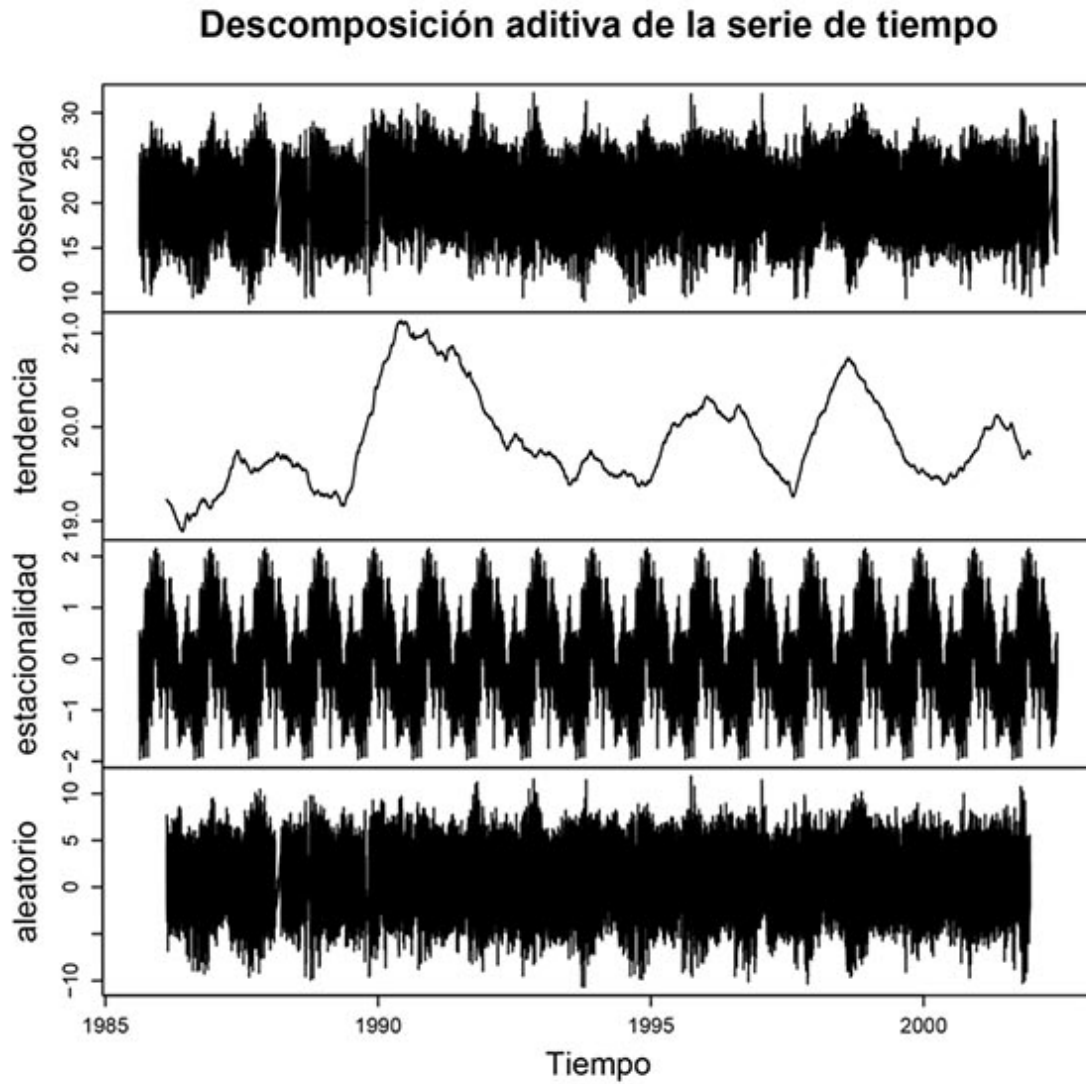


FIGURA D.10:
Estación Meteorológica Santa Lucía - Heredia (84111):Descomposición
de serie de tiempo temperatura.

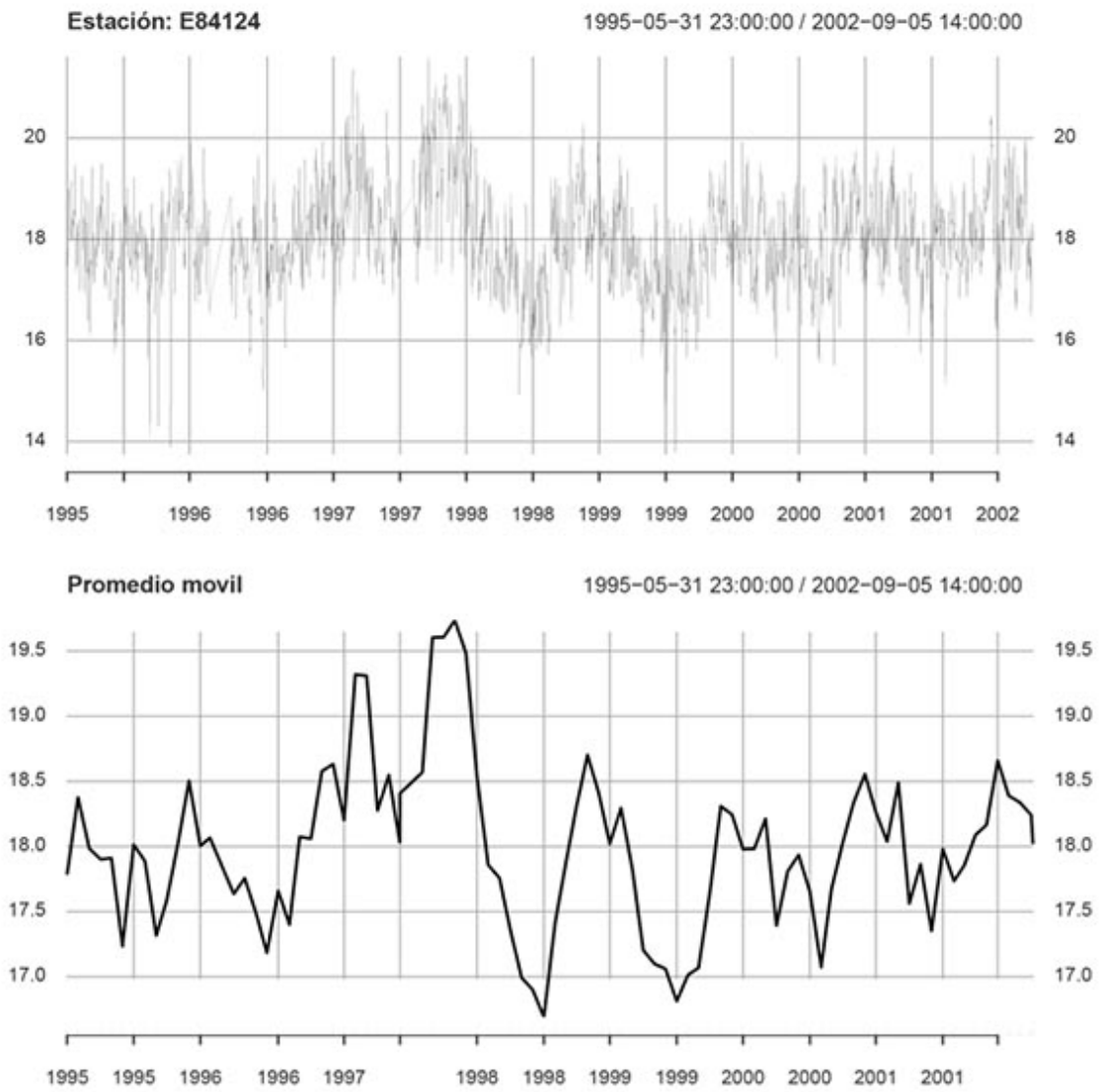


FIGURA D.11: Estación Meteorológica San Luis - Heredia (84124): Serie temporal temperatura 1995 - 2002.

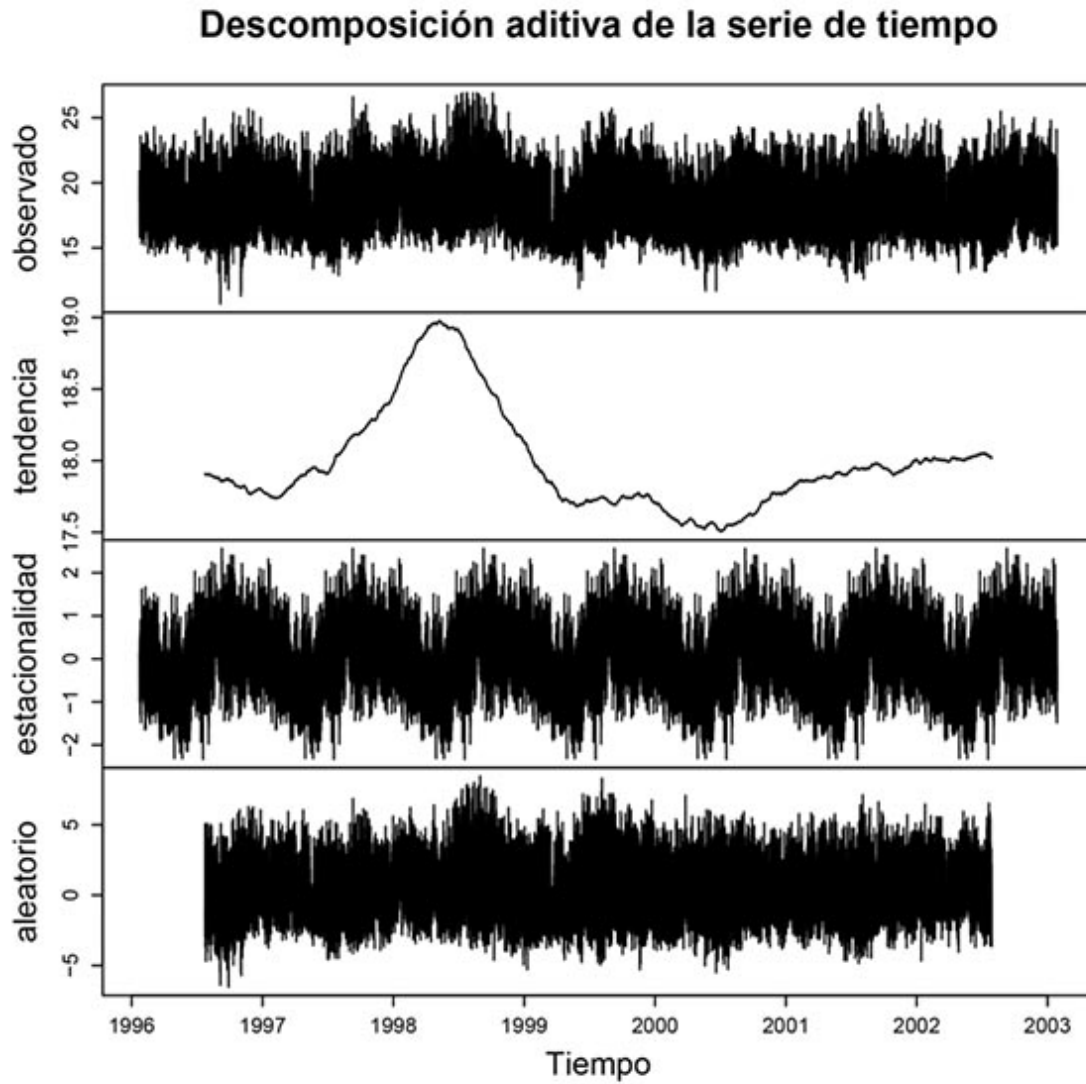


FIGURA D.12:
Estación Meteorológica Santa Lucía - Heredia (84124):Descomposición de serie de tiempo temperatura.

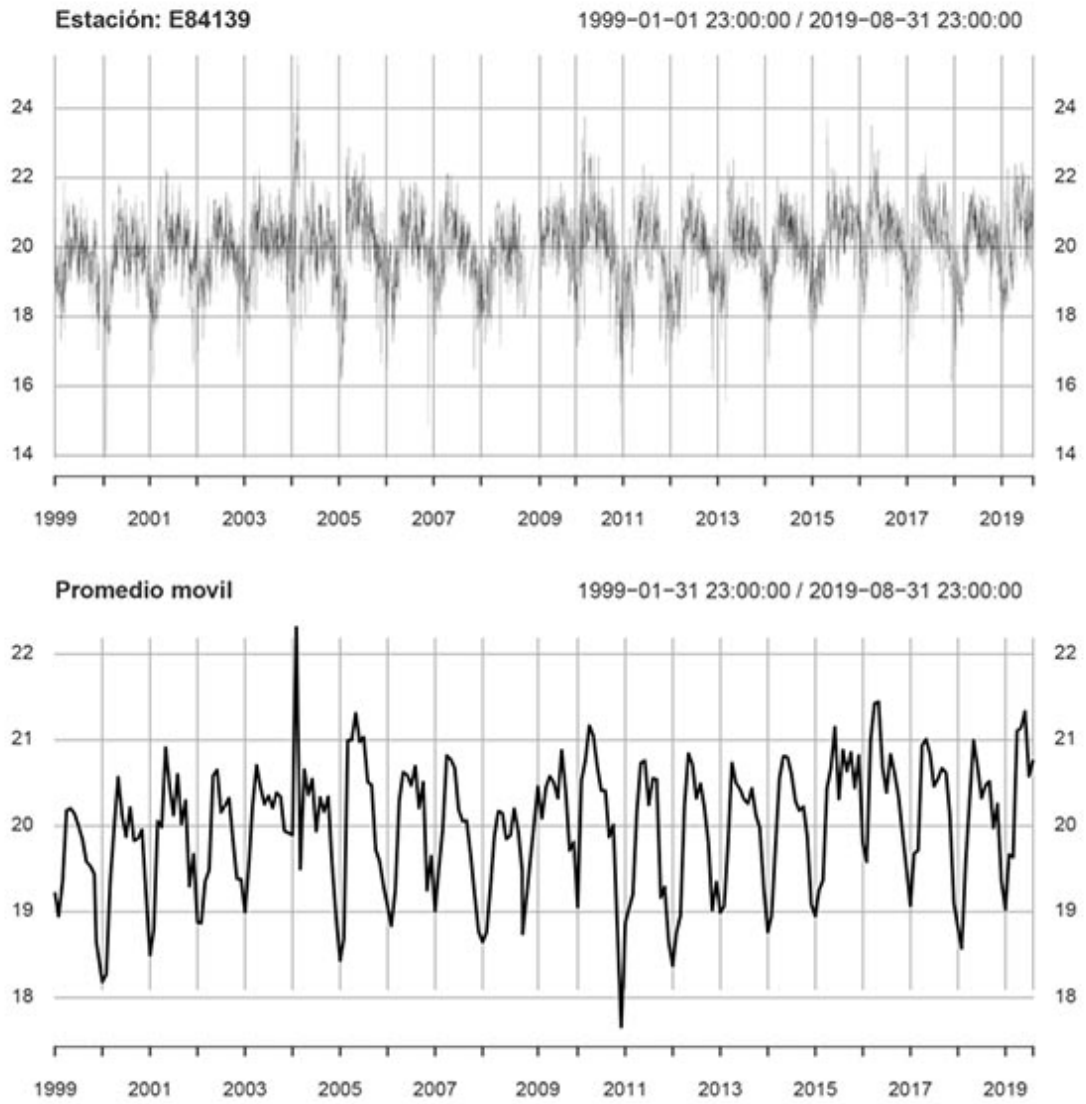


FIGURA D.13: Estación Meteorológica CIGEFI (84139): Serie temporal temperatura 1999 - 2019.

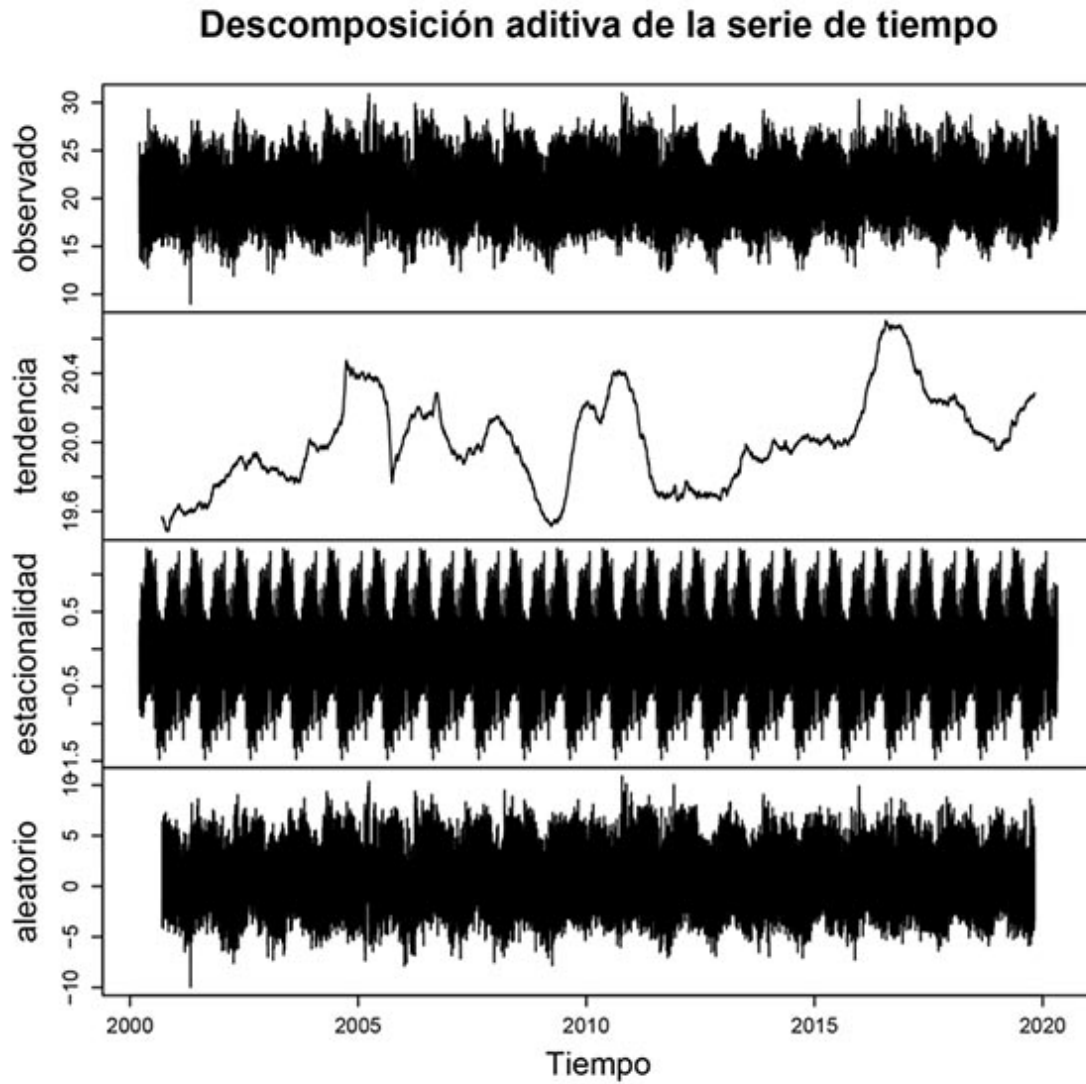


FIGURA D.14: Estación Meteorológica CIGEFI (84139):Descomposición de serie de tiempo temperatura.

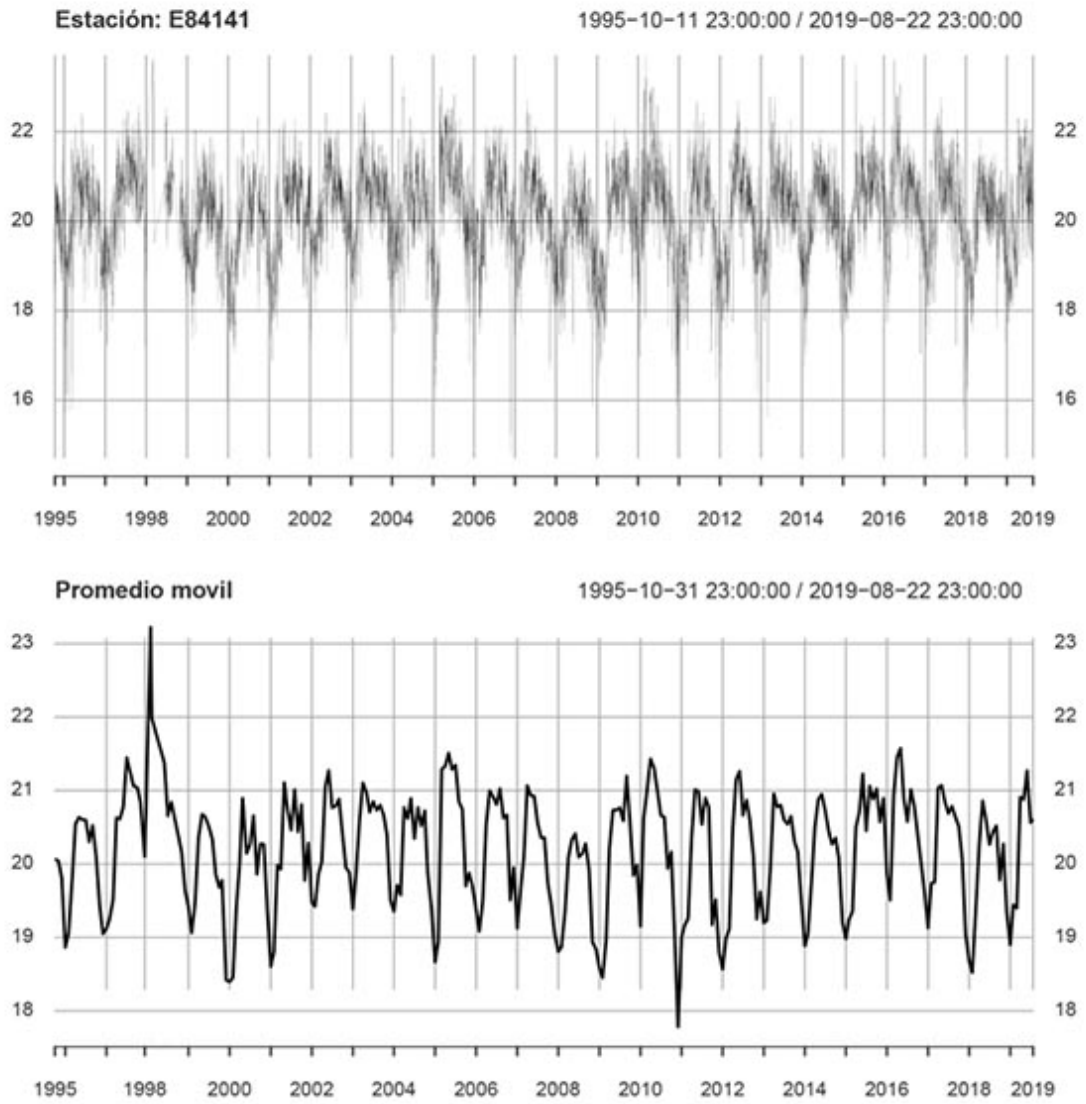


FIGURA D.15: Estación Meteorológica IMN - SJ (84141): Serie temporal temperatura 1995 - 2019.

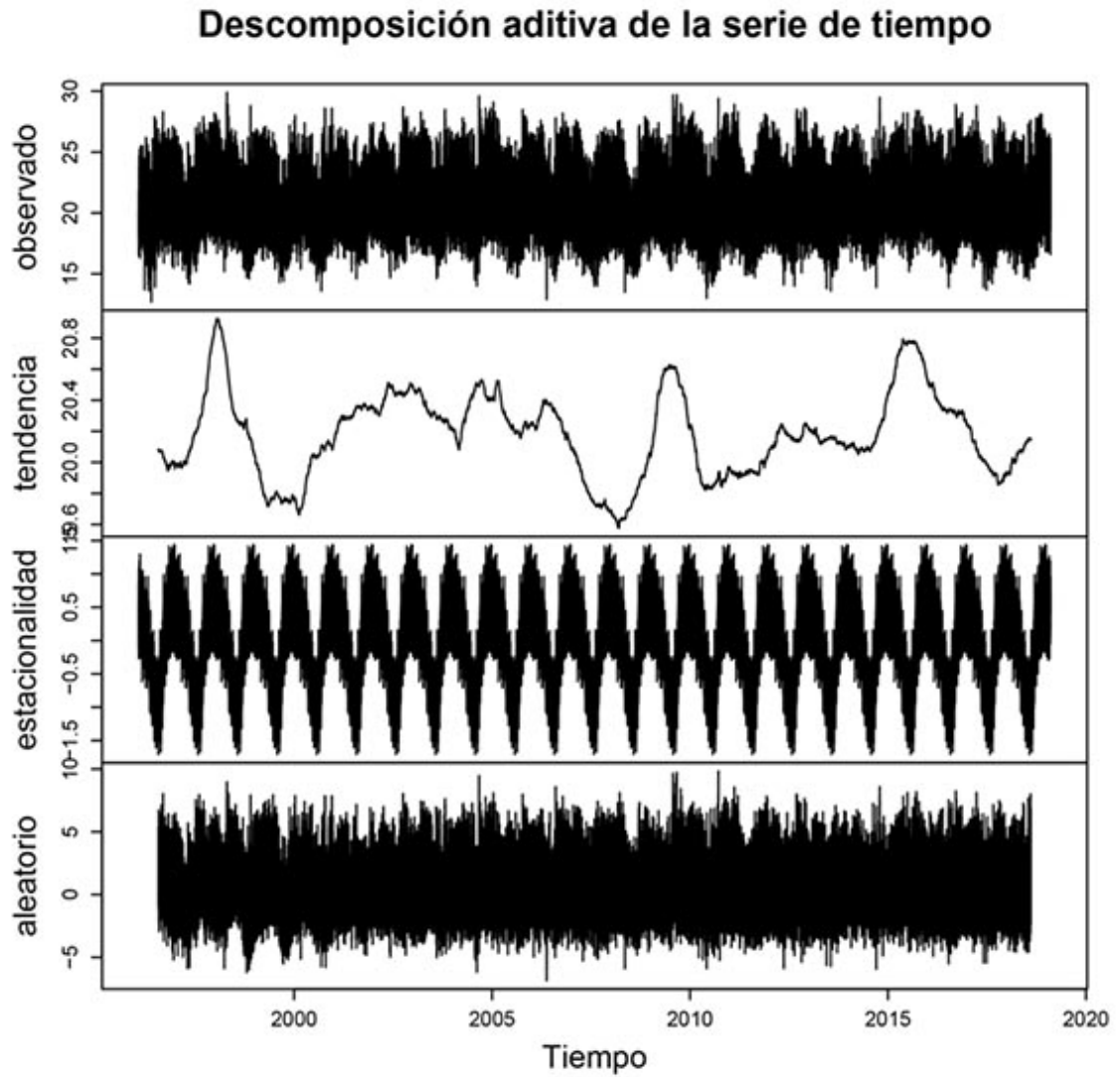


FIGURA D.16: Estación Meteorológica IMN - SJ (84141): Descomposición de serie de tiempo temperatura.

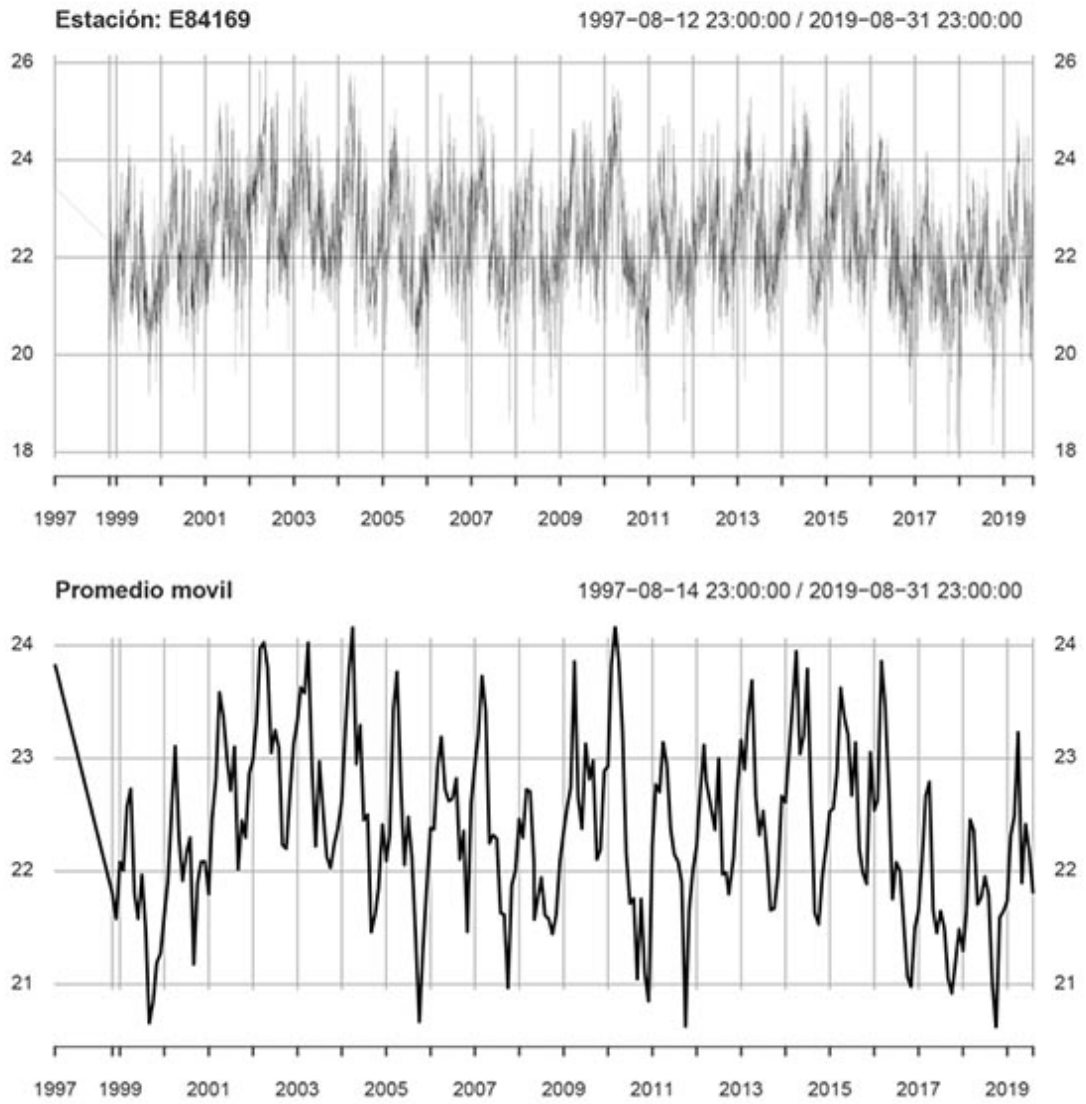


FIGURA D.17: Estación Meteorológica Aeropuerto Juan Santamaría (84169): Serie temporal temperatura 1997 - 2019.

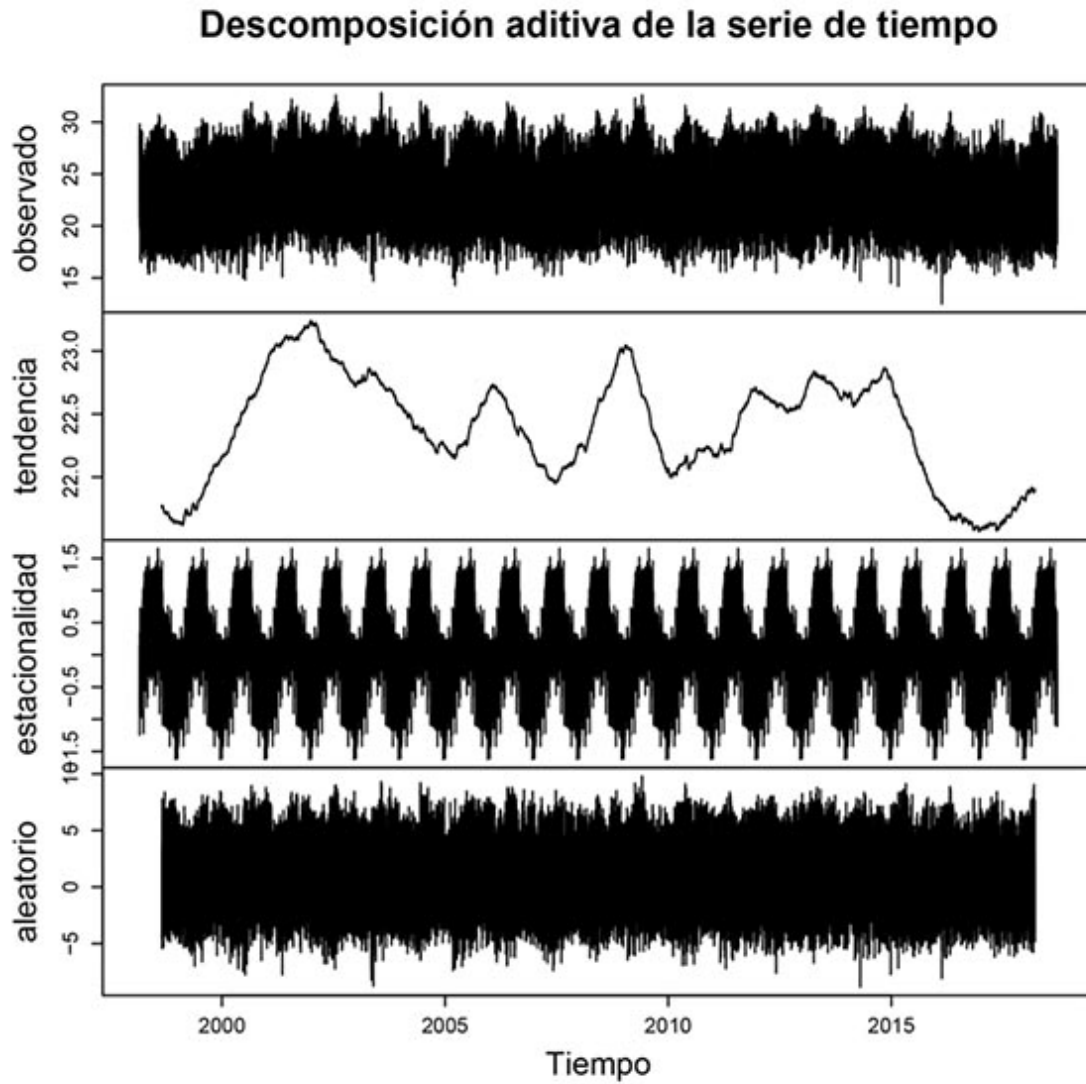


FIGURA D.18: Estación Meteorológica Aeropuerto Juan Santamaría (84169): Descomposición de serie de tiempo temperatura.

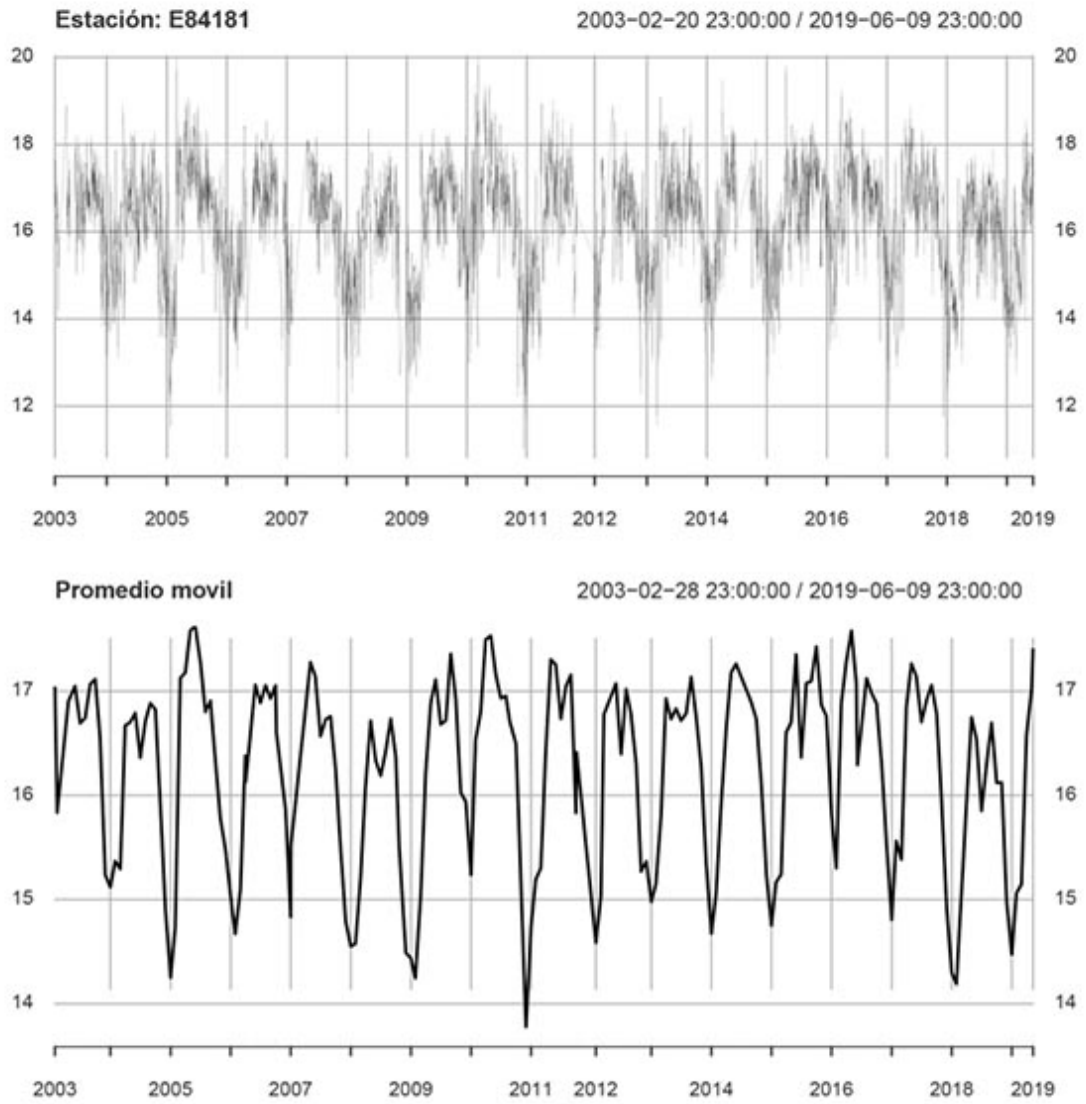


FIGURA D.19: Estación Meteorológica Iztaru (84181): Serie temporal temperatura 2003 - 2019.

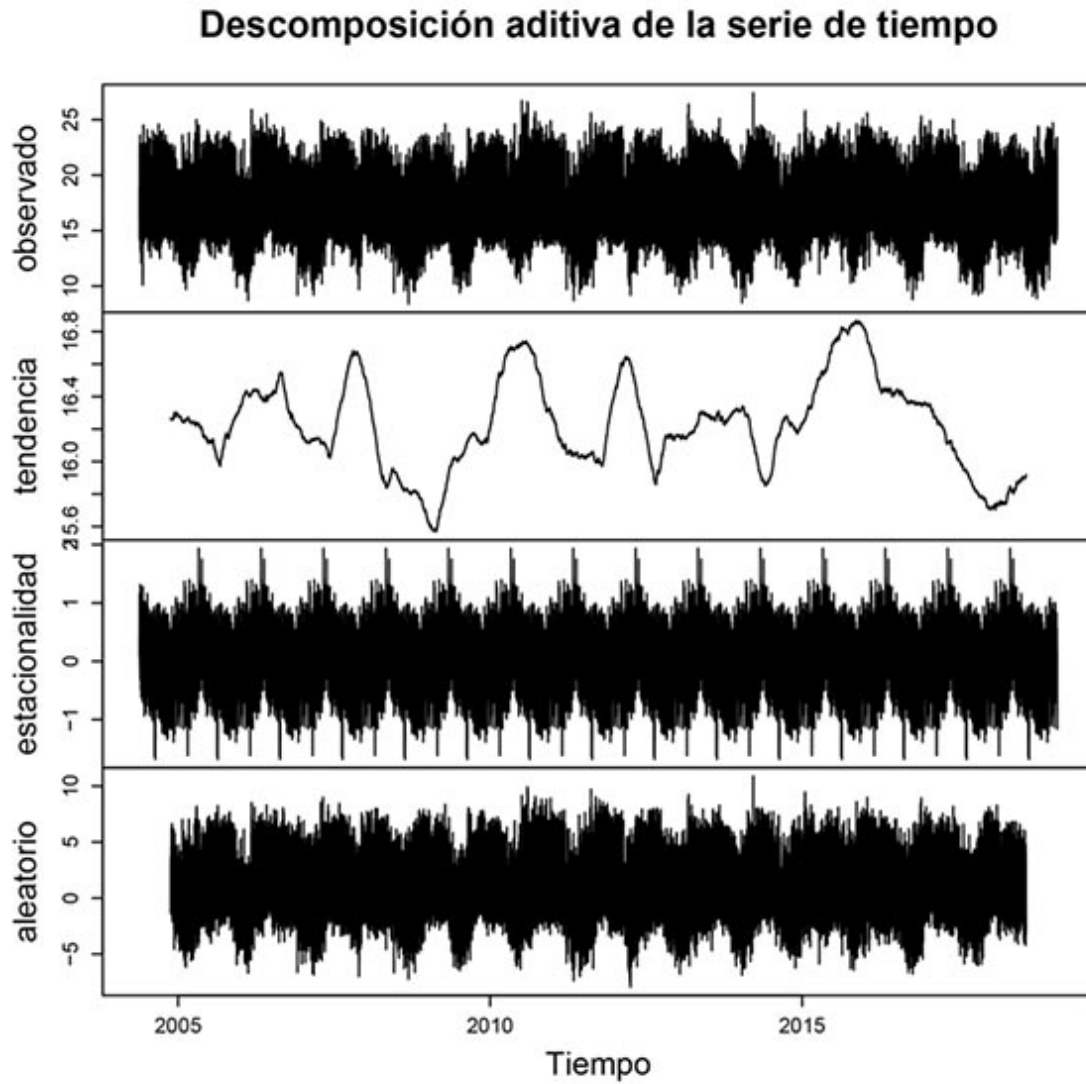


FIGURA D.20: Estación Meteorológica Iztaru (84181): Descomposición de serie de tiempo temperatura.

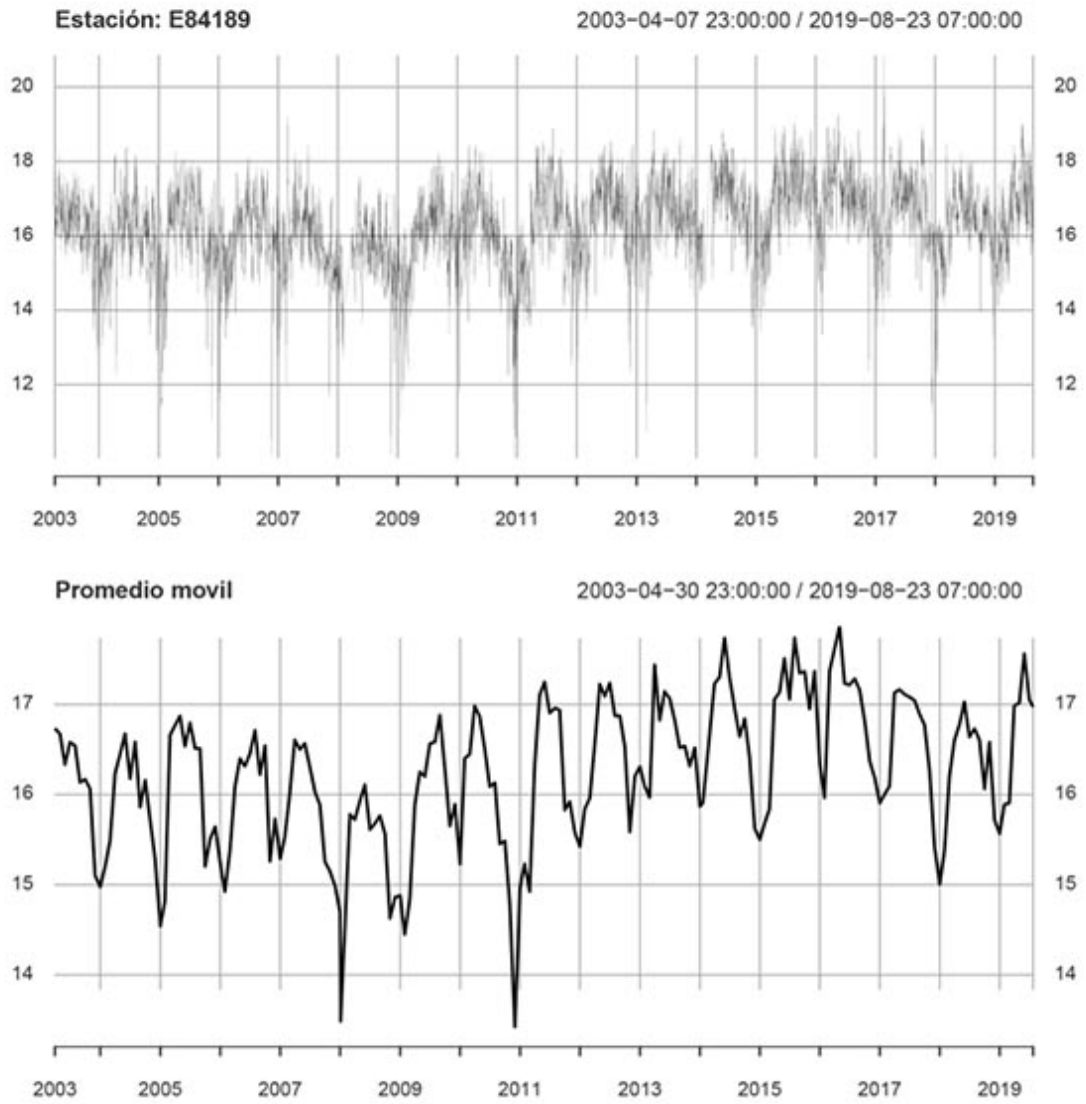


FIGURA D.21: Estación Meteorológica Laguna - Fraijanes (84189): Serie temporal temperatura 2003 - 2019.

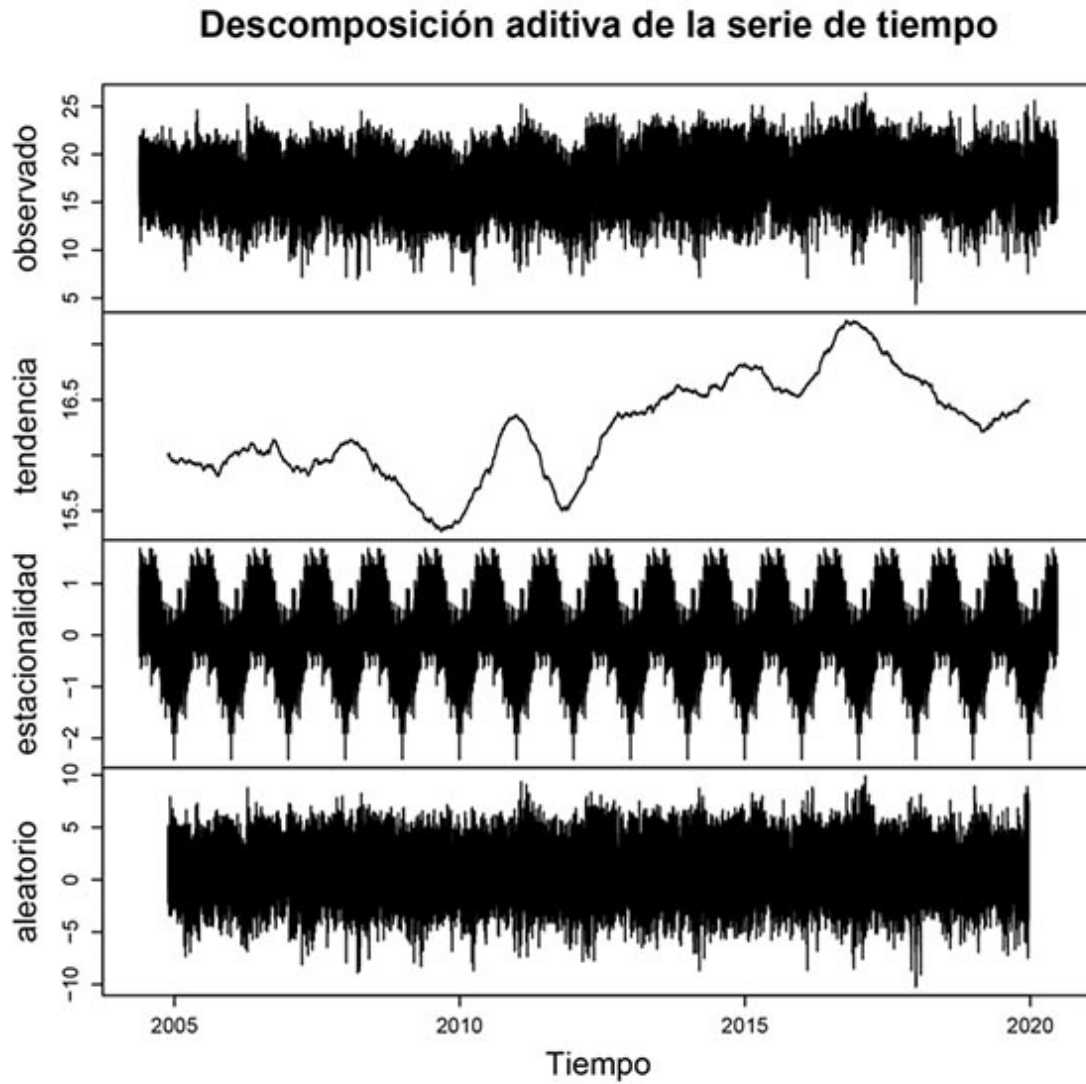


FIGURA D.22: Estación Meteorológica Laguna - Fraijanes (84189):
Descomposición de serie de tiempo temperatura.

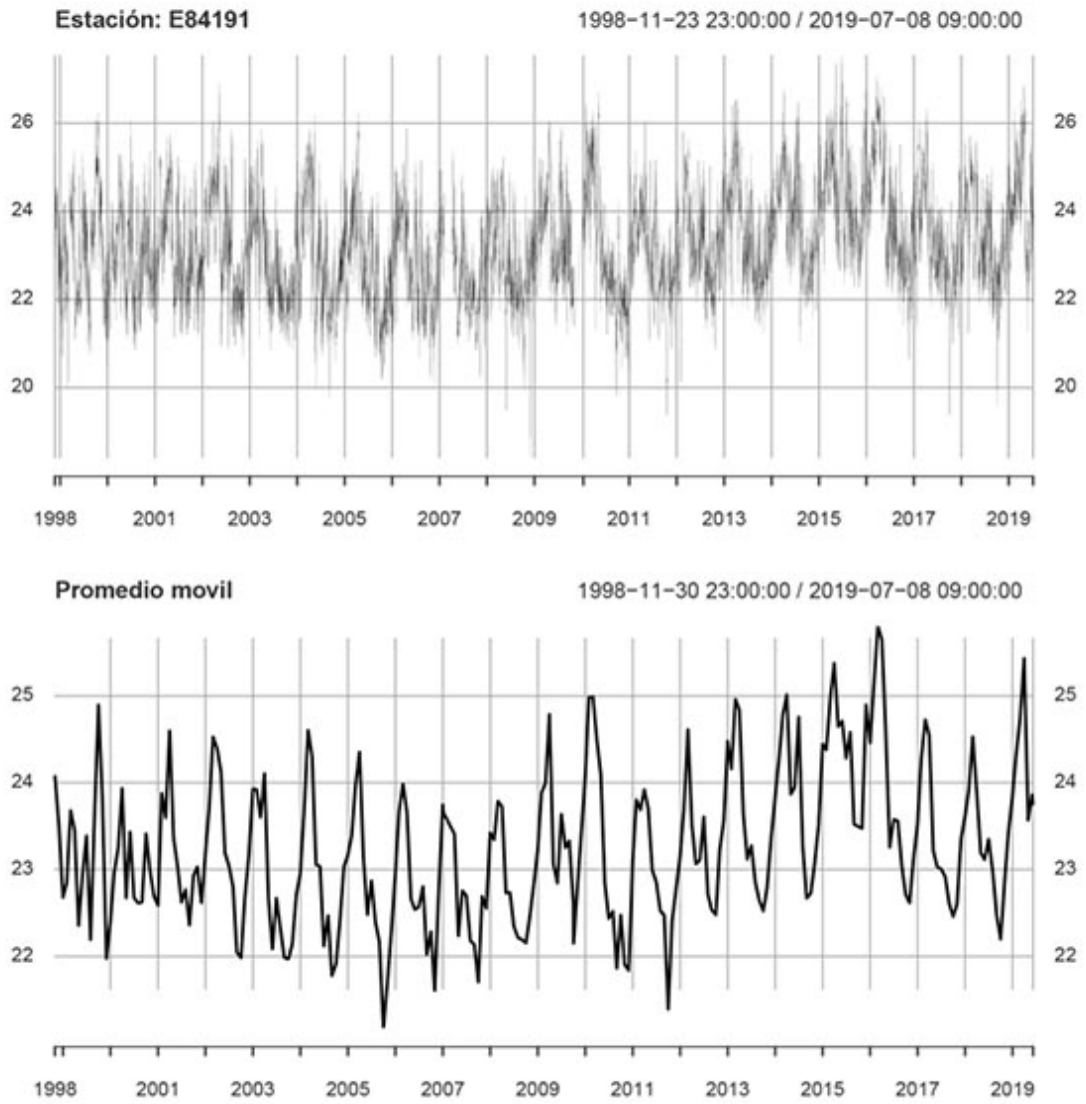


FIGURA D.23: Estación Meteorológica Recope (84191): Serie temporal temperatura 1998 - 2019.

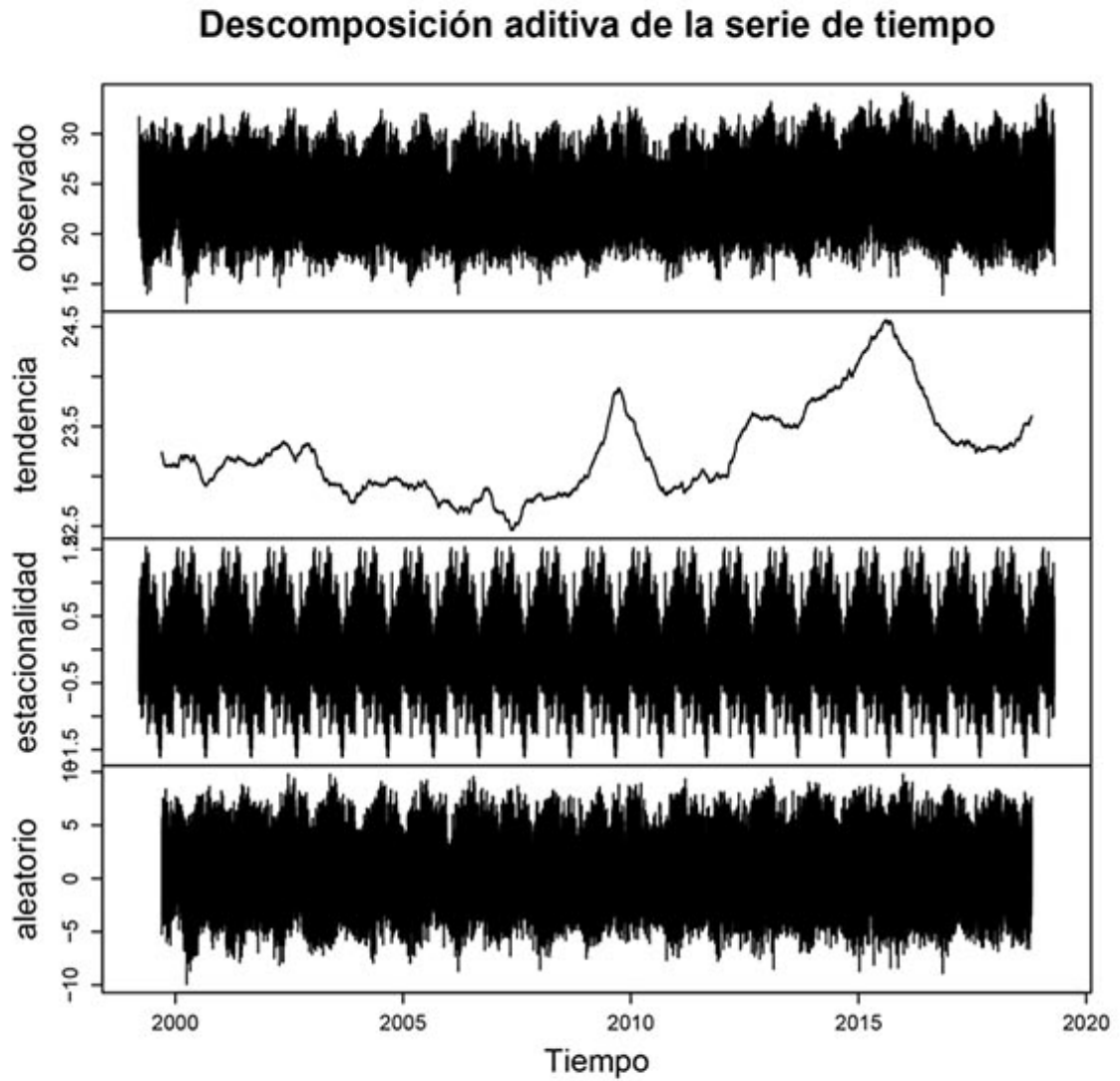


FIGURA D.24: Estación Meteorológica Recope (84191): Descomposición de serie de tiempo temperatura.

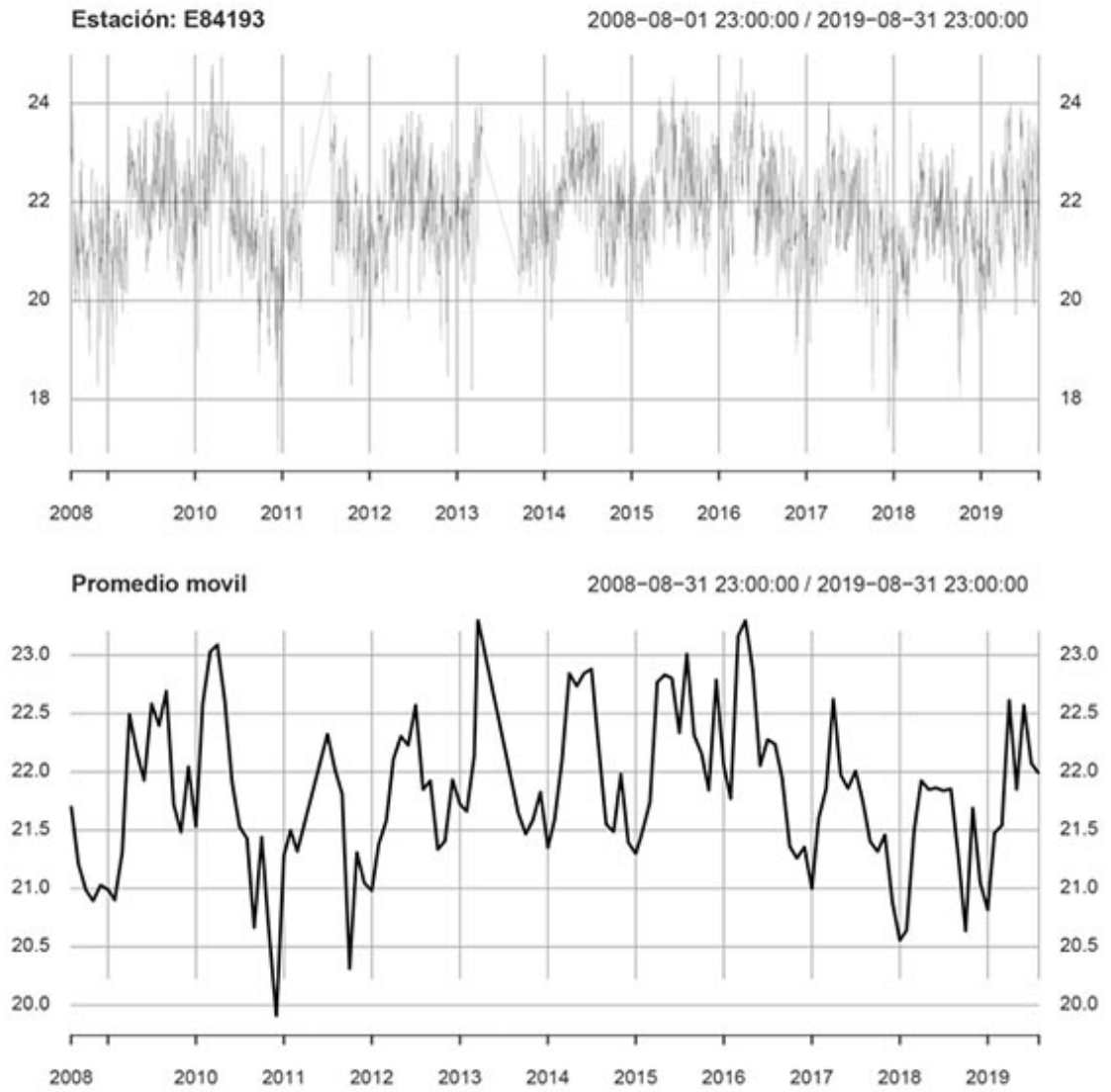


FIGURA D.25: Estación Meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños (84193): Serie temporal temperatura 2008 - 2019.

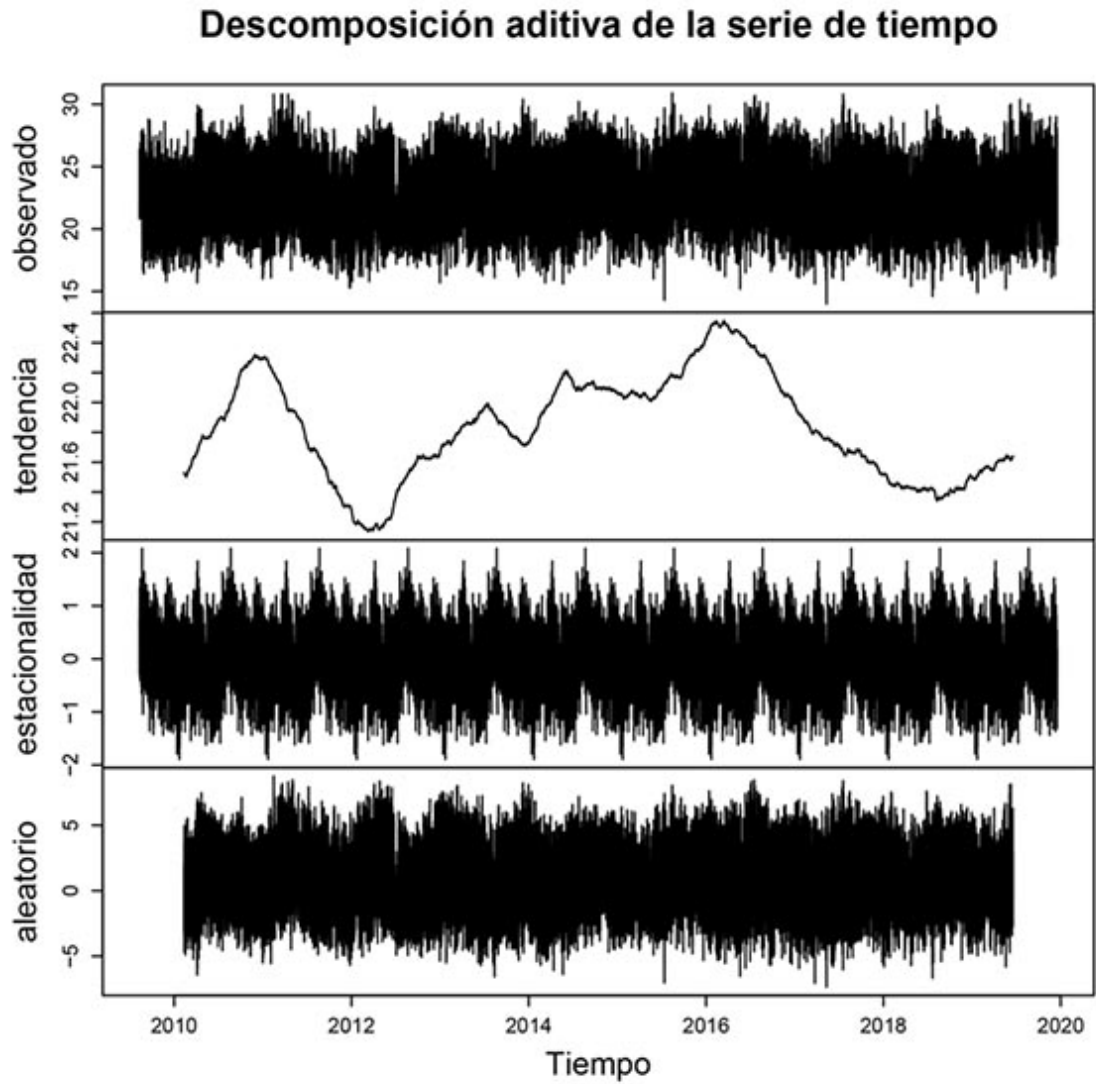


FIGURA D.26: Estación Meteorológica Aeropuerto Tobías Bolaños (84193):
Descomposición de serie de tiempo temperatura.

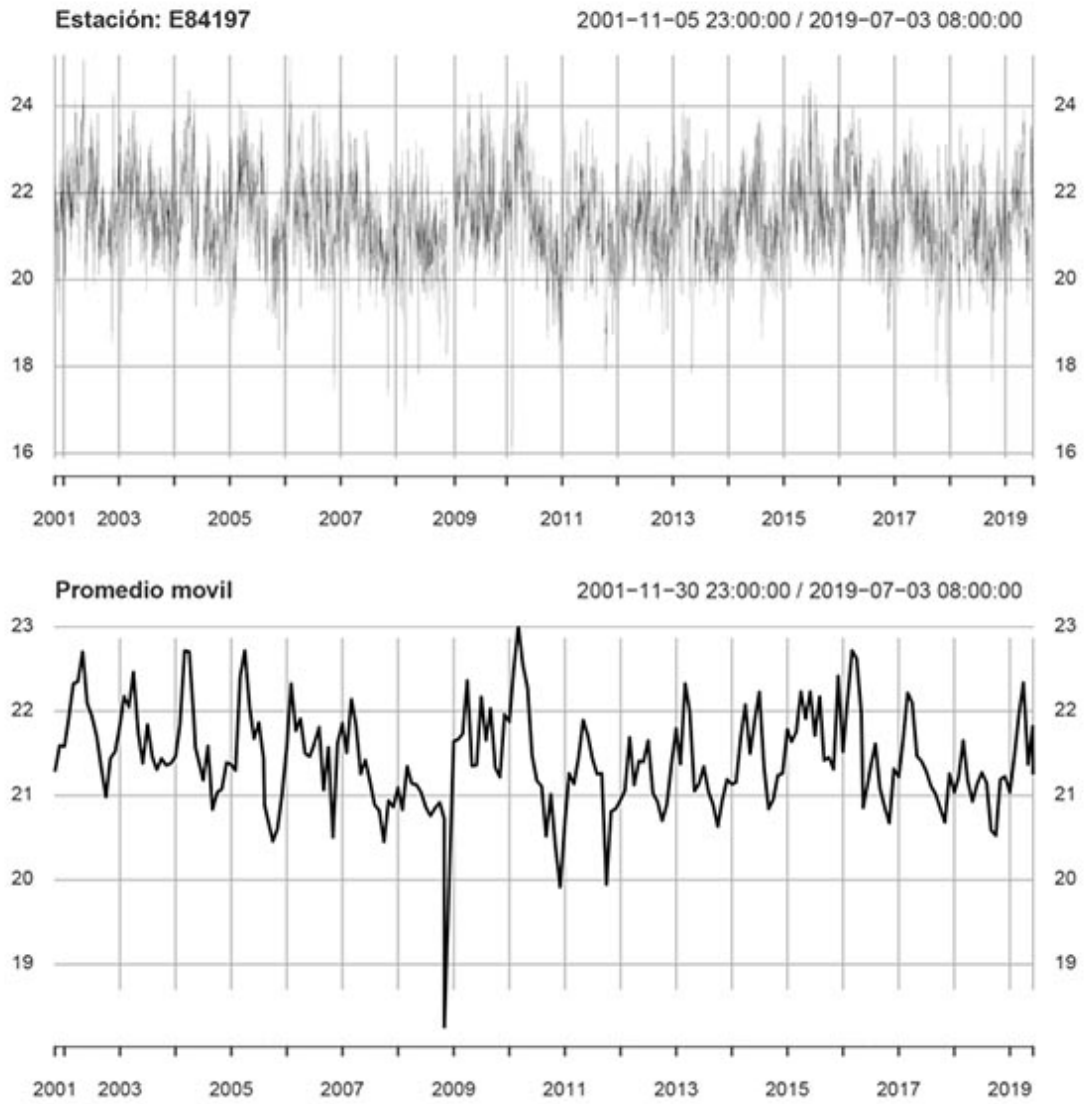


FIGURA D.27: Estación Meteorológica Santa Bárbara (84197): Serie temporal temperatura 2001 - 2019.

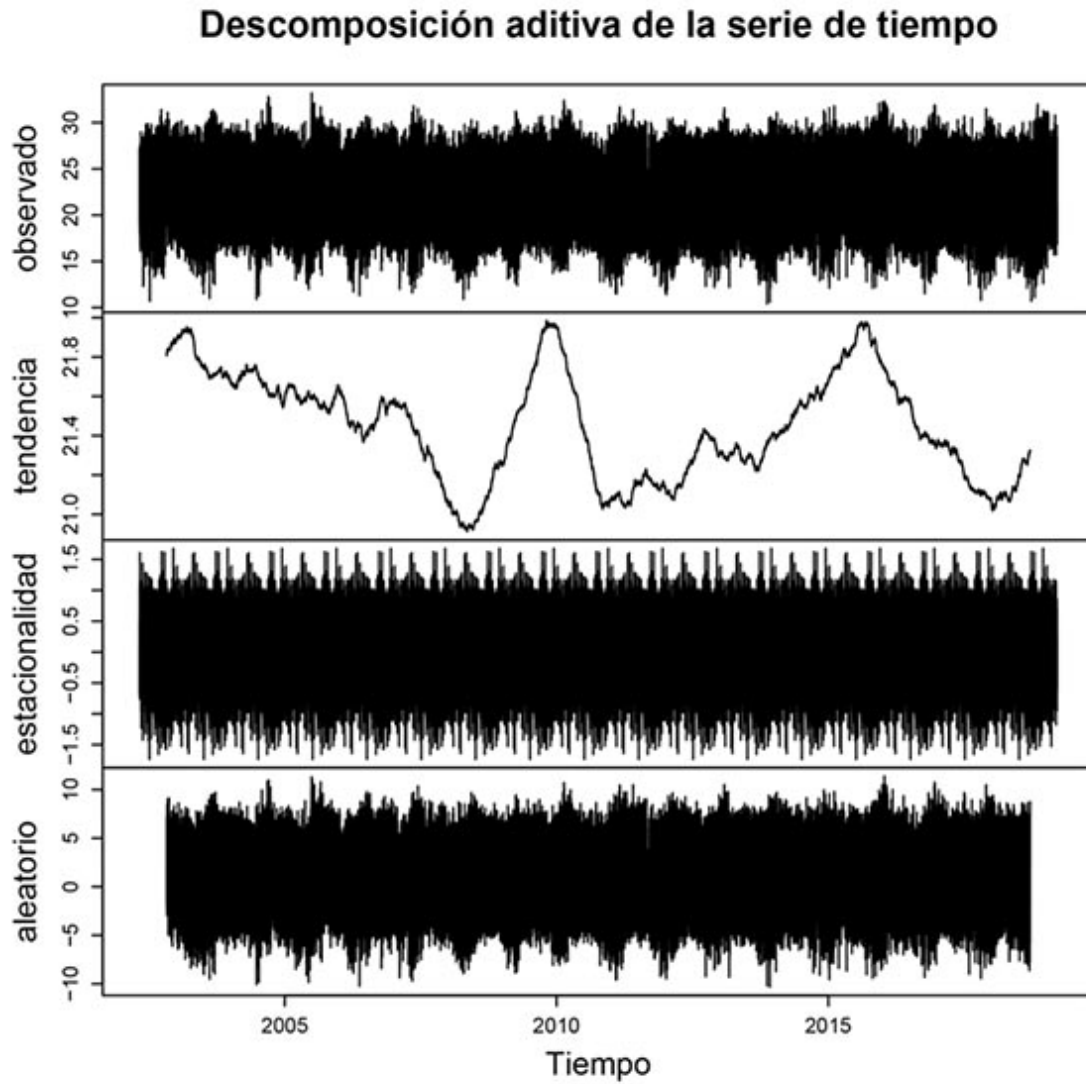


FIGURA D.28: Estación Meteorológica Santa Bárbara (84197):
Descomposición de serie de tiempo temperatura.

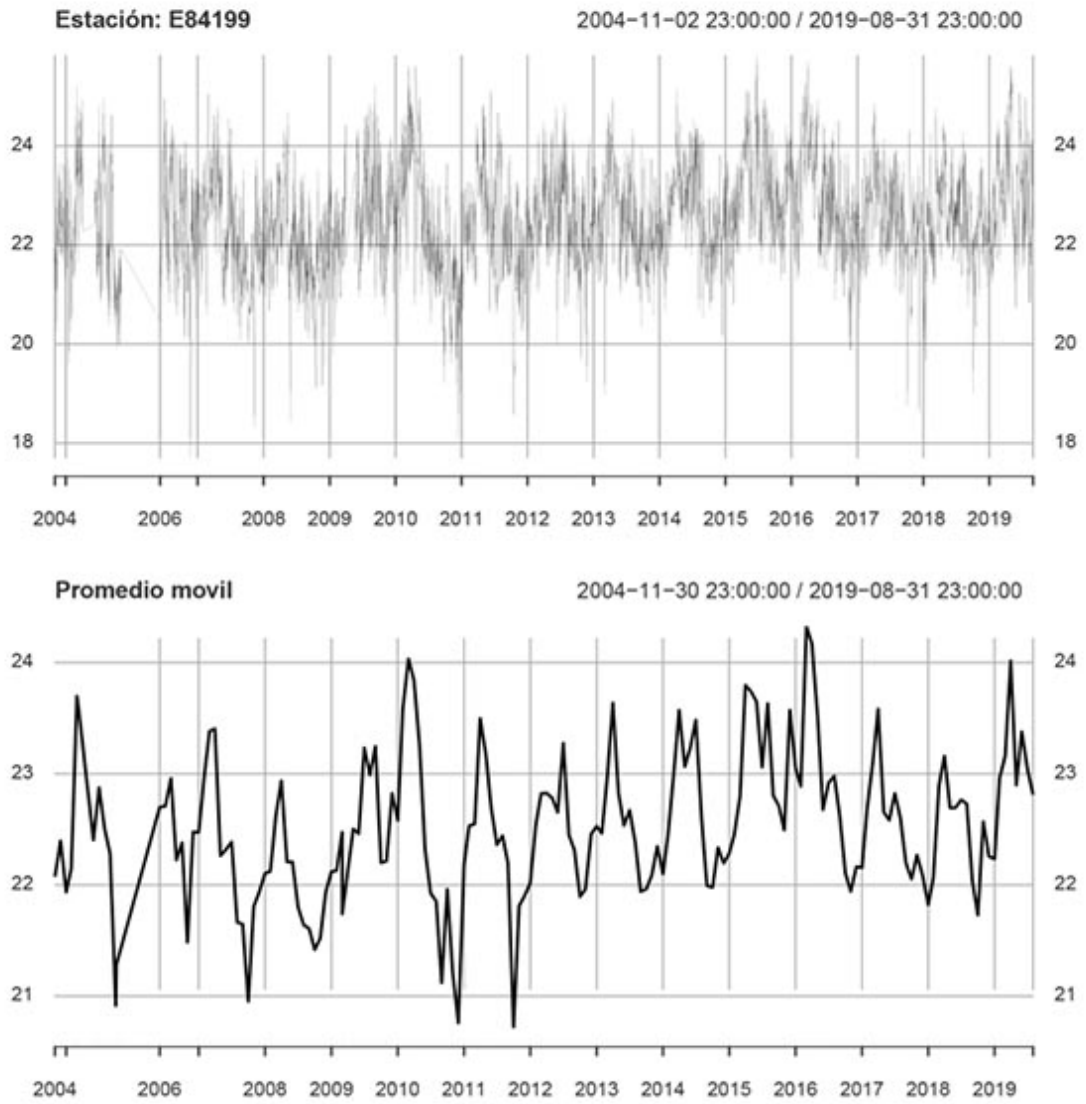


FIGURA D.29: Estación Meteorológica Belén (84199): Serie temporal temperatura 2004 - 2019.

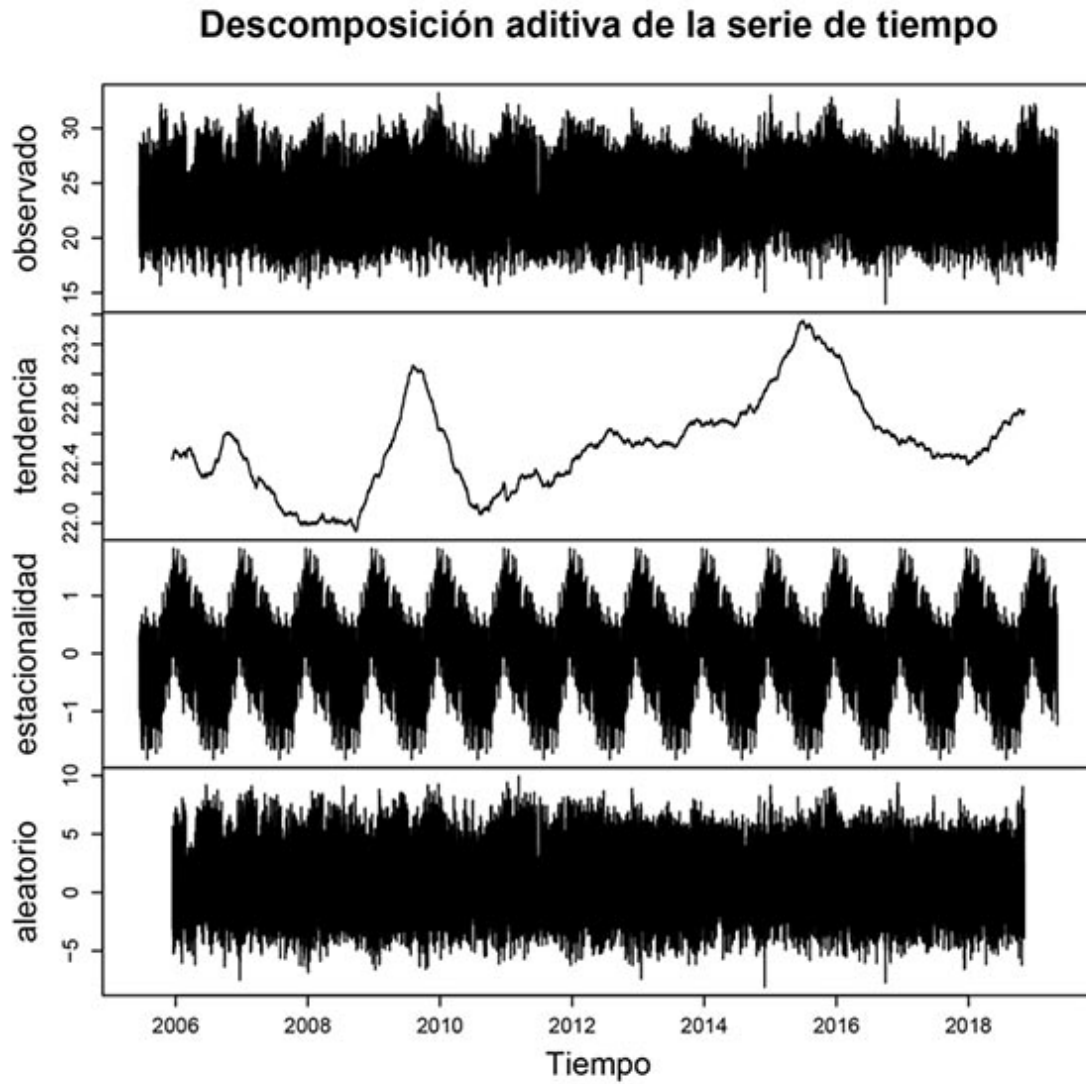


FIGURA D.30: Estación Meteorológica Belén (84199): Descomposición de serie de tiempo temperatura.

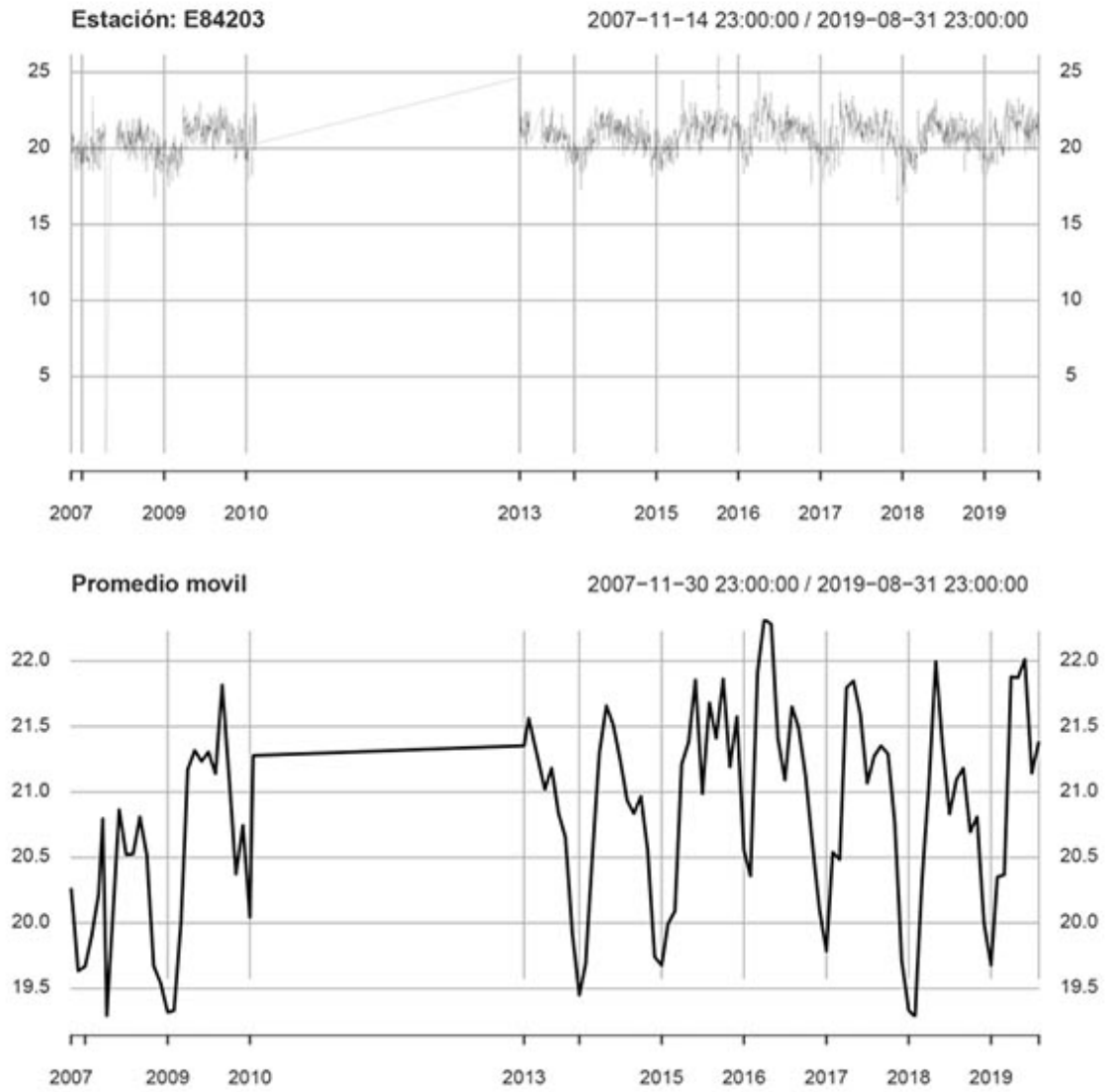


FIGURA D.31: Estación Meteorológica Zapote (84203): Serie temporal temperatura 2007 - 2019.

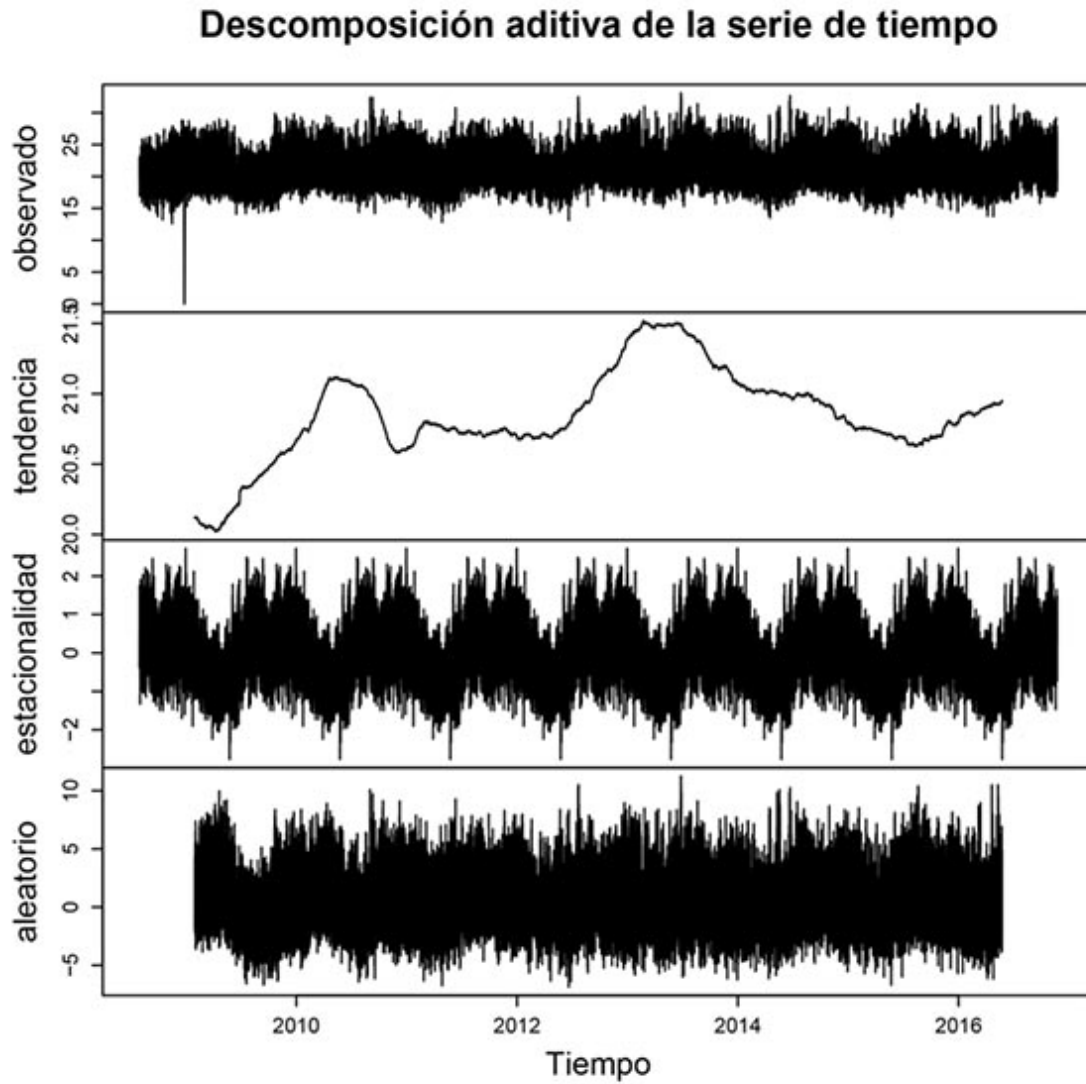


FIGURA D.32: Estación Meteorológica Zapote (84203): Descomposición de serie de tiempo temperatura.

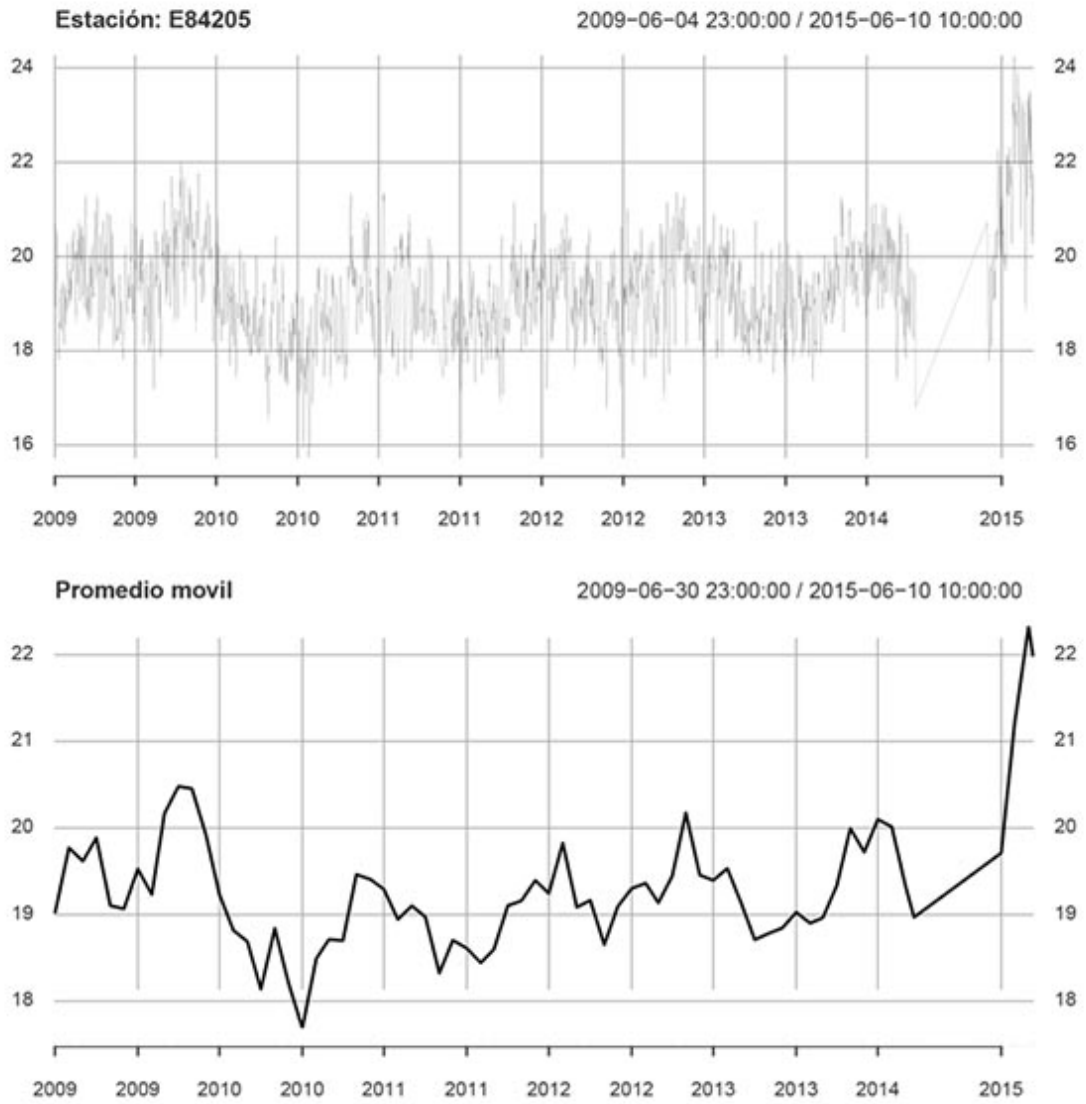


FIGURA D.33: Estación Meteorológica Getsemani (84205): Serie temporal temperatura 2009 - 2019.

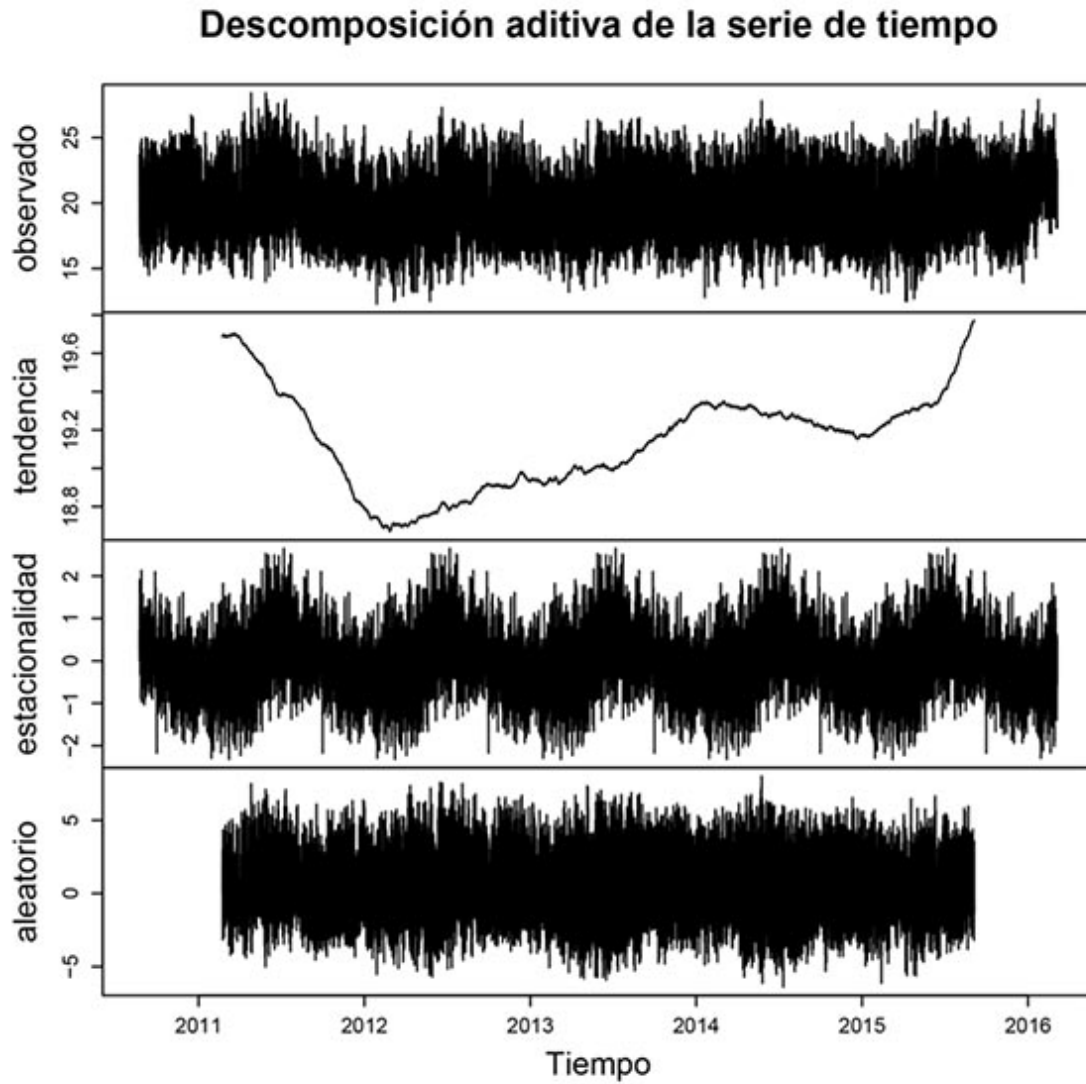


FIGURA D.34: Estación Meteorológica Getsemani (84205):
Descomposición de serie de tiempo temperatura.

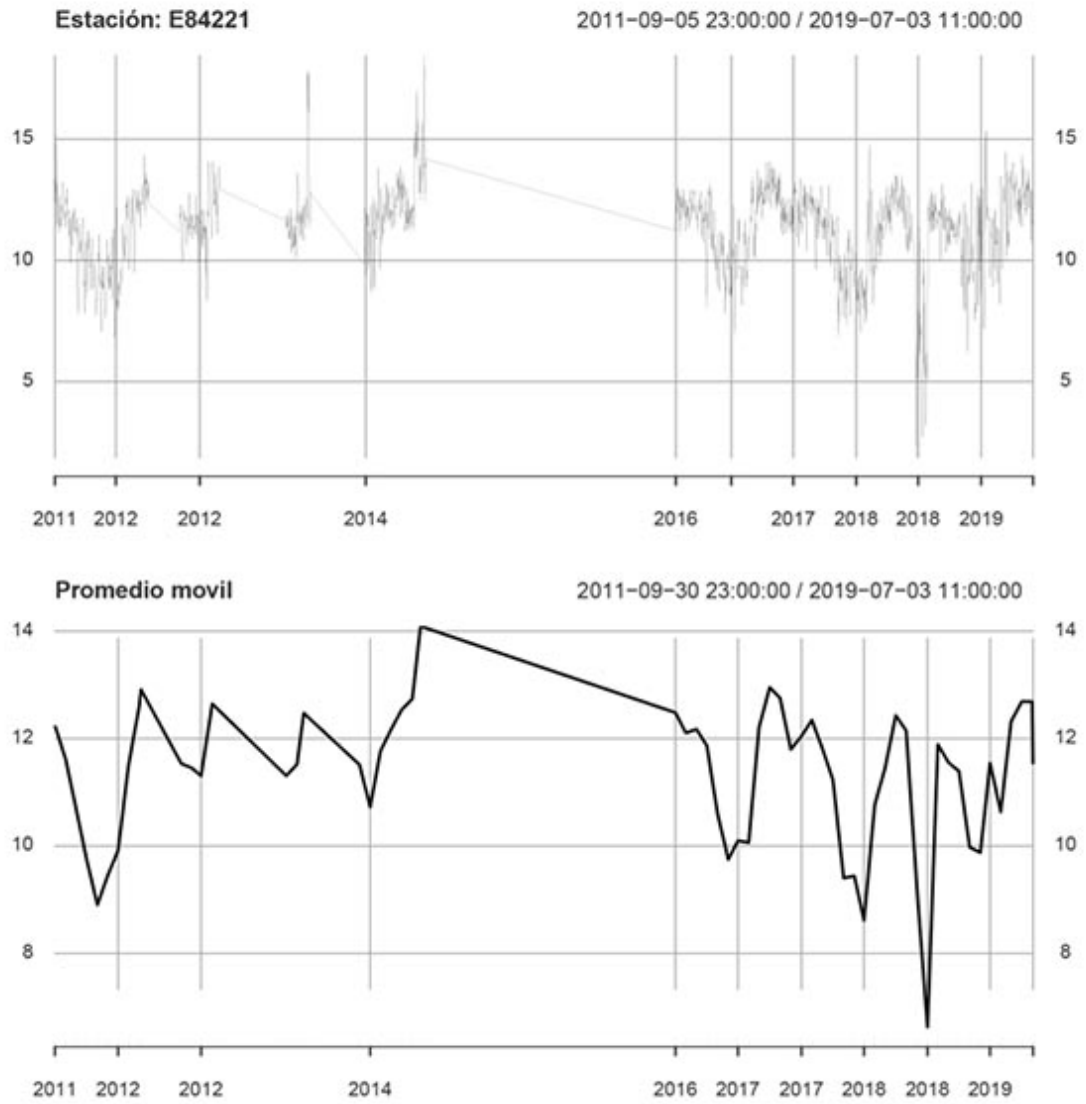


FIGURA D.35: Estación Meteorológica Volcán Poás (84221): Serie temporal temperatura 2011 - 2019.

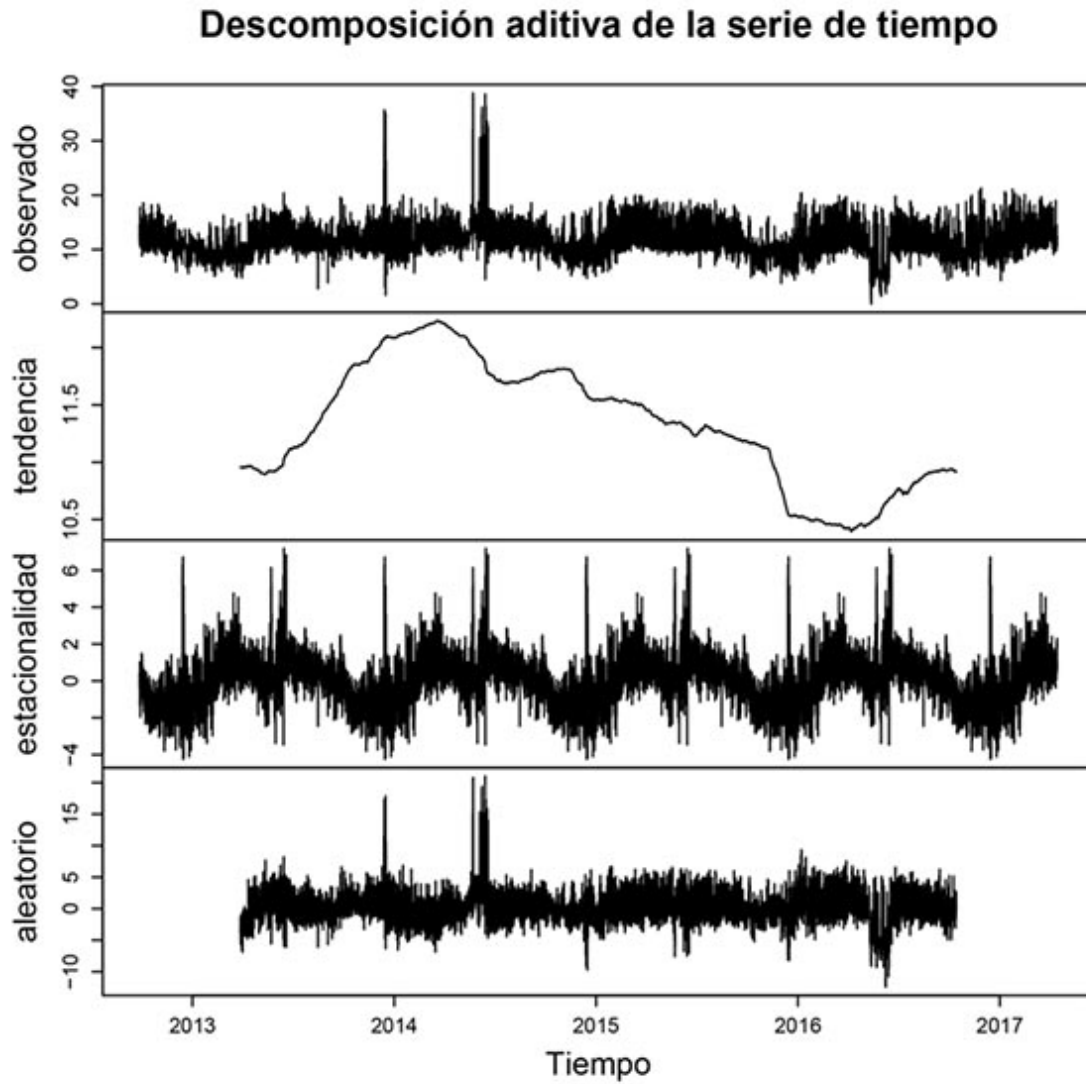


FIGURA D.36: Estación Meteorológica Volcán Poás (84221): Descomposición de serie de tiempo temperatura.

Apéndice E

Oscilaciones

E.1. El Niño, Oscilación del Sur

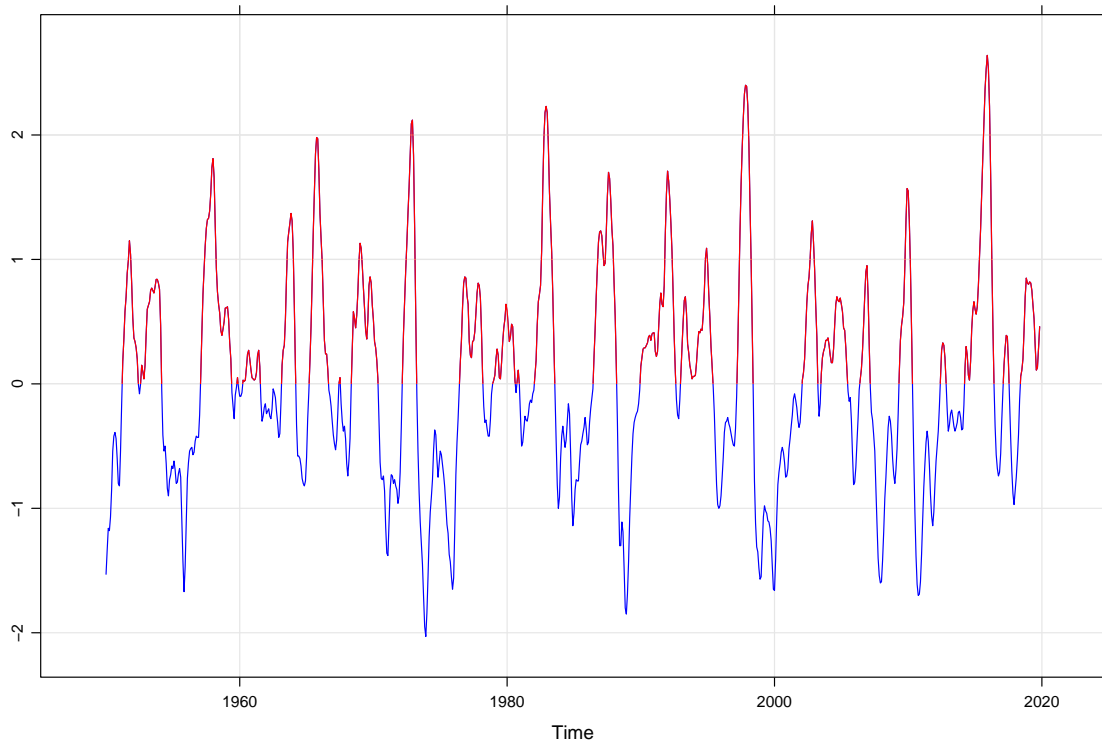


FIGURA E.1: Índice de oscilación del sur (IOS). Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

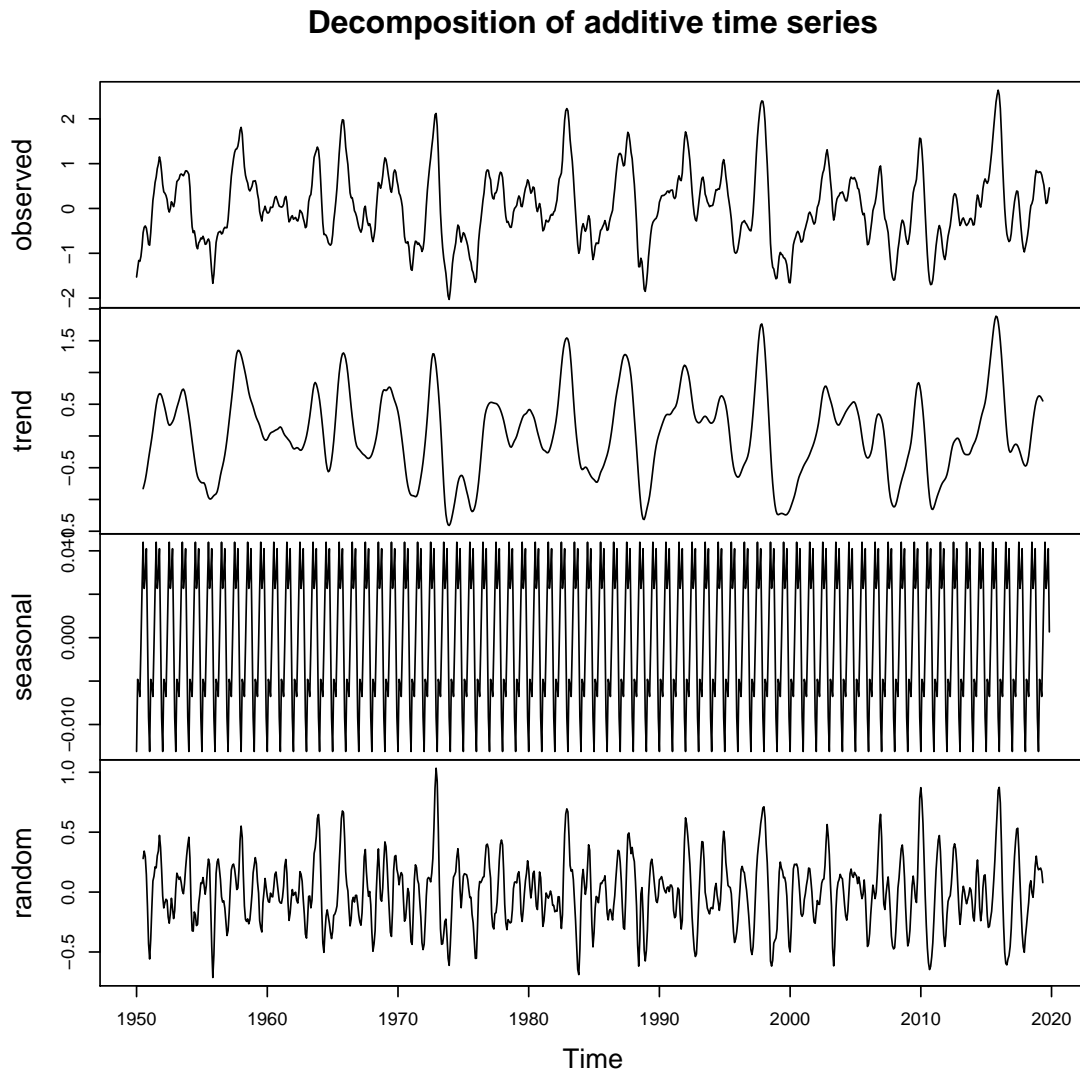


FIGURA E.2: Descomposición Serie de tiempo ENOS. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

CUADRO E.1: El Niño y La Niña, años de ocurrencia y sus intensidades (ONI).

El Niño				La Niña		
Débil - 12	Moderado - 7	Fuerte - 5	Muy Fuerte - 3	Débil - 10	Moderado - 4	Fuerte - 7
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-74
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10				2000-01	2010-11
					2005-06	
	2004-05				2008-09	
	2006-07					
2014-15				2016-17		
2018-19				2017-18		
2019-20						

E.2. Oscilación Decadal del Pacífico

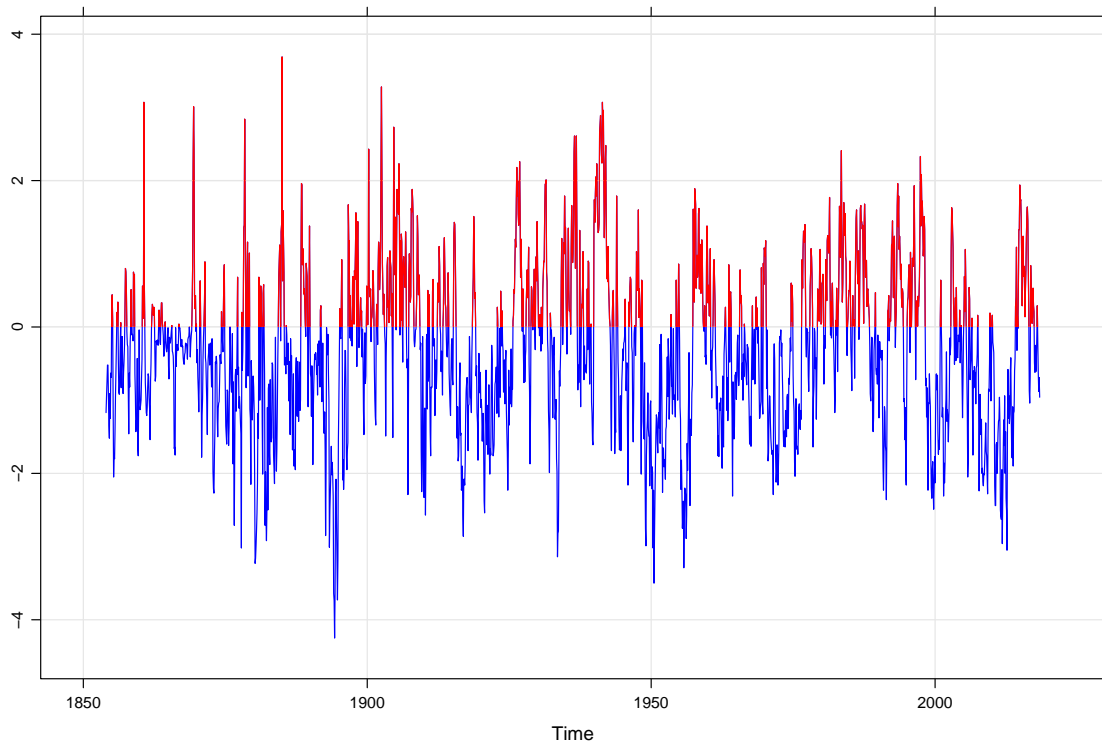


FIGURA E.3: Oscilación Decadal del Pacífico. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

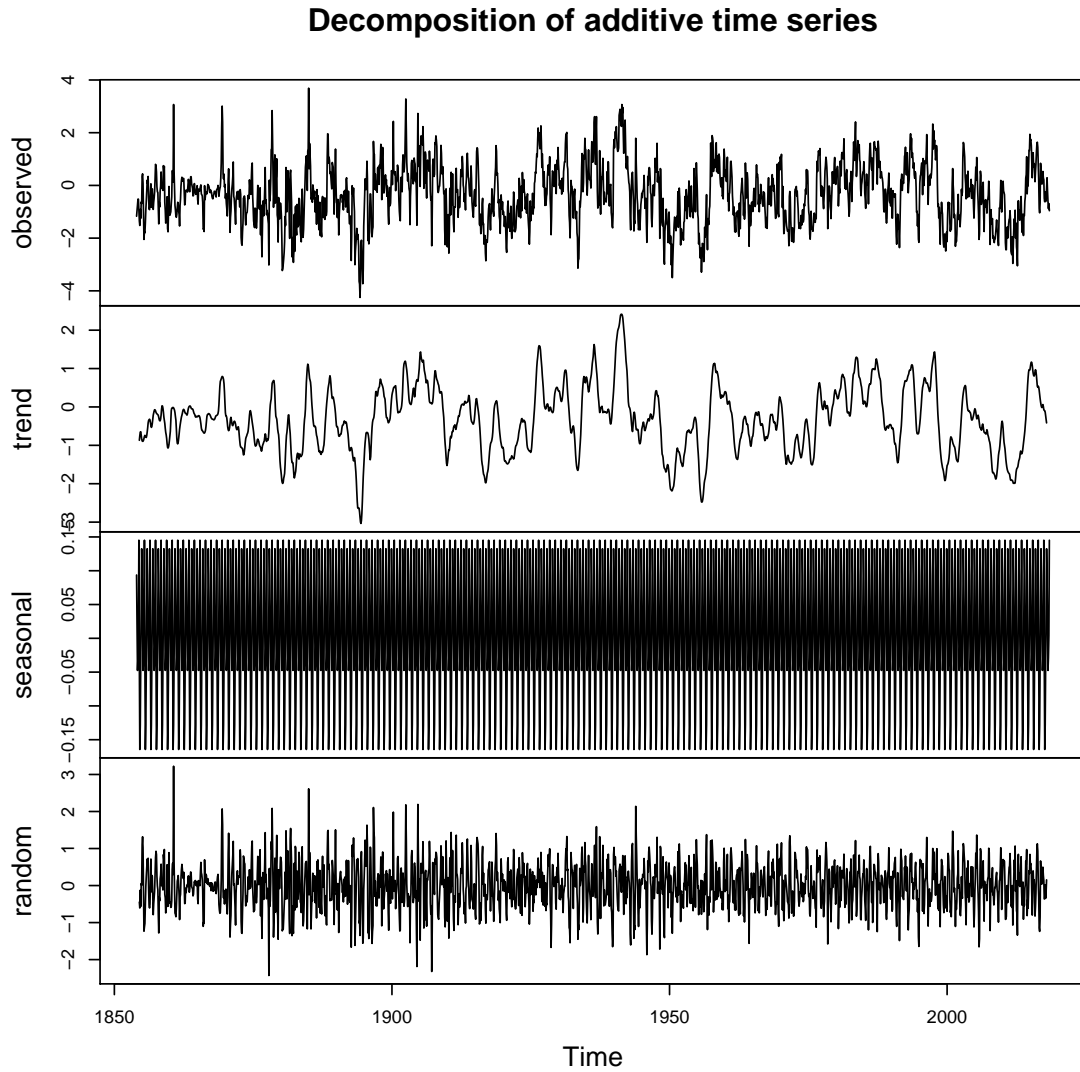


FIGURA E.4: Descomposición Serie de tiempo POD. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

E.3. Oscilación del Atlántico Norte

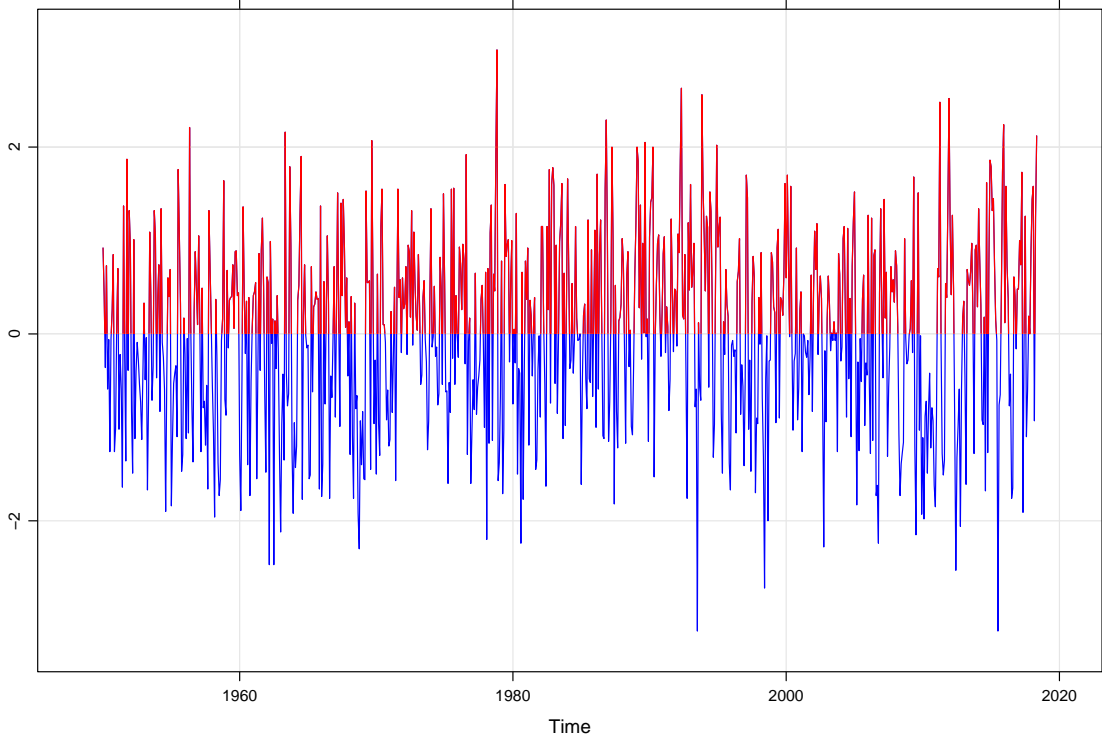


FIGURA E.5: Oscilación del Atlántico Norte. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

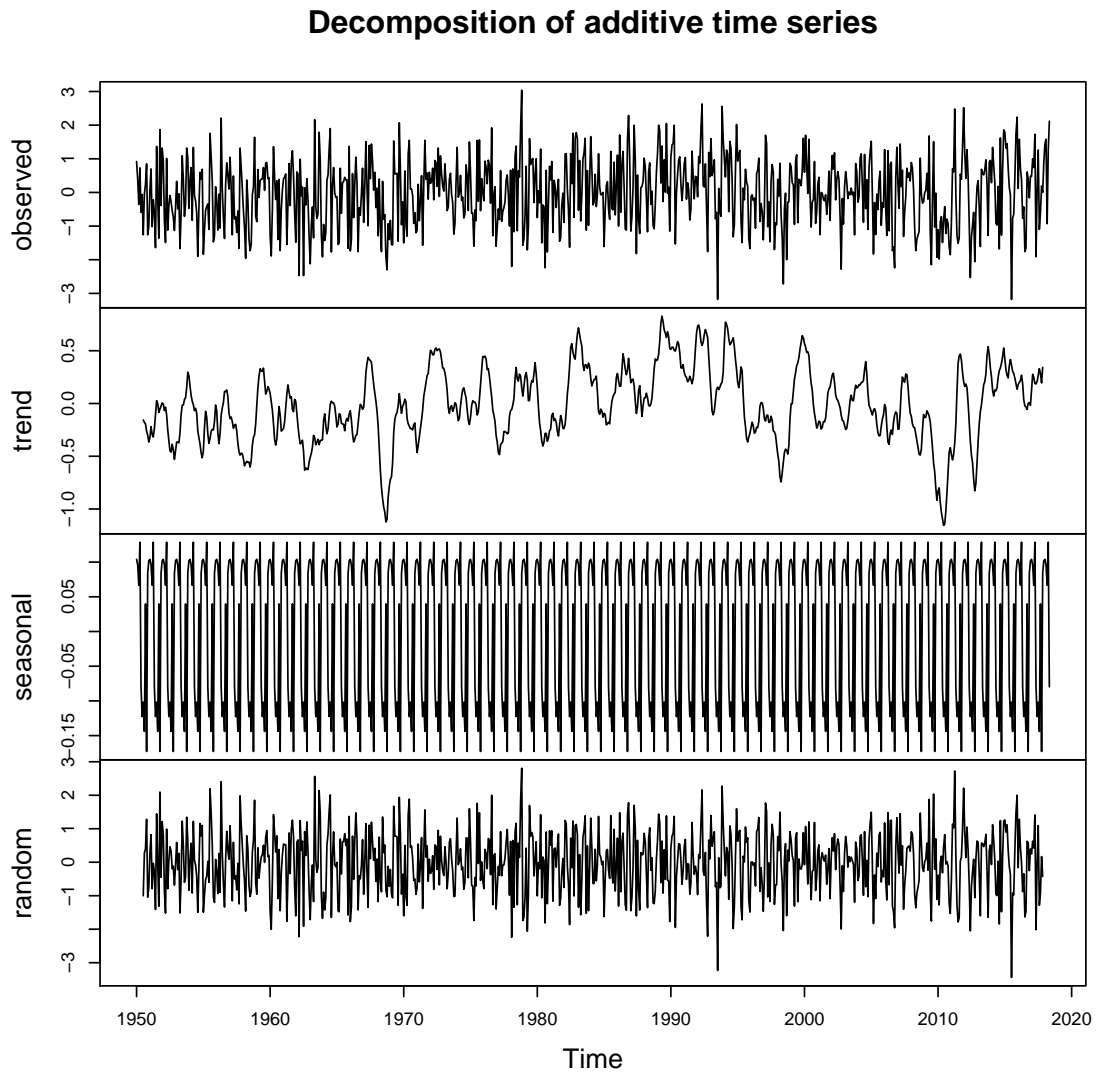


FIGURA E.6: Descomposición Serie de tiempo NAO. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

E.4. Oscilación del Ártico

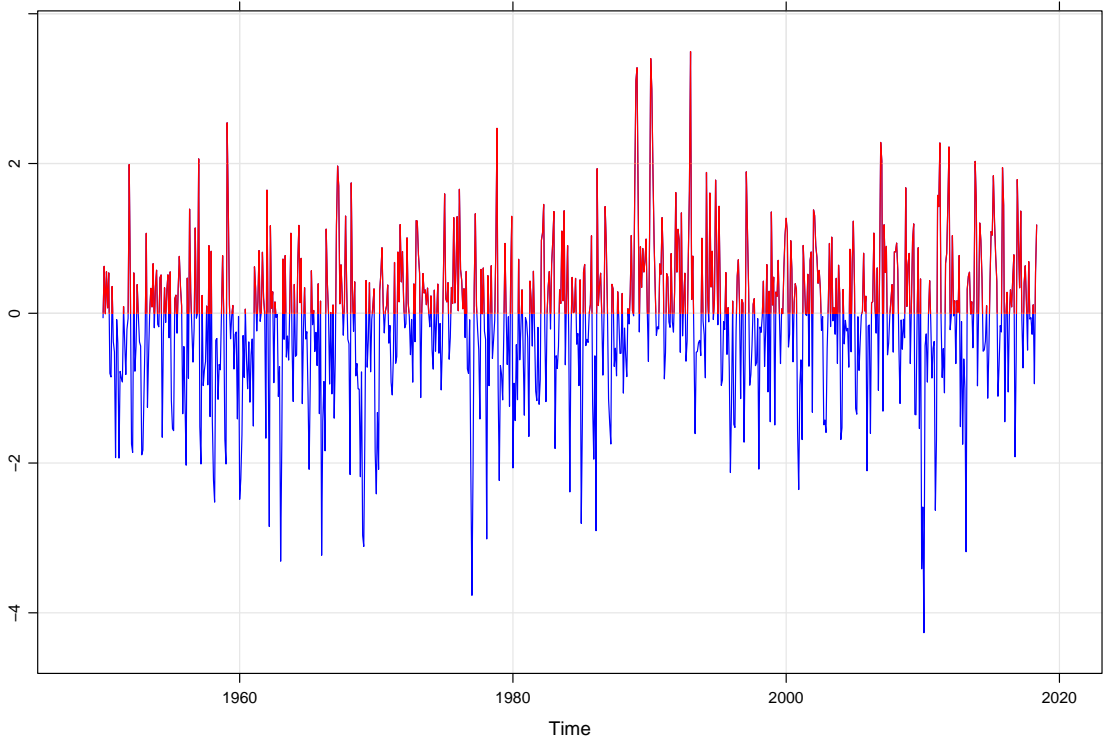


FIGURA E.7: Oscilación del Ártico. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

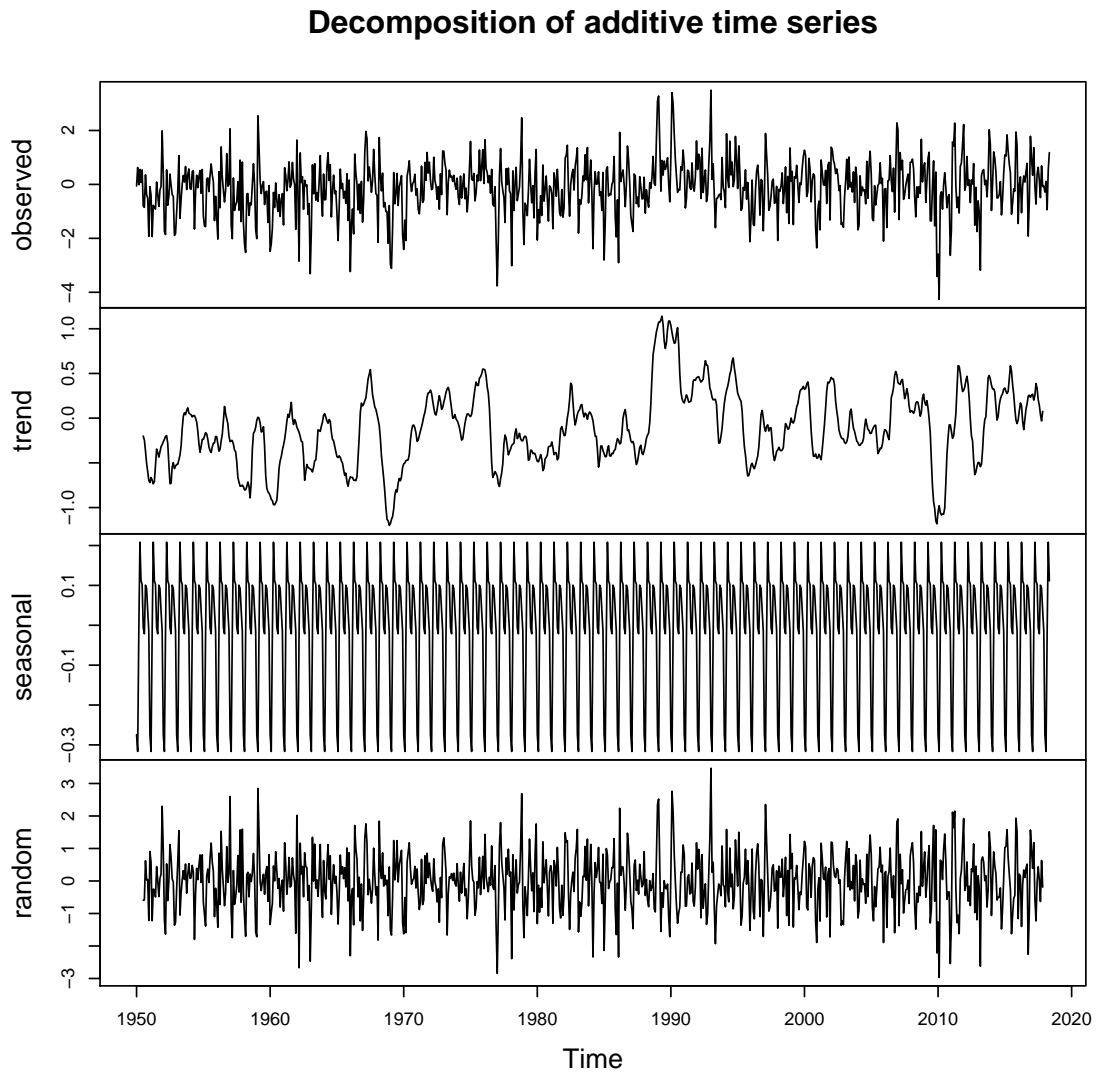


FIGURA E.8: Descomposición Serie de tiempo AO. Generado a partir de los datos NOAA (Elaboración propia).

Apéndice F

Encuestas

F.1. Instrumentos de encuesta

CUADRO F.1: Características metodológicas de los instrumentos de encuesta.

	Sociedad Civil	Funcionarios Municipales	Empresa Privada
Período de realización	31/05/2019 al 7 /06/2019	25/06/2019 al 23/07/2019	10/05/2019 al 11/08/2019
Horario de trabajo	8:00 a 19:00	8:00 a 19:00	8:00 a 19:00
Modalidad de entrevista	Presencial	Telefónica	Presencial
Cobertura	Mayores de 14 años, residente en el cantón Heredia	Técnicos municipales de los departamentos encargados de los temas de planificación urbana, desarrollo urbano, control urbana, gestión ambiental y construcción.	Encargado o representante de la actividad económica ubicada en la Ciudad de Heredia.
Tipo de muestreo	Sistemático aleatorio	Dirigido	Sistemático aleatorio
Marco muestral	Proyección de Habitantes al 2019 para el cantón Heredia (se excluye distrito Varablanca), elaborado por INEC.	Directorio Municipal.	Registro de patentes de la Municipalidad.
Selección de la muestra	Probabilístico	No probabilístico por conveniencia	Probabilístico con reemplazo
Entrevistas realizadas	825/840 (Nulas 15)	11	224/236 (Nulas 12)
Margen de error	4% a un nivel de confianza del 98%.	No aplica.	5% a un nivel de confianza del 95%.