

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE ARQUITECTURA Y DISEÑO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOCIALES

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN PLANEACIÓN Y DESARROLLO  
SUSTENTABLE



***Valoración de servicios ambientales del Río Nuevo para definir criterios de infraestructura verde ante el cambio climático en la ciudad de Mexicali.***

**T E S I S**

que para obtener el grado de  
**MAESTRO EN PLANEACIÓN Y DESARROLLO SUSTENTABLE**

presenta  
**BERTHA LILIANA GUERRERO LÓPEZ**

DIRECTOR DE TESIS  
**DR. OSVALDO LEYVA CAMACHO**

**MEXICALI, BAJA CALIFORNIA**

**AGOSTO DE 2018**







## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

Declaro que la tesis que se presenta contiene material original que no ha sido presentado para la obtención de un grado académico o diploma en esta u otra institución de educación superior. Asimismo declaro que hasta donde yo sé no contiene material previamente publicado o escrito por otra persona excepto donde se reconoce como tal a través de las citas.

Mexicali, Baja California a 1º de Agosto de 2018

---

Arq. Bertha Liliana Guerrero López

## **Agradecimientos**

A mis papás, siempre dispuestos a apoyarme en cualquier momento de necesidad, dentro y fuera de tiempos de maestría. Gracias por llevarme hasta el punto de cumplir mi sueño de obtener el grado de Maestra en la disciplina que he deseado desde hace tantos años.

A mis hermanos, por ser una inspiración en el campo académico, y grandes ejemplos de superación personal.

A mi director de tesis, Dr. Osvaldo Leyva Camacho, por su paciencia, dirección y dedicación en todo el proceso de realización de esta tesis, desde pequeñas confusiones durante el planteamiento del problema hasta el aprendizaje de nuevos softwares y técnicas.

A mi comité tutorial, Dr. Jorge Augusto Arredondo Vega y Dra. Elva Alicia Corona Zambrano, por sus comentarios durante revisiones, y aportaciones de literatura sobre el tema de investigación.

A mis profesores Dra. Rosa Imelda Rojas Caldelas y Dr. César Angel Peña Salmón, por estar siempre dispuestos a ayudar, tanto a mí como a mis compañeras de Maestría, en lo que fuera necesario para nuestras clases e investigaciones.

A mis profesores del programa de Maestría, por sus conocimientos que enriquecieron esta investigación, y su interés por nuestra formación profesional.

A mis anteriores compañeros de trabajo: Carolina Díaz, Adriana Pimentel y Fernando Marín, así como a mi anterior jefe Arq. Samuel Piñera, quienes fomentaron mi interés por la planeación y el diseño urbano.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su apoyo del programa de becas de este posgrado. Gracias por fomentar la investigación científica en diferentes campos, por apoyar nuestra formación profesional, tanto en esta universidad como en el resto del mundo.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por facilitarnos becas para el pago de colegiaturas de este posgrado, y por formarme durante mi licenciatura de Arquitectura.

A mis compañeros del programa de maestría y doctorado, siempre presentes para colaborar en lo que se necesitara, desde momentos amenos hasta información de nuestros cursos.

A mis amigos, dentro y fuera de la escuela, por sus palabras de aliento, ánimos y bromas en los momentos adecuados.

A toda mi familia, por ser las personas más importantes de mi vida.

A todos los que alguna vez me apoyaron en la realización de mi tesis, aun con el más mínimo detalle.





## **RESUMEN**

El Río Nuevo representa un antiguo ecosistema ripario que quedó dentro de la ciudad de Mexicali, Baja California, y fue modificado por acciones de urbanización a través de los años. Actualmente su presencia como cuerpo de agua es minimizada al grado de considerarse un canal de riego, sin embargo, cuando se encontraba a cielo abierto, brindaba condiciones de confort en temperatura, calidad de aire y humedad, entre otras, pero parte de ellas se han deteriorado al momento de embovedar el río. A través de una investigación aplicada en sustentabilidad, infraestructura verde y servicios ambientales, y finalmente por metodologías en sistemas de información geográfica para el análisis de temperaturas y caudales en tres periodos diferentes dentro del área de estudio, se comprobaron los beneficios climáticos y de regulación de caudales del río antes de su embovedado y la pérdida de los mismos en fechas más recientes, servicios que prevalecen latentes y que pueden ser rescatados con la aplicación de principios de infraestructura verde para restablecer parcialmente el carácter natural del río.

Palabras clave: infraestructura verde, sustentabilidad ambiental, servicios ambientales, regulación de caudales.

## **Abstract**

The New River (Río Nuevo) represents a former riverside ecosystem left inside the city of Mexicali, Baja California, and was modified by urbanization actions through the years. Its presence as a water body was underplayed to the point of being considered an irrigation waterway, however it used to bring comfort conditions of temperature, air quality and humidity, but the most part of them was lost when the river was channeled. Through a theoretical and methodological research on sustainability, green infrastructure and ecosystem services, and finally via geographic information systems methods for temperature and watershed analysis in three different time periods at the study area, the climatic benefits of the river before the channeling were proven and the loss of these in most recent dates, with the objective of applying principles of green infrastructure for the recovery or replica of the environmental nature of this river.

Keywords: green infrastructure, environmental sustainability, ecosystem services, watershed management.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>V</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
1.1. DESARROLLO SUSTENTABLE .....	7
1.1.1. <i>Sobre Conferencia Hábitat III</i> .....	9
1.2. SUSTENTABILIDAD AMBIENTAL Y URBANA .....	10
1.3. CAMBIO CLIMÁTICO .....	15
1.4. INFRAESTRUCTURA VERDE .....	18
1.4.1. <i>Servicios ambientales</i> .....	24
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>30</b>
2.1. REVISIÓN DE LITERATURA .....	31
2.2. PROCESO METODOLÓGICO CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	32
2.2.1. <i>Recopilación y preprocesamiento de imágenes.</i> .....	33
2.2.2. <i>Clasificación de cubiertas y usos de suelo.</i> .....	35
2.2.3. <i>Comparación de cubiertas en tres periodos diferentes.</i> .....	37
2.3. CLASIFICACIÓN SEGÚN TEMPERATURAS. ....	38
2.3.1. <i>Perfiles de temperaturas sobre el cauce.</i> .....	39
2.4. ANÁLISIS DE RIESGO DE INUNDACIONES POR ALTURAS DE RELIEVE. ....	41
2.4.1. <i>Análisis de inundaciones</i> .....	42
2.4.2. <i>Perfiles de alturas sobre el cauce</i> .....	43
<b>CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DEL ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	<b>45</b>
3.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO.....	45
3.2. CLASIFICACIÓN FINAL DE CUBIERTAS.....	46
3.2.1. <i>Comparación de usos de suelo</i> .....	52
3.3. CLASIFICACIÓN POR TEMPERATURAS .....	55
3.3.1. <i>Perfiles de temperaturas sobre el cauce</i> .....	58
3.4. ANÁLISIS DE INUNDACIONES .....	70
3.4.1. <i>Perfiles de alturas sobre el cauce del río</i> .....	71
3.5. RELACIÓN ENTRE RELIEVE Y TEMPERATURAS .....	75
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADO Y DISCUSIÓN.</b> .....	<b>83</b>
DINÁMICA DE CAMBIO DE COBERTURA DEL SUELO. ....	83
CON REFERENCIA A LAS TEMPERATURAS SOBRE EL CAUCE. ....	86
CON REFERENCIA A LAS ÁREAS DE INUNDACIÓN. ....	87
LINEAMIENTOS DE DISEÑO DE INFRAESTRUCTURA VERDE.....	88
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>93</b>
CONCLUSIONES .....	93

RECOMENDACIONES .....	95
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Metodología .....	33
Figura 2: Imagen normalizada de la ciudad de Mexicali en 1984. ....	34
Figura 3: Imagen normalizada de la ciudad de Mexicali en 1998. ....	34
Figura 4: Imagen normalizada de la ciudad de Mexicali en 2007. ....	35
Figura 5: Delimitación del área de estudio sobre imagen 2007. ....	36
Figura 6: Modelo digital de elevación recortado al área de estudio. ....	42
Figura 7: Clasificación de usos de suelo al año 1984 .....	47
Figura 8: Clasificación de usos de suelo al año 1998 .....	49
Figura 9: Clasificación de usos de suelo al año 2007 .....	51
Figura 10: Clasificación de temperaturas 1984 .....	56
Figura 11: Clasificación de temperaturas 1998 .....	57
Figura 12: Clasificación de temperaturas 2007 .....	58
Figura 13: Ubicación de perfiles sobre el cauce del río.....	59
Figura 14: Perfil de temperatura 1 al año 1984.....	60
Figura 15: Perfil de temperatura 2 al año 1984.....	60
Figura 16: Perfil de temperatura 3 al año 1984.....	61
Figura 17: Perfil de temperatura 4 al año 1984.....	61
Figura 18: Perfil de temperatura 5 al año 1984.....	62
Figura 19: Perfil de temperatura 6 al año 1984.....	62
Figura 20: Perfil de temperatura 7 al año 1984.....	63
Figura 21: Perfil de temperatura 1 al año 1998.....	63
Figura 22: Perfil de temperatura 2 al año 1998.....	64
Figura 23: Perfil de temperatura 3 al año 1998.....	64
Figura 24: Perfil de temperatura 4 al año 1998.....	65
Figura 25: Perfil de temperatura 5 al año 1998.....	65
Figura 26: Perfil de temperatura 6 al año 1998.....	66
Figura 27: Perfil de temperatura 7 al año 1998.....	66
Figura 28: Perfil de temperatura 1 al año 2007.....	67
Figura 29: Perfil de temperatura 2 al año 2007.....	67
Figura 30: Perfil de temperatura 3 al año 2007.....	68
Figura 31: Perfil de temperatura 4 al año 2007.....	68
Figura 32: Perfil de temperatura 5 al año 2007.....	69
Figura 33: Perfil de temperatura 6 al año 2007.....	69

Figura 34: Perfil de temperatura 7 al año 2007.....	70
Figura 35: Área de estudio con cuencas desde ArcGIS .....	71
Figura 36: Perfil 1 de elevaciones.....	72
Figura 37: Perfil 2 de elevaciones.....	72
Figura 38: Perfil 3 de elevaciones.....	73
Figura 39: Perfil 4 de elevaciones.....	73
Figura 40: Perfil 5 de elevaciones.....	74
Figura 41: Perfil 6 de elevaciones.....	74
Figura 42: Perfil 7 de elevaciones.....	75
Figura 43: Perfil 1 en relieve y temperaturas.....	76
Figura 44: Perfil 2 en relieve y temperaturas.....	77
Figura 45: Perfil 3 en relieve y temperaturas.....	78
Figura 46: Perfil 4 en relieve y temperaturas.....	79
Figura 47: Perfil 5 en relieve y temperaturas.....	80
Figura 48: Perfil 6 en relieve y temperaturas.....	81
Figura 49: Perfil 7 en relieve y temperaturas.....	82



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Literatura revisada para metodología. ....	32
Tabla 2: Clasificaciones inicial y definitiva de cubiertas. ....	37
Tabla 3: Rangos de clasificación de temperaturas. ....	39
Tabla 4: Superficies según clasificación al año 1984. ....	48
Tabla 5: Superficies según clasificación al año 1998. ....	50
Tabla 6: Superficies según clasificación al año 2007. ....	52
Tabla 7: Cambios de usos y superficies 1984 a 1998. ....	53
Tabla 8: Cambios de usos y superficies 1998 a 2007. ....	54
Tabla 9: Cambios de usos y superficies 1984 a 2007. ....	55
Tabla 10: Comparación de usos y superficies en los tres periodos. ....	84
Tabla 11: Pérdida de usos y superficies 1984 a 1998. ....	84
Tabla 12: Pérdida de usos y superficies 1998 a 2007. ....	85
Tabla 13: Pérdida de usos y superficies 1984 a 2007. ....	85







## **INTRODUCCIÓN**

El concepto de desarrollo ha pasado por enfoques económicos, sociales y políticos, cambiando los planes en cada decenio para corregir los errores anteriores. Su primer enfoque fue totalmente mercantilista, eventualmente evolucionando hacia un dualismo industrial y agrícola, hasta que durante la década de los 70 surgió una gran preocupación por problemas surgidos de las acciones de años anteriores. Expertos en diferentes disciplinas ligadas al desarrollo llegaron a la conclusión de que los recursos naturales y el medioambiente habían sido tratados como fuentes ilimitadas, y que ahora comenzaba a notarse una disminución en su disponibilidad: se inició entonces el análisis del medioambiente para conservarse y mantener su papel como proveedor (Thorbecke, 2006). En el año de 1972 se publicaron simulaciones como parte del libro *Los Límites del Crecimiento* por Peccei y King, que presentaban los efectos para el futuro de la industria, la población, la urbanización y la explotación de recursos, iniciando así el debate sobre la problemática ambiental global (Allen y You, 2002).

El ecosistema ripario objetivo de esta investigación corresponde al Río Nuevo, su recorrido comienza en la proximidad de Cerro Prieto en Mexicali, y desemboca en Salton Sea, California, Estados Unidos. Su historia, presencia y morfología ha cambiado desde el tiempo del desarrollo agrícola del valle de Mexicali, constituyó parte importante del sistema de riego y de consumo para los habitantes de la región, sin embargo, en la actualidad se puede presenciar una zona principalmente vial y de equipamiento rodeada de terrenos abandonados, irregulares y sucios. El río se alteró inundaciones a comenzó a alterarse a partir de una gran inundación en 1906 (XXI Ayuntamiento de Mexicali, 2013), pero su más grande alteración inició en 1996 cuando se licitó la obra para embovedarlo, terminando la primera etapa en 1998, y comenzando la segunda en 2007 (Peña, 2011). La zona urbana cercana al río, el cual tiene una longitud aproximada de 9 km de longitud, se divide en 4 grandes áreas de acuerdo con los usos de suelo que se encuentran en ella: la

zona centro, la zona institucional, la zona del bosque, y por último la zona habitacional y natural, esta última comprendiendo también el sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre.

El Río Nuevo ha sido objeto de varios estudios y planes para su urbanización y mejora: desde planes para un parque urbano recreativo y cultural hasta desarrollos inmobiliarios entre 1989 y 1992 (XV Ayuntamiento de Mexicali, 1997), planes de protección y regeneración ambiental, e intenciones de regularizar tenencia de terrenos sobre el río, todos ellos, aunados a problemas de seguimiento del gobierno local, imposibilitaron su regeneración como ecosistema y la pérdida de sus cualidades naturales.

El Programa Parcial de Desarrollo Urbano Río Nuevo de 1997 identificó que el uso de suelo más común en ese entonces era el habitacional, seguido por el equipamiento urbano y los baldíos, y que tan solo la tercera parte de la zona tenía los 6 servicios básicos (agua, electricidad, etc.), por lo que sus propuestas de acción se orientaban hacia los equipamientos y servicios comerciales y recreativos. Fue a partir de este programa que nació el proyecto del Centro de Ferias y Espectáculos (FEX) y el Centro Estatal de las Artes (XV Ayuntamiento de Mexicali, 1997). Se han realizado más proyectos relacionados con la revitalización del cauce del Río, siempre en la búsqueda de un elemento de identidad local, planteados tanto por el Ayuntamiento de Mexicali como por empresas privadas y organizaciones paramunicipales como URBI y el Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali, que van desde complejos urbanos hasta programas de forestación o rehabilitación de espacios públicos.

De acuerdo al planteamiento y progreso de cada proyecto, es fácil advertir de las barreras institucionales y/o jurídicas que han frenado o dificultado dichos proyectos, probablemente por tratarse de soluciones arquitectónicas y urbanas de gran escala, lo cual implica una fuerte inversión monetaria y un seguimiento temporal correspondiente a más de un solo ayuntamiento. Si conectamos los proyectos antes mencionados con el tema de la infraestructura verde, se puede resaltar que sin usar el término propiamente, todos los proyectos y planes hablan sobre la utilización de servicios ambientales culturales y de regulación, al mencionar la reducción de temperatura, la purificación del aire y los servicios educativos y recreativos de los espacios a desarrollar.

Por medio de análisis físicos e hidrológicos se ha concluido que toda la zona correspondiente a la cuenca del río no es apta para el desarrollo urbano, pero si tiene un gran valor ecológico que debe rescatarse: es por esta razón que forma una de las dos áreas de conservación según el Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali 2025 (Peña, 2011).

Al ser el río Nuevo considerado más como una fuente de contaminación o un borde que como un área potencial, uno de los objetivos más importantes de esta investigación es el buscar parte de la recuperación se su carácter natural. A continuación, se enlistan las preguntas y objetivos de investigación que iniciaron con este proyecto de tesis.

**Pregunta General:**

- **¿En la ciudad de Mexicali, de qué manera el área urbanizada del Río Nuevo puede integrarse a una red de infraestructura verde que brinde resiliencia ante los efectos del cambio climático?**

**Preguntas Específicas:**

- ¿Cómo ha afectado la urbanización de la ciudad de Mexicali a la funcionalidad del Río Nuevo?
- ¿Cómo se han alterado las condiciones micro-climáticas y de flujo de caudales en el área urbanizada del Río Nuevo?
- ¿Cómo permitiría el manejo de infraestructura verde en la zona urbanizada del Río Nuevo, la adquisición de resiliencia urbana ante los efectos del cambio climático en la ciudad de Mexicali?

Respondiendo a estas preguntas de investigación, se redactaron los siguientes objetivos:

**Objetivo General:**

- **Valorar los servicios ambientales de regulación de microclima y control de inundaciones que ofrece el cauce del Río Nuevo para el desarrollo de**

**infraestructura verde que genere resiliencia ante los efectos del cambio climático.**

**Objetivos Específicos:**

- Identificar escenarios globales y regionales de cambio climático para la ciudad de Mexicali.
- Evaluar los efectos de la urbanización sobre el Río Nuevo y sus servicios ambientales.
- Determinar las características de la infraestructura verde aplicables en el área del Río Nuevo para obtener mayor resiliencia ante los efectos del cambio climático.

Además se redactó la siguiente hipótesis inicial, describiendo brevemente la intención y el resultado esperado de esta investigación.

**Hipótesis de trabajo:**

Un proyecto de infraestructura verde utilizando como punto de partida el Río Nuevo permitiría su rescate como un área natural, su uso como un área verde cultural y recreativa, y además tener una función benéfica para la resiliencia contra el cambio climático mediante el uso de servicios ambientales propios del río.

Esta tesis se divide en 4 partes, que se recapitularán a continuación:

- En el capítulo 1 se explican los conceptos centrales de la teoría que funciona como base para esta investigación, en el siguiente orden: desarrollo sustentable, sustentabilidad ambiental y urbana, cambio climático, infraestructura verde y servicios ambientales, al igual que otros conceptos secundarios pero no menos importantes como la resiliencia urbana, el metabolismo urbano y las áreas verdes.
- En el capítulo 2 se describe lo referente a la metodología desde la revisión bibliográfica y los ejemplos tomados para el trabajo propio, hasta los procesos

realizados en sistemas de información geográfica paso a paso o referenciados a algún manual citado. Los métodos se dividen en: recopilación y preprocesamiento de imágenes, clasificación de cubiertas, comparación de cubiertas en tres periodos, clasificación de temperaturas general y sobre el cauce, análisis de inundaciones en general y sobre el cauce.

- En el capítulo 3 se presentan los resultados iniciales de los métodos descritos en el capítulo 2, iniciando con una descripción general del sitio, y continuando con los resultados de las partes: clasificación final de cubiertas, comparación de usos de suelo, análisis de transectos térmicos y análisis de áreas inundables sobre el cauce del río.
- En el capítulo 4 se hace una discusión basada en los resultados obtenidos, así como un resumen de resultados en su mayoría comparativos para observar los cambios según los objetivos planteados inicialmente. La discusión se divide en tres partes: cambio de uso de suelo, temperaturas y áreas de inundación sobre el cauce.
- Por último, se escribieron conclusiones como respuesta a los objetivos y preguntas planteados en esta introducción, comentando los resultados obtenidos, así como algunos problemas encontrados durante la realización de la tesis y objetivos para el futuro. La última parte de las conclusiones corresponde a un apartado de recomendaciones, en el cual se escribieron consejos generales para personas interesadas en el tema de la infraestructura verde, profesionistas y personas que forman parte de instituciones de gobierno o construcción.





## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO**

En este capítulo se describen los fundamentos base para esta investigación, tanto variables de análisis como términos que más adelante se convirtieron en mediciones y bases para la evaluación del potencial del área de estudio. Se buscó que los conceptos en este marco teórico fueran claros y provenientes de autores de diferentes nacionalidades para obtener diferentes perspectivas en algunos de los temas.

El punto 1.1 de desarrollo sustentable se abordó de la forma más sencilla posible, y a manera de antecedentes, al tratarse del tema más general para conectarse con lo siguiente. El punto 1.2 de sustentabilidad ambiental y urbana aborda temas de resiliencia, metabolismo urbano y actores de la sustentabilidad. El punto 1.3 describe lo referente al cambio climático, desde sus causas y teorías hasta sus consecuencias y el impacto sobre la ciudad. Por último el punto 1.4 es el tema central de investigación, donde se describe por diferentes perspectivas la definición, beneficios, formas y otros puntos importantes de la infraestructura verde, conteniendo dentro de este punto además la conceptualización de los servicios ambientales.

### **1.1. Desarrollo sustentable**

El término “desarrollo sustentable” lleva un tiempo relativamente corto de existir como tal. Antes de su creación durante la década de los 80, como se verá más adelante, había diversos enfoques y estudios que sentaron sus bases. Fue hasta el año a 1972, en la Cumbre de Estocolmo, que se reconoce por primera vez la problemática ambiental global. En esta reunión de gobiernos nacionales se presentaron los temas de contaminación regional y lluvia ácida, y para atender estas externalidades del desarrollo, se fundó el Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente, mejor conocido como UNEP. Posteriormente en 1976, se llevó a cabo la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Asentamientos Humanos en Vancouver, Canadá, estableciendo el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos también llamado UN-HABITAT, teniendo como objetivos principales el acceso a información sobre vivienda y desarrollo sustentable de los asentamientos humanos, así como la implementación de la asesoría técnica a países que enfrenten problemas de urbanización (ONU-Habitat, 2009).

La primera aproximación a un concepto de desarrollo que considerara al medioambiente expuso en 1987 con la publicación de las Naciones Unidas *Nuestro Futuro Común*. Se conceptualiza por primera vez el desarrollo sustentable como aquel desarrollo que “busca satisfacer las necesidades y aspiraciones del presente sin comprometer la habilidad de satisfacerlas en el futuro” (World Commission on Environment and Development, 1987), un proceso de cambio armónico entre la explotación de recursos, la dirección de inversiones, la orientación del desarrollo tecnológico, y el cambio institucional, orientado a mejorar el potencial actual y futuro, y que requiere el trabajo conjunto de sistemas políticos, económicos, sociales, de producción, tecnológicos, internacionales y administrativos en todos los países del mundo para el bien común de la humanidad y la naturaleza.

Desde entonces la Organización de las Naciones Unidas ha actualizado los documentos y eventos sobre sustentabilidad de acuerdo con la cambiante condición global. La Cumbre de Rio de Janeiro de 1992, también conocida como Cumbre de la Tierra, dio pie a la Agenda 21, documento que marcó un punto de partida en el tema del desarrollo sustentable ambiental. A partir de la Conferencia Hábitat II de 1996 y para complementar la Agenda 21, en Estambul nació la Agenda Hábitat listando objetivos indispensables para el desarrollo sustentable de una ciudad relacionados con la vivienda, la urbanización, la pobreza y los problemas de gobernanza. Ambas agendas tienen en común la apreciación de las ciudades en el desarrollo, el enfoque del desarrollo urbano por la articulación de lo social, económico y ambiental, y el énfasis en los actores locales (Allen y You, 2002), aunque abordados desde diferentes perspectivas.

La Cumbre del Milenio del año 2000 realizada en Nueva York logró unir las perspectivas de la Cumbre Hábitat y la Cumbre de la Tierra, listando propuestas sobre desarrollo y medioambiente. La agenda de desarrollo enmarca metas enfocadas hacia la reducción de la pobreza, el abastecimiento de agua potable, y la necesidad por ofrecer mejores condiciones de vida en las zonas urbanas. La agenda ambiental abarca metas hacia el cambio climático, la contabilización verde y la valoración de ecosistemas.

Una vez conectados estos antecedentes rápidos sobre el desarrollo sustentable y su percepción en el ámbito institucional, y después de varios años de perfeccionarse el

término, se ha continuado con eventos que cada vez enmarcan casos y problemas más específicos en materia ambiental de acuerdo a los temas que más conciernen a los gobiernos de los periodos en que se realizan. En el siguiente subtítulo se verá el caso de la Conferencia Hábitat III, donde claramente se vio un cambio de perspectivas en contraste con las conferencias anteriores.

### **1.1.1. Sobre Conferencia Hábitat III**

La más reciente Conferencia Hábitat III se llevó a cabo en Ecuador durante octubre del año 2016, la cual planteó seis grandes áreas temáticas: ciudades equitativas, marcos urbanos, desarrollo espacial, economía urbana, ecología urbana y medioambiente, y por último, vivienda y servicios urbanos. Desde el planteamiento de los objetivos de Hábitat III se enlistaron 17 objetivos, destacando entre ellos particularmente el desarrollo de infraestructura resiliente, la lucha contra el cambio climático y la seguridad en las ciudades, tomando como punto inicial el potencial local en contraste con la presencia nacionalmente y la inevitable globalización a través del protagonismo de las personas y el planeta con un enfoque social y ambiental (Organización de las Naciones Unidas, 2015). En la Nueva Agenda Urbana publicada como resultado de esta conferencia, se especifica los propósitos principales de terminar con la pobreza, el hambre, las desigualdades, la discriminación por género, todo esto en un contexto de impulso al crecimiento económico, sustentable y resiliente (Organización de las Naciones Unidas, 2017).

En su tercera área de trabajo sobre desarrollo espacial se menciona por primera vez el término infraestructura verde, siendo necesaria su implementación globalmente a través de una perspectiva de la planificación que integre a los ecosistemas, la dinámica ecológica, y los ciudadanos de toda clase, género y grupo social. En su quinta área de trabajo sobre ecología urbana y medioambiente, Hábitat III introduce el tema de la infraestructura verde y su papel como un puente entre la gestión urbana y la naturaleza.

“Un enfoque ecosistémico en la gestión de la ciudad es económicamente racional y permite promover infraestructura verde, y medidas de adaptación y mitigación. Las ciudades son parte de la biósfera y deben aspirar a un equilibrio de su huella ecológica entendiendo a la naturaleza

como parte del ecosistema urbano. La inversión en ‘infraestructura verde’ es una de las maneras de abrazar un enfoque ecosistémico en la gestión de la ciudad y proporciona moderación de las temperaturas, reducción de la contaminación y un aumento de valor estético urbano” (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Si bien esto era lo indicado en los documentos previos a la Agenda, el término infraestructura verde no aparece como tal en el documento publicado en el año 2017: este habla de proyectos urbanos y espacios públicos con las características de dichas infraestructuras, tales como accesibilidad, inclusividad, conectividad, la participación ciudadana y la interacción social. Además se mencionan puntos importantes como la reducción de riesgos de desastres, el aumento de resiliencia, la protección de recursos hídricos, y la adaptación al cambio climático (Organización de las Naciones Unidas, 2017).

Lo anterior resume a grandes rasgos la evolución del concepto de desarrollo sustentable desde su reconocimiento mundial en el siglo pasado como opción para el desarrollo en el futuro, hasta la actualidad. Sin embargo, el concepto de desarrollo sustentable abarca una gran amplitud de temas y definiciones, las cuales se actualizan constantemente de acuerdo con la situación contemporánea de cada nación y autor dedicado a este tipo de investigaciones. El mayor reto al intentar crear una comunidad sustentable es en regiones urbanas, donde las mismas actividades propias de la ciudad representan inevitablemente una amenaza para el medioambiente debido a la sobreexplotación de recursos y la gestión poco amigable con la naturaleza. La sustentabilidad ambiental y su relación con el desarrollo urbano es un tema aún más amplio, y digno de estudiarse a fondo.

## **1.2. Sustentabilidad ambiental y urbana**

Allen (2001) describe al desarrollo sustentable como la intersección de tres tipos de metas sociales, ambientales y económicas. Sin embargo, al desarticular su descripción resulta insuficiente para representar todos los elementos que intervienen en el proceso del desarrollo sustentable.

“Para poder evaluar qué procesos contemporáneos del desarrollo urbano están avanzando hacia o alejándose de la sustentabilidad, debemos considerar el camino en el que el concepto de sustentabilidad redefine la actuación social, económica, ambiental o política del desarrollo urbano. En las ciudades, la actuación ambiental es definida no solo en términos de uso y apropiación de la base de recursos naturales o del capital natural, también en términos de la actuación del medio físico o construido. Entonces, evaluar la sustentabilidad del proceso de desarrollo urbano dependerá de las tendencias y desafíos asociados a las dimensiones discutidas a continuación”... (Allen, 2001)

Allen continúa explicando el proceso de la sustentabilidad en las ciudades con estas cinco dimensiones: la económica, la social, la natural, la física y la política, donde las primeras 4 funcionan como círculos separados que se unifican en el contexto de la sustentabilidad política para así terminar logrando exitosamente la sustentabilidad urbana, sosteniéndose a su vez sobre su propia capacidad ecológica bioregional.

A diferencia de Allen, Ravetz (2000) simplifica los actores del desarrollo sustentable a tres: la economía, el medioambiente y la sociedad. Estos tres elementos se combinan, por ejemplo, conectando a la sociedad con el medioambiente por medio de política, valores culturales y valores étnicos. Adicionalmente se relacionan la economía y el medioambiente por medio de la distribución de recursos e ingresos, y la coexistencia de la economía con la capacidad de carga; y la economía y la sociedad creando nuevos caminos para la interacción social. Cada ciudad debe establecer el camino hacia la sustentabilidad según las dinámicas de la región, debe resultar de interacciones planeadas en una temporalidad a largo plazo partiendo de un equilibrio de sistemas urbanos con sus respectivas fuentes de recursos, sumándose al desarrollo urbano como evolución y reestructuración de sistemas en un contexto global. El fruto de esta alianza es el desarrollo urbano sustentable, que conceptualiza como “las acciones que dirigen el proceso evolutivo del desarrollo urbano hacia el balance dinámico de la sustentabilidad ambiental” (Ravetz, 2000).

Este mismo autor también describe una analogía del organismo vivo con la ciudad, aludiendo al concepto de metabolismo ambiental y urbano, y alegando que la ciudad debe

tener sus propios ciclos y flujos internos y así lograr ser menos vulnerable, menos dañina, y más sustentable, ya que puede aprovechar a la naturaleza como proveedora de recursos a la vez que la misma ciudad le provee de nuevos espacios o herramientas. Finalmente, puntualiza tres fases del desarrollo sustentable: la estabilización, la redirección, y la sustentabilidad, a corto, mediano y largo plazo respectivamente, actuando para reducir niveles y tendencias de impactos y presiones ambientales. Estas tres fases desarrollan una ciudad que funciona equilibradamente en aspectos físicos, ambientales, espaciales, de transporte, industriales, tecnológicos, económicos, sociales, políticos y culturales.

Tjanlingii (1995), de la misma manera habla sobre las ciudades y sus ciclos, refiriéndose a la ciudad como un ecosistema, conformada por sistemas de relaciones entre elementos bióticos y abióticos, es decir, entre su medio natural y sus áreas urbanizadas, personas, sistemas de infraestructura, sistemas políticos y económicos, entre otros.

Desde esta idea de metabolismo urbano, la resiliencia se conforma como una característica significativa de la sustentabilidad urbana, este concepto nace desde una perspectiva ambiental, definiéndola como la “medida de persistencia de los ecosistemas y la consecuente habilidad de estos para absorber cambios o disturbios generados por eventos aleatorios, así como la posibilidad de mantener las mismas relaciones entre poblaciones y variables presentes antes del fenómeno” (Holling, 1973).

Sin embargo, esta concepción también se ha desarrollado como resiliencia urbana dentro de las disciplinas propias de la planeación local, en la que se manejan factores del tipo natural, económico, biosanitario, político, tecnológico, social, e incluso de violencia y terrorismo (Julio, 2011), para poder determinar el cambio que puede sufrir una ciudad y de qué manera pueden sobrellevarse ciertas situaciones, es decir, la habilidad del sistema urbano para soportar ciertas tensiones y conmociones (Leichenko, 2011), especialmente en lo que respecta a la reducción de riesgos ante desastres y las estrategias para su reducción dentro del diseño urbano (Jiménez, 2016).

El análisis de la resiliencia urbana comprende dos fases: la adaptación a la vulnerabilidad inmediata, y la recuperación de las diferentes actividades de la ciudad (Bertoux y González, 2015), y así poder concluir en qué condiciones se encuentra una ciudad para

enfrentarse a los mayores problemas urbanos posibles, entre ellos el cambio climático. La teoría de la resiliencia es adecuada para la definición de metas y la evaluación de resultados con los principios de la sustentabilidad urbana, al permitir la integración de las funciones de los ecosistemas con las dinámicas sociales urbanas (Andersson, 2006), mismas dinámicas que deben ser tomadas en cuenta al momento de evaluar la vulnerabilidad de ciertos grupos sociales, que debido a sus desventajas tienden a sufrir mayores afectaciones (Jiménez, 2016).

Para integrar el tema de resiliencia al del desarrollo sustentable, Haughton y Hunter (1994) lo conectan a tres principios básicos directamente relacionados con la dimensión social urbana: la equidad intergeneracional, la justicia social, y la responsabilidad transfronteriza. Los tres principios pueden relacionarse la definición original del desarrollo sustentable de *Nuestro Futuro Común*, donde se menciona en repetidas ocasiones cómo las acciones de una sociedad deben respetar la integridad de las generaciones actuales y de las generaciones futuras, pero también a otros grupos, comunidades y naciones, debido a que cualquier alteración dentro de un país podría afectar a un país vecino o con el que mantenga una relación.

En este contexto, Tjanlingii (1995) plantea un modelo propio para el desarrollo urbano con base en la ecología urbana, al cual denomina ECOPOLIS, dividido en tres áreas de atención: flujos, sitios/áreas y participantes. ‘Flujos’ se refiere a cuatro sistemas: energía, agua, basura y transporte, y plantea estrategias para resolver los problemas de estos cuatro sistemas de la manera más efectiva y eficiente, en la escala adecuada. ‘Sitios/áreas’ se refiere a la planeación de la integración de los flujos antes mencionados, y cómo pueden ser manejados para administrar áreas. Por último, ‘participantes’ se refiere a los actores del desarrollo y administración urbana: habitantes, organizaciones sin fines de lucro, servicios gubernamentales y comercios, con el objetivo de crear condiciones que comprometan a estos actores con las relaciones ecológicas.

Desde estas perspectivas para abordar al desarrollo urbano sustentable, el producto final de cualquier proyecto de desarrollo urbano que busque la sustentabilidad podría plantearse como la ciudad verde descrita por Haughton y Hunter (1994): delimitada por la misma naturaleza, basada en su contexto bioregional, dedicada a hacer cambios socioculturales y

ambientales. La ciudad verde y sustentable es pequeña, cooperativa y autosuficiente económica y ambientalmente, donde las personas y los negocios intentan continuamente mejorar su entorno natural, construido y cultural a nivel vecindario y región, a la vez que trabajan en modos que siempre apoyen la meta del desarrollo sustentable global.

La ciudad sustentable no puede pensarse sin la integración con sus áreas verdes, espacios que varían en definición según ciertos autores y culturas. En el caso del National Housing Federation (2011) de Inglaterra, se refiere a un área dotada de vegetación para fines de recreación y disfrute de la comunidad, encontrada en forma de parques, jardines comunitarios, espacios recreativos, áreas infantiles y juveniles, huertos, instalaciones deportivas al aire libre, corredores verdes, bosques, praderas, humedales y espacios cívicos. Además, maneja una definición de espacio abierto muy similar a la de un espacio verde, como un espacio público que incluye tierra y agua que ofrece oportunidades de recreación y deporte, y por consiguiente una diversión comunitaria. Sus beneficios van desde la inclusión social y la educación ambiental hasta la regeneración urbana y la conservación de patrimonio, la conservación de biodiversidad y una vida más saludable para todas las edades al ofrecer espacios para ejercitarse.

Fadigas (2009) agrega a estos beneficios las mejoras a los procesos de urbanización y regeneración de tejidos urbanos, e incluso se ha comprobado que las áreas verdes en buenas condiciones y acondicionadas para personas de todas las edades pueden extender la esperanza de vida de personas de la tercera edad (Takano, Nakamura, y Watanabe, 2002).

Para Bolund y Hunhammar (1999), las áreas verdes poseen tanta importancia que incluso las denomina ecosistemas urbanos, aun siendo espacios modificados o creados por el hombre y de escala que podría parecer insignificante. Este autor categoriza estos ecosistemas urbanos en: árboles que se encuentran en la calle, parques o patios, bosques urbanos, humedales, lagos o mares, y arroyos, y declara que todo espacio verde o elemento natural dentro de una ciudad puede entrar en una de estas categorías, y que incluso los espacios abiertos como los baldíos y los basureros pueden albergar una población animal o vegetal que los convertiría en ecosistemas.



Zhang, Liu, Hall, y Fu (2006), mencionan que el espacio verde urbano es un componente importante de estos ecosistemas que contribuye al medioambiente y a la vida de la ciudad por igual, y que dichos componentes donan servicios ambientales que tienen un impacto directo en el bienestar de la ciudad y por lo tanto deben ser aprovechados para fines de planeación urbana.

En este contexto y como se vio en un par de párrafos previos, no es extraño que Bolund y Hunhammar (1999), hable de cuerpos de agua, ya que estos son una buena adición a los espacios verdes: incrementan su valor estético y otorgan un mayor valor ambiental al regular la temperatura en las áreas circundantes.

Retomando la ciudad verde de Haughton y Hunter, en lo que respecta los límites naturales, un río urbano bien tratado y acondicionado incrementa el valor económico del suelo y la posibilidad de ofrecer ciertos servicios y actividades recreativas, atrae clientes y nuevos residentes por su valor paisajístico, reduce la contaminación del aire, entre otros beneficios que los residentes de áreas urbanas extensas han mencionado en importantes encuestas (Shafer, Scott, Baker, y Winemiller, 2013). Sin embargo hay que tener cuidado del tratamiento que se le da al río urbano, no debe olvidarse que se trata de un ecosistema acuático que la actividad humana puede alterar (Holling, 1973).

El desarrollo sustentable de una ciudad implica una armonía entre dimensiones económicas, ambientales, sociales y políticas: funciona como un organismo vivo que es menos vulnerable a factores de cambio externos, y en la época en la que vivimos los factores de cambio van más allá de la acción humana, o mejor dicho, pueden ser consecuencia de esta. En este contexto, el cambio climático es uno de estos factores que necesita estudiarse a fondo para que la ciudad esté preparada ante sus posibles consecuencias.

### **1.3. Cambio climático**

La Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas diferencia el cambio climático de la variación climática, siendo la primera atribuida a la actividad humana, y la segunda a causas naturales: en ambos casos, sucede una alteración climatológica en la atmósfera. El cambio climático se define como “la variación del estado

del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos” (IPCC, 2007). Existen diversas teorías sobre el cambio climático, siendo la teoría antropogénica la más reconocida: la producción de CO<sub>2</sub> como su principal causante (Bast, 2010). Se atribuye el calentamiento global al CO<sub>2</sub> producido por la actividad humana, junto con otros gases que producen el efecto invernadero en la atmósfera y acumulan el calor dentro de ella. Sin embargo, esta teoría ha perdido fuerza y credibilidad a través de los años, y ha dado lugar a otras teorías que no tienen relación alguna con los gases invernadero.

Existen seis teorías alternativas y científicamente comprobadas: el bio-termostato global creado a partir de las reacciones químicas de la atmósfera ante el aumento de temperatura, el cambio en el albedo y formación de las nubes, la acción humana sobre el suelo terrestre para actividades de producción y/o urbanización, el cambio en la velocidad de las corrientes marinas y su influencia en precipitaciones y evaporación, el movimiento planetario natural que altera la incidencia de los rayos solares, y por último la variabilidad de los gases en la superficie solar (Bast, 2010). Para efectos de esta investigación, y debido a su frecuente inclusión en las políticas de acción contra el cambio climático, se tomarán como causas principales las referentes a la acción humana: la teoría antropogénica antes mencionada, pero también el tema de la isla de calor urbana como parte de la teoría de las acciones humanas.

El cambio climático es la principal causa del incremento y aparición de desastres naturales como inundaciones y tormentas, lo que convierte a una gran cantidad de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo, o empeora la condición de aquellos que ya se encuentran en zonas peligrosas según sus características físicas o ubicación geográfica. El impacto ocurre sobre las actividades agrícolas, los recursos naturales, el agua, en el bienestar humano, y prácticamente en cualquier actividad o espacio humano. En el caso de los ecosistemas naturales que involucran cuerpos de agua, estos han perdido una gran cantidad de su biodiversidad debido al aumento de amenazas de represas, la extracción del agua, la sobrepesca y la extracción de minerales, la presencia de especies invasoras, entre otras (Calvache, Benítez, y Ramos, 2012), pero además, el cambio climático podría causar más

alteraciones en estos ecosistemas, aunadas a los patrones de precipitaciones. A partir de esto aparecerían sequías o inundaciones, perjudicando a las ciudades a niveles humanos, económicos y de infraestructura, e incluso tendrían consecuencias directas e indirectas sobre la organización y funcionamiento de la ciudad (Bertoux y González, 2015).

Una de las manifestaciones del cambio climático a nivel urbano es el fenómeno de la isla de calor urbana, donde el área urbana tiene una mayor temperatura que las áreas no urbanizadas, esto debido a la concentración de máquinas productoras de energía, superficies que emiten el calor absorbido durante el día y sobre todo por la falta de superficies verdes que causan el efecto contrario al de una superficie de concreto o asfalto (Bast, 2010), y en general la modificación de la cobertura de los suelos urbanos. El tema de la isla de calor urbana ha adquirido la atención de investigadores y gobiernos mundialmente al ser una consecuencia casi inevitable de la urbanización y el crecimiento desordenado de las ciudades, y es un tema central al hablar de mitigación ante el cambio climático (Villanueva-Solís, Ranfla, y Quintanilla-Montoya, 2012).

El tema del cambio climático también forma parte de los 17 objetivos de desarrollo sustentable tratados en la cumbre Hábitat III: “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (Organización de las Naciones Unidas, 2015). El documento publicado por ONU-Hábitat como introducción hacia Hábitat III contiene un apartado exclusivo sobre el cambio climático y gestión de riesgos, en el cual se identifican cinco factores clave para combatir estos dos problemas dentro de un contexto urbano: la planificación y el diseño urbano, la gobernanza urbana, la financiación, la participación y la gestión del conocimiento. A grandes rasgos, se habla del ideal de la ciudad compacta y eficiente en cuestión de servicios, con un sistema político transparente que garantice la sustentabilidad, la participación social, la transferencia financiera y tecnológica entre países, y el uso de tecnologías para disminuir el impacto ambiental negativo (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

Contra el cambio climático se tienen generalmente posturas con medidas de mitigación y adaptación. Mientras que la mitigación busca reducir emisiones e insumos de recursos a través de cambios y reemplazos tecnológicos en políticas ambientales, la adaptación se logra con medidas e iniciativas para reducir la vulnerabilidad de los sistemas ante el

cambio climático aumentando su resiliencia (IPCC, 2007). De acuerdo con Raynal-Villaseñor (2011), las medidas para combatir el cambio climático más populares y divulgadas tienen mayor relación con la participación ciudadana que con las políticas públicas, usualmente enfrentando el problema con campañas de concientización y educación ambiental.

Un ejemplo recurrente pero cuya veracidad ha sido comprobada científicamente son las campañas de reforestación, protección y recuperación de zonas forestales, esto con la premisa de que cada ser humano produce tal cantidad de CO<sub>2</sub> a lo largo de su vida, que solo puede transformar esto en oxígeno con 500 árboles (Raynal-Villaseñor, 2011). En las ciudades es de vital importancia educar a la población para que relacionen el bienestar de las áreas verdes con beneficios ambientales como la recarga de acuíferos y la reducción de la isla de calor, adicionalmente a los beneficios culturales como la recreación, el esparcimiento y la actividad física.

El fenómeno del cambio climático ha estado presente desde hace varios decenios, afecta a todas las naciones del mundo por igual, y aun así ha sido difícil hasta la fecha poner en funcionamiento herramientas que otorguen cualidades de mitigación y adaptación en las ciudades contra este. Proyectos de desarrollo y diseño urbano denominados como infraestructura verde poseen principios que esencialmente permiten a una comunidad ser más resistentes ante problemas ambientales como este.

#### **1.4. Infraestructura verde**

El término “infraestructura verde” es un concepto relativamente nuevo, el cual ha ganado fuerza en los últimos años debido a la constante lucha de las naciones por lograr una planeación exitosa orientada a la sustentabilidad. Sin embargo, al estudiar sobre diferentes publicaciones, libros y artículos al respecto, es común ver como el concepto cambia según la perspectiva o las variables consideradas por cada uno de los autores dedicados al tema, e incluso según el país de procedencia de los autores, ya que la base teórica actualmente es principalmente creada para fines institucionales.

A través de los años la infraestructura verde ha podido verse en forma de parques victorianos, corredores verdes, ciudades-jardín, “new towns”, la ciudad ecológica y el urbanismo sustentable (Wright, 2011).

Los países donde se ha integrado la infraestructura verde en la planeación urbana son Estados Unidos, España y los países que conforman Reino Unido, cada uno con su propio enfoque. En Estados Unidos se utiliza la infraestructura verde para la planeación y el diseño principalmente estructurado por una red de desagüe o hidrológica híbrida conectada con áreas verdes e infraestructura para proveer funciones ecológicas (Ahern, 2007), por otro lado en la planeación de Inglaterra la infraestructura verde es considerada como un conjunto de redes conectadas de espacios multifuncionales predominantemente no construidos para apoyar servicios y procesos ecológicos y sociales (Kambites y Owen, 2006).

Específicamente, se trata como una red de espacios verdes multifuncionales que contribuye a la calidad del ambiente natural y construido, público y privado, urbano y rural, accesible y no accesible, para las comunidades actuales y futuras (Chris Blandford Associates, 2006).

En Escocia se entiende la infraestructura verde como el uso de ecosistemas, espacios verdes y agua en la planeación estratégica de usos de suelo de manera que la calidad de vida se incremente al igual que el medioambiente natural, utilizando espacios como parques, campos de juego, bosques, humedales, jardines privados, entre otros (APS Group Scotland, 2011).

En el caso de Irlanda del Norte, no se maneja precisamente un concepto de infraestructura verde pero si el de un espacio abierto que contribuye a la calidad de vida urbana otorgando pulmones verdes, descansos visuales y hábitats silvestres dentro de una zona urbanizada, dicho espacio es similar al definido como infraestructura verde en otros países (Royal Town Planning Institute, 2013).

En España la infraestructura verde se considera un instrumento de paisaje, fruto de un proceso participativo comunitario que preserva la identidad del lugar y garantiza el

funcionamiento medioambiental del territorio ofreciendo un espacio de interés cultural o visual (Muñoz, 2008).

En general Europa ve a la infraestructura verde como una red estratégicamente planeada de áreas naturales y seminaturales con características ambientales diseñadas para cumplir funciones ecológicas, con la tarea de cumplir una multifuncionalidad de servicios ecosistémicos y la conectividad que logre la protección de redes ecológicas (Liquete *et al.*, 2015). Hasta la fecha, el concepto más difundido y conocido de la literatura del tema es el de Benedict y McMahon, de origen estadounidense, quienes priorizan la multifuncionalidad del espacio, la conectividad entre natural y artificial, y la calidad de vida a través de estos espacios:

“...el sistema natural de soporte de vida de nuestra nación, una red interconectada de hidrovías, humedales, bosques, hábitats de vida silvestre, y otras áreas naturales; caminos verdes, parques y otras zonas de conservación; granjas de trabajo, ranchos y bosques; y áreas salvajes y otros espacios que sustenten especies nativas, mantengan procesos ecológicos naturales, sostengan recursos de aire y agua, y contribuyan a la salud y calidad de vida de las comunidades y personas de América” (Benedict y McMahon, 2002).

Comparando los conceptos desarrollados por los autores según su área de trabajo, puede entenderse que en Estados Unidos la infraestructura verde cumple funciones principalmente hidrológicas y pluviales. En Europa se unen las funciones naturales y ecología con la estética y el beneficio a la comunidad en la actualidad y para el futuro. En el Reino Unido se busca la conexión entre lo natural y lo construido, mientras que España se enfoca en el paisaje. A pesar de estas diferencias entre EE. UU., Reino Unido y España se tienen en común la búsqueda de la armonía con la naturaleza a través de la conectividad de espacios naturales y construidos, el aprovechamiento de funciones ambientales y la multifuncionalidad de los espacios para lograr lo antes mencionado.

Para esta investigación, se define a la infraestructura verde como una red de áreas naturales y seminaturales o parcialmente construidas, que desempeña funciones

ecológicas, paisajísticas y culturales, que contribuyen al mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad y su integración al medioambiente.

Para sistematizar el concepto de infraestructura verde se integran las siguientes dimensiones: principios, funciones y beneficios. Donde los principios se dedican a la mejora y conservación del paisaje local, histórico, arqueológico, natural y patrimonial, utilizando espacios naturales existentes y conectándolos con espacios nuevos construidos o con la ampliación del mismo espacio natural. Se trata de la unificación de actividades recreativas, ecológicas, urbanas, naturales, históricas, culturales, educativas y sociales dentro de espacios comunes que cumplen altas pautas de calidad y sustentabilidad (Chris Blandford Associates, 2006).

Sus funciones son similares a sus principios, como la recreación, la conectividad, la educación, la estructura paisajística, la preservación histórica y la conservación de la naturaleza, pero también maneja funciones de carácter más urbanístico, como el transporte sustentable, los derechos de vía públicos, los espacios para eventos socioculturales, energías renovables, manejo de sistemas pluviales, producción de alimentos y la integración de comunidades nuevas y existentes.

Es así como los principios y funciones interactúan dentro de una dinámica urbana y social que coexiste valiosamente con el medioambiente denotando además la importancia de la conciencia pública y la cooperación entre ciudadanos, empresarios, funcionarios públicos, y todos los actores necesarios para lograr la correcta aplicación de los principios de infraestructura verde desde el proceso de planeación hasta la obtención de resultados (Grizans, Auzins, y Vanags, 2012).

Los beneficios de la infraestructura verde son entonces entendidos socialmente, debido a que los habitantes de una región obtienen una mejor calidad de vida al facilitar el acceso a la naturaleza y a los espacios abiertos. Esto trae consigo espacios más atractivos a inversionistas, agregan valor a la tierra y fomentan actividades turísticas, que impulsan la economía de la ciudad. La conectividad con la naturaleza brinda beneficios ambientales tales como la conservación de la naturaleza, una mejor calidad del aire y el apoyo a una identidad local.

Los espacios planeados de acuerdo a los principios de la infraestructura verde pueden adicionalmente auxiliar a la salud de las personas que habitan la ciudad o las zonas cercanas a ellos, por ejemplo promoviendo un estilo de vida más activo y saludable con prácticas como el deporte, el ciclismo, la caminata y otras actividades al aire libre (Chris Blandford Associates, 2006).

Por mencionar otros beneficios de la infraestructura verde y retomando el documento introductorio a la Conferencia Hábitat III, se menciona que la infraestructura verde es un puente hacia medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, por lo que se debe invertir en esta para lograr moderar temperaturas, reducir contaminación, aumentar el valor estético, al mismo tiempo que se gestionan los residuos de la ciudad y la reducción de costos (Organización de las Naciones Unidas, 2015). Si bien no se tiene un gran apartado específico sobre infraestructura verde en el documento, se puntualiza claramente el conjunto de beneficios que esta brinda al contexto urbano.

Se pueden trabajar varias escalas de infraestructura verde según la magnitud de lo requerido o el tipo de proyecto que se desee realizar. Según la APS Group Scotland (2011) es posible trabajar con cuatro escalas de planeación, siendo la primera a nivel edificio, con prácticas como los techos verdes, la segunda es a nivel vialidad, donde una calle puede ser más amigable con todo usuario con prácticas como la vegetación en las vialidades para regulación de temperaturas, la disminución de ruido y polvo y el atractivo visual, y la tercera escala es el nivel de vecindario donde se planea integrar el entorno construido a una red verde que promueva la reducción de emisiones de vehículos y el estilo de vida activo. Por último, está la escala a nivel estratégico, tratándose de planes de desarrollo y planes maestros que usualmente crean conexiones entre ciudades enteras o una gran parte de ellas con una región natural de conservación, o bien, simplemente se integran zonas naturales entre ellas. Las cuatro escalas se desarrollan con los mismos principios y funciones anteriormente mencionados, la diferencia sería en los beneficios que varían en el nivel de impacto.

Como ejemplo, el concepto de los *greenways* definitivamente se maneja con una escala a nivel vecindario o estratégica, tratándose de redes de elementos lineales para propósitos ecológicos, sustentables, culturales y estéticos con una configuración espacial linear,



conexiones con un contexto paisajístico mayor, la multifuncionalidad espacial y la compatibilidad con el concepto de la sustentabilidad económica y ambiental (Ahern, 1995). Los principios de los *greenways* no son muy distintos a los de la infraestructura verde, lo que evidencia que al buscar principios de sustentabilidad urbana suele llegarse a soluciones similares entre ellas, aunque con teorías y métodos diferentes. La escala puede tener también relación con la tipología propuesta por Natural England (2009), que resume la infraestructura verde a cinco grandes grupos: parques y jardines de diferentes magnitudes, espacios verdes recreativos, las áreas verdes naturales y seminaturales urbanas de mayor superficie, los corredores verdes que se conforman por ríos y canales con sus respectivos caminos y derechos de vía, y por último una categoría para las áreas restantes como jardines comunitarios, cementerios, granjas urbanas y parcelas.

Los beneficios antes mencionados no son excluyentes, sino que se relacionan con escalas y entre sí. La red ecológica Red Natura 2000 para la conservación de la biodiversidad en Europa en diversas zonas naturales y de protección para aves (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, s.f) maneja un enfoque predominantemente ambiental desde un nivel estratégico. El proyecto de infraestructura verde para el Río Támesis en Londres trabaja a una escala de vecindario o estratégica, con beneficios mayormente sociales y ambientales, busca crear zonas habitables de carácter ecológico y cultural a partir de la conexión entre lo construido y lo natural para crear un sentido de identidad positivo y mejorar la calidad de vida (Department for Environment Food and Rural Affairs, 2004).

En el ámbito nacional, en el Distrito Federal, hoy Ciudad de México, el proyecto de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel desarrollado por la UNAM a nivel vecindario está compuesta por elementos naturales y elementos de intervención humana utilizando los antecedentes biológicos y sociales del pedregal (Suárez, Camarena, Herrera, y Lot, 2011). El grupo Watershed Management Group y su documento *Infraestructura Verde para comunidades del desierto sonorense* proporciona lineamientos y recomendaciones para construcción y acondicionamiento de calles y espacios públicos con prácticas de infraestructura verde, como la utilización de vegetación y acolchado para propósito de bioretención y manejo de agua y las trampas de sedimento, que si bien no

representan una infraestructura verde avanzada, si se acercan bastante al concepto por medio de prácticas sencillas (Watershed Management Group, 2012), logrando beneficios ambientales y probablemente económicos si se realizan correctamente las prácticas pluviales, y obviamente planeado en una escala menor a nivel vialidad.

La infraestructura verde puede contribuir a reducir ciertos problemas del ambiente por medio de la regulación de temperaturas y la reducción de deslaves e inundaciones, mientras que contribuye a la creación de espacios recreativos si es que la escala, forma y función lo permite. La eficacia de un espacio verde para la reducción de los efectos del cambio climático se reduce a cuatro factores: el carácter biofísico del medioambiente construido, los sistemas de planeación, los marcos institucionales y los valores de la población urbana (Matthews, Lo, y Byrne, 2015). Si estos factores se interrelacionan de manera correcta, se puede mejorar la salud y bienestar de los residentes, proveer alimentos, controlar aspectos climáticos tales como el viento, la temperatura y los deslaves, e incluso incluir un sistema de generación de energía limpia.

La vegetación desempeña un papel primordial en la infraestructura verde: reduce los escurrimientos y deslaves que ocurren por las precipitaciones, y en el caso de un flujo mayor de agua, una zona de vegetación densa representa un mayor apoyo para la prevención de inundaciones que una zona seca o erosionada (Farrugia, Hudson, y McCulloch, 2013). Otro beneficio implícito es la reducción de temperaturas debida a la humedad proveniente de la evapotranspiración de las plantas, a la sombra creada por los árboles, y a la reducción de transmisión de calor contenido en la superficie. Estas características de las plantas proporcionan cierta utilidad para el ser humano, al igual que varios elementos de la naturaleza que poseen cierto potencial útil para alguna actividad humana. Este tipo de características son cruciales en el proceso de planeación y acción de la infraestructura verde y son comúnmente conocidas como servicios ambientales.

#### **1.4.1. Servicios ambientales**

Los servicios ambientales, también llamados ecosistémicos o ecológicos, son parte del resultado deseado de la implementación y acción de la infraestructura verde. Uno de los primeros documentos que propuso un marco de referencia sobre los servicios ambientales

es el resumen de la Millennium Ecosystem Assessment de 2003, en el cual se describen de los servicios que prestan los ecosistemas para el aprovechamiento humano:

Los servicios que prestan los ecosistemas son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas, y se integran por servicios de suministro, como los alimentos y el agua; servicios de regulación, como la regulación de las inundaciones, las sequías, la degradación del suelo y las enfermedades; servicios de base, como la formación del suelo y los ciclos de los nutrientes; y servicios culturales, como los beneficios recreacionales, espirituales, religiosos y otros beneficios intangibles (Secretaría de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, 2003).

Los servicios ambientales se consideran como servicios a partir de los beneficios que aporten al ser humano, por lo tanto, se evalúan de forma antropocéntrica. Son condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas intervienen en la vida humana directa o indirectamente para el bienestar humano (Grunewald y Bastian, 2015), aunque un servicio en si no existe en la naturaleza, solo el potencial para la realización de dicho proceso que se convierte en servicio al momento de que un ser humano tiene una necesidad que puede saciar con este potencial. La polinización por ejemplo es un proceso natural de las abejas que se convierte en un servicio ambiental al encontrar que los cultivos agrícolas, obviamente para el consumo humano, dependen en un gran porcentaje de este. Es importante recalcar que los servicios ambientales forman parte importante de las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, ya que facilitan formas de planeación de sistemas e infraestructuras que pueden alcanzar un estado de resiliencia a largo plazo en el caso de los cambios en las condiciones del medioambiente (Lennon y Scott, 2014).

Los servicios ambientales también pueden verse como los componentes de la naturaleza que son directamente disfrutados o utilizados por los humanos, no exactamente el beneficio obtenido de un ecosistema (Lennon y Scott, 2014). La infraestructura verde debe enfatizar la provisión de dichos servicios para la sociedad y para los ecosistemas, por medio de la planeación espacial, y al tratarse de servicios que pueden ser subjetivos y cambiantes por su naturaleza, es necesario que esta planeación espacial tenga la habilidad de adaptarse a necesidades futuras (Andersson, 2006).

Respecto a la aportación de infraestructura verde en zonas de humedales y ríos, la vegetación tiene la cualidad de reducir los escurrimientos posteriores a las precipitaciones. La tierra que alberga vegetación absorbe más humedad que la tierra erosionada, por lo que un suelo cubierto por vegetación abundante reduciría significativamente el riesgo de inundaciones o deslaves. Además de los beneficios en contra de inundaciones, un suelo con estas características naturalmente favorece al control climático por medio de la evapotranspiración, proceso en el que las plantas absorben calor sensible y expiden calor latente, convirtiendo el agua líquida en vapor (Farrugia *et al.*, 2013). En una infraestructura verde próxima a un río o propia de la zona de este, se revive la actividad de dicho cuerpo de agua conservando la biodiversidad y aportando una nueva área para actividades recreativas (Llausas y Roe, 2012).

Los servicios ambientales dentro de la zona de un río específicamente son la regulación del ciclo hidrológico, el control de sedimentación, el mejoramiento de la calidad del agua y otros como la interceptación de neblina (Calvache *et al.*, 2012), y gran parte de ellos son potenciados por la vegetación que crece a la orilla de los ríos, denominada vegetación riparia. Esta vegetación, como el carrizo y el sauce, proporciona servicios propios del ecosistema ripario como la regulación de flujos, la aportación de materia orgánica al cauce que alimenta a especies acuáticas, la estabilización de sedimentos y la habilidad de evitar la erosión de las áreas aledañas (Blanco-Garrido, López-Albacete, Herrera-Grao, Magdaleno-Más, y Martínez, 2011). Es por ello, que los ecosistemas riparios dependen totalmente de la estabilidad del río, del tipo de sedimento, la calidad del agua, y los procesos hidrológicos que se llevan a cabo, y por supuesto también de las actividades humanas. Un ecosistema ripario puede alterarse por el cambio en la calidad y cantidad del flujo del agua, los disturbios humanos y la tala de vegetación (Guerra, 2000).

Para el caso de esta investigación, los servicios que se verán más a fondo y se evaluarán en la parte metodológica serán algunos propios de los ríos: la regulación de caudales, el control de inundaciones y la regulación de microclima, proceso que se explicó anteriormente, y que Bolund y Hunhammar (1999) asegura que estos microclimas traen una disminución de temperatura utilizando las propiedades de los ecosistemas urbanos y vegetación por medio de la evapotranspiración.

El control de inundaciones tendrá la misma importancia en esta investigación, el cual es un servicio ambiental y una herramienta vista frecuentemente en la infraestructura verde, pues con esta se contribuye al control de precipitaciones y desagüe utilizando áreas verdes y suelos que retendrán el agua para disminuir el daño a las estructuras y construcciones existentes. El suelo absorbe y retiene el agua con mayor eficacia que un suelo pavimentado, mientras que la vegetación encontrada en él absorbe el agua y la evapora (Bolund y Hunhammar, 1999), por lo que además se relaciona con el control de microclima.

En un ecosistema urbano, los servicios ambientales se incorporan a la ciudad con espacios verdes y azules, representados por áreas verdes y cuerpos de agua artificiales o naturales respectivamente, y se caracterizan por tener una mayor demanda que en una zona rural, de parte de una mayor cantidad de beneficiarios inmediatos. En una ciudad afectada por las consecuencias propias de la urbanización, como la explotación del suelo, el agotamiento de recursos y la contaminación en diferentes dimensiones, cualquier tipo de restauración puede traer una mejora significativa en la calidad de vida, y la utilización de servicios ambientales puede ser bastante efectiva (Elmqvist *et al.*, 2015).

Sin embargo, algunos servicios ambientales no son compatibles y pueden hacer que el funcionamiento de dichos servicios no sea el esperado, como mencionan el caso de la biodiversidad en conjunto la retención de nutrientes (Jessop *et al.*, 2015). Es de suma importancia analizar los servicios ambientales que pretenden utilizarse para cualquier tipo de infraestructura verde, de tal forma que no se dañen entre sí ni dañen al medioambiente ya presente antes de la intervención.

Si se logra manejar los servicios ambientales correctamente, pueden incluso representar un beneficio económico importante por medio de los pagos de servicios ambientales, para los que existe ya un mercado internacional que enlaza los intereses de inversionistas, terratenientes y residentes con la conservación del medioambiente. Los pagos por servicios ambientales, o PES por sus siglas en inglés *Payments for Ecosystem Services*, son transacciones voluntarias donde un servicio ambiental definido es comprado por al menos un comprador de un proveedor si se asegura la provisión de dicho servicio (Wunder,

2005), y los más comunes en el mercado son la retención de carbono, la protección de biodiversidad, la protección de cuencas, y la belleza paisajística.

Un ejemplo es el del Valle Caura en Trinidad, donde con el fin de controlar los incendios forestales los sectores privado, público y civil construyeron senderos rurales para la prevención de incendios que funcionarían para el senderismo turístico, y se calculó el valor en el mercado para definir los pagos que harían los ciudadanos para conservar este servicio que finalmente funciona como recreativo/cultural y de conservación a la vez (Rawlins y Westby, 2013). En este caso se puede notar lo mencionado anteriormente respecto a los beneficios de la infraestructura verde, en este caso ambientales y económicos, tanto por los pagos de servicios como por la potencial atracción turística.

Una vez revisada la literatura correspondiente para este apartado teórico, se pueden apreciar las raíces dentro de la sustentabilidad del tema central de esta tesis: la infraestructura verde. Este tipo de infraestructura podría sobrentenderse solamente como elementos ecológicos o jardinados debido a la popularización del adjetivo “verde” en la actualidad, sin embargo, una vez delimitado el tema, se puede mejorar la calidad ambiental a través de elementos como la conectividad, la multifuncionalidad y la retroalimentación con el medioambiente.

La infraestructura verde, como ya se ha dicho, funciona a distintas escalas y regiones, en este caso se busca su propuesta dentro de un área riparia para la recuperación de servicios ambientales propios del ecosistema de un río. Por lo tanto, la siguiente revisión de literatura buscó métodos de análisis y evaluación de servicios riparios, cambios de usos de suelo entre periodos y de pérdida de los mismos.



## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

Por definición, el concepto de infraestructura verde explora la posibilidad de brindar uno o varios espacios verdes multifuncionales con la capacidad de crear una red integrada a los ya existentes en la ciudad: esto con el objetivo de reducir el efecto de isla de calor urbana y beneficiar a la ciudad en aspectos sociales, económicos, ambientales, estéticos, recreativos y de salud. Por lo tanto, se buscará la cualidad del espacio del Río Nuevo para proyectarse como infraestructura verde, rescatar características naturales del río, resultando en aumentar los niveles de resiliencia de la ciudad contra los efectos del cambio climático (Vásquez, 2016).

De acuerdo la literatura revisada en el marco teórico, las variables a evaluar son: cubierta vegetal, temperaturas, servicios ambientales de control de microclima y control de inundaciones, esta delimitación se hace en función de la disponibilidad tanto de métodos y técnicas como de la información disponible para realizar el análisis por medio de imágenes satelitales de la zona del Río Nuevo en cuatro fechas aproximadas:

1. Antes del gran proceso de urbanización, de preferencia alrededor de los años 80 o inicios de los 90.
2. Antes del comienzo de la obra de embovedado, la cual inició en el año 1996.
3. Después de terminada la obra de embovedado, en el año 2007.
4. Imagen reciente (la fecha más reciente posible).

Las imágenes adquiridas para el análisis son del satélite Landsat TM5, las cuales fueron adquiridas gratuitamente por cortesía de la USGS del gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica, y se aplicaron distintos procesos a las bandas espectrales para detectar el cambio de cobertura y de análisis de temperaturas superficie, esto para identificar el cambio de la temperatura debido a la dinámica de expansión urbana en la zona de estudio.

Para el caso seleccionado de los servicios ambientales referidos al control de microclima y control de inundaciones, inicialmente estos se evaluarían por calidad, sin embargo, se encontró con el problema de que la gran mayoría de las guías y manuales de evaluación de servicios ambientales, se refieren al valor monetario y pocas veces hacen énfasis a estos dos servicios que son primordiales para la mitigación y adaptación al cambio climático en



los sistemas urbanos. Es decir que las técnicas de evaluación económicas de los servicios ambientales no se tomaron en cuenta, ya que representan un interés de análisis orientado al campo institucional y al mercado, así como también se descartan las evaluaciones de carácter paisajístico que poseen cualidades mayormente subjetivas y culturales. La razón de esto es que se buscó utilizar metodologías de evaluación de los servicios ambientales, en función de la infraestructura verde como infraestructura urbana en sí, no como espacio recreativo o de esparcimiento.

## **2.1. Revisión de literatura**

Aunque ya se tenía una dirección inicial para el análisis de servicios, se buscó metodología en casos análogos de ríos urbanos para respaldar estos procesos, centrándose en la funcionalidad de servicios ambientales dentro de ellos, así como casos de regeneración de ríos en general. La mayor parte de los casos consultados se guían por motivos paisajísticos o monetarios, además de tratarse de ríos con características mayormente naturales, totalmente diferente al caso del Río Nuevo, que se encuentra embovedado y urbanizado desde finales de los años 90.

Varios casos se fueron descartando al tener un enfoque diferente o tomar información que en este caso propio no era válida o no buscaba los mismos objetivos, por lo tanto, en la Tabla 1 se hace un resumen a grandes rasgos de las fuentes bibliográficas utilizadas después de revisar y descartar, se seleccionaron los elementos metodológicos apropiados retomados en cada caso revisado.

**Tabla 1: Literatura revisada para metodología.**

Autores	Información utilizada
Sánchez, Caselles, Valor, y Coll (2007)	Teledetección con imágenes Landsat para cálculo de evapotranspiración.
Vásquez (2016)	Patrones termales con transectos sobre el cauce del río para cálculo de efecto enfriador, y mapeo de áreas de inundación para su mitigación.
Zamudio (2011)	Análisis del río Nuevo en tramos definidos por intersecciones viales, y superposición de mapas.
Schwarz, Bauer, y Haase (2011)	Elección de usos para clasificación de suelos y cubiertas. Análisis de emisividad de temperaturas según imagen satelital.

Fuente: Elaboración propia.

## **2.2. Proceso metodológico con sistemas de información geográfica.**

Para el proceso metodológico de esta tesis se utilizaron dos softwares para el análisis de información geográfica: ArcMap de ArcGIS 10.1 y ENVI 8, también se utilizó IDRISI Terrset procesamientos y visualizaciones.

Durante la primera aproximación se realizaron mosaicos con imágenes del río para determinar el área de estudio, en la escena completa adquirida por el sensor Landsat TM5. Estas escenas fueron descargadas del sitio web EarthExplorer con las coordenadas de la ciudad de Mexicali, para ser posteriormente recortadas, como primer paso, a solamente la extensión de la ciudad de Mexicali.

En la Figura 1 se presenta el diagrama de trabajo y metodología, el cual resume los pasos seguidos durante el procedimiento de investigación y que será abordado a mayor detalle en este capítulo.

**Figura 1: Diagrama de Metodología**



Fuente: Elaboración propia a partir de Vásquez (2016) y Schwarz *et al.* (2011)

### **2.2.1. Recopilación y preprocesamiento de imágenes.**

La primera parte de la metodología consistió en la recopilación de imágenes, debido a su disponibilidad, las variaciones de datos durante el proceso y a la simplificación del método, al final las fechas elegidas de las escenas Landsat TM5 fueron las siguientes:

- 1) 31 de mayo de 1984
- 2) 6 de mayo de 1998
- 3) 15 de mayo de 2007

El siguiente paso es el preprocesamiento de imágenes, se tomó como ejemplo la metodología de Hantson *et al.* (2011) que consiste en la corrección geométrica, radiométrica, atmosférica y topográfica de la imagen. El primer intento de corrección se realizó con puntos específicos tomados del plano de catastro en ArcGIS, y luego se corrigió con puntos de referencia fácilmente identificables en la parte urbana y agrícola. Finalmente, con el software ENVI, se utilizaron las herramientas para corrección y normalización insertando el archivo MTL provisto por la USGS junto con las imágenes de satélite (ver Anexo A). Las figuras 2, 3 y 4 muestran las tres imágenes resultantes de la ciudad correspondientes a tres años definidos para analizar el cambio en este estudio.

**Figura 2: Imagen normalizada de la ciudad de Mexicali en 1984.**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

**Figura 3: Imagen normalizada de la ciudad de Mexicali en 1998.**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

**Figura 4: Imagen normalizada de la ciudad de Mexicali en 2007.**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

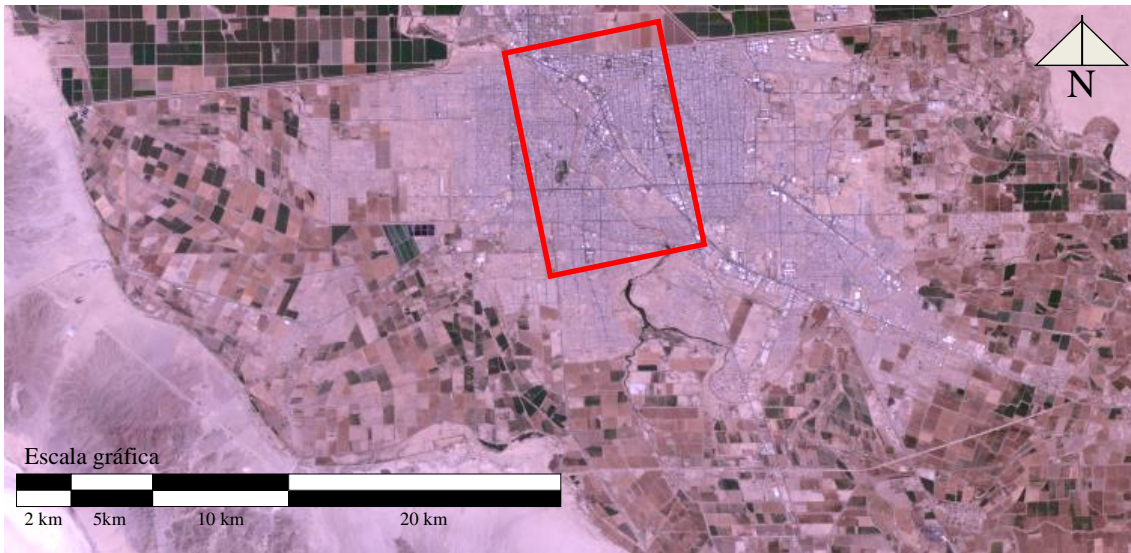
### **2.2.2. Clasificación de cubiertas y usos de suelo.**

Para la clasificación de cubiertas y usos de suelo, se realizó una clasificación empírica según el conocimiento de la ciudad, estableciendo las siguientes coberturas: área urbana de densidad baja, media y alta, vegetación urbana, baldíos, vialidades, naves o grandes cubiertas, cuerpos de agua, cultivos agrícolas, área agrícola en preparación, cultivos con riego, área agrícola en preparación con riego, bajadas de sierra, bancos de arena y sierra. Esta clasificación se realizó en toda el área de estudio con la finalidad de tener el contexto del río Nuevo, sin embargo posteriormente se retomó sólo el área del cauce de acuerdo a la metodología definida. Esta clasificación de coberturas se utilizó para el procesamiento de las tres imágenes satelitales, mostradas en el apartado anterior, correspondientes a los años 1984, 1998 y 2007 con el software ENVI, tomando ejemplos de píxeles para que posteriormente el software hiciera un reconocimiento de píxeles similares (ver procedimiento en Anexo B).

Posteriormente se hizo un recorte con **Extract by Mask** de ENVI para corresponder al área del cauce embovedado del río, además de rotarse el espacio de trabajo para ir de acuerdo a la herramienta RLCM, que se verá más adelante. Esto se muestra en la Figura 5.



**Figura 5: Delimitación del área de estudio sobre imagen 2007.**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

A partir de estos resultados, se realizó otro proceso en el software ArcGIS 10.1 para corregir píxeles, convirtiendo el ráster a polígonos y cambiando manualmente en la tabla de atributos las clases observando la imagen satelital en ArcGIS o en Google Earth como apoyo. Se corrigieron píxeles con valor cero o clases similares visualmente pero incorrectamente clasificadas por el software (como por ejemplo, los terrenos baldíos confundidos por arena o el área verde por el área agrícola). Además se hizo una nueva clasificación, cambiando de la clase empírica previamente realizada a la nueva basada en el caso de Leipzig (Schwarz *et al.*, 2011), resultando en los siguientes tipos: Urbano continuo, Urbano discontinuo, Comercial/Industrial, Construcción, Vialidades, Verde urbano, Agua, Agrocultivo y Agropreparación. (ver tabla 2 a continuación).

**Tabla 2: Clasificaciones inicial y definitiva de cubiertas.**

Clasificación inicial (empírica)	Clasificación definitiva (Leipzig)	Clave
Urbano densidad baja	Urbano discontinuo.	URB DISC
Urbano densidad media	Urbano continuo o discontinuo según la imagen satelital.	URB CONT, URB DISC
Urbano densidad alta	Urbano continuo	URB CONT
Vegetación urbana	Vegetación urbana	VEG URB
Baldíos	Construcción	CONSTR
Vialidades	Vialidades	VIAL
Naves o grandes cubiertas	Comercial Industrial	COM INDUS
Cuerpos de agua	Agua	AGUA
Cultivos agrícolas	Agrocultivo	AGROCULT
Área agrícola en preparación	Agropreparación	AGROPREP
Cultivos con riego	Agrocultivo	AGROCULT
Área agrícola en preparación con riego	Agropreparación	AGROPREP
Bajadas de sierra	(eliminado al cortar la foto)	-
Bancos de arena	(eliminado al cortar la foto)	-
Sierra	(eliminado al cortar la foto)	-

Fuente: Elaboración propia.

Esta clasificación permite observar la evolución de las coberturas que denotó el cambio de usos sobre el cauce del río, debido a la desaparición del espejo de agua del río, aunado al proceso de urbanización dentro del área de estudio. Los mayores cambios se notaron como resultado del proceso de cambio de usos de suelo, que será abordado a continuación.

### **2.2.3. Comparación de cubiertas en tres periodos diferentes.**

Clasificar las coberturas del suelo en el área de estudio permite comparar el cambio que ocurre a través de los años, y observar la relación que mantiene con el cambio de las temperaturas de superficie detectadas con las bandas térmicas de las imágenes Landsat y por la presencia o ausencia del espejo de agua en el río.

Para este proceso se encontró una herramienta (add-in) desarrollada por la U. S. Geological Survey (2017b) para ArcGIS llamado Rapid Land Cover Mapper, al que se referirá por sus siglas RLCM, el cual puede descargarse fácilmente del sitio web de U.S. Geological Survey. RLCM funciona con mapas de puntos a los que se les asigna una clase y un periodo de tiempo, facilitando el análisis de cambio de suelos con imágenes satelitales de diferentes resoluciones e incluso de diferentes sensores.

De acuerdo con Cotillon y Mathis (2017) la herramienta de RLCM, Con el software RLCM se crearon puntos de referencia en los 3 periodos de estudio, con una resolución de 30 metros como es indicada por las imágenes TM5. Se introdujeron las clases según la tabla antes presentada, seleccionando los puntos con ayuda de los polígonos creados previamente y, una vez asegurada la ausencia de espacios en blanco y la asignación correcta de clases, se crearon los rásters de cambio de suelo. Con este proceso se crean una gran cantidad de nuevas clases, por lo que el mapa en si no resulta muy legible visualmente, pero se pueden sumar superficies de, por ejemplo, lo que solía ser área verde pero se convirtió en algún otro uso.

Después de esto se hizo un proceso separado, pero no aislado, para tomar la otra parte de la investigación: el cambio de temperaturas a través de los años en el área de estudio.

### **2.3. Clasificación según temperaturas.**

Otro de los objetivos del análisis con sistemas de información geográfica desde el inicio fue la detección de temperaturas y sus alteraciones en cada periodo, así como su relación directa con los usos de suelo y el efecto enfriador que causaba la presencia del río en el pasado. El análisis de temperaturas se hizo con los softwares ENVI y ArcGIS, comenzando desde tomar la banda térmica de la imagen Landsat para radiancia (*radiance*) y terminando en un ráster con clasificación de temperaturas. Los datos de radiancia de una imagen satelital en este caso se utilizan para el cálculo de la temperatura de la superficie terrestre, sin embargo también puede ser utilizada para la emisividad del suelo y el tipo de suelo o vegetación que se encuentra en ciertas áreas (Hantson *et al.*, 2011).



La metodología de la primera parte en ENVI se tomó de la guía hecha por The Yale Center for Earth Observation (2010), donde se puede ver este proceso más a detalle. En este procedimiento se convirtieron datos de banda térmica a radiancia, esto a temperatura en grados Kelvin, y finalmente de grados Kelvin a grados Celsius, repitiendo en los 3 periodos. Estas imágenes con datos Celsius se cortaron con la máscara del área de estudio en ArcGIS.

Para realizar la clasificación por temperaturas más allá de una simple visualización, se usó un criterio de intervalos de temperaturas (ver tabla 3) con la herramienta Reclassify de la caja de herramientas de Spatial Analyst de ArcMAP.

**Tabla 3: Rangos de clasificación de temperaturas.**

Clase	Rango de temperatura
1	< 29.99.° C
2	30.00.° C – 32.49.° C
3	32.50.° C – 34.99.° C
4	35.00.° C – 37.49.° C
5	37.50.° C – 39.99.° C
6	40.00.° C – 42.49.° C
7	42.50.° C – 44.99.° C
8	45.00.° C – 51.00.° C

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó este proceso en las imágenes de los tres años. Durante el procedimiento se encontró que la temperatura de 1998 era más baja debido a la ocurrencia de precipitaciones cercanas a la fecha en que se tomó la imagen, por lo que se buscó otra imagen para tener una imagen en condiciones climáticas normales. Se explicarán estos resultados y variaciones a detalle en el apartado de Diagnóstico del área.

### **2.3.1. Perfiles de temperaturas sobre el cauce.**

Aunque el análisis de temperaturas general era de interés para notar el cambio a escala un poco mayor del área, era de mayor importancia el encontrar las temperaturas sobre el cauce para notar el cambio entre periodos, para diferenciar la temperatura cuando el cauce se encontraba abierto y presentaba espejo de agua, cuando el cauce se desecó por la

realización infraestructura, y finalmente para observar la temperatura en el área, una vez ya instalada la infraestructura de embovedado.

Para esto se trazaron 6 líneas de perfil sobre cruces o construcciones importantes como referencia, sobre el recorrido del cauce, más un perfil extra sobre un área mayormente residencial, resultando en 7 perfiles gráficos o transectos. Éstos tienen un trazo visualmente perpendicular a la línea del río, y abarcan como mínimo 300 m de cada lado del cauce, en algunos casos más largo para identificar la dinámica de la temperatura del cauce y su área de inundación potencial.

Estos perfiles se describen a continuación:

1. Perfil 1. Sobre la frontera con Calexico, CA, Estados Unidos. Incluye parte del centro de Calexico, y la Colonia Santa Clara en Mexicali.
2. Perfil 2. Sobre parte de la calle James W Stone a un costado de la Plaza Cachanilla. Incluye parte del Barrio Pasadina, Colonia Jabonera y Colonia Loma Linda. Se extendió al tratarse de una conocida zona irregular propensa a inundaciones.
3. Perfil 3. Sobre el Centro de Convenciones FEX (Ferias y Exposiciones) ubicado en la Calzada de los Presidentes. Incluye parte de la Colonia Industrial, Colonia Esperanza y Villas Cachanillas.
4. Sobre el Lago del Bosque de la Ciudad, parque urbano ubicado en la Calzada de los Presidentes. Incluye parte del Fraccionamiento San Marcos y Colonia El Vidrio.
5. Cruce con Bulevar Lázaro Cárdenas. Este perfil incluye parte del Fraccionamiento Las Flores y Colonia del Rastro.
6. Tramo medio entre el perfil 5 y 7, por tratarse de una zona de inundación sobre varios conjuntos residenciales y baldíos. Incluye parte de la Colonia Aurora y el Desarrollo Urbano Zacatecas.
7. Cerca del fin del cauce embovedado del río y cruce con Calzada Héctor Terán Terán. Aproximadamente 200 metros hacia el sur, el río se abre para dar lugar al

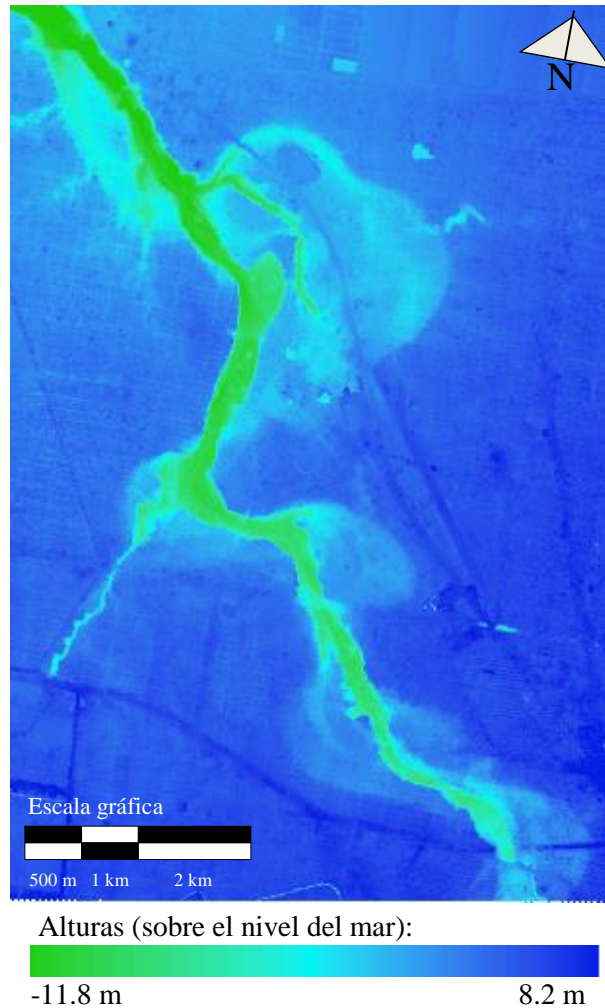
sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre. Incluye parte de los Fraccionamiento Villas del Sol y Justo Sierra.

Los perfiles se crearon con herramientas 3D Analyst de ArcMAP sobre una de las imágenes del área de estudio en color verdadero (bandas RGB 321) con la herramienta *Interpolate Line*. Estos perfiles se agregaron sobre el modelo digital de elevación para evaluar gráficamente el comportamiento la temperatura en función de la geometría del cauce del río.

#### **2.4. Análisis de riesgo de inundaciones por alturas de relieve.**

Para determinar la manera en que las precipitaciones pudieran dañar la funcionalidad de la zona del Río Nuevo, se trabajó en ArcGIS con un modelo digital de elevación, al que se referirá como MDE, y las herramientas de ArcGIS para cuencas e inundaciones de Hydrology. Este MDE abarca la ciudad en su totalidad y parte de los alrededores, incluyendo parte de la Sierra Cucapá y la Laguna Salada, por lo que el primer paso fue cortar el DEM con una máscara correspondiente al área de estudio resultando lo que puede verse en la Figura 6. Además se crearon gráficos de perfil sobre el DEM para observar la diferencia de alturas sobre el cauce del río aun sin la presencia de un cuerpo de agua.

**Figura 6: Modelo digital de elevación recortado al área de estudio.**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

Una vez recortado el espacio de trabajo del DEM se realizó el procedimiento descrito en el tutorial de ESRI Inc. (2012) para delinear las micro-cuencas del Río Nuevo, se utilizó la herramienta de *watershed*, el cual se describirá brevemente en la siguiente parte de este texto.

#### **2.4.1. Análisis de inundaciones**

Con el mapa con la información de elevaciones, se creó un ráster con el DEM como base en ArcGIS, seguido por las herramientas Sink, Fill, Flow Direction y Basin, para delimitar

las áreas más propensas a inundaciones. Los resultados de estas herramientas se verán en el apartado de Diagnóstico.

La siguiente parte indica de manera más precisa las alturas del área sobre el cauce del río en ciertos puntos importantes de su recorrido.

#### **2.4.2. Perfiles de alturas sobre el cauce**

Aunque el procedimiento para el análisis de inundaciones es suficiente para explicar el impacto y riesgo de estas sobre el área de estudio, al hacer perfiles gráficos sobre el DEM pueden notarse con mayor exactitud las alturas de ciertos puntos del recorrido del cauce.

Se utilizaron los mismos trazos para los perfiles de temperaturas, pero al posicionarse sobre el DEM se obtuvieron datos de elevaciones. Una vez creados los perfiles puede visualizarse de mejor forma la diferencia de pendientes y alturas en cada intersección elegida para determinar áreas de riesgo.

Con base en los procedimientos y metodologías descritos en este capítulo, se continuó con el diagnóstico del área de estudio utilizando los datos obtenidos para luego dar lugar a una discusión sobre estos resultados.



## **CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DEL ÁREA DE ESTUDIO**

En este capítulo se presentan los primeros resultados de las metodologías descritas en el capítulo anterior. En el punto 3.1 se hace una descripción general de las características del sitio para dar una idea general de las condiciones del río Nuevo. El punto 3.2 describe los resultados de la clasificación de usos de suelo y cubiertas en los tres periodos, así como la comparación de estos y los cambios traducidos a superficies. El punto 3.3 aborda la clasificación realizada para las temperaturas de los tres periodos, a nivel área de estudio y sobre el cauce del río. Por último, el punto 3.4 se enfoca en las áreas propensas a inundaciones cercanas al cauce del río, y las elevaciones sobre este.

### **3.1. Descripción del sitio**

Como ya se mencionó con anterioridad, el área del Río Nuevo actualmente representa una importante vialidad rodeada de elementos de equipamiento, así como de terrenos irregulares y contaminados. El río presenta un alto índice de contaminación debido a descargas provenientes de drenajes, basuras y lagunas de oxidación, afectando a la calidad del agua, del suelo y del ambiente en general, perdiendo además su carácter de río y siendo considerado nada más que un borde de referencia o un canal de aguas negras (XV Ayuntamiento de Mexicali, 1997).

Por otro lado, la cuenca del río que se encuentra dentro del área urbana de la ciudad Mexicali, representa una zona de áreas verdes potenciales según análisis físicos, por lo que es recomendable que este sea su uso futuro, para satisfacer necesidades de equipamiento urbano, recreación y deporte para la población, controlando la densidad y usos de suelo circundantes para minimizar el impacto del desarrollo urbano sobre el río (Peña, 2011).

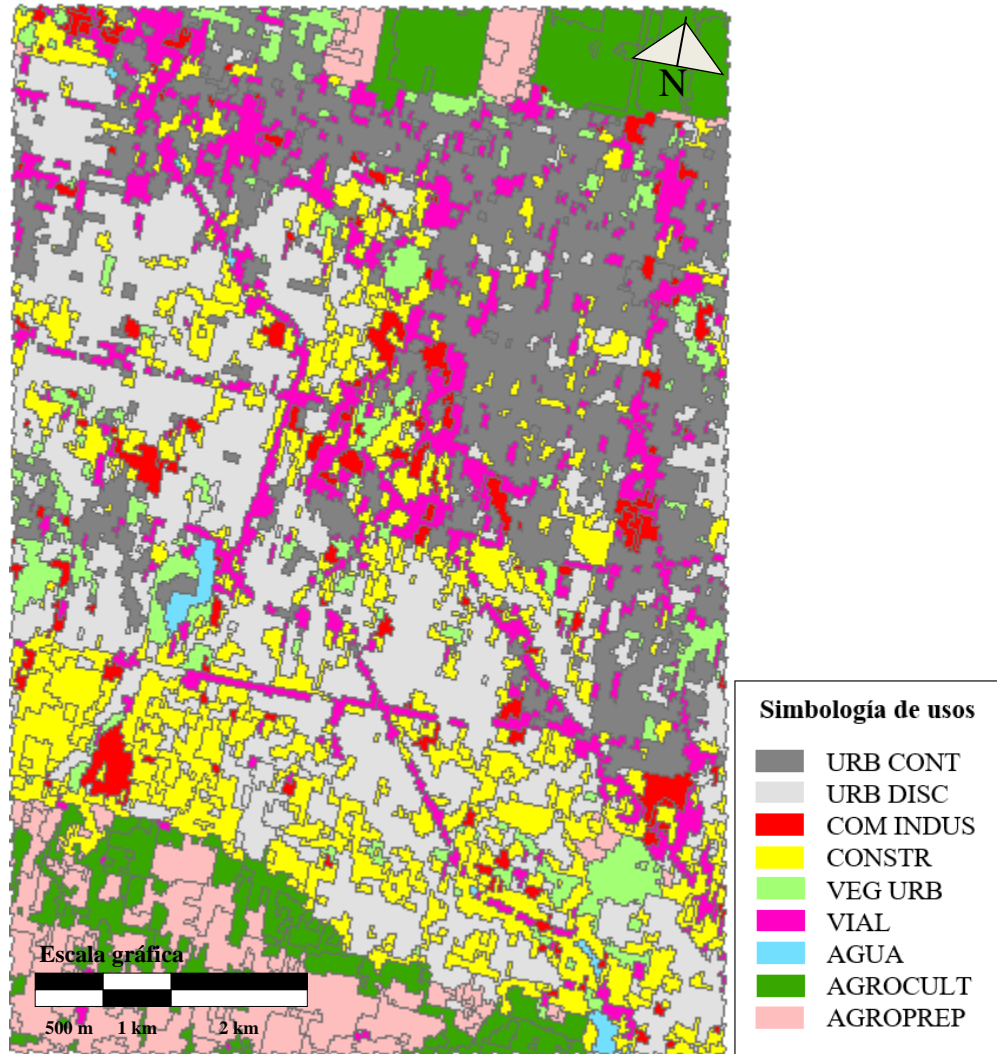
En este sentido, la recuperación e integración de las dinámicas ambientales de regulación microclimáticas y control de caudales del río, se encuentra dentro de las acciones de integración del Río como parte de un sistema hidrológico municipal sumamente valioso para la mitigación y adaptación al cambio climático.

### **3.2. Clasificación final de cubiertas**

Realizando la clasificación de cubiertas en ArcGIS se pudo observar el tipo de usos que existían en cada uno de los periodos elegidos, además de los ya supuestos cambios en los usos de suelo desde el año 1984. Aunque es fácil asumir que esto se debe al proceso natural de urbanización, lo pertinente en este caso es el cambio alrededor del área de estudio tomando en cuenta la ausencia del cuerpo de agua correspondiente al río. Como puede verse en la figura 7, la disposición de los usos alrededor del río durante para el año 1984 es en su mayoría compuesta por baldíos, tejido urbano discontinuo o áreas verdes en menor escala, y al tratarse de un río estrecho el software no detectó completamente el cuerpo de agua. De igual manera se nota una gran presencia de áreas agrícolas al sur del río, tanto en cultivo como en preparación en la parte de la periferia de la mancha urbana.



**Figura 7: Clasificación de usos de suelo al año 1984**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

En la Tabla 4 se muestra un resumen de las superficies de cada clase encontrada en la imagen de 1984, donde puede observarse una gran diferencia entre el área urbana continua y discontinua y una gran extensión de área de cultivos. El área urbana continua y discontinua en total constituye un 45% del área de estudio, y las áreas agrícolas en conjunto un 16.62%. Es importante recordar estos porcentajes para compararlos con los otros periodos.

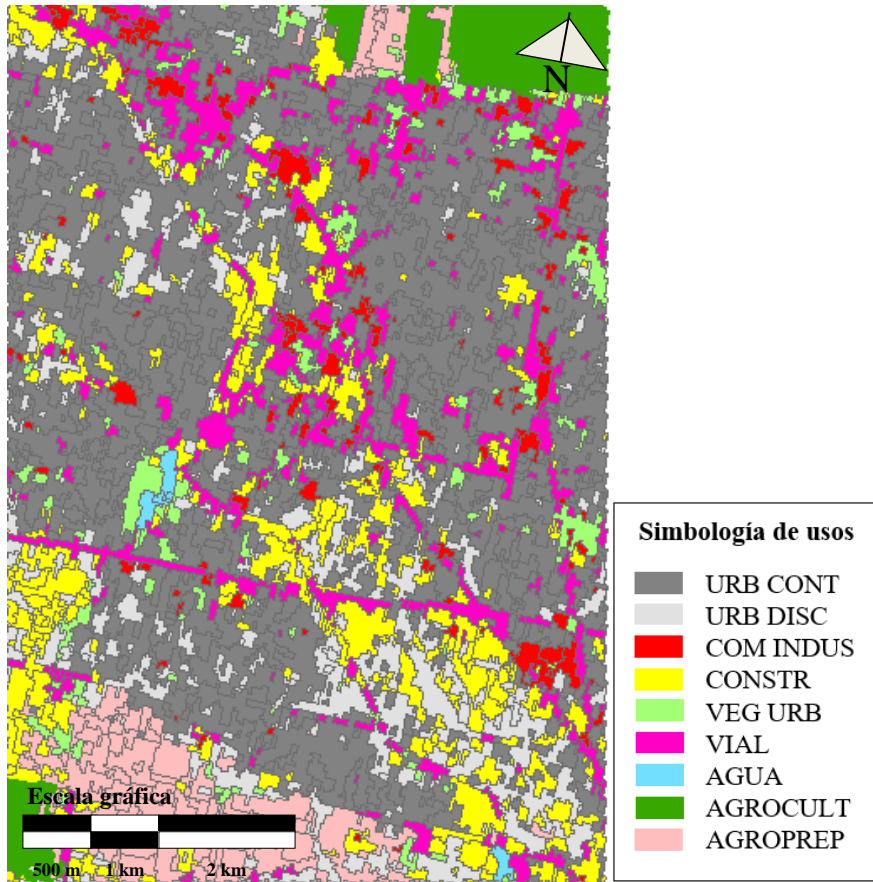
**Tabla 4: Superficies según clasificación al año 1984.**

Clave	Clase	Superficie (ha)	%
URB CONT	Urbano continuo	860.22	19.20%
URB DISC	Urbano discontinuo	1,156.23	25.80%
COM INDUS	Comercial – industrial	167.76	3.74%
CONSTR	Construcción (baldíos)	809.64	18.07%
VEG URB	Vegetación urbana	214.29	4.78%
VIAL	Vialidades	506.34	11.30%
AGUA	Cuerpos de agua	21.69	0.48%
AGROCULT	Cultivos agrícolas	374.04	8.35%
AGROPREP	Área agrícola en preparación	370.62	8.27%
		4,480.83	100%

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, las mayores diferencias comienzan a notarse al ver los resultados en los siguientes dos periodos que se analizaron. En el caso de la clasificación de 1998 mostrada en la Figura 8, año en que el río ya estaba embovedado y cerrado, se detectaron pocos píxeles con características de agua ubicados solamente en el Bosque de la Ciudad y en el área del sistema lagunar. Las áreas agrícolas al sur del mapa se redujeron considerablemente, y el área urbana continua creció en gran medida. En el caso del área circundante al cauce del río, ya en este año construida como la Calzada de los Presidentes, los terrenos son mayormente baldíos, tejido urbano continuo y una parte discontinua, y una cantidad mínima de áreas verdes.

**Figura 8: Clasificación de usos de suelo al año 1998**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

Al compararse los valores de la Tabla 3 con la Tabla 4 (ver a continuación) se puede notar la gran pérdida de vegetación urbana entre ambos años, así como el cambio en el tejido urbano: la vegetación urbana ocupaba un 4.78% del área total de estudio en 1984 reduciéndose a 3.67% en 1998, el tejido urbano total pasó de 45% a 57.22%, y el área agrícola de 16.62% a 11.39%.

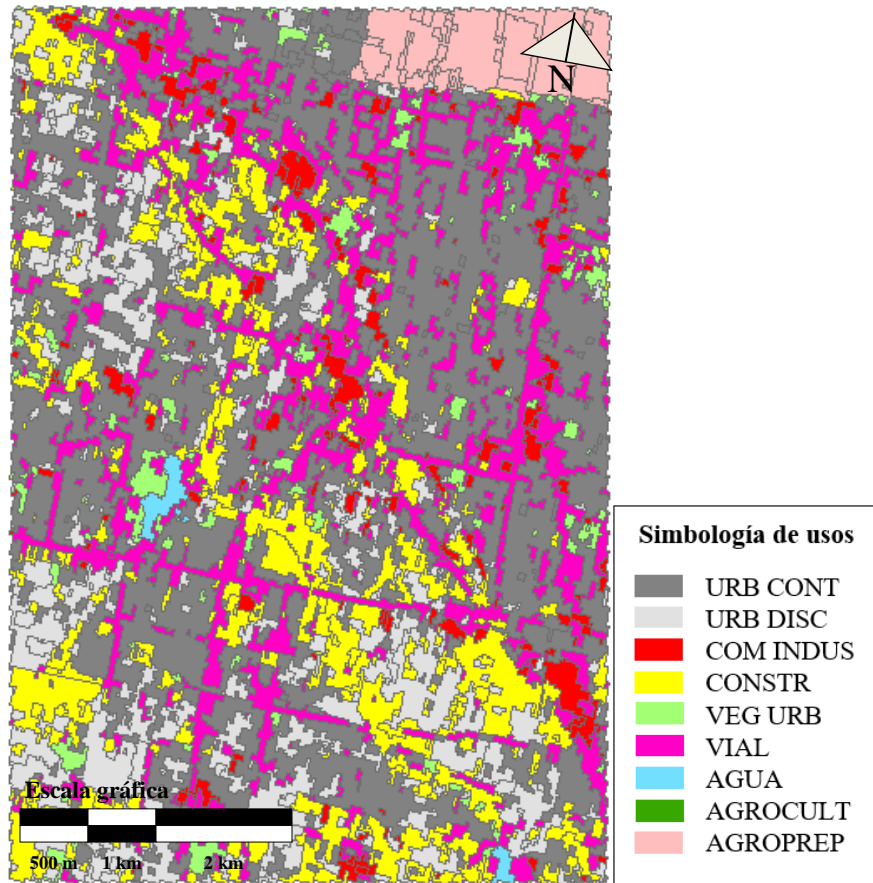
**Tabla 5: Superficies según clasificación al año 1998**

Clave	Clase	Superficie (ha)	%
URB CONT	Urbano continuo	2,047.95	45.70%
URB DISC	Urbano discontinuo	516.33	11.52%
COM INDUS	Comercial – industrial	158.04	3.53%
CONSTR	Construcción (baldíos)	573.93	12.81%
VEG URB	Vegetación urbana	164.43	3.67%
VIAL	Vialidades	494.19	11.03%
AGUA	Cuerpos de agua	15.48	0.35%
AGROCULT	Cultivos agrícolas	188.82	4.21%
AGROPREP	Área agrícola en preparación	321.66	7.18%
		4,480.83	100%

Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias son aún mayores al observar los resultados del análisis del año 2007, aunque en este caso los cambios más notorios son fuera del área del cauce del río. Por ejemplo, se puede notar que las áreas agrícolas son casi nulas debido al crecimiento urbano que se dio hacia el sur de la ciudad como se muestra en la Figura 9, hay menor área de vegetación urbana, y el tejido urbano discontinuo tiene una mayor superficie al periodo anterior, debido a la construcción de nuevas áreas residenciales que dentro de sus terrenos contienen grandes extensiones de baldíos.

**Figura 9: Clasificación de usos de suelo al año 2007**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

En la Tabla 6 se resumen las áreas correspondientes al análisis del año 2007, donde se encuentra una ausencia total de cultivos agrícolas y un número reducido de cuerpos de agua. Del porcentaje de áreas agrícolas sólo quedó un 3.92% correspondiente a tierras en preparación, la vegetación urbana se redujo de un 3.67% a un 2.68% de 1998 a 2007, y el área urbana bajó entre ambos periodos de 57.22% a 53.07%, perdiendo esa diferencia como campos baldíos.

**Tabla 6: Superficies según clasificación al año 2007.**

Clave	Clase	Superficie (ha)	%
URB CONT	Urbano continuo	1,683.54	37.57%
URB DISC	Urbano discontinuo	694.62	15.50%
COM INDUS	Comercial – industrial	193.86	4.33%
CONSTR	Construcción (baldíos)	720.63	16.08%
VEG URB	Vegetación urbana	119.97	2.68%
VIAL	Vialidades	872.73	19.48%
AGUA	Cuerpos de agua	19.98	0.45%
AGROCULT	Cultivos agrícolas	0.00	0
AGROPREP	Área agrícola en preparación	175.50	3.92%
		4,480.83	100%

Fuente: Elaboración propia.

En esta parte se describió por separado cada una de las clasificaciones de usos, los cuales se introdujeron después en el add-in Rapid Land Cover Mapper, o RLCM, mencionado en el apartado sobre los procesos metodológicos. Los resultados de la comparación se muestran a continuación.

### 3.2.1. Comparación de usos de suelo

Al vaciar los datos en el RLCM el software arrojó mapas que, aunque visualmente son un tanto ilegibles debido a que se agrupan todos los cambios encontrados con diferentes colores, el mismo mapa contiene una base de datos de cada relación entre clases de un periodo a otro. La primera comparación realizada fue entre el año 1984 y 1998, obteniendo superficies que se mantuvieron con la misma clase y otras que se transformaron, como puede verse en la Tabla 7 (ver Anexo C para información desglosada). La clase que sufrió menores cambios fue el tejido urbano continuo, perdiendo apenas un 25.29% de su superficie a otras clases, por otro lado, la más afectada fue el tejido urbano discontinuo perdiendo un 82.03%, seguido por la clase comercial-industrial, la cual perdió un 77.94% de su superficie.

**Tabla 7: Cambios de usos y superficies 1984 a 1998**

Clase 1984	Clase 1998	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
<b>URB CONT</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>6.4188</b>	<b>74.71%</b>
	Sup. trasformada	2.1726	25.29%
<b>URB DISC</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>2.0745</b>	<b>17.97%</b>
	Sup. trasformada	9.4716	82.03%
<b>COM INDUS</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.3699</b>	<b>22.06%</b>
	Sup. trasformada	1.3068	77.94%
<b>CONSTR</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>2.0952</b>	<b>25.94%</b>
	Sup. trasformada	5.9805	74.06%
<b>VEG URB</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.5490</b>	<b>25.73%</b>
	Sup. trasformada	1.5849	74.27%
<b>VIAL</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>1.8000</b>	<b>35.57%</b>
	Sup. trasformada	3.2598	64.43%
<b>AGUA</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.1449</b>	<b>67.36%</b>
	Sup. trasformada	0.0702	32.64%
<b>AGROCULT</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>1.2951</b>	<b>34.83%</b>
	Sup. trasformada	2.4237	65.17%
<b>AGROPREP</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>1.9284</b>	<b>52.10%</b>
	Sup. trasformada	1.7730	47.90%

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se muestran los resultados entre los años 1998 y 2007 (ver información desglosada en Anexo D), donde la clase que mantuvo la mayor parte de su superficie fue el agua perdiendo tan solo un 7.06%. En el otro extremo, la clase de cultivo agrícola presentó un 100% de cambios, volviéndose así totalmente ausente en la clasificación del año 2007. La siguiente clase con mayor pérdida fue el cultivo agrícola en preparación, lo que resume una pérdida significativa de áreas agrícolas en general.

**Tabla 8: Cambios de usos y superficies 1998 a 2007**

Clase 1998	Clase 2007	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
<b>URB CONT</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>11.4849</b>	<b>56.22%</b>
	Sup. trasformada	8.9442	43.78%
<b>URB DISC</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>1.5912</b>	<b>30.94%</b>
	Sup. trasformada	3.5523	69.06%
<b>COM INDUS</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.6705</b>	<b>42.47%</b>
	Sup. trasformada	0.9081	57.53%
<b>CONSTR</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>2.0952</b>	<b>36.39%</b>
	Sup. trasformada	3.6621	63.61%
<b>VEG URB</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.4914</b>	<b>30.25%</b>
	Sup. trasformada	1.1331	69.75%
<b>VIAL</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>2.4705</b>	<b>49.92%</b>
	Sup. trasformada	2.4786	50.08%
<b>AGUA</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.1422</b>	<b>92.94%</b>
	Sup. trasformada	0.0108	7.06%
<b>AGROCULT</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	Sup. trasformada	1.8702	100.00%
<b>AGROPREP</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.3330</b>	<b>10.36%</b>
	Sup. trasformada	2.8809	89.64%

Fuente: Elaboración propia.

La última comparativa se hizo entre los años 1984 y 2007, se presentan los resultados en la Tabla 9 (ver información desglosada en Anexo E). Entre estos dos periodos el cambio más importante es la pérdida total de cultivos agrícolas, seguida por una pérdida de áreas agrícolas en preparación del 91.98%, resultando así en una pérdida casi total de tierras destinadas a la agricultura. La clase que mantuvo una mayor cantidad de su superficie fue el agua, perdiendo un 33.05% de su superficie que, de acuerdo a la comparación de los años, debe ser aquella correspondiente al Río Nuevo. Es notable también la pérdida de casi un 80% de vegetación urbana.



**Tabla 9: Cambios de usos y superficies 1984 a 2007**

Clase 1984	Clase 2007	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
<b>URB CONT</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>5.2335</b>	<b>60.92%</b>
	Sup. trasformada	3.3579	39.08%
<b>URB DISC</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>2.3721</b>	<b>20.55%</b>
	Sup. trasformada	9.1710	79.45%
<b>COM INDUS</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.3321</b>	<b>19.81%</b>
	Sup. trasformada	1.3446	80.19%
<b>CONSTR</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>1.6938</b>	<b>20.97%</b>
	Sup. trasformada	6.3819	79.03%
<b>VEG URB</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.4275</b>	<b>20.03%</b>
	Sup. trasformada	1.7064	79.97%
<b>VIAL</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>2.1852</b>	<b>43.19%</b>
	Sup. trasformada	2.8746	56.81%
<b>AGUA</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.1440</b>	<b>66.95%</b>
	Sup. trasformada	0.0711	33.05%
<b>AGROCULT</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	Sup. trasformada	3.7188	100.00%
<b>AGROPREP</b>	<b>Sin cambios</b>	<b>0.2970</b>	<b>8.02%</b>
	Sup. trasformada	3.4047	91.98%

Fuente: Elaboración propia.

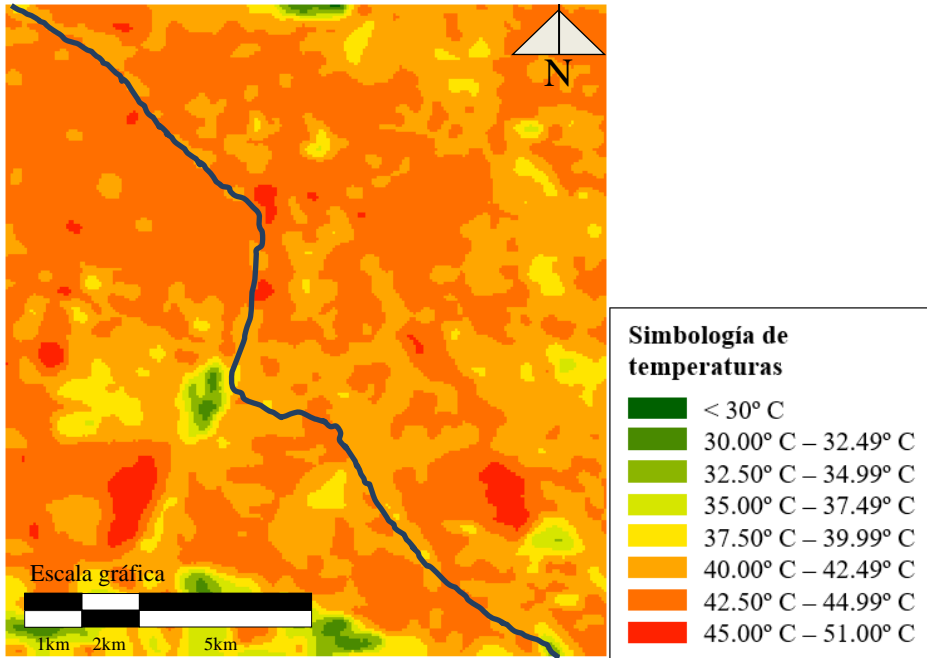
De acuerdo a estas tablas de cambios de los tres periodos de estudio, se puede observar como los mayores cambios fueron la pérdida de áreas agrícolas, el cambio en el tejido urbano y la disminución de cuerpos de agua, además de las áreas verdes y una gran fluctuación en los dos tipos de tejido urbano. Estos cambios se compararán en el apartado de Resultados y Discusión.

### 3.3. Clasificación por temperaturas

Los resultados de la clasificación por intervalos de temperatura mencionados en el apartado de metodología se dieron primero a nivel área de estudio por medio de la imagen completa utilizada en todo el procedimiento.

Para empezar, se obtuvo con la imagen de 1984, como se muestra en la Figura 10, una temperatura predominantemente dentro del intervalo entre 42.5.° C y 45.° C, pero en el recorrido del río se reduce al intervalo entre 40.° C y 42.° C, salvo algunas áreas en la cercanía al lago del Bosque de la Ciudad y el sistema lagunar, con una temperatura entre 35.° C y 40.° C.

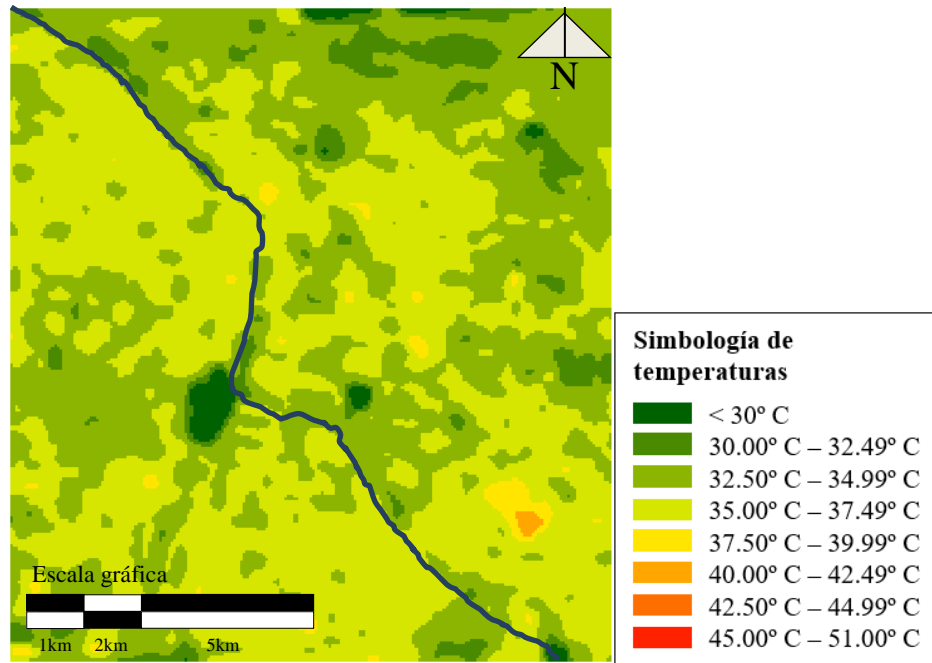
**Figura 10: Clasificación de temperaturas 1984**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

En el caso de la clasificación de 1998, se obtuvieron resultados poco favorables debido a la disponibilidad de imágenes en las fechas requeridas, ya que en estas se mostraban temperaturas mucho más bajas y una resolución alterada debido a un tiempo nublado. Con esta clasificación presentada en la Figura 11, se observa que el recorrido del cauce, para este entonces ya embovedado y con la Calzada de los Presidentes sobre el río, se encuentran pocas variaciones dentro del intervalo de 32.5.° C a 35.° C y una mayor cantidad de zonas en el intervalo de 35.° C a 37.5.° C. Las áreas aledañas al lago del Bosque y al sistema lagunar bajan hasta el intervalo de 30.° C a 32.5.° C.

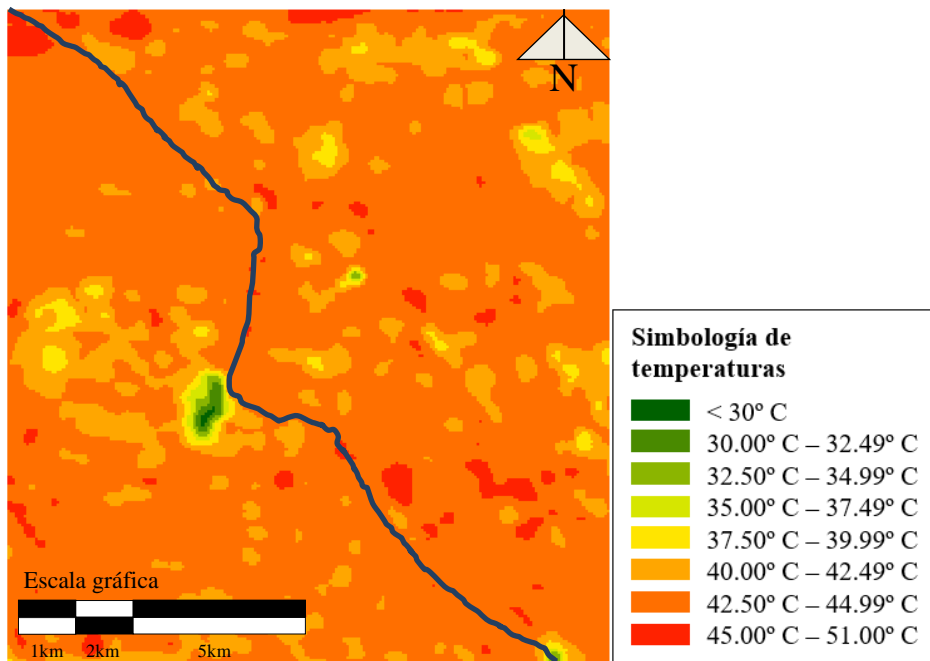
**Figura 11: Clasificación de temperaturas 1998**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

En el caso de la clasificación del año 2007 presentada en la Figura 12, fecha más reciente y en la que el río tiene una presencia prácticamente nula en la ciudad, el recorrido del cauce es casi imperceptible en lo referente a las temperaturas, mostrando casi uniformemente el intervalo entre 42.5° C y 45° C en toda el área de la imagen. Sobre el recorrido solo puede verse el cambio en el área aledaña al Bosque y al sistema Lagunar, bajando al intervalo de 30° C a 32.5° C, lo que comprueba el gran beneficio climático de un cuerpo de agua, además rodeado por vegetación.

**Figura 12: Clasificación de temperaturas 2007**



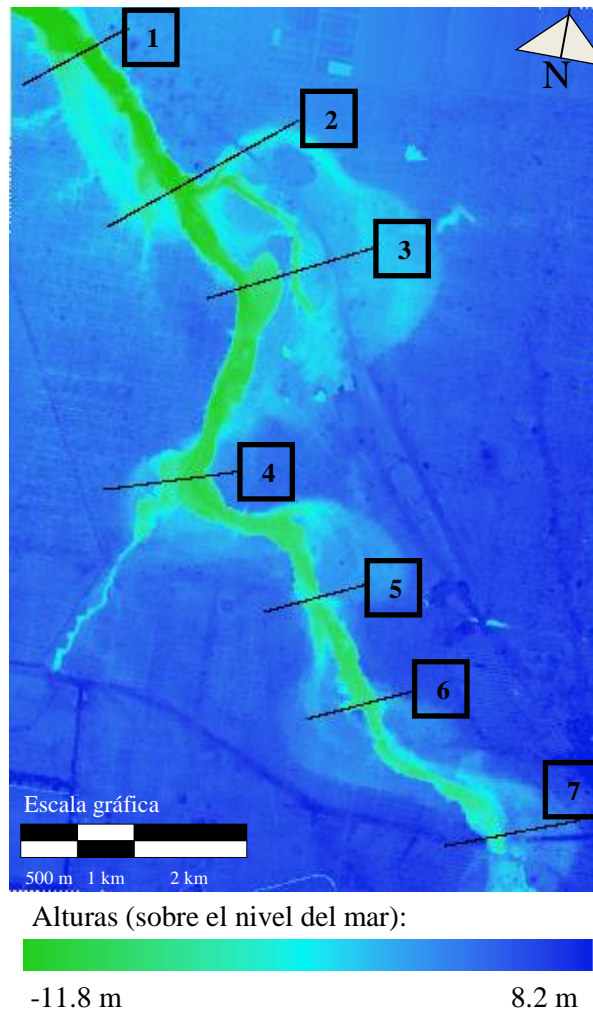
Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

Estas clasificaciones se realizaron para obtener una idea general de las temperaturas en el área y para hacer un comparativo visual. En el siguiente apartado se obtuvieron resultados más precisos sobre el recorrido del cauce del río.

### 3.3.1. Perfiles de temperaturas sobre el cauce

Después del análisis general realizado con los intervalos de temperatura en el área completa, se hicieron perfiles con las líneas trazadas como se describieron en el capítulo de metodología. En la Figura 13 se muestra la ubicación de estos perfiles utilizando como referencia e imagen de ejemplo el modelo de elevación para una mejor visualización del recorrido y presencia del río.

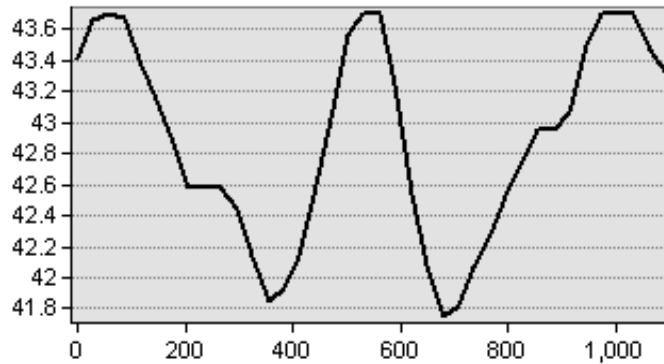
**Figura 13: Ubicación de perfiles sobre el cauce del río**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

Las temperaturas de estos transectos se obtuvieron en los tres periodos. En el caso del perfil de la Figura 14 correspondiente a 1984 cuando aún estaba abierto el río, la temperatura en casi 2.° C entre el cuerpo de agua y la tierra, que solía ser terreno mayormente baldío.

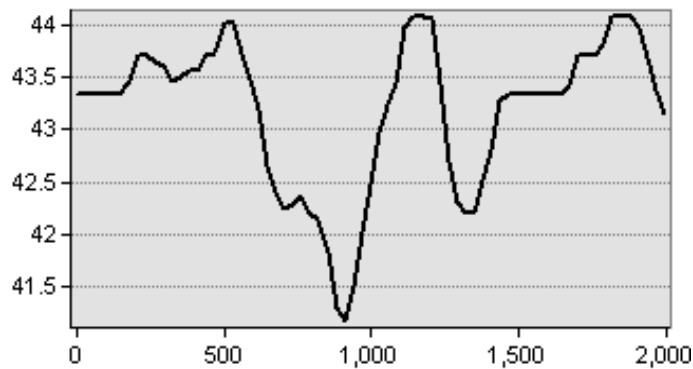
**Figura 14: Perfil de temperatura 1 al año 1984**



Fuente: Elaboración propia.

El perfil 2, mostrado en la Figura 15, también muestra una variación de casi 4.° C dentro del cuerpo de agua, y de 2.5.° C aproximadamente en las áreas más bajas, no necesariamente con presencia de agua.

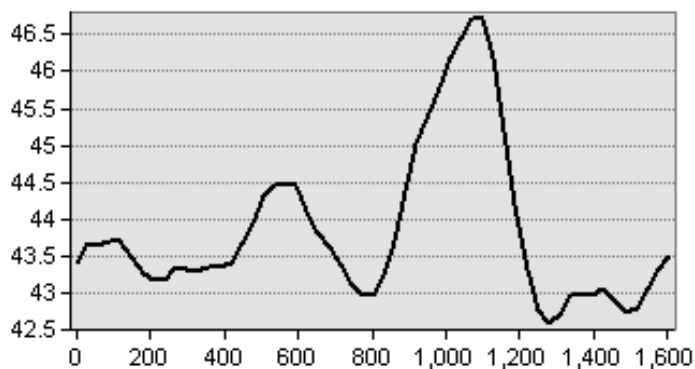
**Figura 15: Perfil de temperatura 2 al año 1984**



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 se muestra el perfil 3, el cual muestra una temperatura casi uniforme pero igualmente baja en el cuerpo de agua con una temperatura de 43.3.° C aproximadamente, subiendo hasta casi 47.° C en un área comercial, y bajando de nuevo en una zona de baldíos y probablemente de vegetación irregular.

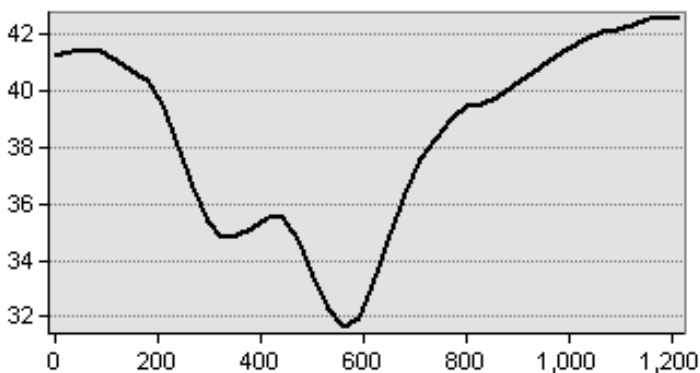
**Figura 16: Perfil de temperatura 3 al año 1984**



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 corresponde al perfil 4, el cual pasa por el lago del Bosque de la Ciudad y el río, mostrando una temperatura mínima de casi 31.° C dentro del lago, llegando hasta los 40.° C cuando acaba el cauce del río.

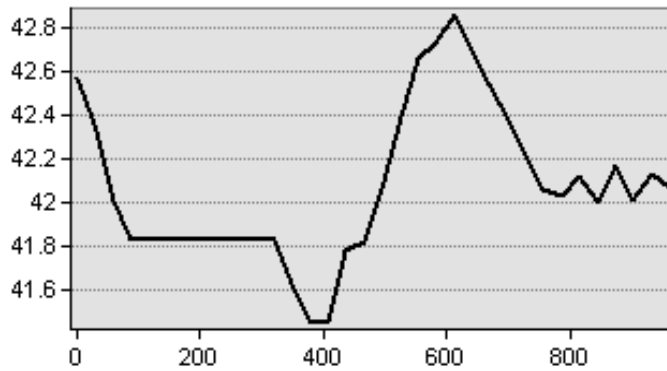
**Figura 17: Perfil de temperatura 4 al año 1984**



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 18 se muestra el perfil 5, el cual muestra una temperatura mínima de 41.5.° C aproximadamente dentro del río, y casi 43.° C en una zona urbana densa.

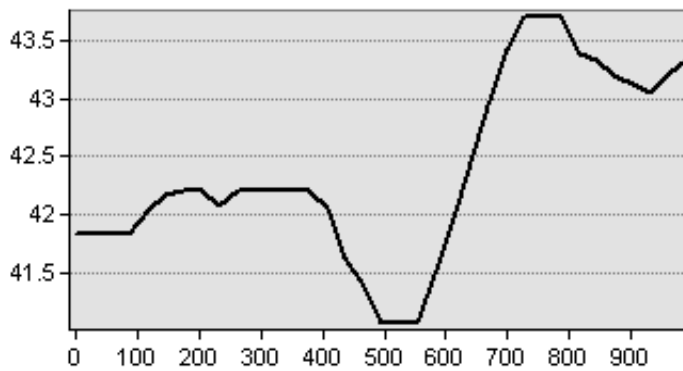
**Figura 18: Perfil de temperatura 5 al año 1984**



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 19 se observa el perfil 6 que pasa por zonas de baldío y residenciales irregulares, con 41.° C en el cuerpo de agua, y un máximo de casi 44.° C en presencia de construcciones.

**Figura 19: Perfil de temperatura 6 al año 1984**

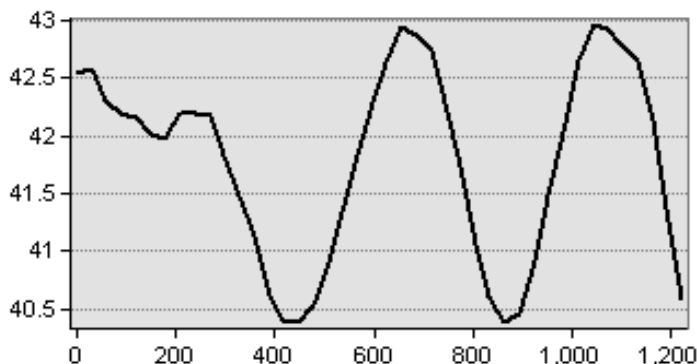


Fuente: Elaboración propia.

El último perfil del año 1984 se muestra en la figura 20, con grandes variaciones de hasta 3.° C en presencia del cuerpo de agua.



**Figura 20: Perfil de temperatura 7 al año 1984**

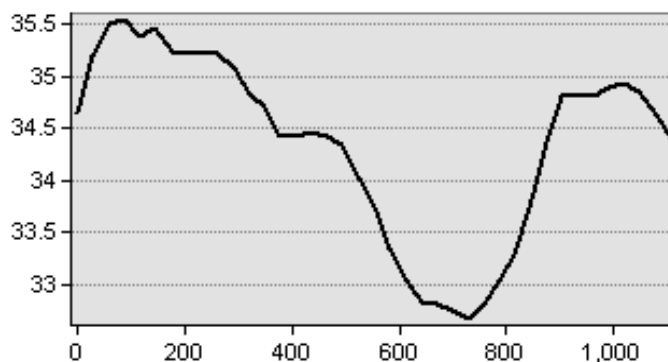


Fuente: Elaboración propia.

Los perfiles correspondientes al año 1984 son de especial interés al ser los que aún presentan características de enfriamiento debido a la presencia de agua, mismas que en los siguientes dos años pueden no aparecer tan drásticamente.

A continuación se presentan los perfiles del año 1998, año en que el río ya se encontraba embovedado y ya estaba presente una vialidad en su lugar. El perfil 1 de la Figura 21 muestra una variación de 2.5.° C entre un área de vivienda de alta densidad y lo que solía ser el cauce del río, que en este periodo presenta en su mayoría terrenos baldíos.

**Figura 21: Perfil de temperatura 1 al año 1998**

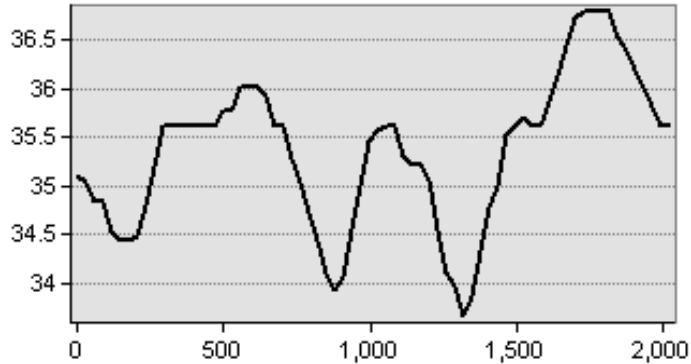


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 22, el perfil 2 muestra variaciones de 2.°C a 3.° C entre áreas construidas y vialidades, siendo las vialidades las que muestran temperaturas de 35.5.° C y las áreas

construidas con temperaturas más bajas, o la más alta de 37.° C al final del perfil, está ubicada en un área comercial de la colonia Segunda Sección.

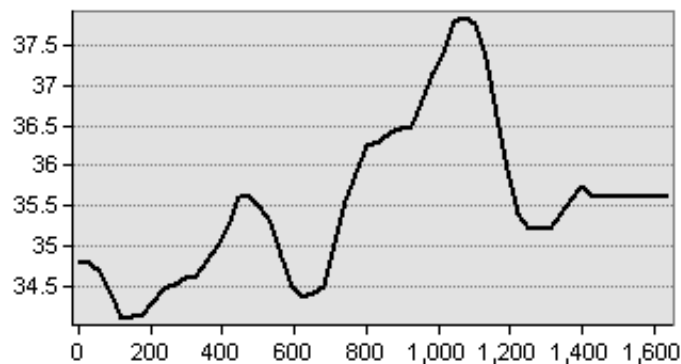
**Figura 22: Perfil de temperatura 2 al año 1998**



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 23 el perfil 3 muestra su temperatura más alta de 38.° C en un área comercial y las más bajas en terrenos baldíos, teniendo el cauce del río una temperatura aproximada de 35.° C.

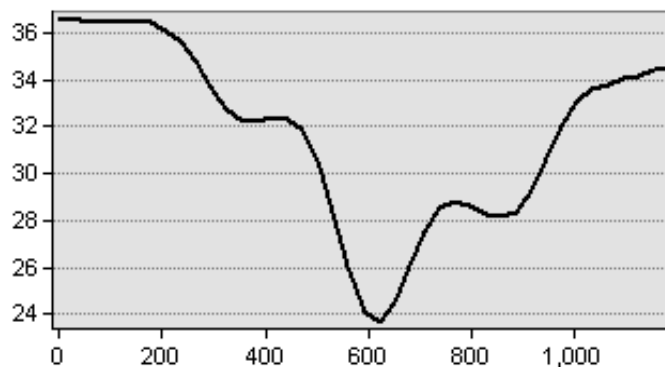
**Figura 23: Perfil de temperatura 3 al año 1998**



Fuente: Elaboración propia.

El perfil 4 en la Figura 24 pasa sobre el Bosque de la Ciudad, con casi 23.° C dentro del lago, subiendo a 28.° C en la vialidad sobre el río, hasta un máximo de 36.° C en zona habitacional.

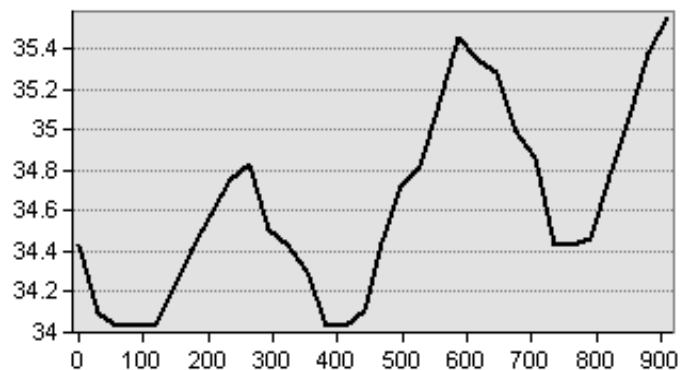
**Figura 24: Perfil de temperatura 4 al año 1998**



Fuente: Elaboración propia.

En el perfil 5 de la Figura 25, el cual pasa cerca del cruce de Lázaro Cárdenas y Calzada de los Presidentes, se ven temperaturas bajas en terrenos baldíos, alta de hasta 34.8.° C sobre ambas vialidades, y las más altas en terrenos comerciales. Las variaciones no son muy significativas.

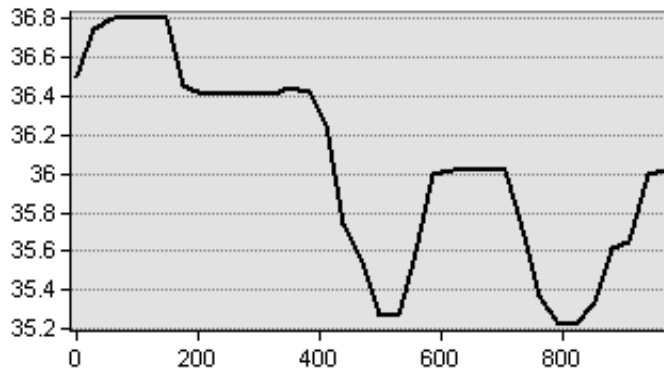
**Figura 25: Perfil de temperatura 5 al año 1998**



Fuente: Elaboración propia.

El perfil 6 en la Figura 26 muestra una temperatura mínima en donde se ubica la Calzada de los Presidentes, con pequeñas variaciones en las colindancias que consisten mayormente en viviendas de densidad media.

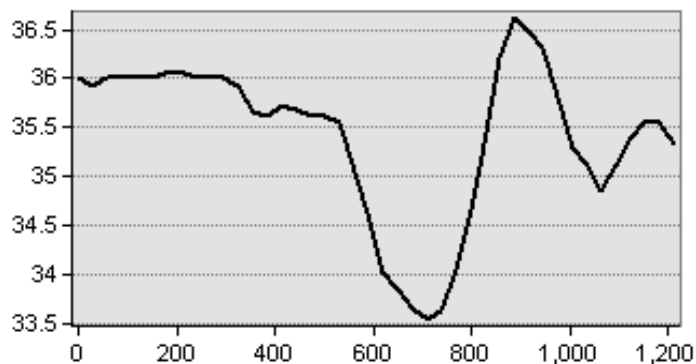
**Figura 26: Perfil de temperatura 6 al año 1998**



Fuente: Elaboración propia.

El último perfil del año 1998 se muestra en la Figura 27, con una mínima de 33.5.° C sobre la Calzada, subiendo hasta casi 37.° C en las colindancias, mayormente áreas habitacionales.

**Figura 27: Perfil de temperatura 7 al año 1998**

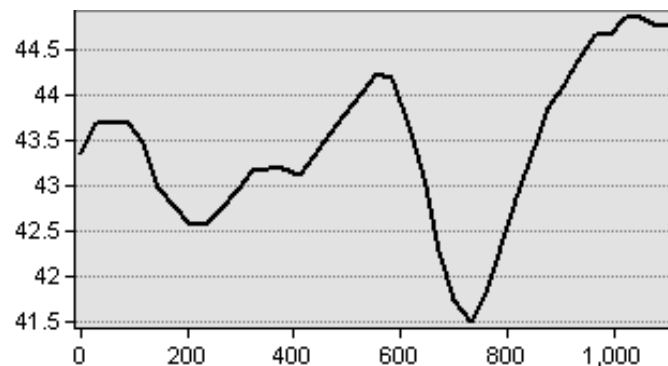


Fuente: Elaboración propia.

Aunque las temperaturas en los perfiles del periodo de 1998 si muestran resultados favorables sobre la Calzada sobre el río, las temperaturas no tienen una diferencia tan significativa como la que se encontraba en el periodo de 1984 entre áreas con agua y sin agua. Como se mencionó anteriormente, este periodo tiene temperaturas más bajas de las esperadas debido al clima de ese año, además de la presencia de vegetación durante ese periodo como parte del proyecto de urbanización de la vialidad del Río.

En el caso del año 2007, para este entonces el río ya llevaba años embovedado, y la obra paisajística y de vegetación de la Calzada ya no tenía el mismo mantenimiento que en el periodo anterior. En la Figura 28, el perfil 1 muestra una media de 43.° C en baldíos y en la vialidad sobre el río, la más baja en baldíos, y la más alta en área comercial de Calexico.

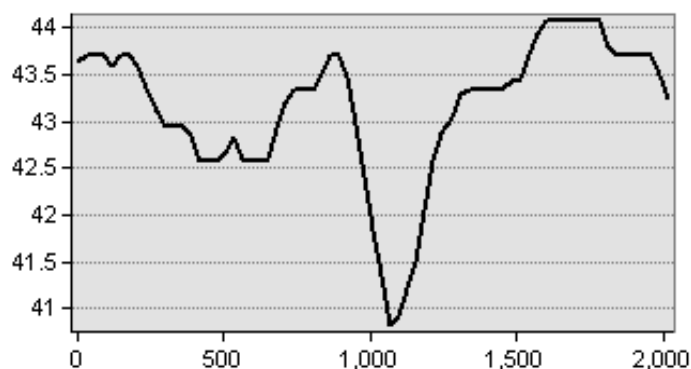
**Figura 28: Perfil de temperatura 1 al año 2007**



Fuente: Elaboración propia.

El perfil de la Figura 29 muestra 42.5.° C sobre la vialidad del río, y 40.5.° C en un área verde, así como una máxima de 44.° C cercana a la Plaza Cachanilla.

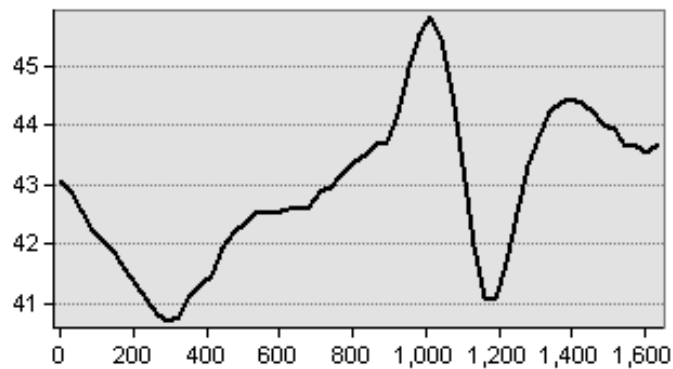
**Figura 29: Perfil de temperatura 2 al año 2007**



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 30 muestra sobre la Calzada una temperatura de 42.5.° C aproximadamente, 41.° C sobre un área verde, y hasta 46.° C sobre área comercial.

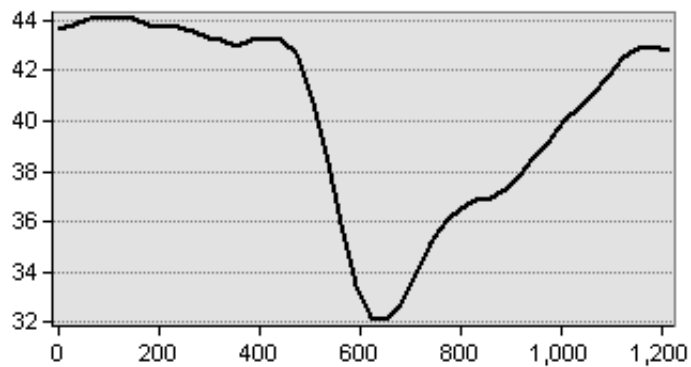
**Figura 30: Perfil de temperatura 3 al año 2007**



Fuente: Elaboración propia.

La figura 31 muestra hasta 32.° C sobre el lago del Bosque, y aproximadamente 37.° C sobre la Calzada, subiendo hasta 44.° C en zona de viviendas, comercios y el estacionamiento del Bosque.

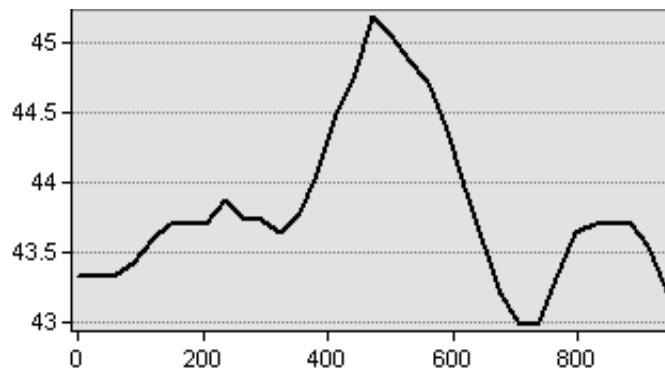
**Figura 31: Perfil de temperatura 4 al año 2007**



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 32 la máxima temperatura se presenta sobre la Calzada, y la mínima sobre un terreno baldío, aunque se trata de una pequeña diferencia de 2.5.° C.

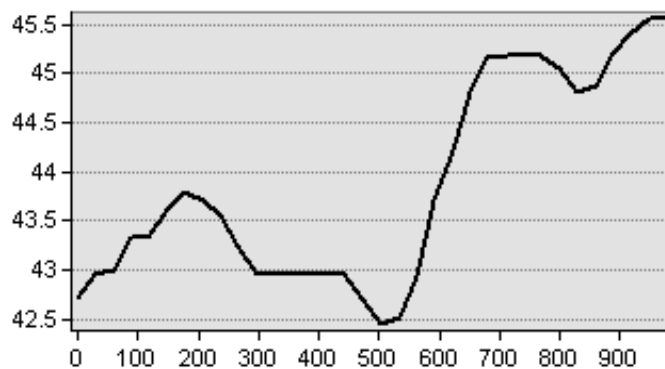
**Figura 32: Perfil de temperatura 5 al año 2007**



Fuente: Elaboración propia.

La figura 33 presenta la temperatura mínima sobre la Calzada, subiendo hasta 3.° C en una zona industrial y manteniéndose baja en terrenos baldíos.

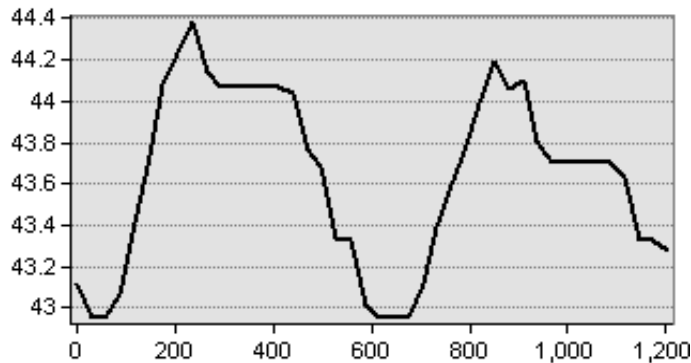
**Figura 33: Perfil de temperatura 6 al año 2007**



Fuente: Elaboración propia.

El último perfil del año 2007 en la Figura 34 muestra mínimas diferencias, teniendo una temperatura media de aproximadamente 43.7.° C sobre la Calzada y la mínima de 43.° C en un área verde.

**Figura 34: Perfil de temperatura 7 al año 2007**



Fuente: Elaboración propia.

Estos perfiles de temperaturas se realizaron con el fin de mostrar la gran diferencia entre áreas verdes, vialidades y cuerpos de agua, diferencia que se hizo más evidente en el perfil que incluía al Bosque de la Ciudad y su lago. Era necesario también mostrar estas diferencias ya que no podían apreciarse del todo en la imagen completa del área de trabajo, sobre todo por la temperatura general más baja del periodo de 1998.

### **3.4. Análisis de inundaciones**

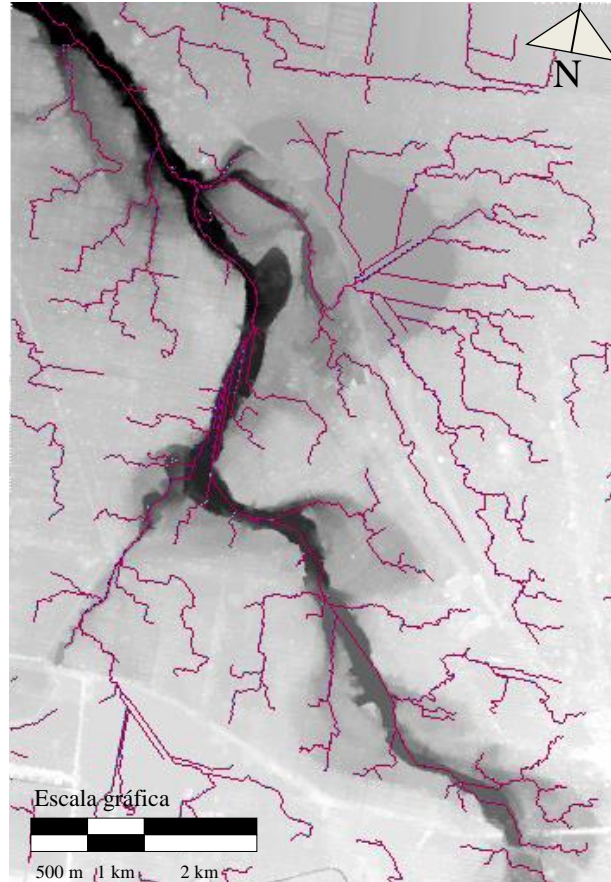
Esta parte es crucial al momento de evaluar lo relacionado con la regulación de caudales, ya que aun con la ausencia del río como cuerpo de agua visible, el tipo de suelo y las elevaciones continúan presentes, incluyendo sus lagunas de inundación.

Aunque estas lagunas ya eran bastante evidentes desde el momento que se le dio un gradiente de color al modelo digital de elevación DEM como se mostró previamente en la Figura 6 del capítulo 2 de Metodología, se confirmó al aplicar las herramientas Flow Direction, Sink y Fill y obtener una imagen muy similar a la Figura 6. Después con las herramientas Flow Accumulation y Stream Order se obtuvo la red de escurrimientos principales que alimentan al cauce del río, como se muestra en la Figura 35. No solo se observa que el área correspondiente al cauce del río sigue siendo la más propensa a inundaciones, sino también varias zonas circundantes a ella, como la mayoría de las



colindancias de la Plaza Cachanilla, y algunos escurrimientos que pasan por áreas habitacionales.

**Figura 35: Área de estudio con cuencas desde ArcGIS**



Fuente: Elaboración propia a partir de U. S. Geological Survey (2017a).

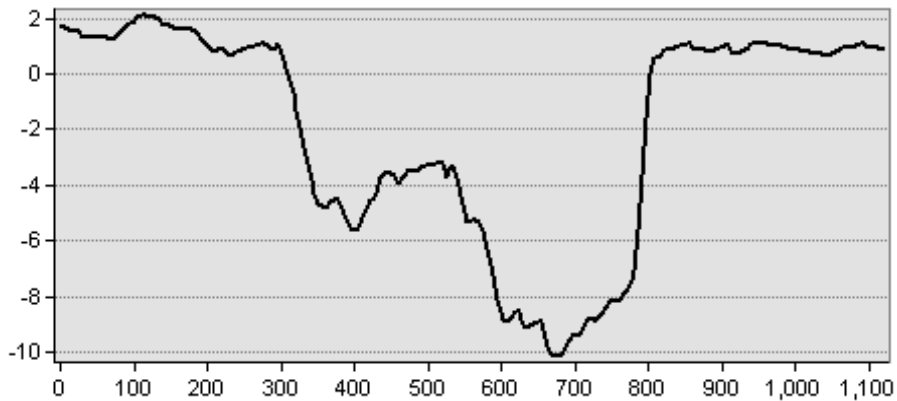
El área que comprende al río tiene una profundidad muy marcada en comparación con el resto, pero el área fuera de ella tiene pocas elevaciones. Debido a esto, se buscó captar estas alturas de manera más detallada por medio de perfiles gráficos.

### **3.4.1. Perfiles de alturas sobre el cauce del río**

Para este apartado se utilizaron los mismos trazos previamente descritos en la metodología y en el análisis de temperaturas. En este caso solo obtuvieron los 7 perfiles de alturas de año 1998, ya que en teoría las elevaciones no han cambiado significativamente.

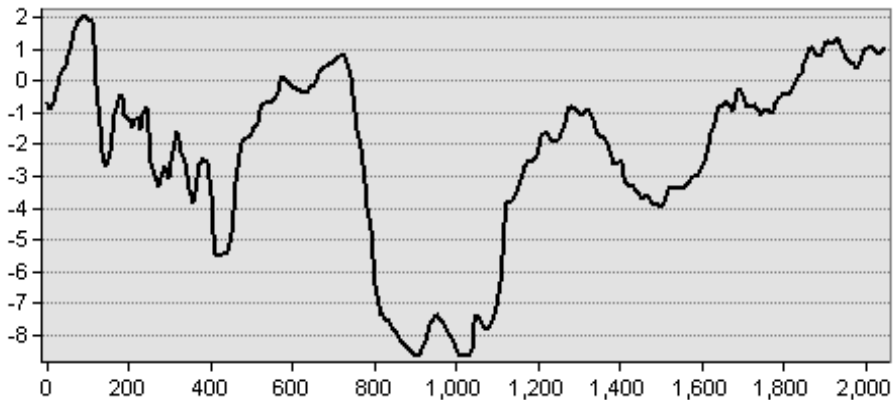
En la figura 36 la diferencia es de 12 metros, en la figura 37 y 38 de 11 metros. La diferencia es prácticamente igual en los tres perfiles, sin embargo, la zona baja del primer perfil corresponde a baldíos, del segundo a zona habitacional, y del tercero al cauce del río donde encontramos actualmente el Centro de Convenciones FEX.

**Figura 36: Perfil 1 de elevaciones**



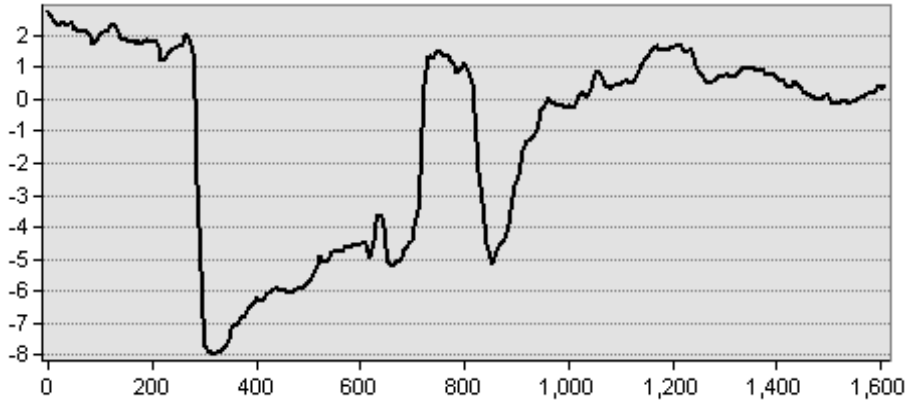
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 37: Perfil 2 de elevaciones**



Fuente: Elaboración propia.

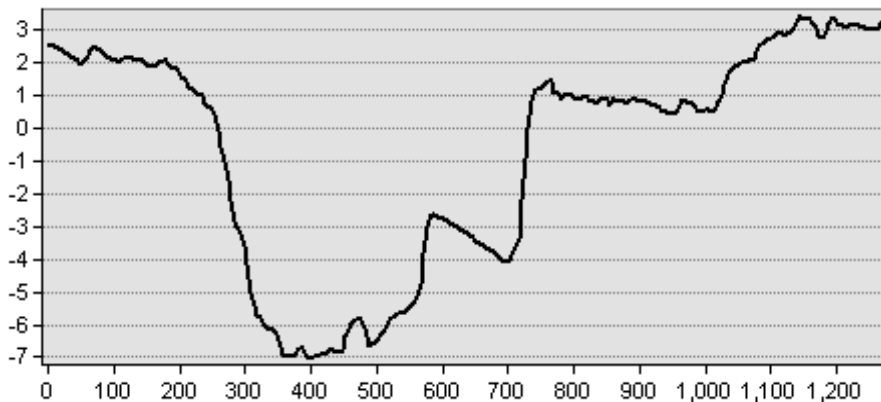
**Figura 38: Perfil 3 de elevaciones**



Fuente: Elaboración propia.

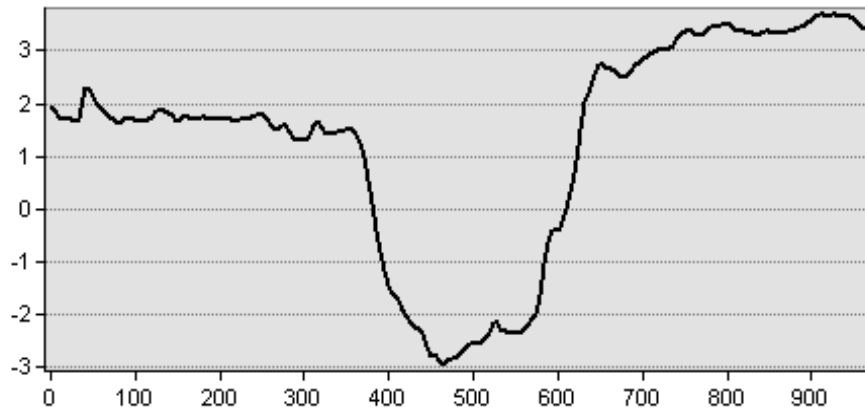
En el caso de las figuras 39 y 40 correspondientes a los perfiles 4 y 5 respectivamente, el perfil 4 presenta su área más baja en el Bosque de la Ciudad llegando hasta -7 metros en el Bosque, aproximadamente 1 metro de altura sobre la Calzada, y hasta 3 metros en el resto. El perfil 5 tiene una diferencia de 6 metros entre su máximo y su mínimo, siendo su área más baja la correspondiente a la Calzada sobre el río.

**Figura 39: Perfil 4 de elevaciones**



Fuente: Elaboración propia.

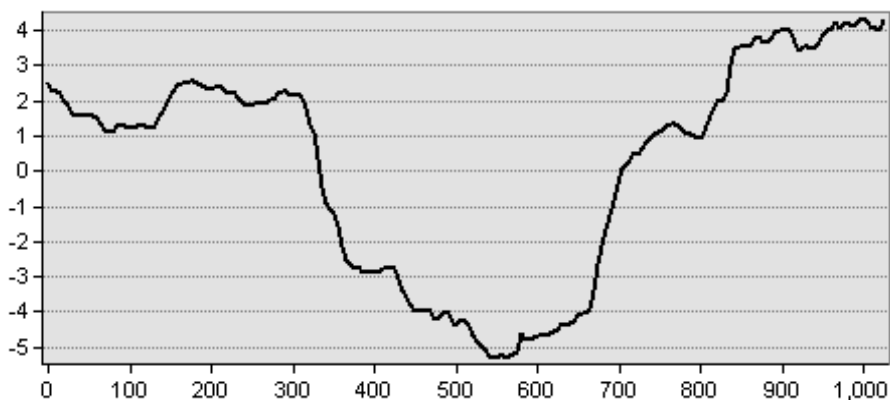
**Figura 40: Perfil 5 de elevaciones**



Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 41 y 42 corresponden a los perfiles 6 y 7. El perfil 6 muestra una diferencia de 9 metros aproximadamente, siendo su área más baja la correspondiente a la Calzada sobre el río y las áreas colindantes. El perfil 7 presenta una diferencia de 7 metros, siendo la parte más baja también sobre la Calzada sobre el río, y subiendo abruptamente en los terrenos colindantes con esta.

**Figura 41: Perfil 6 de elevaciones**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 42: Perfil 7 de elevaciones**



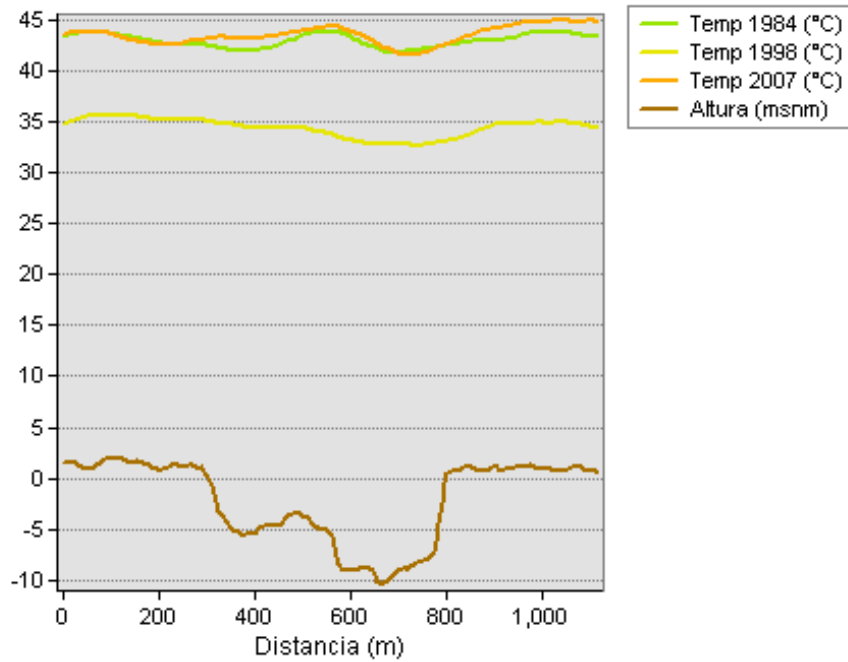
Fuente: Elaboración propia.

### 3.5. Relación entre relieve y temperaturas

En este apartado se pondrán a manera de comparativa los perfiles agrupados según su número, iniciando por el perfil de alturas, seguido por los resultados de estos en los mapas de temperatura, con la intención de unir los datos de alturas de relieve con las temperaturas, buscando una relación directa entre ambas.

En la figura 43 se presenta el perfil 1, el cual tiene una depresión de hasta -10 m donde se encuentra el río, y una depresión no tan profunda de -6 m. La parte más baja siempre indicó una temperatura menor, pero la sección de -6 m ha variado debido a los diferentes usos en ella (baldío en 1984, urbano discontinuo en 1998 y baldío en 2007).

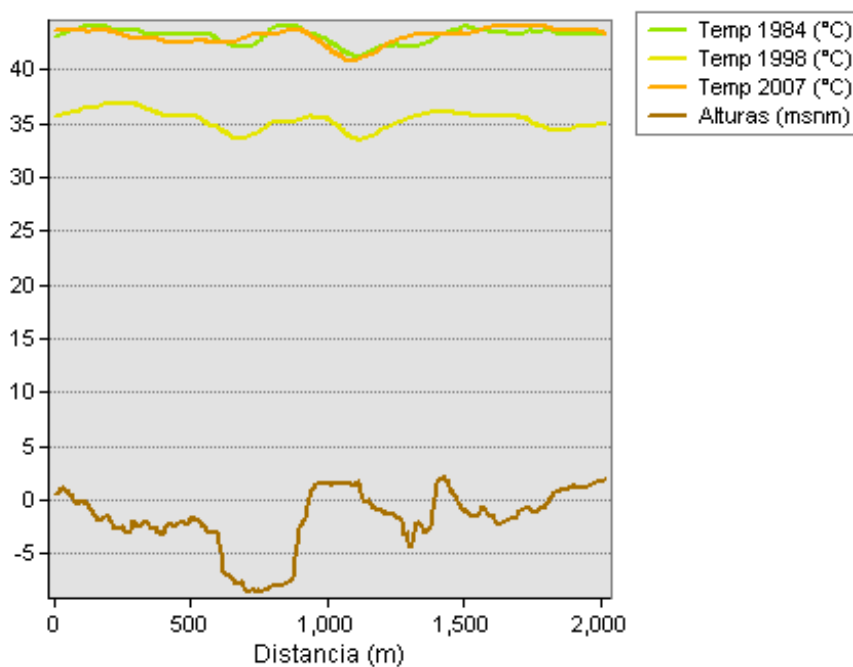
**Figura 43: Perfil 1 en relieve y temperaturas**



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 44 se compara el perfil 2, donde la parte más baja corresponde al cauce con hasta -9 m, siempre con una temperatura más baja. Los usos en las demás partes de la sección son mayormente baldíos y comerciales, teniendo estos últimos mayores temperaturas.

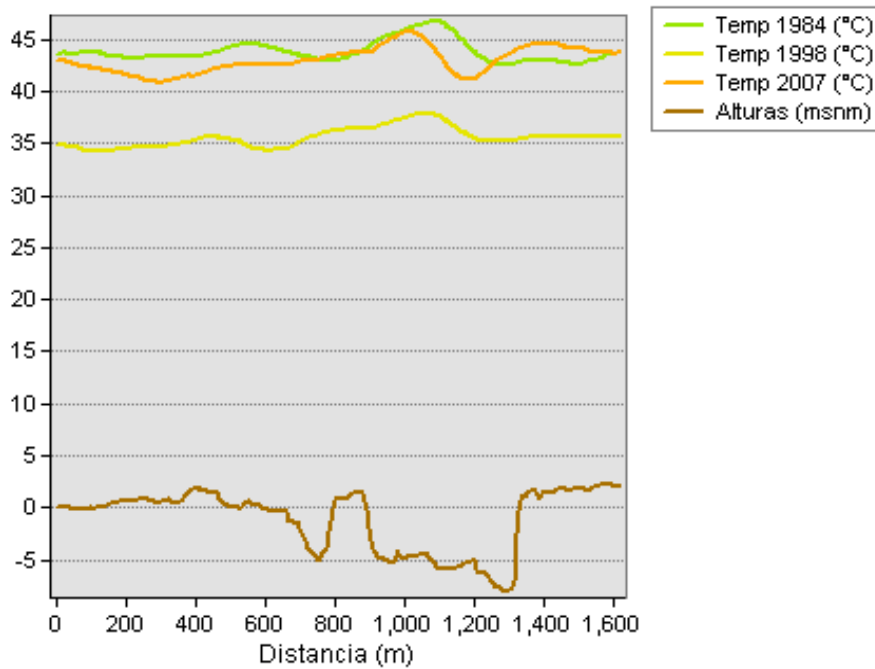
**Figura 44: Perfil 2 en relieve y temperaturas**



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 45 se compara el perfil 3, donde la parte baja corresponde al río y una gran área de inundación con el Centro FEX, continuando con un baldío, vialidad, y área verde. La temperatura es más baja en el cauce, subiendo en la vialidad, y bajando en el área verde.

**Figura 45: Perfil 3 en relieve y temperaturas**

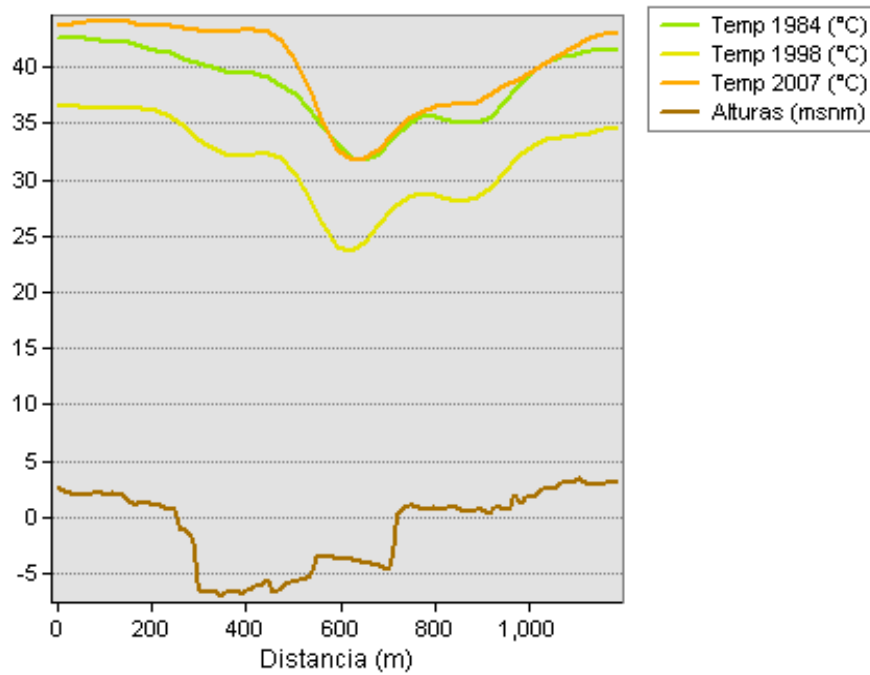


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 46 el perfil 4 muestra su parte más baja en la región del Bosque y el cauce del río, siendo el Bosque la zona con una temperatura considerablemente menor en los tres periodos.



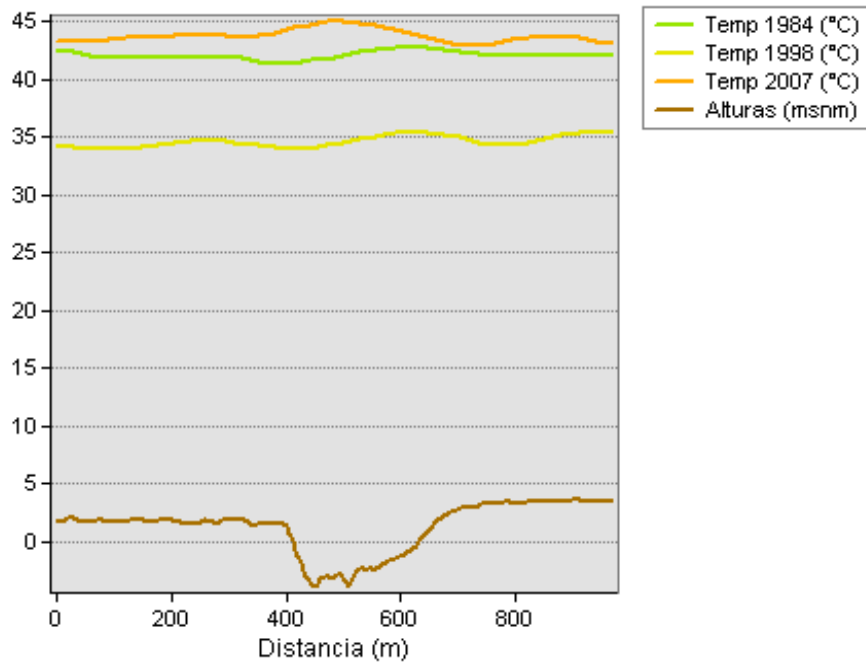
**Figura 46: Perfil 4 en relieve y temperaturas**



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 47 el perfil 5 muestra una elevación menor en el cauce del río. Los puntos con mayores temperaturas corresponden a vialidades y los menores a baldíos. El cauce del río sube drásticamente su temperatura en el periodo 2007.

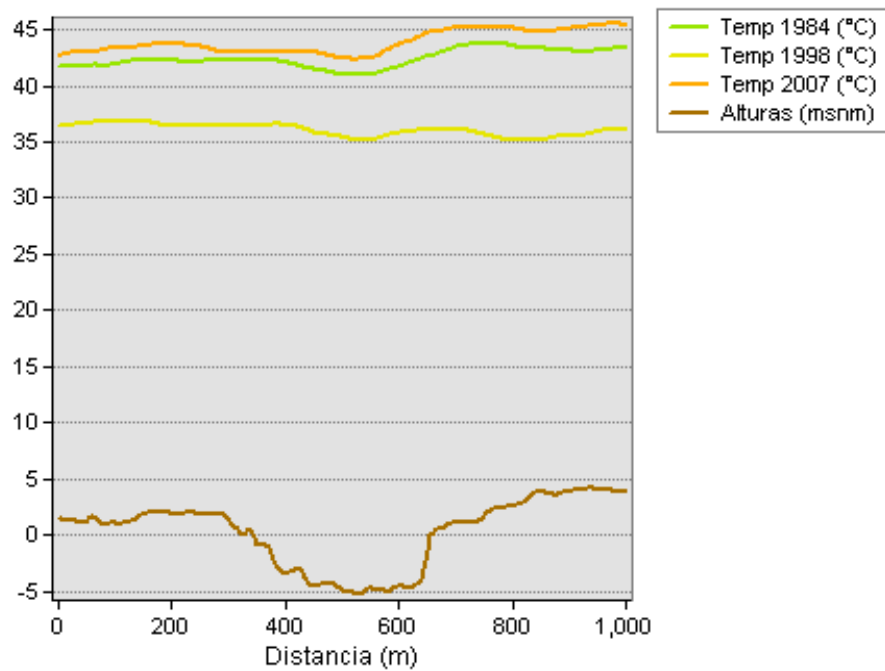
**Figura 47: Perfil 5 en relieve y temperaturas**



Fuente: Elaboración propia.

La figura 48 muestra como el perfil 6 tiene una elevación más baja dentro del cauce que corresponde a temperaturas más bajas en los tres periodos. Las temperaturas más altas corresponden a vialidades y zonas habitacionales, las más bajas a terrenos baldíos.

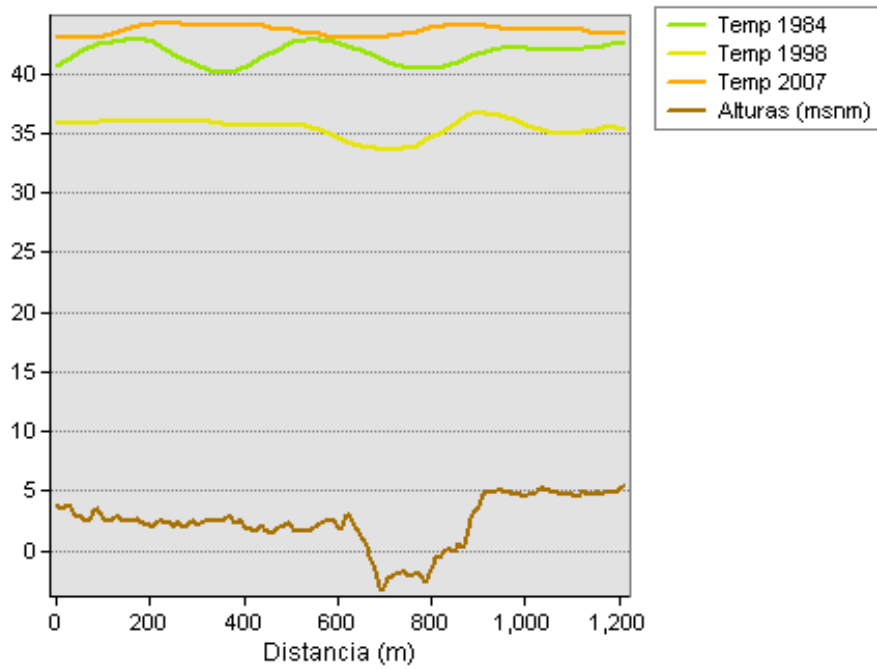
**Figura 48: Perfil 6 en relieve y temperaturas**



Fuente: Elaboración propia.

La figura 49 muestra el último perfil, también con su parte más baja en el cauce del río. La temperatura sobre el cauce es baja solo en el primer periodo, ya que en el segundo y tercer periodo ya era una vialidad. Las temperaturas varían por la presencia de usos de terrenos baldíos y tejido urbano discontinuo.

**Figura 49: Perfil 7 en relieve y temperaturas**



Fuente: Elaboración propia.

Con este comparativo de perfiles se concluye el capítulo de Diagnóstico, donde se vieron los resultados de los métodos citados con anterioridad, y expuestos en el contexto de la descripción del sitio para su evaluación. En el capítulo siguiente se hará un resumen de los resultados más notables con el objetivo de lograr una discusión y conclusiones previas.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADO Y DISCUSIÓN.**

En este capítulo se resumen los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, vaciándolos en tablas comparativas para su evaluación y observación de cambios generales. En el punto 4.1 se comparan los resultados de usos de suelo y cubiertas, comparando individualmente cada clase en cada periodo y explicando según los mapas resultantes de cada clasificación cuáles fueron los cambios alrededor del cauce del río. En el punto 4.2 se observan las temperaturas generales del área de estudio y específicas sobre el cauce y sus colindancias, explicando la razón de las temperaturas más bajas y las más altas. En el punto 4.3 se describe a manera de resumen y análisis las elevaciones sobre el cauce y sus áreas de inundación, y los peligros que estas representan para las áreas urbanizadas y construidas cercanas.

### **Dinámica de cambio de cobertura del suelo.**

En los primeros cálculos de uso de suelo y cubiertas a nivel área de estudio, se pudo notar una gran diferencia en ambos tipos de tejidos urbanos. En la tabla 10 se muestran las superficies en km<sup>2</sup> de cada periodo y cada uso, con esta comparación se evidencia que los mayores cambios se dieron en las primeras dos clases, primero subiendo drásticamente y luego reduciéndose de nuevo, al mismo tiempo que aumentó la superficie de vialidades, se redujeron las áreas verdes urbanas, se perdió totalmente el área de cultivo y se redujo en un 50 % aproximadamente el terreno agrícola restante encontrado en la clase AGROPREP. En el caso de los cuerpos de agua, el cambio no fue tan drástico como se suponía, ya que los resultados mostraron que apenas se perdieron un par de km<sup>2</sup> en total, aunque es probable que la superficie de 1984 no fuera captada en su totalidad debido a la resolución TM5.

**Tabla 10: Comparación de usos y superficies en los tres periodos**

Clase	Superficie 1984 (km <sup>2</sup> )	%	Superficie 1998 (km <sup>2</sup> )	%	Superficie 2007 (km <sup>2</sup> )	%
URB CONT	860.22	19.20	2,047.95	45.70	1,683.54	37.57
URB DISC	1,156.23	25.80	516.33	11.52	694.62	15.50
COM INDUS	167.76	3.74	158.04	3.53	193.86	4.33
CONSTR	809.64	18.07	573.93	12.81	720.63	16.08
VEG URB	214.29	4.78	164.43	3.67	119.97	2.68
VIAL	506.34	11.30	494.19	11.03	872.73	19.48
AGUA	21.69	0.48	15.48	0.35	19.98	0.45
AGROCULT	374.04	8.35	188.82	4.21	0	0
AGROPREP	370.62	8.27	321.66	7.18	175.50	3.92
<b>TOTAL</b>					4,480.83	100%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11 se compara la pérdida de usos entre 1984 y 1998. El uso con mayor variación fue el tejido urbano discontinuo perdiendo 9.47 m<sup>2</sup>, seguido por los terrenos en construcción o baldíos con 5.98 m<sup>2</sup> perdidos. Si se observan las clasificaciones de usos ilustradas en las Figuras 7 y 8 del capítulo de Diagnóstico, puede notarse que cambiaron su uso a tejido urbano continuo.

**Tabla 11: Pérdida de usos y superficies 1984 a 1998**

Clase	Superficie perdida o transformada (km <sup>2</sup> )
URB CONT	2.1726
<b>URB DISC</b>	<b>9.4716</b>
COM INDUS	1.3068
CONSTR	5.9805
VEG URB	1.5849
VIAL	3.2598
AGUA	0.0702
AGROCULT	2.4237
AGROPREP	1.7730

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12 se anotaron las pérdidas de usos entre los años 1998 y 2007, que a diferencia de la tabla anterior, muestra mayor pérdida en el tejido urbano continuo con 8.94 m<sup>2</sup>, seguido por el tejido urbano discontinuo con 3.55 m<sup>2</sup>. En el caso de esta comparativa, y observando las figuras 8 y 9 del capítulo de Diagnóstico se nota como estos dos usos se convirtieron en terrenos baldíos o zonas viales.

**Tabla 12: Pérdida de usos y superficies 1998 a 2007**

Clase	Superficie (km <sup>2</sup> )
<b>URB CONT</b>	<b>8.9442</b>
<i>URB DISC</i>	3.5523
COM INDUS	0.9081
CONSTR	3.6621
VEG URB	1.0899
VIAL	2.4786
AGUA	0.0108
AGROCULT	1.8702
AGROPREP	2.8809

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 13 representa la pérdida final desde 1984 a 2007, teniendo la mayor pérdida en el tejido urbano discontinuo con 9.17 m<sup>2</sup>, seguido por los terrenos baldíos con 6.38 m<sup>2</sup>. Comparando las figuras 7 y 9 del capítulo de Diagnóstico, se evidencia que el área de estudio sufrió notoriamente un cambio de tejido urbano, ya que en la imagen del año 2007 aparece en mayor extensión el tejido urbano continuo.

**Tabla 13: Pérdida de usos y superficies 1984 a 2007**

Clase	Superficie (km <sup>2</sup> )
URB CONT	3.3579
<b>URB DISC</b>	<b>9.1710</b>
COM INDUS	1.6767
<i>CONSTR</i>	<i>6.3819</i>
VEG URB	1.7064
VIAL	2.8746
AGUA	0.0711
AGROCULT	3.7188
AGROPREP	3.4047

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del área colindante con el cauce del río, en 1984 los usos predominantes eran los baldíos y las vialidades, y el tejido urbano discontinuo como el de mayor extensión, así como áreas verdes ubicadas aleatoriamente a orillas del cauce, seguramente áreas verdes naturales. Para el año 1998 la mayoría de estas áreas verdes desaparecieron, dando lugar a algunas áreas verdes urbanas construidas como parte de las vialidades de la zona, conservando una gran cantidad de baldíos y de área urbana discontinua (especialmente en el área entre la calzada Terán Terán y el bulevar Lázaro Cárdenas), aumentando el tejido urbano continuo hasta ser el uso predominante sobre el cauce. En el análisis del año 2007 se conservaron la mayor parte de las vialidades, agregando o alterando algunas de estas, sin embargo, el mayor cambio sobre el cauce durante este año fue el incremento en baldíos y la reducción de áreas de tejido urbano clase 1 y 2.

### **Con referencia a las temperaturas sobre el cauce.**

Antes de calcular las temperaturas sobre el cauce, se consideró importante encontrar las temperaturas en el área de estudio general. En el año de 1984 se registraron mayores áreas dentro del intervalo de 42.5.° C y 45.° C, aunque dentro del cauce del río se reduce al intervalo entre 40.° C y 42.5.° C. En 1998, como ya se mencionó anteriormente, los resultados de temperaturas arrojaron un clima mucho más fresco de lo esperado, ya que el día que se capturó la imagen había vientos de 37 km/h que redujeron las altas temperaturas, en comparación con los vientos de 18.3 km/h presentes durante el día en que se captó la imagen del año 2007 (CICESE, 2018; Meteored, 2017). Debido a esto se encontraron pocas variaciones dentro del intervalo de 32.5.° C a 35.° C y una mayor cantidad de zonas en el intervalo de 35.° C a 37.5.° C, con temperaturas de hasta 30.° C en los cuerpos de agua. En el año 2007, siendo una fecha más cercana al estado urbanizado actual del río, la clasificación mostró una temperatura casi uniforme dentro del intervalo de 42.5.° C y 45.° C, con alteraciones casi nulas dentro del recorrido del cauce del río, y bajando hasta 30.° C en presencia de agua.

En el caso de las temperaturas dentro del cauce, es importante resaltar como en los perfiles del año 1984 se vieron reducciones de hasta 3.° C dentro del río en comparación con áreas construidas y baldíos.



El recorrido del cauce, aun en ausencia del agua y con la vialidad Calzada de los Presidentes sobre el río, sigue siendo ligeramente más fresco que las áreas construidas colindantes con este, aunque es una diferencia de 2.º C aproximadamente. Los baldíos tienen una temperatura menor, debido a la posible presencia de vegetación endémica y a la ausencia de elementos construidos.

La presencia del lago del Bosque de la Ciudad en los tres periodos denota los grandes beneficios climáticos del agua, ya que en sus tres apariciones dentro de los perfiles muestra una reducción de temperaturas de hasta 13.º C, como se observa en el resultado del año 1998. También las áreas verdes muestran temperaturas bajas en comparación con otros tramos de los transectos, bajando hasta 3.º C, o 5.º C en el caso de compararlo con un área comercial o de construcción densa.

### **Con referencia a las áreas de inundación.**

De acuerdo con los resultados obtenidos sobre la imagen completa en ArcGIS, no solo el área correspondiente es propensa a inundaciones debido a que naturalmente tiene una elevación menor, sino también áreas circundantes a ella que tienen casi el mismo nivel de riesgo. Con la segunda herramienta utilizada se vio tal similitud entre las alturas del suelo que simplemente aparece como una gran área de inundación abarcando casi en su totalidad la imagen del área de estudio.

Se vio que las áreas más propensas a inundarse prácticamente al mismo nivel que el cauce del río son: parte considerable del Barrio Pasadina, el Centro de Convenciones FEX, ubicado sobre la Calzada de los Presidentes, y la gran mayoría de los puntos construidos sobre la Calzada, como el Centro Estatal de las Artes y la Facultad de Ciencias Administrativas de la Universidad Autónoma de Baja California. Las siguientes áreas de riesgo corresponderían a colonias como Jabonera, Pueblo Nuevo, Santa Clara, Loma Linda y la Colonia del Rastro, al igual que la Plaza Cachanilla. Estas áreas habitacionales suelen albergar a ciudadanos de bajos recursos.

Algo interesante que se notó al visualizar las elevaciones fue una pendiente poco pronunciada sobre la misma dirección del cauce, observando que la altura menor es de 2

metros sobre el nivel del mar en el primer perfil, y de 6 metros en el último perfil, siendo el extremo norte y el extremo sur del área embovedada del río respectivamente, lo que convierte el área norte del cauce del río como una zona de riesgo importante en el caso de una inundación, siendo además un área de gran concentración habitacional y comercial.

### **Lineamientos de diseño de infraestructura verde**

Como se vio en el marco teórico de esta investigación, la infraestructura verde debe tener enfoques a diferentes disciplinas para su correcta ejecución a nivel institucional. Siguiendo esta idea y considerando los campos pertinentes dentro del contexto del área de estudio se enlistan a continuación una serie de lineamientos a tomarse en cuenta por proyectistas, arquitectos e inversionistas para el diseño de infraestructura verde dentro del área del cauce del río y sus alrededores.

- Previo a todo el proceso de diseño, hay que recordar que uno de los fundamentos de la infraestructura verde es la participación ciudadana. Por lo tanto, el proceso de planeación integra obligatoriamente la opinión pública para conocer las preferencias y exigencias de la población respecto a este espacio (Chris Blandford Associates, 2006). Una vez entendiendo esto, es posible comenzar con la definición de prioridades para el proyecto.
- Como principio básico, los elementos dentro del área de estudio deben estar conectados visual o funcionalmente, es decir, que aún distanciados mantengan una similitud o desempeñen funciones complementarias (Llausas y Roe, 2012). Como requisito extra, deben ser accesibles entre ellos, llevando una continuidad de circulación. Por ejemplo, jardines alargados a manera de corredor verde, colocados en diferentes manzanas, con diseños y vegetación similares.
- Ya que los espacios deben estar conectados de esta manera, debe analizarse cuáles son las intersecciones o puntos de mayor flujo y con mayores necesidades de acondicionamiento, o por otro lado, con mayor riesgo en caso de inundación (Watershed Management Group, 2012). Esto con el objetivo de encontrar áreas con

mayor necesidad de intervención que pueden conformar la red de infraestructura verde.

- Los elementos construidos deben ofrecer actividades variadas para visitantes que, aunque no serían frecuentes debido a que esta vialidad es mayormente automovilística, no debe ignorarse la posibilidad de su estancia por un lapso mediano, especialmente en las banquetas cercanas al Centro FEX o al CEART durante eventos culturales o sociales en estos, o en banquetas donde se detenga el transporte público. Estos espacios además deben traer un beneficio climático, estético o cultural a zonas aledañas (Vásquez, 2016).
- Al tratarse de áreas propensas a inundación, debe realizarse una combinación entre vegetación riparia y endémica, ya que son necesarias las propiedades de ambas para absorber el agua en caso de precipitaciones, al mismo tiempo que controlan el polvo, la contaminación y las altas temperaturas con el menor mantenimiento posible (Zamudio, 2011). Esta vegetación deberá tener una mayor presencia en las zonas con menor elevación debido al riesgo mayor en ellas.
- Se recomienda diseñar pequeños nichos o refugios tanto en corredores como en la cercanía a edificios existentes, ya que por medio de cierta vegetación e incluso de elementos acuáticos es posible crear microclimas en áreas concurridas que reducirán la sensación térmica durante épocas calurosas (Suárez *et al.*, 2011).
- En relación con el punto anterior, ya que la Calzada de los Presidentes ubicada sobre el cauce del río contiene actualmente diversas construcciones de importancia para la población de Mexicali, es necesario adaptar estos edificios al enfoque de la infraestructura verde. Esto puede lograrse con detalles simples como techos y muros verdes, vegetación que reemplace a elementos tradicionales para delimitar espacios, y manejo de desniveles o canaletas para el control de inundaciones (APS Group Scotland, 2011).
- En el diagnóstico de esta investigación siempre se observaron resultados favorables en relación con el Bosque de la Ciudad, por lo tanto, sería deseable darle un

protagonismo en el diseño de la infraestructura, y emular un poco su forma y función para extender su utilidad ambiental en este caso.

- Aunque las precipitaciones sean poco frecuentes en la ciudad de Mexicali, el área de estudio es sumamente vulnerable en estos casos. Por lo tanto, es necesario utilizar pavimentación y suelos permeables, como grava o arena, vegetación cubresuelos, y construcciones con la capacidad para contener agua de lluvias (Watershed Management Group, 2012).
- Lo ideal sería tener tramos abiertos del río en algún futuro, pero ya que esto probablemente no sea posible o deseado por los habitantes de la ciudad, será ineludible la integración de fuentes, espejos de agua y otros usos de cuerpos de agua para generar un efecto enfriador en aquellos espacios que lo necesiten (Ahern, 2007).
- Como consideración adicional y en caso de ser aplicable, las nuevas construcciones en la zona idealmente deberán contar con generadores de energía, de preferencia solar, para mantenerse a sí mismas, o generar electricidad para edificios aledaños.

Estos son algunos lineamientos generales de diseño a considerarse en caso de desarrollar infraestructura verde en el área del cauce del río. Estos podrían ser más extensos, sin embargo se escribieron solo estimando lo pertinente al Río Nuevo y el enfoque de servicios ambientales de regulación de microclimas y caudales que se buscó desde un inicio.





## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En este último apartado, se escriben las conclusiones de la investigación, conectando los resultados al planteamiento inicial del problema mencionado en la introducción de este mismo documento, así como una descripción breve de algunos problemas encontrados y de los intereses por continuar esta investigación en otro ámbito. Finalmente se escriben una serie de recomendaciones generales para investigadores, instituciones y cualquier lector con el interés de saber sobre infraestructura verde y del río Nuevo.

### **Conclusiones**

La pregunta general de esta investigación buscaba la manera de integrar el área urbanizada del río a una red de infraestructura verde, que consecuentemente brinde características de resiliencia ante efectos del cambio climático, dichos efectos pudiendo entenderse como el aumento de temperaturas y el cambio en el índice de precipitaciones, es decir, una mayor probabilidad de lluvias inesperadas. Las preguntas específicas además requerían la investigación del cambio en las funciones hidrológicas del río Nuevo, a nivel microclima y en cuestión de caudales, siempre centrándose en el área embovedada de este, puesto que el reto consistía en comparar su estado natural con su condición actual modificada y urbanizada. De acuerdo con la metodología empleada y el diagnóstico del área, los resultados de temperaturas y de cambio de usos sobre el cauce y sus alrededores, se puede concluir que la pérdida del cuerpo de agua tuvo una gran influencia en la temperatura de la zona (en el caso del río abierto la temperatura bajaba hasta 3 °C en comparación con los tramos de baldío, y con el río embovedado bajaba 1 °C o se mantenía igual en comparación con baldíos), así como en los cambios de uso de suelo: de baldíos y áreas verdes naturales a zonas urbanizadas construidas con espacios áridos. La infraestructura verde, como se vio dentro del marco teórico, puede utilizar beneficios a partir de servicios ambientales por medio de vegetación, cuerpos de agua y elementos construidos armónicos

con el medioambiente, sean construidos a partir de cero o agregados a construcciones existentes para brindar las características de resiliencia ante el cambio climático, que se buscaban desde el planteamiento del trabajo. Con estos se puede formar fácilmente un grupo de espacios recreativos y culturales que de alguna forma rescaten el carácter natural del río, comprobando así lo descrito en la hipótesis inicial de trabajo.

Los objetivos desde el inicio se orientaron hacia los servicios ambientales que se veían en la posibilidad de evaluar y valorar por medio de sistemas de información geográfica, además de identificar de acuerdo con los escenarios de cambio climático para la región a diferentes niveles, efectos de urbanización en la ciudad y sobre el río, y por último determinar lineamientos aplicables para el diseño de infraestructura verde en este caso específico. Los tres periodos elegidos para la investigación se definieron según el estado del río: antes de su embovedado, recientemente después del embovedado, y un tiempo en el que se pudiera revisar su estado tan actualizado como fuera posible; con los datos obtenidos de estos periodos de 1984, 1998 y 2007 respectivamente, fue posible cuantificar los cambios causados por la urbanización que pueden empeorar la situación de riesgo en presencia del cambio climático en materia de incremento de las temperaturas, justificando además los beneficios de la presencia de cuerpos de agua y vegetación como se muestra en el capítulo de Diagnóstico al revisar el perfil gráfico correspondiente al lago del Bosque de la Ciudad. Estos beneficios, ya presentes en el área correspondiente al único parque urbano de la ciudad, pueden reproducirse en una escala similar extendida sobre el Río Nuevo, siguiendo las características y lineamientos de la infraestructura verde.

Durante el proceso de realización de esta tesis habría sido preferente tener imágenes con una mejor resolución de píxel, ya que por esta razón no se pudo captar con precisión el área del río con agua en las imágenes del primer periodo, así como algunas áreas verdes que probablemente pasaron desapercibidas para los programas de computadora utilizados. Por otra parte, gran parte del tiempo de investigación se dedicó a probar diferentes softwares para encontrar el más adecuado para las metodologías, a aplicar métodos distintos en estos programas de información geográfica con diferentes datos y fuentes, e incluso se aprendió durante el proceso a utilizar estos softwares ya que se contaba con un conocimiento previo casi nulo.



En un futuro se buscaría fortalecer esta tesis con información más actualizada sobre investigaciones y antecedentes históricos del río Nuevo, datos de inundaciones y precipitaciones para tener una mejor justificación en materia de regulación de caudales, y nueva teoría y casos sobre infraestructura verde y su aplicación sobre ríos urbanos, al igual que algún método para cálculo de evapotranspiración que no involucre observación en sitio. Como continuación, se haría una propuesta arquitectónica a manera de zonificación y lineamientos de diseño para acompañar los conocimientos adquiridos de este documento y poder así sentar las bases de un proyecto de infraestructura verde con el cauce del río como base, ya que, aunque si existen proyectos arquitectónicos y paisajísticos en esta zona, ninguno es tratado exactamente como infraestructura verde ni como un elemento conectado a otras áreas verdes o naturales de la ciudad.

### **Recomendaciones**

Este trabajo demuestra los beneficios de temperatura y humedad proporcionados por áreas verdes y cuerpos de agua, aun si tienen una extensión pequeña moderada. Como se observó en las imágenes de temperaturas, existen zonas con temperaturas bastante altas debido a actividades comerciales e industriales y un gran flujo automovilístico. Por lo tanto, se recomienda la implementación de áreas verdes, de preferencia con vegetación que requiera poco mantenimiento, en estos focos de calor urbano. Además de estas ventajas, se recomienda la construcción de estas áreas para mejorar la calidad del aire, e incrementar el valor y atractivo paisajístico, características importantes para una mejor calidad urbana en zonas concurridas.

Se recomienda a instituciones y elementos de gobierno dedicados a la construcción, retomar las impresiones sobre áreas de inundación para disminuir la cantidad de proyectos arquitectónicos sobre estas zonas de riesgo, y en cambio colocar elementos que funcionen para la regulación de caudales y disminuir el riesgo de inundaciones. Lo ideal además sería la reubicación de zonas habitacionales y sitios de alta concurrencia actualmente encontrados sobre el cauce del río, ya que representan un gran peligro para la población en caso de desastres. Sin embargo, es evidente que su remoción o reubicación es difícil por diferentes razones, por lo que se recomienda entonces el refuerzo de instalaciones para

reducir los daños en caso de desastres naturales, actividad sísmica o consecuencias de tierras inestables.

Se recomienda al lector interesado en realizar un proyecto de infraestructura verde el obtener la mayor información posible en el marco teórico de esta tesis o en las fuentes encontradas en la bibliografía, con las fechas más recientes posibles para conocer nuevas tecnologías, y buscando las perspectivas propias de cada país e investigador. En el caso de desear una introducción rápida e ilustrada con ejemplos de elementos que cumplen con los requisitos de infraestructura verde, se recomiendan los documentos de APS Group Scotland (2011), Natural England (2009) y Civic y Suita (2014).

Se recomienda a investigadores interesados en continuar con estudios sobre el río Nuevo, especialmente referente a la infraestructura verde y proyectos paisajísticos, el considerar abrir porciones del cuerpo de agua del río o agregar elementos en este mismo espacio para emular los beneficios del antiguo ecosistema ripario, e instrumentar sistemas de saneamiento para reducir la contaminación del agua.

Por último, se recomienda a investigadores, estudiantes, arquitectos, y otros profesionistas interesados en el paisajismo dentro de la ciudad de Mexicali, el trabajar con elementos constructivos y de vegetación que requieran poco mantenimiento e inversión, ya que este es uno de los mayores problemas que se han dado en el área de la Calzada de los Presidentes y en general en la mayor parte de los proyectos de la ciudad. Para esto se recomienda la tesis de Zamudio (2011) sobre vegetación nativa sobre el río, pero puede ser aplicada a cualquier región de la ciudad o con características climáticas similares.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Ahern, J. (1995). Greenways as a planning strategy. *Landscape and Urban Planning*, 33, 131-155.
- Ahern, J. (2007). Green infrastructure for cities: The spatial dimension. *Cities of the Future Towards Integrated Sustainable Water and Landscape*. (pp. 267-283). London: IWA Publishing.
- Allen, A. (2001). Urban sustainability under threat. The industrial restructuring of the fishing industry in the city of Mar del Plata, Argentina. *Development in Practice*, 11(2-3), 12-42.
- Allen, A., y You, N. (2002). *Sustainable urbanisation: Bridging the Green and Brown agendas*. Londres: Development Planning Unit University College London.
- Andersson, E. (2006). Urban landscapes and sustainable cities. *Ecology and Society*, 11 (1)(34), 1-7.
- APS Group Scotland. (2011). *Green Infrastructure - Design and Placemaking*. Edinburgo: Crown.
- Bast, J. (2010). *Seven Theories of Climate Change*. Chicago: The Heartland Institute.
- Benedict, M., y McMahon, E. (2002). Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century. *Sprawl Watch Clearinghouse Monograph Series* (pp. 36). Washington, D.C. : The Conservation Fund.
- Bertoux, L., y González, D. (2015). Vulnerabilidad y resiliencia urbana frente al cambio climático: El caso de la zona metropolitana de Guadalajara, México. *Revista Urbano*, 31, 24-31.
- Blanco-Garrido, F., López-Albacete, I., Herrera-Grao, A., Magdaleno-Más, F., y Martínez, R. (2011). *Relación entre vegetación riparia y caudales: resultados preliminares en tramos fluviales del sur de España*. Ensayo presentado en I Congreso Ibérico Restaurarios de 2011.

- Bolund, P., y Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29, 293-230.
- Calvache, A., Benítez, S., y Ramos, A. (2012). *Fondos de Agua: Conservando la Infraestructura Verde. Guía de Diseño, Creación y Operación*. Bogotá: The Nature Conservancy.
- CICESE. (2018). Sistema CICLOM. 2018, de <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- Civic, K., y Suita, M. (2014). Green Infrastructure: Training Manual for trainers. In ECNC y CEEweb for Biodiversity (Ed.), (1 ed.). Budapest: European Centre for Nature Conservation y CEEweb for Biodiversity.
- Cotillon, S. E., y Mathis, M. L. (2017). Mapping land cover through time with the Rapid Land Cover Mapper—Documentation and user manual *Open-File Report* (pp. 34). Reston, VA.
- Chris Blandford Associates. (2006). *Towards a Vision of Green Infrastructure in Buckinghamshire*. Buckinghamshire: Buckinghamshire County Council.
- Department for Environment Food and Rural Affairs. (2004). *Creating sustainable communities: Greening the Gateway. A greenspace strategy for Thames Gateway*. London: Office of the Deputy Prime Minister.
- Elmqvist, T., Setälä, H., Handel, S., Van der Ploeg, S., Aronson, J., Blignaut, J., . . . De Groot, R. (2015). Benefits of restoring ecosystem services in urban areas *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 101-108.
- ESRI Inc. (2012). Delineating Watersheds from a Digital Elevation Model (DEM). from ESRI Inc. <http://sites.tufts.edu/gis/files/2013/11/Delineating-Watersheds-from-a-Digital-Elevation-Model.pdf>
- Fadigas, L. (2009). La estructura verde en el proceso de planificación urbana. *Ciudades*, 12, 33-47.
- Farrugia, S., Hudson, M., y McCulloch, L. (2013). An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 9(2), 136-145.
- Grizans, J., Auzins, A., y Vanags, J. (2012). Green infrastructure development - Challenge of the modern urban dynamic growth. *Economics and Business*, 22, 51-58.

- Grunewald, K., y Bastian, O. (2015). *Ecosystem Services - Concept, Methods and Case Studies*. Berlín: Springer-Verlag.
- Guerra, S. (2000). *Evaluación de la vegetación riparia, insectos acuáticos y peces, influenciados por las variaciones en la calidad y cantidad de los caudales de la cuenca del Río San Juan, Nuevo León, México*. (Maestro en Ciencias Forestales), Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares.
- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., . . . Tejeiro, J. A. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51-61.
- Haughton, G., y Hunter, C. (1994). *Sustainable Cities*. Londres: Jessica Kingsley Publishers Ltd.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: IPCC.
- Jessop, J., Spyreas, G., Pociask, G., Benson, T., Ward, M., y Matthews, J. (2015). Tradeoff among ecosystem services in restored wetlands. *Biological Conservation*, 191, 341-348.
- Jiménez, L. M. (2016). *Hacia ciudades y territorios inteligentes, resilientes y sostenibles. Gestión y gobernanza para la transición urbana*. Madrid: Asociación para la Sostenibilidad y el Progreso de las Ciudades.
- Julio, J. (2011). ¿Hacia una resiliencia urbana? *Revista Zero*, 27, 160-163.
- Kambites, C., y Owen, S. (2006). Renewed Prospects for Green Infrastructure Planning in the UK. *Planning, Practice & Research*, 21(4), 483-496. doi: 10.1080/02697450601173413
- Leichenko, R. (2011). Climate change and urban resilience. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3, 164-168. doi: 10.1016/j.cosust.2010.12.014
- Lennon, M., y Scott, M. (2014). Delivering ecosystem services via spatial planning: reviewing the possibilities and implications of a Green infrastructure approach. *Town Planning Review*, 85(5), 563-587.

- Liquete, C., Klesschulte, S., Dige, G., Maes, J., Grizzetti, B., Olah, B., y Zulian, G. (2015). Mapping Green infrastructure based on Ecosystem services and ecological networks: a Pan-European case study. *Environmental Science and Policy*, 54, 268-280.
- Llausas, A., y Roe, M. (2012). Green infrastructure planning: Cross-national analysis between the North East of England (UK) and Catalonia (Spain). *European Planning Studies*, 20(4), 641-663.
- Matthews, T., Lo, A., y Byrne, J. (2015). Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. *Landscape and Urban Planning*, 138, 155-163.
- Meteored. (2017). Histórico del Clima en Mexicali. 2017, de [https://www.meteored.mx/clima\\_Mexicali-America+Norte-Mexico-Baja+California-MMML-sactual-22386.html](https://www.meteored.mx/clima_Mexicali-America+Norte-Mexico-Baja+California-MMML-sactual-22386.html)
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (s.f). Red Natura 2000. Recuperado 8 de diciembre de 2015, de <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-prottegidos/red-natura-2000/>
- Muñoz, A. (2008). La política del paisaje de la Comunitat Valenciana. *Cuadernos geográficos*, 43(99-121).
- National Housing Federation. (2011). *Greener neighbourhoods: A good practice guide to managing green space*. London: National Housing Federation.
- Natural England. (2009). *Green Infrastructure Guidance*. Londres: Natural England.
- ONU-Habitat. (2009). Sobre UN-Hábitat. Recuperado 23 de noviembre de 2015, de [http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=89:sobreun-habitat&catid=35:sobre-rolac](http://www.onuhabitat.org/index.php?option=com_content&view=article&id=89:sobreun-habitat&catid=35:sobre-rolac)
- Organización de las Naciones Unidas. (2015). Agenda Urbana para el Siglo XXI. *Ciudad Sostenible*, 24, 37-56.
- Organización de las Naciones Unidas. (2017). *Nueva Agenda Urbana. Declaración de Quito sobre Ciudades y Asentamientos Humanos Sostenibles para Todos*. Ensayo presentado en Conferencia Hábitat III, Quito.

- Peña, C. (2011). *Metodología para la planificación de áreas verdes urbanas: El caso de Mexicali, Baja California*. Mexicali: Universidad Autónoma de Baja California.
- Ravetz, J. (2000). *City Region 2020. Integrated planning for a sustainable development*. Glasgow: Earthscan Publications.
- Rawlins, M., y Westby, L. (2013). Community participation in payment for ecosystem services design and implementation: An example from Trinidad. *Ecosystem Services*, 6, 117-121.
- Raynal-Villaseñor, J. A. (2011). Cambio climático global: una realidad inequívoca. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XII(4), 421-427.
- Royal Town Planning Institute. (2013). Briefing on Green Infrastructure in the United Kingdom (pp. 1-5). Londres: Royal Town Planning Institute.
- Sánchez, J. M., Caselles, V., Valor, E., y Coll, C. (2007). Análisis de una metodología para la estimación de la evapotranspiración real diaria mediante teledetección a una escala regional. *Revista de Teledetección*, 27, 71-79.
- Schwarz, N., Bauer, A., y Haase, D. (2011). Assessing climate impacts of planning policies—An estimation for the urban region of Leipzig (Germany). *Environmental Impact Assessment Review*, 31, 97-111. doi: 10.1016/j.eiar.2010.02.002
- Secretaría de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio. (2003). Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación. Resumen. (pp. 31): Secretaría de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio.
- Shafer, S., Scott, D., Baker, J., y Winemiller, K. (2013). Recreation and amenity values of urban stream corridors: Implications for Green infrastructure. *Journal of Urban Design*, 18(4), 478-493.
- Suárez, A., Camarena, P., Herrera, I., y Lot, A. (2011). *Infraestructura verde y corredores ecológicos de los pedregales: ecología urbana del sur de la Ciudad de México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Takano, T., Nakamura, K., y Watanabe, M. (2002). Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas: the importance of walkable green spaces. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 56(12), 913-918.
- The Yale Center for Earth Observation. (2010). Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to temperature. 2017, de <https://slidedocument.org/dn-to-kelvin>

- Thorbecke, E. (2006). *The Evolution of Development Doctrine, 1950-2005* (Vol. 155, pp. 39). Helsinki: UNU-WIDER.
- Tjanlingii, S. (1995). *Ecopolis. Strategies for ecologically sound urban development*. Leiden: Backhuys Publishers.
- U. S. Geological Survey. (2017a). EarthExplorer. Recuperado 30 de agosto 2017, de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- U. S. Geological Survey. (2017b). Rapid Land Cover Mapper (Version 1.0): U. S. Geological Survey.
- UK Green Building Council. (2015). *Demystifying Green Infrastructure* (pp. 55). Londres: UK Green Building Council.
- Vásquez, A. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*(63), 63-86.
- Villanueva-Solís, J., Ranfla, A., y Quintanilla-Montoya, A. L. (2012). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información Tecnológica*, 24(1), 15-24. doi: 10.4067/S0718-07642013000100003
- Watershed Management Group. (2012). *Infraestructura verde para comunidades del desierto sonorense*. Tucson: Watershed Management Group.
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford: United Nations.
- Wright, H. (2011). Understanding green infrastructure: the development of a contested concept in England. *Local Environment*, 16(10), 1003-1009.
- Wunder, S. (2005). *Payments for environmental services: some nuts and bolts*. (Vol. 42). Jakarta: Center for International Forestry Research.
- XV Ayuntamiento de Mexicali. (1997, 16 de mayo). Programa Parcial de Desarrollo Urbano Rio Nuevo. *Periódico Oficial del Estado de Baja California*, p. 70.
- XXI Ayuntamiento de Mexicali. (2013). Episodios históricos. Recuperado 8 de diciembre de 2015, de <http://www.mexicali.gob.mx/xxi/pages/historiaEpisodios.php>
- Zamudio, D. (2011). *Criterios de sustentabilidad aplicables a la selección de vegetación nativa y adaptada para el cuidado del medio ambiente y mejoramiento del paisaje*



*urbano en ciudades desérticas. El caso de la Calzada de los Presidentes, Mexicali B.C.* (Maestro en Planeación y Desarrollo Sustentable), Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali.

Zhang, L., Liu, Q., Hall, N. W., y Fu, Z. (2006). An environmental accounting framework applied to green space ecosystem planning for small towns in China as a case study. *Ecological Economics*, 60, 533-542.



## Anexos

### A. Proceso para corrección de imagen en ENVI.

- 1) **Radiometric Calibration**, seleccionando una máscara correspondiente al área de estudio como Spatial Subset y aplicando la opción FLAASH.
- 2) **Atmospheric Correction**, opción FLAASH, tomar la imagen que resultó del paso anterior, seleccionar la segunda opción del Scale Factor y un archivo *output* nuevo, cambiar los datos según el tipo de imagen: en este caso Landsat 5, con modelo Standard, modo aerosol Urban, *retrival* None con su correcta fecha de adquisición según los datos de la imagen.
- 3) **Normalización** utilizando herramienta Band Math, con la siguiente fórmula:

$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1)/10000$

## **B. Proceso para clasificación de píxeles Example Based en ENVI**

- 1) Función **Example Based Feature Extraction Workflow**, seleccionando la imagen resultante del procedimiento anterior, y eligiendo las bandas 3 y 4 en Normalized Difference Band, y las bandas 6, 4 y 1 en Color Space para visualización.
- 2) Elegir Scale Level 10 y Merge Level 5. Seleccionar Show Boundaries para facilitar la distinción de los grupos de píxeles.
- 3) Crear las clases deseadas, y seleccionar una cantidad considerable de píxeles que correspondan a dicha clase. En este caso se intentó seleccionar al menos 30 ejemplos por clase, para obtener mejores resultados.
- 4) Una vez guardados los ejemplos y arrancar el procedimiento, el software identifica píxeles similares a los que se seleccionaron manualmente y hace una clasificación según características en común.

## C. Cambios de usos y superficies 1984-1998

Clase 1984	Clase 1998	Superficie (km <sup>2</sup> )
<b>URB CONT</b>	URB CONT	6.4188
URB CONT	URB DISC	0.1647
URB CONT	COM INDUS	0.3303
URB CONT	CONSTR	0.1890
URB CONT	VEG URB	0.2736
URB CONT	VIAL	1.2051
URB CONT	AGUA	0.0045
URB CONT	AGROCULT	0.0018
URB CONT	AGROPREP	0.0036
<b>URB DISC</b>	URB CONT	7.1991
URB DISC	URB DISC	2.0745
URB DISC	COM INDUS	0.1017
URB DISC	CONSTR	1.4346
URB DISC	VEG URB	0.1206
URB DISC	VIAL	0.5679
URB DISC	AGUA	0
URB DISC	AGROCULT	0
URB DISC	AGROPREP	0.0477
<b>COM INDUS</b>	URB CONT	0.4932
COM INDUS	URB DISC	0.1566
COM INDUS	COM INDUS	0.3699
COM INDUS	CONSTR	0.3789

COM INDUS	VEG URB	0.0765
COM INDUS	VIAL	0.1953
COM INDUS	AGUA	0
COM INDUS	AGROCULT	0.0045
COM INDUS	AGROPREP	0.0018
<b>CONSTR</b>	URB CONT	3.2103
CONSTR	URB DISC	1.5021
CONSTR	COM INDUS	0.3240
CONSTR	CONSTR	2.0952
CONSTR	VEG URB	0.1854
CONSTR	VIAL	0.7380
CONSTR	AGUA	0.0018
CONSTR	AGROCULT	0
CONSTR	AGROPREP	0.0189
<b>VEG URB</b>	URB CONT	0.6993
VEG URB	URB DISC	0.3816
VEG URB	COM INDUS	0.0360
VEG URB	CONSTR	0.1890
VEG URB	VEG URB	0.5490
VEG URB	VIAL	0.2592
VEG URB	AGUA	0
VEG URB	AGROCULT	0.0063
VEG URB	AGROPREP	0.0135
<b>VIAL</b>	URB CONT	2.0151
VIAL	URB DISC	0.1584
VIAL	COM INDUS	0.3960
VIAL	CONSTR	0.5238
VIAL	VEG URB	0.1386
VIAL	VIAL	1.8000
VIAL	AGUA	0.0009
VIAL	AGROCULT	0.0063
VIAL	AGROPREP	0.0207
<b>AGUA</b>	URB CONT	0.0054
AGUA	URB DISC	0.0045
AGUA	COM INDUS	0
AGUA	CONSTR	0.0081
AGUA	VEG URB	0.0162
AGUA	VIAL	0.0360
AGUA	AGUA	0.1449
AGUA	AGROCULT	0
AGUA	AGROPREP	0
<b>AGROCULT</b>	URB CONT	0.1953
AGROCULT	URB DISC	0.3951
AGROCULT	COM INDUS	0.0072
AGROCULT	CONSTR	0.4230

AGROCULT	VEG URB	0.1386
AGROCULT	VIAL	0.0846
AGROCULT	AGUA	0.0009
AGROCULT	AGROCULT	1.2951
AGROCULT	AGROPREP	1.1790
<b>AGROPREP</b>	URB CONT	0.1926
AGROPREP	URB DISC	0.3060
AGROPREP	COM INDUS	0.0135
AGROPREP	CONSTR	0.5157
AGROPREP	VEG URB	0.1260
AGROPREP	VIAL	0.0630
AGROPREP	AGUA	0
AGROPREP	AGROCULT	0.5562
AGROPREP	AGROPREP	1.9287

## D. Cambios de usos y superficies 1998-2007

Clase 1998	Clase 2007	Superficie (km <sup>2</sup> )
URB CONT	URB CONT	11.4849
URB CONT	URB DISC	2.3337
URB CONT	COM INDUS	0.4356
URB CONT	CONSTR	1.8702
URB CONT	VEG URB	0.2061
URB CONT	VIAL	4.0923
URB CONT	AGUA	0.0054
URB CONT	AGROCULT	0
URB CONT	AGROPREP	0.0009
<b>URB DISC</b>	URB CONT	<b>1.3860</b>
URB DISC	URB DISC	1.5912
URB DISC	COM INDUS	0.1467
URB DISC	CONSTR	1.5426
URB DISC	VEG URB	0.0567
URB DISC	VIAL	0.4095
URB DISC	AGUA	0

URB DISC	AGROCULT	0
URB DISC	AGROPREP	0.0108
<b>COM INDUS</b>	<b>URB CONT</b>	<b>0.4761</b>
COM INDUS	URB DISC	0.0684
COM INDUS	COM INDUS	0.6705
COM INDUS	CONSTR	0.0567
COM INDUS	VEG URB	0.0099
COM INDUS	VIAL	0.2952
COM INDUS	AGUA	0
COM INDUS	AGROCULT	0
COM INDUS	AGROPREP	0.0018
<b>CONSTR</b>	<b>URB CONT</b>	<b>1.2501</b>
CONSTR	URB DISC	1.3050
CONSTR	COM INDUS	0.2826
CONSTR	CONSTR	2.0952
CONSTR	VEG URB	0.1323
CONSTR	VIAL	0.6696
CONSTR	AGUA	0.0063
CONSTR	AGROCULT	0
CONSTR	AGROPREP	0.0162
<b>VEG URB</b>	<b>URB CONT</b>	<b>0.3627</b>
VEG URB	URB DISC	0.1287
VEG URB	COM INDUS	0.0306
VEG URB	CONSTR	0.1656
VEG URB	VEG URB	0.4914
VEG URB	VIAL	0.3618
VEG URB	AGUA	0.0405
VEG URB	AGROCULT	0
VEG URB	AGROPREP	0.0432
<b>VIAL</b>	<b>URB CONT</b>	<b>1.1358</b>
VIAL	URB DISC	0.3159
VIAL	COM INDUS	0.2610
VIAL	CONSTR	0.5976
VIAL	VEG URB	0.1512
VIAL	VIAL	2.4705
VIAL	AGUA	0.0045
VIAL	AGROCULT	0
VIAL	AGROPREP	0.0126
<b>AGUA</b>	<b>URB CONT</b>	<b>0.0009</b>
AGUA	URB DISC	0.0009
AGUA	COM INDUS	0
AGUA	CONSTR	0.0027
AGUA	VEG URB	0.0009
AGUA	VIAL	0.0054
AGUA	AGUA	0.1422



AGUA	AGROCULT	0
AGUA	AGROPREP	0
<b>AGROCULT</b>	URB CONT	0.1350
AGROCULT	URB DISC	0.1152
AGROCULT	COM INDUS	0.0018
AGROCULT	CONSTR	0.2511
AGROCULT	VEG URB	0.0225
AGROCULT	VIAL	0.0270
AGROCULT	AGUA	0
AGROCULT	AGROCULT	0
AGROCULT	AGROPREP	1.3176
<b>AGROPREP</b>	URB CONT	0.5526
AGROPREP	URB DISC	1.0989
AGROPREP	COM INDUS	0.1116
AGROPREP	CONSTR	0.6264
AGROPREP	VEG URB	0.1206
AGROPREP	VIAL	0.3708
AGROPREP	AGUA	0
AGROPREP	AGROCULT	0
AGROPREP	AGROPREP	0.3330

## E. Cambios de usos y superficies 1984-2007

Clase 1984	Clase 2007	Superficie (km <sup>2</sup> )
<b>URB CONT</b>	URB CONT	5.2335
URB CONT	URB DISC	0.2430
URB CONT	COM INDUS	0.2898
URB CONT	CONSTR	0.3411
URB CONT	VEG URB	0.1665
URB CONT	VIAL	2.3049
URB CONT	AGUA	0.0072
URB CONT	AGROCULT	0
URB CONT	AGROPREP	0.0054
<b>URB DISC</b>	URB CONT	4.9662

URB DISC	URB DISC	2.3751
URB DISC	COM INDUS	0.2430
URB DISC	CONSTR	2.4300
URB DISC	VEG URB	0.1179
URB DISC	VIAL	1.4094
URB DISC	AGUA	0.0045
URB DISC	AGROCULT	0
URB DISC	AGROPREP	0
<b>COM INDUS</b>	URB CONT	0.5859
COM INDUS	URB DISC	0.1809
COM INDUS	COM INDUS	0.3321
COM INDUS	CONSTR	0.1917
COM INDUS	VEG URB	0.0513
COM INDUS	VIAL	0.3231
COM INDUS	AGUA	0.0045
COM INDUS	AGROCULT	0
COM INDUS	AGROPREP	0.0072
<b>CONSTR</b>	URB CONT	<b>2.6910</b>
CONSTR	URB DISC	1.7181
CONSTR	COM INDUS	0.4590
CONSTR	CONSTR	1.6938
CONSTR	VEG URB	0.1026
CONSTR	VIAL	1.3959
CONSTR	AGUA	0.0135
CONSTR	AGROCULT	0
CONSTR	AGROPREP	0.0018
<b>VEG URB</b>	URB CONT	0.6516
VEG URB	URB DISC	0.3078
VEG URB	COM INDUS	0.0297
VEG URB	CONSTR	0.2178
VEG URB	VEG URB	0.4275
VEG URB	VIAL	0.4599
VEG URB	AGUA	0.0126
VEG URB	AGROCULT	0
VEG URB	AGROPREP	0.0270
<b>VIAL</b>	URB CONT	1.3518
VIAL	URB DISC	0.2889
VIAL	COM INDUS	0.4077
VIAL	CONSTR	0.7335
VIAL	VEG URB	0.0648
VIAL	VIAL	2.1852
VIAL	AGUA	0.0117
VIAL	AGROCULT	0
VIAL	AGROPREP	0.0162
<b>AGUA</b>	URB CONT	0.0054

AGUA	URB DISC	0.0045
AGUA	COM INDUS	0.0027
AGUA	CONSTR	0.0216
AGUA	VEG URB	0.0090
AGUA	VIAL	0.0279
AGUA	AGUA	0.1440
AGUA	AGROCULT	0
AGUA	AGROPREP	0
<b>AGROCULT</b>	URB CONT	0.6174
AGROCULT	URB DISC	0.7767
AGROCULT	COM INDUS	0.0603
AGROCULT	CONSTR	0.5697
AGROCULT	VEG URB	0.0810
AGROCULT	VIAL	0.2313
AGROCULT	AGUA	0.0009
AGROCULT	AGROCULT	0
AGROCULT	AGROPREP	1.3815
<b>AGROPREP</b>	URB CONT	0.6813
AGROPREP	URB DISC	1.0629
AGROPREP	COM INDUS	0.1161
AGROPREP	CONSTR	1.0089
AGROPREP	VEG URB	0.1710
AGROPREP	VIAL	0.3645
AGROPREP	AGUA	0
AGROPREP	AGROCULT	0
AGROPREP	AGROPREP	0.2970