



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Infraestructura distribuida para
el desarrollo de la resiliencia
urbana de la Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Rodrigo Muñoz Sánchez

DIRECTOR DE TESIS

Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

*A mi familia, que me han dado
la sed por el conocimiento y me
han apoyado en todo momento.*

Índice de contenidos

| | |
|--|-----------|
| Índice de contenidos | 5 |
| Introducción: Retos para la resiliencia urbana..... | 7 |
| Objetivos | 9 |
| 1. Planeación urbana..... | 11 |
| El ser humano y los asentamientos urbanos | 11 |
| Metabolismo urbano | 12 |
| Crecimiento urbano | 16 |
| Ideologías recientes del urbanismo..... | 21 |
| Salud Urbana..... | 24 |
| 2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México | 27 |
| Características físicas..... | 27 |
| Historia | 29 |
| Metabolismo urbano del Valle de México..... | 32 |
| Problemáticas | 37 |
| 3. Resiliencia urbana | 43 |
| Desarrollo histórico del concepto de resiliencia..... | 43 |
| Concepto de resiliencia urbana..... | 44 |
| Institucionalización de la resiliencia urbana | 47 |
| Resiliencia urbana de la ciudad de México | 49 |
| 4. Infraestructura distribuida..... | 51 |
| Teoría de redes..... | 51 |
| Comportamiento de redes | 54 |
| Resiliencia de redes | 56 |
| Redes urbanas descentralizadas..... | 58 |
| 5. Infraestructura verde y servicios ecológicos..... | 63 |
| Servicios ecológicos..... | 63 |
| Afectaciones por pérdida de servicios ecológicos | 64 |
| Infraestructura verde..... | 66 |
| Infraestructura verde en la Ciudad de México | 72 |
| 6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable..... | 79 |
| Abastecimiento tradicional y problemáticas..... | 79 |

Índice de contenidos

| | |
|--|------------|
| Infraestructura sustentable de abastecimiento | 81 |
| Drenaje tradicional y problemáticas | 85 |
| Soluciones distribuidas en drenaje..... | 88 |
| 7. Energías renovables y generación distribuida..... | 97 |
| Consumo energético urbano | 97 |
| Energías renovables en zonas urbanas | 100 |
| Redes inteligentes | 103 |
| Generación eléctrica distribuida..... | 106 |
| 8. Edificios autosuficientes | 111 |
| Uso de recursos | 111 |
| Infraestructura sustentable | 113 |
| Economía circular | 117 |
| Normatividad | 118 |
| 9. Otros retos urbanos: aire y residuos sólidos | 121 |
| Calidad del aire en la Ciudad de México..... | 121 |
| Control de la contaminación atmosférica | 122 |
| Situación de residuos sólidos en la Ciudad de México | 125 |
| Control de residuos sólidos | 127 |
| 10. Planeación regional metropolitana | 131 |
| Integración regional | 131 |
| Acción para la resiliencia | 133 |
| Ciudad Universitaria como laboratorio urbano | 136 |
| Conclusiones: Visión a futuro..... | 139 |
| Índice de figuras | 141 |
| Fuentes consultadas | 143 |

Introducción: Retos para la resiliencia urbana

La actividad industrial humana ha generado impactos en el medio ambiente que cambiarán el paradigma de la planeación urbana. El cambio climático, el aumento de la población, de los niveles de vida y de la desigualdad económica generan tensiones y posibles impactos debido a la falta de acceso a servicios públicos y a desastres naturales que las ciudades del futuro tendrán que absorber y sobreponerse mediante la resiliencia urbana. Este concepto ha cobrado popularidad en los últimos años y consiste en la *"capacidad de las ciudades para funcionar de tal manera que las personas que viven y habiten en ellas – particularmente los pobres y los vulnerables – sobrevivan y prosperen sin importar con qué impactos o tensiones se encuentren"* (Arup, 2014).

Una creciente preocupación por la estabilidad y la salud de las megalópolis en el mundo ha llevado a la institucionalización de este concepto a través del GFDRR del Banco Mundial, La oficina de la ONU para asentamientos humanos, ONU Hábitat, y la iniciativa de 100 Ciudades Resilientes. En el marco de esta última, en 2016 se publicó el plan de resiliencia de la Ciudad de México, que pretende evitar un inminente colapso de la urbe si no se lleva a cabo alguna acción. Sin embargo, existen aún retos y soluciones que posiblemente no han sido considerados con la importancia que deberían tener.

Para resolver los problemas de la ciudad se podría tener éxito al tomar un enfoque de infraestructura distribuida que sea descentralizada y puntual, tanto en la generación, tratamiento, disposición o reúso *in situ* de los insumos y residuos generados por la actividad del asentamiento urbano. Este enfoque es aplicable al sistema hidro-sanitario, a través de medidas como la sectorización de la red de agua potable, las plantas de tratamiento descentralizadas e *in situ*, y la infraestructura verde y azul para un manejo sustentable de las aguas pluviales y mitigación del efecto de isla de calor.

Las energías renovables también tendrán un papel importante para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero, aumentar la eficiencia del sistema de distribución y transmisión y evitar una superación de su capacidad. Además ayudarán a asegurar la continuidad de servicios energéticos críticos en caso de disruptiones al servicio gracias a redes inteligentes, microrredes eléctricas y manejo de la demanda.

Los edificios como unidades sustentables y cada vez con mayor autosuficiencia serán capaces de disminuir los impactos del aumento de densidad poblacional de la ciudad. Sin embargo, será necesario contar con las políticas y la normatividad adecuada para incentivar el desarrollo de este tipo de edificaciones y para mejorar la infraestructura urbana de la que dependen, principalmente con respecto a la movilidad.

Otras problemáticas de la ciudad serán la contaminación del aire, donde no se han tomado medidas contundentes. Se prevé que ésta siga creciendo debido al mayor número de automóviles en las calles, causado en parte por la falta de un transporte

Introducción

público masivo eficiente. Será conflictivo el manejo y disposición de residuos sólidos, que ya ha generado crisis con anterioridad, y cuyas soluciones pueden llegar a ser contradictorias con la reducción de emisiones, como es el caso de la proyectada planta de termovalorización, donde se pretende disponer de los residuos sólidos a través de un proceso de incineración controlada que genere a la vez energía eléctrica.

Cualquier solución deberá tener como prioridad a las poblaciones menos favorecidas y más vulnerables por su posición económica y geográfica, minimizar la gentrificación y el consecuente desplazamiento a zonas de mayor riesgo para evitar el descontento social y las externalidades asociadas a este tipo de conflictos. La reducción de riesgos geográficos deberá estar acompañada de planes de contingencia coordinados centralmente pero en los que la población esté capacitada para actuar por cuenta propia.

Ningún enfoque de resiliencia urbana de la Ciudad de México tendrá éxito si no crea a su vez un plan integral de toda la región de la Zona Metropolitana del Valle de México con un enfoque holístico y sistémico para resolver los complejos problemas que tendrá una de las más grandes ciudades del mundo durante el siglo XXI. Para lograrlo, se deberán aprovechar los nuevos desarrollos tecnológicos e impulsar la investigación para la creación de soluciones innovadoras para los retos del futuro.

En los primeros cuatro capítulos de esta tesis se estudia a las ciudades y al problema de la resiliencia urbana desde un punto teórico multidisciplinario. Mediante un enfoque sistémico y de teoría de redes se revisa la importancia de la infraestructura en el desarrollo de la resiliencia y las oportunidades que presenta la adopción de un enfoque distribuido. Se analiza también la historia y situación de la cuenca del Valle de México, la cual se toma como estudio de caso.

En los posteriores seis capítulos se propone la manera de desarrollar la resiliencia urbana a través de infraestructura distribuida en diferentes sectores, como el hidro-sanitario, eléctrico, inmobiliario y de planeación urbana y regional. Estas propuestas se realizan a un nivel conceptual y de planeación para la Ciudad de México. Se toman ejemplos concretos y aplicables a la realidad actual, y se estudia la factibilidad de las soluciones propuestas de manera general. En estudios posteriores deberá verificar la aplicación de la infraestructura distribuida con evaluaciones técnico-económicas para casos particulares.

Objetivos

Analizar con un enfoque sistémico al ambiente urbano identificando las vulnerabilidades que presentan las grandes ciudades del planeta ante un panorama cambiante y un futuro incierto, principalmente debido al cambio climático. Examinar los orígenes del término "resiliencia" comprendiendo su aplicación a los asentamientos urbanos y desarrollando el aspecto de la resiliencia urbana pertinente a la infraestructura. Evaluar el marco teórico desarrollado con un estudio de caso, la Ciudad de México, comprendiendo la relación entre el marco geográfico, sociocultural e histórico de una metrópolis, su situación actual de fortalezas y debilidades, y las acciones del gobierno para el desarrollo de una mayor resiliencia. Proponer como solución para el desarrollo de ciudades más resilientes la implementación de estrategias de infraestructura distribuida estableciendo, desde un punto de vista de planeación estratégica, los beneficios comparativos de este enfoque contra uno tradicional y examinando ejemplos prácticos del enfoque de infraestructura distribuida para la urbe escogida como estudio de caso.

1. Planeación urbana

El ser humano y los asentamientos urbanos

El ser humano, como cualquier otro ser vivo, necesita de actividad metabólica para poder llevar a cabo todos sus procesos físicos y sus labores diarias. Visto desde esta perspectiva, una persona puede ser modelada como una caja negra, donde se tienen insumos de diversa índole, como alimentos, agua y aire, que a su vez son procesados por el metabolismo para producir desechos como heces, orina, metano y CO₂ (Figura 1.1a). El resultado de estos procesos puramente biológicos es energía aprovechable, ya sea por las actividades vitales del cuerpo o para que el humano la utilice en su quehacer diario.

El metabolismo además puede ser dividido en procesos catabólicos, de transformación de insumos de mayor masa molecular en subproductos consistentes en moléculas sencillas y energía, y en procesos anabólicos, que utilizan energía para crear macromoléculas, también conocido como biosíntesis (Figura 1.1b). El sistema se puede seguir dividiendo para crear nodos de actividad y transformación, sean los órganos vitales o incluso las células, y redes que transportan los diferentes insumos hacia y desde estos nodos, como las arterias y la red linfática (Insel *et al.*, 2017).

Es claro que esta visión sirve para presentar a la humanidad como consumidora de recursos y generadora de externalidades, pero es necesario también considerar la parte social de nuestro quehacer. La energía resultante de esta actividad nos permite llevar a cabo nuestras operaciones vitales, como la respiración y la circulación, y además de mantener la maquinaria del metabolismo también nos da la oportunidad de utilizar nuestro raciocinio y nuestra capacidad de movimiento mecánico. Con estas herramientas sobrantes de la operación fundamental los seres humanos creamos la actividad económica que nos permite aprovechar todavía mayores fuentes de energía y recursos.

Las actividades externas socioeconómicas que realizamos con el superávit de energía requieren de la interacción con otras personas para agregar esfuerzos y contribuir a las economías de escala, es decir la reducción de costos y uso de recursos ante el aumento de la magnitud o de la densidad. Además, los seres humanos tienen una necesidad emocional y de interacción cotidiana que los ubica como seres vivos altamente sociales. En cuanto al entorno habitado, dígase el ecosistema, cada especie se ha adaptado a un clima y a condiciones geográficas particulares, además de haber generado una simbiosis con el resto de habitantes del mismo espacio. El ser humano, por su parte, ha demostrado la capacidad de sobrevivir y prosperar incluso en los ambientes más inhóspitos a lo largo de todas las regiones del planeta. Sin embargo, más allá de los ascetas y los anacoretas, existen pocas personas que pueden resistir condiciones adversas sin más compañía humana.

Desde la prehistoria, los humanos se han agrupado en tribus o clanes surgidos de relaciones familiares o por pura casualidad. La suma de habilidades y capacidades, así como una protección mutua, les ha permitido prosperar. Después de la invención

1. Planeación urbana

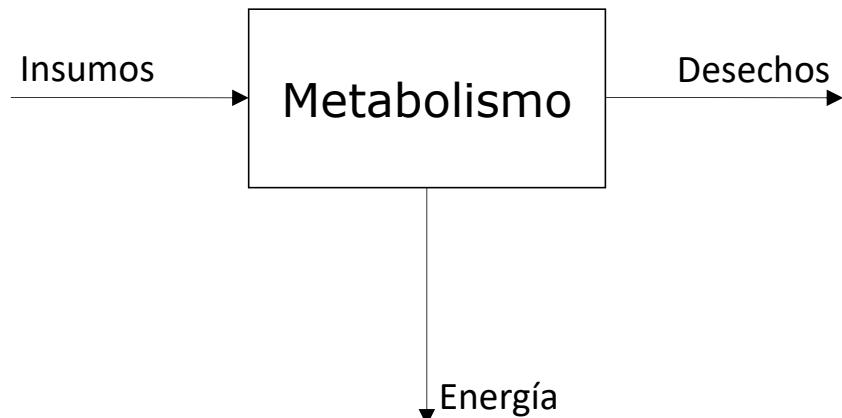


Figura 1.1a. Abstracción del metabolismo en modelo de caja negra.
Basado en Insel *et al.* (2017)

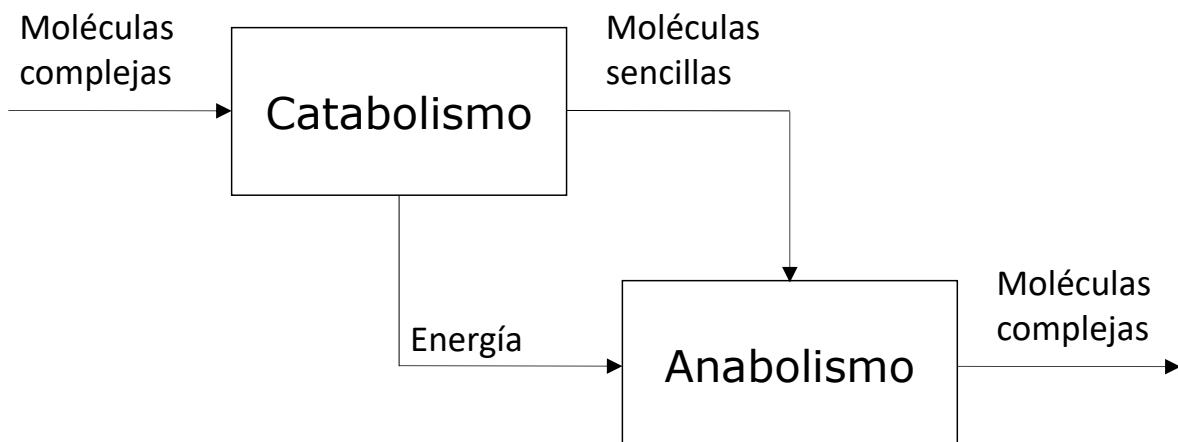


Figura 1.1b. Catabolismo y anabolismo
Basado en Insel *et al.* (2017)

de la agricultura y del sedentarismo, estos clanes se convirtieron en asentamientos y comunidades que crecieron en número a lo largo de los años. Prácticamente toda la vida humana ha girado alrededor de estas comunidades y por esta razón, los humanos se pueden considerar como seres sociales cuyo ecosistema típico es la sociedad (Geller y Glücklich, 2012) (Figura 1.2). Las mejoras en sanidad y salud han aumentado la natalidad y disminuido la morbilidad y mortandad, y por las economías de escala previamente mencionadas, han generado las ciudades y las zonas urbanas de la actualidad, donde millones y millones de personas llevan a cabo sus vidas diarias.

Metabolismo urbano

Para poder estudiar a los sistemas urbanos en los que viven las personas, es necesario conocer cómo se agregan las necesidades de éstas y cómo influyen en el comportamiento general de las ciudades. Es importante tener un enfoque holístico, donde se tome en cuenta el funcionamiento general del sistema y cómo los subcom-

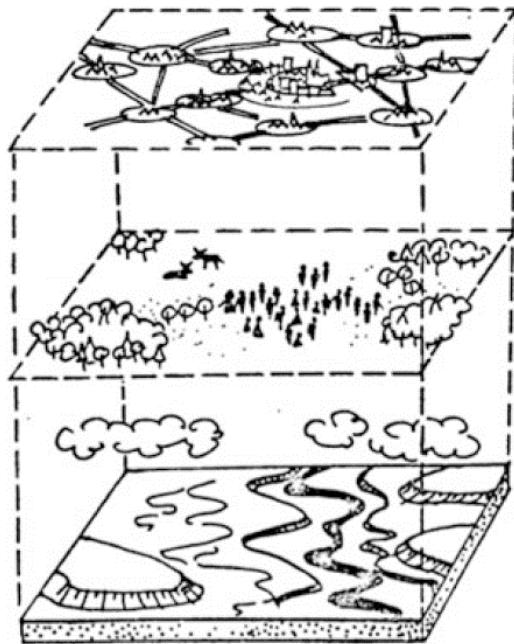


Figura 1.2. Ecosistema humano
(Geller y Glücklich, 2012)

El ecosistema humano está formado por componentes socioculturales y técnicos en la capa superior, elementos vivos en la capa intermedia y componentes geológicos inanimados en la base.

ponentes se juntan para dar forma a la operación general. Así, una ciudad se compone de flujos materiales y energéticos; de componentes físicos, tanto de forma y de infraestructura; de los seres humanos y de sus resultados de actividades sociales, como las redes de gobernanza y actividad como la industria, los gobiernos y las ONG's; y de dinámicas socio económicas, como el capital, la educación, la salud pública y las vidas diarias e interacciones sociales de los habitantes (Meerow *et al.*, 2016) (Figura 1.3a).

Estos componentes interactúan entre sí para formar la actividad colectiva de la urbe, teniendo un ritmo que crece y decrece periódicamente. No es entonces coincidencia que se puedan modelar los asentamientos urbanos como una analogía a los seres humanos, denominando a esta actividad como metabolismo urbano. Para sostener las actividades diarias de sus habitantes, la ciudad necesita proveerles insumos para que puedan sobrevivir y prosperar. Estos insumos pueden ser alimentos, energía, agua y materias primas para actividades industriales. La actividad económica y humana genera a su vez desechos que tienen que ser extraídos de la ciudad para asegurar la salud de sus habitantes, como aguas residuales, contaminación atmosférica, residuos sólidos y generación de calor (Kennedy *et al.*, 2008).

El metabolismo urbano se puede modelar como otra caja negra donde se tienen insumos y salidas, operadas por la ciudad dentro de la caja negra y se tiene como resultado la actividad humana y económica. Los insumos y productos corresponden con el modelo anterior con los flujos materiales y energéticos, que son transportados y procesados a través de la infraestructura y controlados y aprovechados por los mecanismos de control que corresponden a las redes de gobernanza y actividad y a las dinámicas socioeconómicas (Figura 1.3b).

1. Planeación urbana

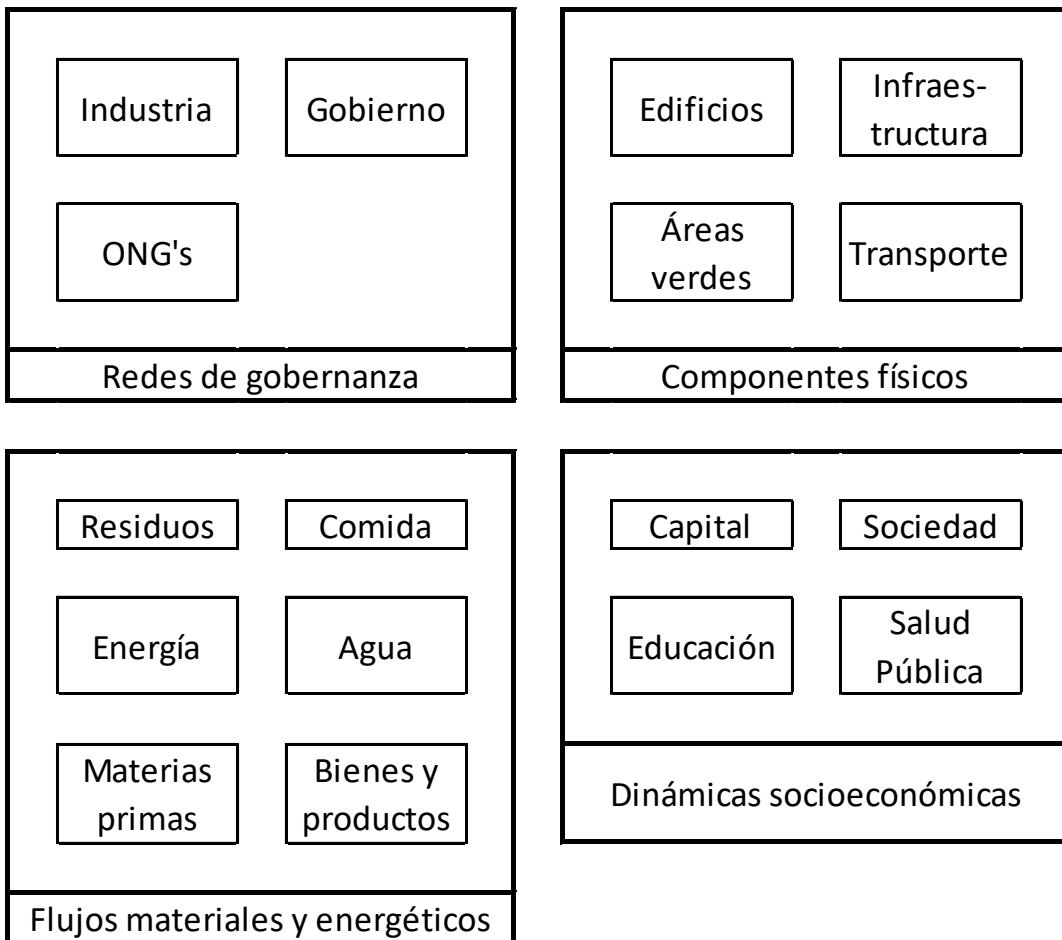


Figura 1.3a. Elementos del sistema urbano
Simplificado a partir de Meerow *et al.* (2016)

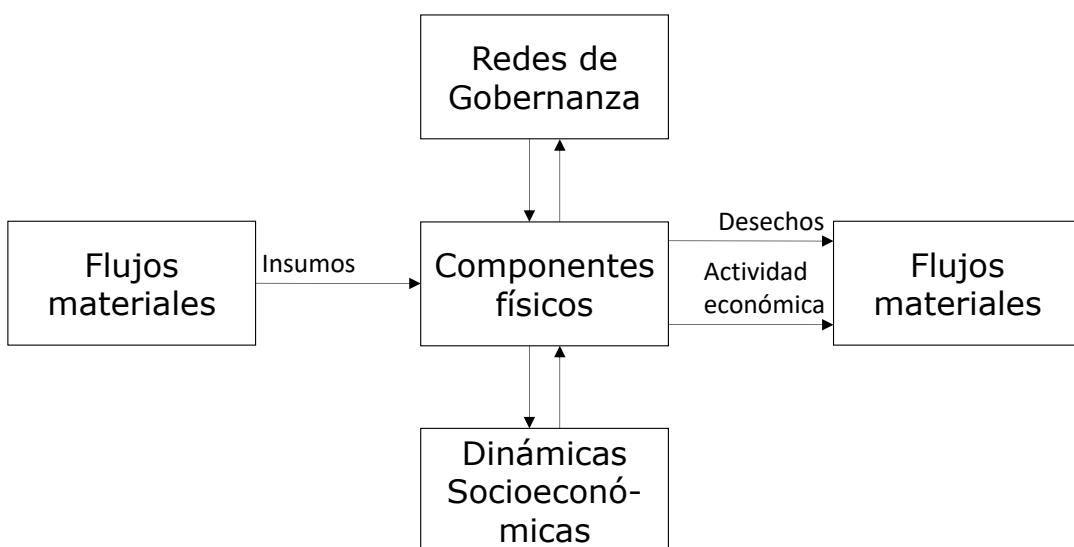


Figura 1.3b. Metabolismo urbano
Basado en Meerow *et al.* (2016)

Es importante notar que muchos de los insumos utilizados por la actividad humana no existen de tal manera en la naturaleza. Los estándares de calidad de vida actuales exigen el uso de la electricidad para casi todas las actividades, pero más allá de los relámpagos, no existe un flujo eléctrico natural de la magnitud requerida por los seres humanos. Por esto, se requiere transformar energía potencial, cinética y térmica en centrales generadoras hidroeléctricas, termoeléctricas, entre otras. Por sus efectos adversos en la población, por su tamaño, o por que el recurso no se encuentra de manera accesible dentro de las ciudades, dichas centrales se suelen ubicar en zonas muy alejadas de las ciudades. Otros insumos como el agua, se pueden encontrar dentro de la ciudad pero su demanda es tan grande que para complementarla, el recurso se debe traer de otras regiones. En cuanto a los alimentos, en las ciudades no se cuenta con el espacio y muchas veces tampoco con el suelo adecuado para la producción agrícola.

Para los flujos salientes de la ciudad suceden cosas similares. Como ya se ha mencionado, deben ser extraídos de las urbes para evitar afectaciones en la salud de los habitantes. Además, en grandes asentamientos, su volumen y ritmo de producción es tan grande que se deben poder despachar de forma rápida y eficiente. Tal es el caso de los residuos sólidos, que deben ser llevados a rellenos sanitarios, plantas de reciclaje o de incineración, instalaciones que requieren gran espacio. El agua residual debe ser regresada al ciclo hidrológico y permitirle llegar al mar o evaporarse para reiniciar el ciclo.

El sistema urbano también puede ser modelado como una nube de nodos y una red de líneas que los conectan. Existen dos fronteras en este sistema abierto: la frontera física y la frontera de influencia directa. Por esta razón existen nodos internos, dentro de la frontera física, y nodos externos, entre la frontera física y de influencia directa. Los nodos externos corresponden a los puntos de generación de los recursos e insumos utilizados por la ciudad, entre ellos parcelas agrícolas, centrales eléctricas, minas y bancos de materiales, entre otros. Existen además nodos externos de disposición final de subproductos, como ríos y lagos para aguas residuales y rellenos sanitarios para residuos sólidos. Los nodos internos corresponden a los puntos de utilización y de aprovechamiento de los recursos, que son inmuebles, ya sea de uso residencial, comercial, institucional o industrial.

Las líneas de conexión corresponden a las redes urbanas que transportan los flujos desde los nodos externos hacia los nodos internos y viceversa. Existen tres principales tipos de redes urbanas: las de transporte físico, que mueven los insumos físicos y a las personas y son las carreteras, líneas férreas y aéreas; redes de agua; y redes de energía eléctrica y de energía química. Las redes tienen macroelementos que conectan nodos externos e internos y microelementos que conectan nodos internos entre sí. En las primeras redes la correspondencia se da en autopistas y vías urbanas; en las segundas se diferencia entre acueductos y túneles emisores, y redes de distribución de agua potable y sistemas de atarjeas; y en las terceras se distingue entre líneas de transmisión, oleoductos y gasoductos, y líneas de distribución eléctrica y redes de gas natural (Figura 1.4).

De este modelo se desprende que para la estabilidad del sistema, se debe evitar la disruptión de las redes y nodos internos pero también de los externos. Un desastre natural dentro de la ciudad podría poner en riesgo a sus habitantes, pero se considera

1. Planeación urbana

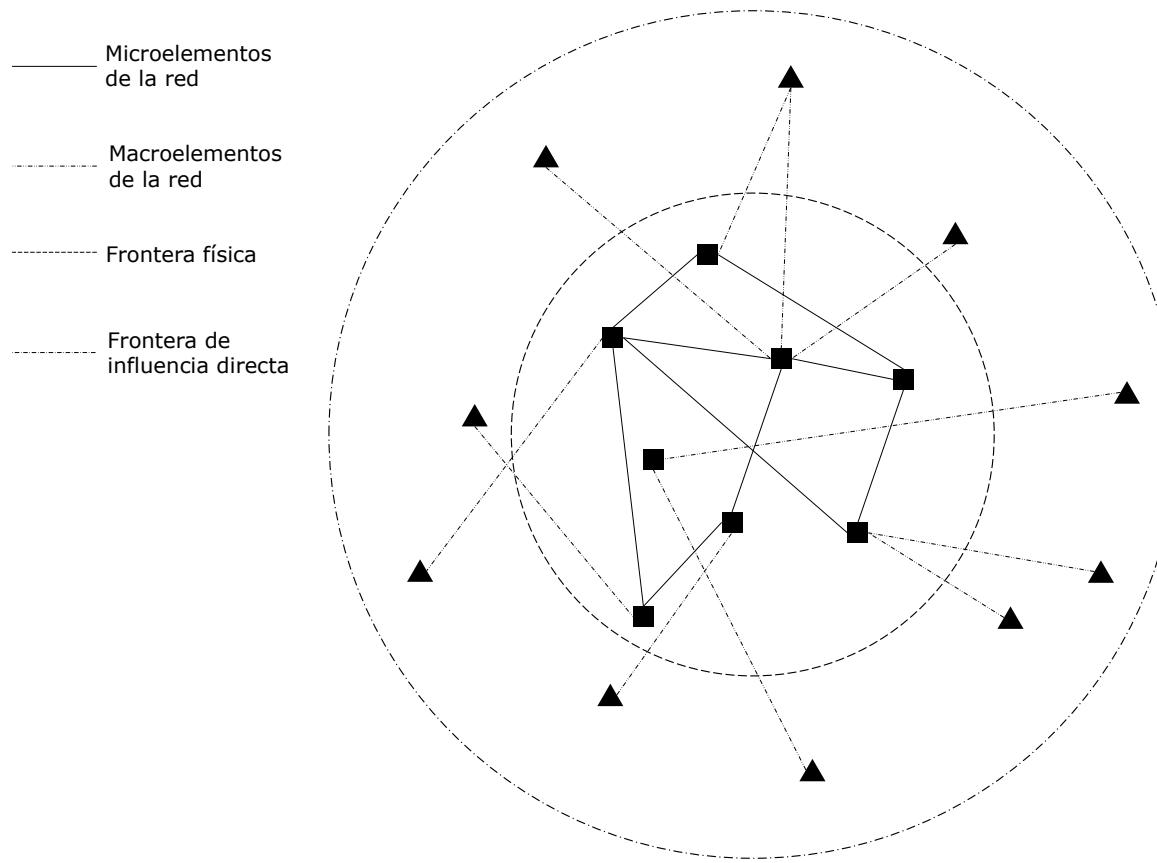


Figura 1.4. Elementos de las redes urbanas
Elaboración propia

poco que la incidencia de un huracán, una sequía o un terremoto a 500 kilómetros de distancia podría afectar a elementos externos y comprometer el suministro de insumos o la disposición de subproductos y afectar de igual manera a la ciudad.

Crecimiento urbano

Desde el siglo pasado se ha concentrado el mayor crecimiento tanto en la población mundial como en la fracción de ésta que habita en asentamientos urbanos (ONU, 2018). Antes de esto existen casos contados de megaciudades, como Londres en el siglo XIX y Tenochtitlan en el siglo XV. Ambas ciudades fueron las más grandes del mundo en su momento y esto fue debido a que fueron polos de la actividad económica regional y tenían fuertes lazos de comercio con zonas más lejanas (Imaz, 1989). La explosión demográfica de nuestra época y el incremento de los niveles de vida han estado ligados al desarrollo tecnológico, que se ha presentado en las ciudades y cuyos principales beneficios se han visto ahí mismo. La gran densidad habitacional facilita la utilización de recursos y permite reunir actividades económicas que funcionan de manera simbiótica.

A lo largo de la historia, se ha considerado que las primeras ciudades empezaron a crecer de una manera orgánica, sin ninguna organización particular. Los nuevos habitantes se iban colocando en los límites urbanos adaptándose a las condiciones preexistentes del asentamiento y a las condiciones geométricas del lugar. Esto ha dado lugar a las intrincadas y estrechas calles de las ciudades medievales europeas, que no parecen seguir algún orden y cuya navegación se dificulta enormemente. Este tipo de arreglo urbano tiene la ventaja de adaptarse mejor a condiciones de terreno accidentado, de ser sólo fácilmente navegable por sus habitantes, dificultando invasiones y ataques externos, y de generar barrios más compactos y con un tejido social más íntimo. Sin embargo, es falso considerar que existe una progresión histórica entre un crecimiento orgánico y un crecimiento planeado. Las ruinas de Mesopotamia, Egipto y Mesoamérica demuestran una ordenación cartesiana de las calles (Stanislawski, 1946), mientras que ciudades relativamente recientes como la ciudad de Guanajuato muestran gran irregularidad en el ordenamiento de sus vialidades.

Pese a la planeación que casi todas las ciudades modernas tienen, en prácticamente todas las urbes del mundo existen zonas donde se da un crecimiento orgánico e irregular. Estas zonas suelen ser habitadas por las personas del más bajo nivel socioeconómico y dada la naturaleza ilegal de los asentamientos, no suelen ser consideradas por los gobiernos locales y no cuentan con servicios públicos o éstos son muy deficientes (ONU Hábitat, 2003). Tales zonas se conocen como asentamientos irregulares o en la Ciudad de México como ciudades perdidas. La mayor parte del crecimiento de las ciudades se presenta aquí, sobre todo debido a la migración de zonas rurales a urbanas. Esta migración se genera por un efecto conocido como *push-pull*; existen factores que empujan a las personas fuera de las zonas rurales, como la baja productividad del campo y los bajos ingresos, y otros factores que jalan a los habitantes hacia las ciudades, como la concentración de la riqueza y actividad económica y la promesa de un salario más alto. Estos dos factores se refuerzan entre sí, pero muchos de los migrantes internos no cuentan con la capacidad económica para mantenerse dentro de la ciudad, viéndose obligados a crear asentamientos irregulares (Jedwab *et al.*, 2014).

La planeación urbana ha existido desde las civilizaciones más antiguas y su principal objetivo ha sido el ordenamiento físico de los componentes urbanos, principalmente de sus vialidades, y del uso del suelo autorizado, por actividad y densidad habitacional, ya sea por dependencias públicas o privadas, conocido usualmente como zonificación u ordenamiento territorial. Tradicionalmente se han presentado usos de suelo mixto, ya que se observa de manera natural en un crecimiento orgánico, cuando los inmuebles residenciales y los comerciales se encuentran mezclados dentro de la matriz urbana. En el siglo pasado se popularizó también el uso de suelo separado, donde existen zonas residenciales y otras zonas comerciales, entre las cuales los habitantes se deben desplazar a diario (Fischel, 2000).

El plan geométrico tradicional ha sido el cartesiano o reticular, donde se tiene una serie de calles simétricas y paralelas entre sí y otra serie de calles iguales perpendiculares al primer grupo (Figura 1.5a). Adicionalmente se ha desarrollado el concepto de jerarquía de calles, donde existen calles de mayor ancho e importancia por donde los vehículos fluyen hacia las zonas de menor jerarquía que cuentan con mayor

1. Planeación urbana

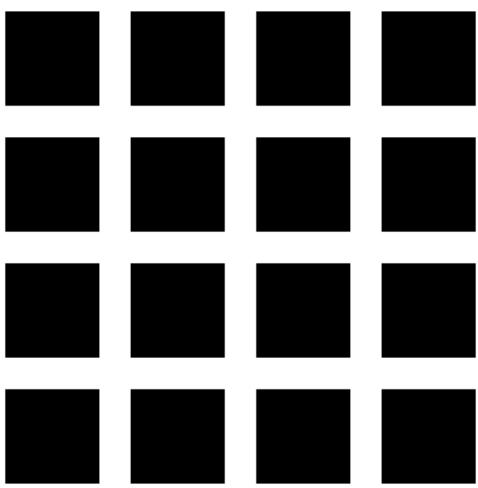


Figura 1.5a. Plan cartesiano
A partir de Wikimedia (2014a)

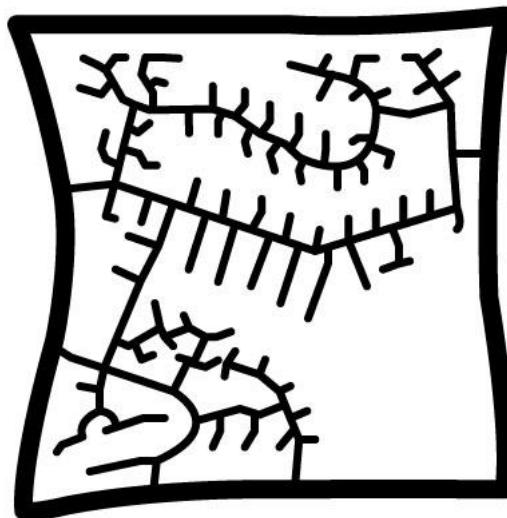


Figura 1.5b. Plan de Milton
Keynes, Londres, Inglaterra
A partir de Wikimedia (2010)

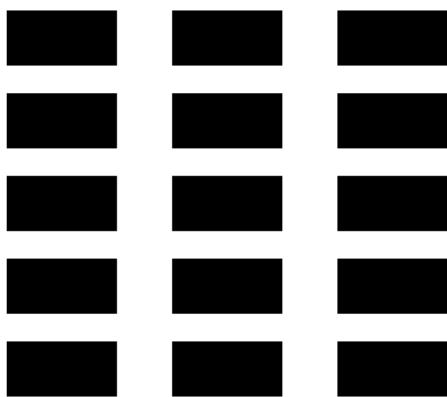


Figura 1.5c. Plan de
Manhattan, Nueva York, EUA
A partir de Wikimedia (2014a)

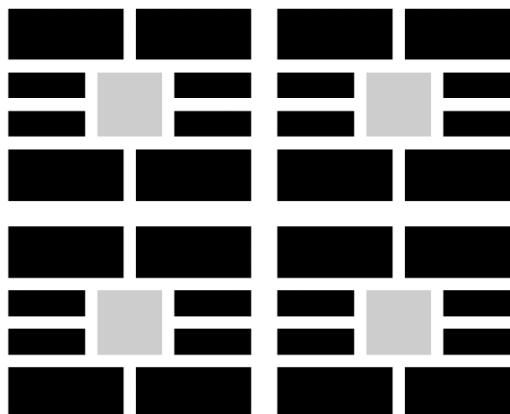


Figura 1.5d. Plan de Oglethorpe,
Savannah, Georgia, EUA
A partir de Wikimedia (2014a)

restricción de acceso. Es importante aclarar que usualmente sobre jerarquías superiores se encuentran usos de suelo comerciales y en las calles más restringidas están las zonas residenciales. Esto ha generado planes como el de la ciudad Milton Keynes en Londres que basan su funcionamiento completamente en la jerarquía de calles (Figueiredo y Amorim, 2007) (Figura 1.5b). Este último tipo de ordenación geométrica tiene la ventaja de aislar el flujo vehicular de los inmuebles, pero favorece trayectos más largos en automóvil. Estudios aseveran que se fomenta una segregación y fragmentación social (Birch, 1980) Así mismo, los planes cartesianos aumentan el tráfico y promueven los trayectos peatonales, pero los hacen convivir con el automóvil, aumentando la incidencia de accidentes (Ewing *et al.*, 2007).

Existen planes que mezclan la forma cartesiana con la jerarquía de calles, como el ordenamiento de Manhattan (Figura 1.5c), donde en un sentido las calles tienen mayor jerarquía que en el otro, y el plan de Oglethorpe, en Savannah, Georgia, Estados Unidos, (Figura 1.5d), donde se rompe la forma cartesiana con parques que



Figura 1.6a. Unité d'Habitation, diseñada por Le Corbusier
(Wikimedia, 2013a)

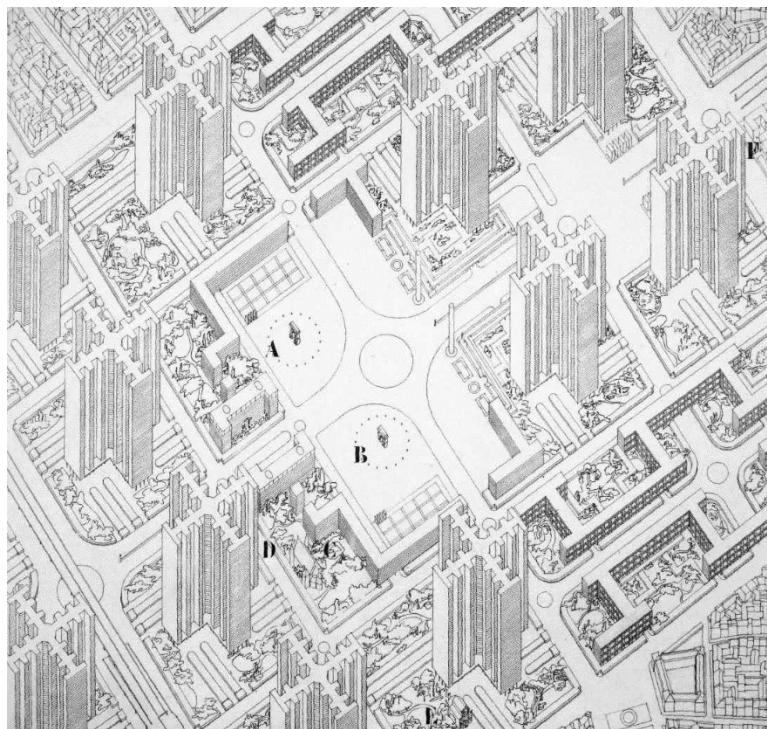


Figura 1.6b. Ville Radieuse, diseñada por Le Corbusier
(Le Corbusier, 1925)

1. Planeación urbana



Figura 1.6c. Brasilia, Brasil, diseñada por Oscar Niemeyer
(Wikimedia, 2013b)



Figura 1.6d. Tlatelolco, Ciudad de México, diseñado por Mario Pani
(Zamora, 2014)

funcionan como centros sociales y disminuyen la jerarquía de las calles aledañas. Este último plan, diseñado en el siglo XVIII, ha probado ser atemporal y por su gran éxito ha sido replicado innumerables veces en Estados Unidos y el resto del mundo (Wilson, 2015).

A lo largo del siglo XX, la corriente arquitectónica que más fuerza tomó fue el modernismo o estilo internacional. El estilo aprovechó los nuevos materiales de construcción y rechazó las ideas tradicionales y de las bellas artes, favoreciendo un estilo más universal (Encyclopædia Britannica, 2016). Muchos de estos arquitectos incursionaron en la planeación urbana y tuvieron ideales de desarrollo utópico, buscando crear la ciudad ideal que resolviera los problemas sociales, de explosión demográfica, y de reconstrucción tras la Segunda Guerra Mundial.

El arquitecto Le Corbusier concibió las primeras unidades multifamiliares con su *Unité d'Habitation* en Marsella (Figura 1.6a) y diseñó una ciudad ideal con su *Ville Radieuse*, que contaba con amplios parques, rascacielos y grandes avenidas (Montavon et al., 2006) (Figura 1.6b). Estos principios se vieron reflejados en Brasil con la creación de una nueva capital, Brasilia, diseñada por Oscar Niemeyer (Dantas, 2004) (Figura 1.6c), y en México con la construcción de las unidades habitacionales Miguel Alemán y Nonoalco Tlatelolco por Mario Pani, la última de las cuales se construyó sobre una zona que solía ser un asentamiento irregular (Sánchez, 2009) (Figura 1.6d).

Las ideas de estos arquitectos han llevado a un desencanto con el pasar de los años. La ciudad de Corbusier nunca fue construida, Brasilia jamás ha sido habitada a su máxima capacidad y es indispensable contar con automóvil para librarse de las grandes distancias entre edificios, y las unidades de Pani han sufrido una larga historia de falta de mantenimiento, alienación social e inseguridad.

Ideologías recientes del urbanismo

Como consecuencia de los desarrollos modernistas se ha generado una dispersión y fragmentación urbana que ha ocasionado que los nodos de las redes urbanas se alejen entre sí, disminuyendo la densidad y haciendo que se requieran más recursos para las redes de transporte. Como consecuencia, se debe viajar una distancia mayor y se tiene un aumento del impacto ambiental. Todos los insumos, entre ellos la energía y el agua, deben recorrer ahora grandes distancias para llegar a cada habitante, lo que distribuye los puntos de servicio de la infraestructura pero mantiene la centralización, aumentando el costo de cada servicio por habitante (Bhatta, 2010).

La respuesta a este tipo de desarrollo ha sido el Nuevo Urbanismo. Dicha ideología plantea que existe mucho valor en las ciudades tradicionales y que se debe buscar rescatar ese conocimiento. El tener ciudades compactas con usos mixtos genera barrios con un tejido social muy fuerte y considerable interconexión entre nodos internos. Ya que la gente vive cerca de donde trabaja, se debe desplazar menos; puede caminar o usar bicicleta más fácilmente y ocupa menos tiempo de su vida en desplazarse de un lugar a otro. Lo mismo sucede con los insumos, lo que genera que la actividad económica sea más eficiente y se reduzcan costos. Todo esto conlleva a que el sistema urbano consuma menos recursos y genere menos subproductos para

1. Planeación urbana

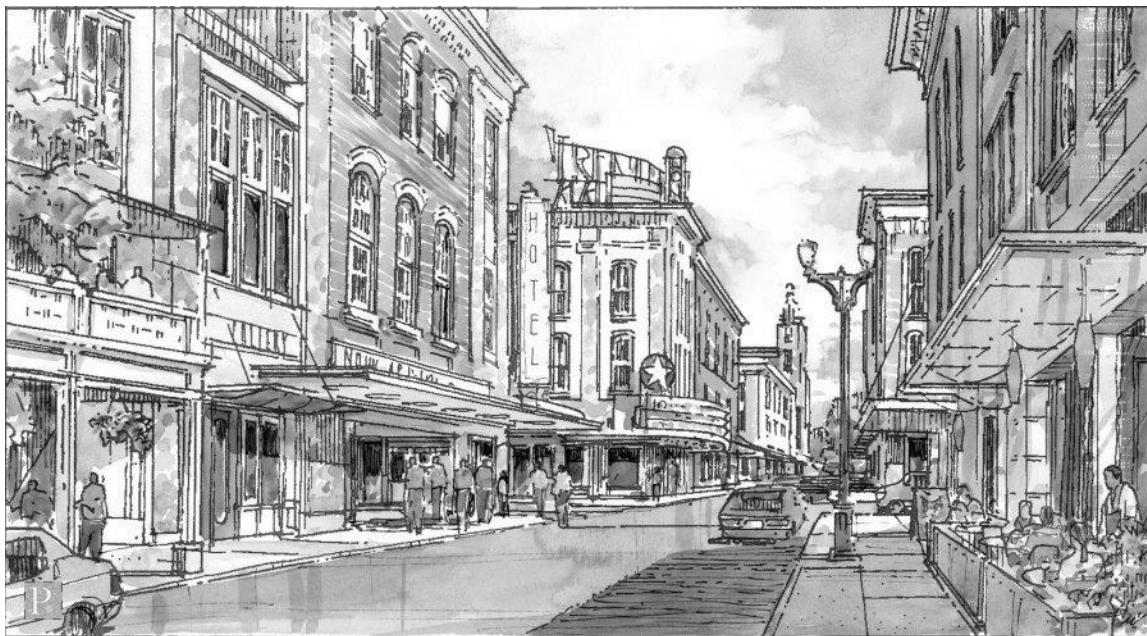


Figura 1.7a. Nuevo Urbanismo, barrios tradicionales vivos con uso de suelo mixto
(Placemakers, 2018)

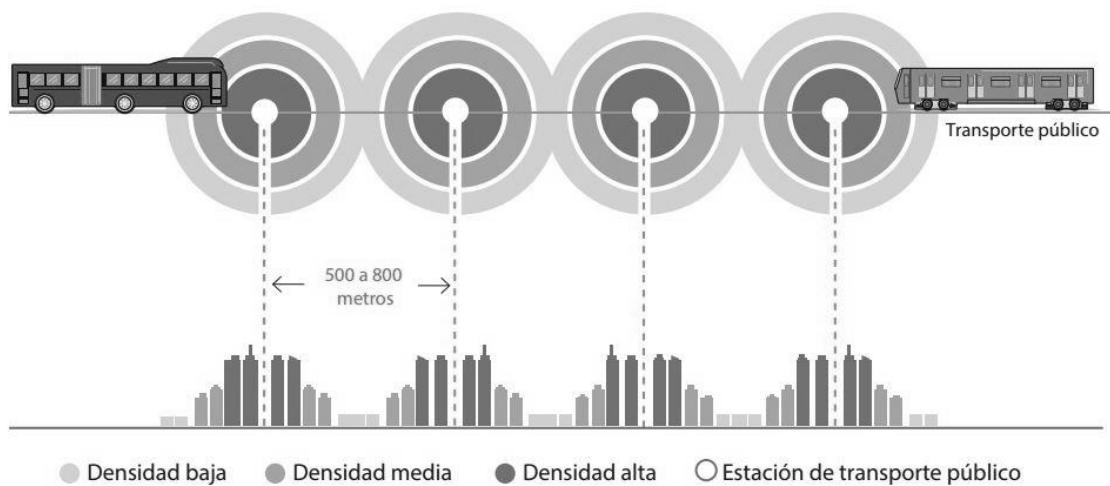


Figura 1.7b. Desarrollo orientado al transporte público
(IDTP, 2013)

crear el mismo valor, lo que se traduce en una mayor productividad del sistema y una mejor calidad de vida de sus habitantes. Además, se propone una transición suave entre las zonas urbanas y las rurales, que permita conectar de forma más armoniosa los nodos internos de una ciudad con sus nodos externos, y permita un mejor flujo de insumos a lo largo de la red (Figura 1.7a) (CNU, 2001).

Existen muchas ciudades cuya población es demasiado grande como para sustentar un solo barrio como el que es propuesto por el Nuevo Urbanismo. El sistema no se podría mantener y se transformaría en la situación actual de muchas ciudades:

centros urbanos cuyas fronteras se mezclan entre sí pero que realmente están inco-nexos, o la creación de un megacentro donde se concentra toda la actividad y al cual están subordinados todos los centros, que funcionan como zonas de habitación para las personas que viajan diario al megacentro.

Para solventar esta problemática se propone el Desarrollo Orientado al Transporte Público (*Transit Oriented Development*), una forma de distribuir los recursos y la infraestructura en unidades completamente independientes y autosuficientes entre sí, pero que estén perfectamente comunicadas para que puedan funcionar como un gran sistema. Se propone que la red de transporte de personas entre los centros locales sea un transporte público masivo como el metro, alrededor de cuyas estaciones se generan centros urbanos de uso mixto, con zonas residenciales de múltiples niveles socioeconómicos mezcladas con comercios y oficinas (Figura 1.7b).

Para que este método tenga éxito cada centro debe tener el tamaño para favorecer al peatón y al ciclista y desincentivar al automóvil (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2016). Hay muchos ejemplos a lo largo del mundo donde se han generado nodos de conexión de metro pero lo único que existe en la cercanía es un estacionamiento masivo que obliga a llegar en carro, o una zona exclusivamente residencial en la que los habitantes se deben desplazar a otro centro de trabajo de manera diaria.

También se ha desarrollado una conciencia ambiental en la planeación urbana para que las ciudades tengan un menor impacto ecológico. Las corrientes del urbanismo sustentable y del urbanismo verde proponen que las ciudades no vivan contra la naturaleza, sino que convivan con ella y generen una sinergia. Se contempla que las ciudades se desarrolle dentro de sus límites ecológicos para no sobreexplotar a los recursos, que imiten al funcionamiento de los ecosistemas donde no existen sub-productos y todos los recursos se reutilizan y explotan por todos los seres vivos (Beatley, 2000). Se busca que dentro del tejido urbano existan zonas ecológicas vivas para aprovechar la biofilia, concepto que se refiere a la hipótesis de la atracción natural que siente el ser humano por la naturaleza (Wilson, 1984). Existen estudios que demuestran que estar en la naturaleza mejora la salud mental (Barton y Pretty, 2010). Para esto deben existir suficientes áreas verdes que además funjan como corredores de vida silvestre para que los humanos puedan coexistir con otras especies.

Además, se propone que el sistema urbano funcione con el más alto rendimiento usando los menores insumos. De tal manera, se prefiere el diseño de edificios que por su diseño bioclimático sean más eficientes en su uso de agua y energía, y que se tenga la infraestructura adecuada que pueda proveer estos servicios a su vez con el menor consumo de recursos, para lo cual debe estar optimizada, ser multifuncional e integrada con otras redes.

Por su parte la ONU ha buscado crear lineamientos para un adecuado desarrollo de las urbes de todo el planeta, en particular las de los países en vías de desarrollo. Durante la cumbre de Río de Janeiro de 1992, además de conformar la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, se consolidó ONU Hábitat, la dependencia de la ONU que estudia los asentamientos humanos y la forma de solucionar los problemas que se presentan. En esa cumbre se llevó a cabo Hábitat I, la

1. Planeación urbana

primera conferencia sobre desarrollo sustentable donde se presentó la Agenda 21, un documento con lineamientos de sustentabilidad que ha sido ratificado por todos los miembros de la ONU. ONU Hábitat ha estudiado particularmente la situación de los asentamientos irregulares y de una adecuada planeación y ordenamiento en las ciudades para darles mayor resiliencia, lo cual se refleja en su más reciente publicación, la Nueva Agenda Urbana, que se explora con detalle en el capítulo 3 (ONU Hábitat, 2009).

Salud Urbana

Un ser humano se considera saludable si su metabolismo y todos sus elementos de operación, regulación y control están funcionando de manera adecuada. Cuando algún elemento deja de funcionar o no funciona como debería, todo el sistema tiene afectaciones y se deben tomar medidas correctivas. Si bien la causa del padecimiento puede provenir de factores exclusivamente internos, muchas veces se debe a la relación que existe con los insumos y los subproductos.

De manera análoga a la salud humana, se puede hablar de salud urbana cuando todos los elementos, redes y nodos del sistema funcionan de manera adecuada. Esta característica provee estabilidad a la ciudad y de manera inherente la prepara ante futuras afectaciones o retos que se tienen. Por el contrario, al igual que en una persona, una ciudad con padecimientos crónicos es altamente vulnerable ante afectaciones imprevistas que puedan tener una gran magnitud. Se puede decir que una ciudad saludable es altamente adaptable y resiliente, términos que serán tratados en el capítulo 3.

Como las ciudades agregan una gran cantidad de habitantes en una zona geográfica de poca extensión y por consiguiente tienen una gran densidad poblacional, las áreas urbanas tienen una gran zona de influencia desde donde toman recursos y hacia donde llevan sus subproductos. Aunado a esto, la globalización ha permitido expandir estas zonas de influencia hacia otros países y continentes. El paradigma actual de operación de las ciudades exige una utilización de los recursos de la ciudad y de su zona de influencia a un ritmo mayor al sostenible para asegurar la renovación de estos y una disposición de residuos a un ritmo superior al de la capacidad natural de depuración del suelo, agua y aire. Además se tienen malas e inefficientes prácticas que empeoran el impacto ambiental, se utilizan recursos no renovables y se generan residuos de difícil neutralización, como el CO₂ y los residuos nucleares.

Las ciudades están ejerciendo una gran presión sobre el planeta y su modelo actual de funcionamiento está destinado a colapsar estrepitosamente. Para 2050, dos tercios de la población mundial vivirán en zonas urbanas y en la actualidad un 80% de la población de América ya habita en ciudades (ONU, 2018). Por si fuera poco, para ese año se alcanzará una población global mayor a nueve mil millones de habitantes y existirán ciudades de más de 50 millones de habitantes, con el mayor crecimiento concentrado en África; para 2100, las grandes metrópolis del mundo tendrían poblaciones de hasta 100 millones (Hoornweg y Pope, 2016).

El agotamiento de los recursos, la contaminación de la naturaleza y la muerte de los ecosistemas, aunados al cambio climático, plantean grandes retos a las ciudades

1. Planeación urbana

del mañana, que deberán enfrentarse a condiciones de mayor riesgo, menor disponibilidad de recursos, y una mayor demanda de éstos. Mantener estas ciudades con una salud adecuada en la actualidad y tener una planeación a largo plazo para tener un crecimiento sostenible y que garantice la habitabilidad de los espacios y la calidad de vida de las personas nos permitirá tener ciudades más saludables y mejor adaptadas al futuro incierto.

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

Características físicas

La Cuenca del Valle de México es una cuenca hidrológica endorreica ubicada aproximadamente entre los $19^{\circ} 15'$ y $20^{\circ} 15'$ de latitud y los $-99^{\circ} 30'$ y $-98^{\circ} 15'$ de longitud (Imaz, 1989) (Figura 2.1.). Dentro del país, se ubica en la zona centro-sur en lo que es conocido como el Eje Neovolcánico Transversal, una cordillera que atraviesa el país de este a oeste por los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Oaxaca, México, Querétaro, la Ciudad de México, Morelos, Tlaxcala, Puebla, y Veracruz. En esta región se encuentran la mayor cantidad de volcanes activos del país. La región cuenta con una gran actividad volcánica y tectónica debido a que México se encuentra sobre el Anillo de Fuego en el Pacífico, particularmente en la zona de subducción entre la Placa de Cocos y la de Norteamérica, ubicada a lo largo de la costa de Guerrero y Michoacán. Hasta hace 700,000 años, la cuenca se trataba de una unidad hidrográfica abierta previa a la formación de la Sierra de Chichinautzin en el sur (Santoyo *et al.*, 2005).

La precipitación de la Ciudad de México coincide con la precipitación media de país, que es de aproximadamente 860 milímetros al año. Se tiene una temporada muy seca durante 8 meses y el resto de los 4 meses del año se presentan grandes lluvias. Durante un evento de tormenta puede caer casi el 10% de toda la precipitación anual, lo que genera grandes avenidas hidráulicas (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016). Se distinguen dos regiones en la cuenca por su humedad, al sur de la sierra de Guadalupe se tiene una región con mayores precipitaciones mientras que el norte es más árido. La altura media sobre el nivel del mar es de 2550 metros, por lo que en la época precolombina se trataba de uno de los lagos de agua salada a mayor altura del planeta. En las partes bajas de la cuenca se presentan nevadas aproximadamente dos veces por siglo, mientras que a 3800 msnm. se presentan cada dos o tres años (Imaz, 1989).

Originariamente existían 5 lagos dentro de la cuenca: Xaltocan, Zumpango, Texcoco, Chalco y Xochimilco. El lago de menor elevación era el de Texcoco, el cual consistía en aguas salobres en conjunto con los de Xaltocan y Zumpango, mientras que Chalco y Xochimilco eran lagos de agua dulce; en Culhuacán y en Chapultepec existían manantiales, de ahí el nombre de Fuentes Brotantes en la primera zona. En las orillas de los lagos existían regiones pantanosas, particularmente en los lagos de Zumpango y de Texcoco (Carballal y Flores, 2004) (Figura 2.2.).

El suelo en la cuenca del Valle de México se formó durante el Holoceno y el Pleistoceno. A lo largo de estas épocas hubo bastantes cambios climáticos, con el lago teniendo aumentos de 25 metros y descensos de hasta 90 metros con respecto al nivel de 1519. Los glaciares del Popocatépetl y del Iztaccíhuatl en su máxima extensión eran 3 veces mayores que antes de que el Popo renovara su actividad en los años noventa, y la última época de gran actividad volcánica fue hace 28,000 años, cuando se formó la sierra de Santa Catarina. A lo largo de los milenios, se fueron

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

formando

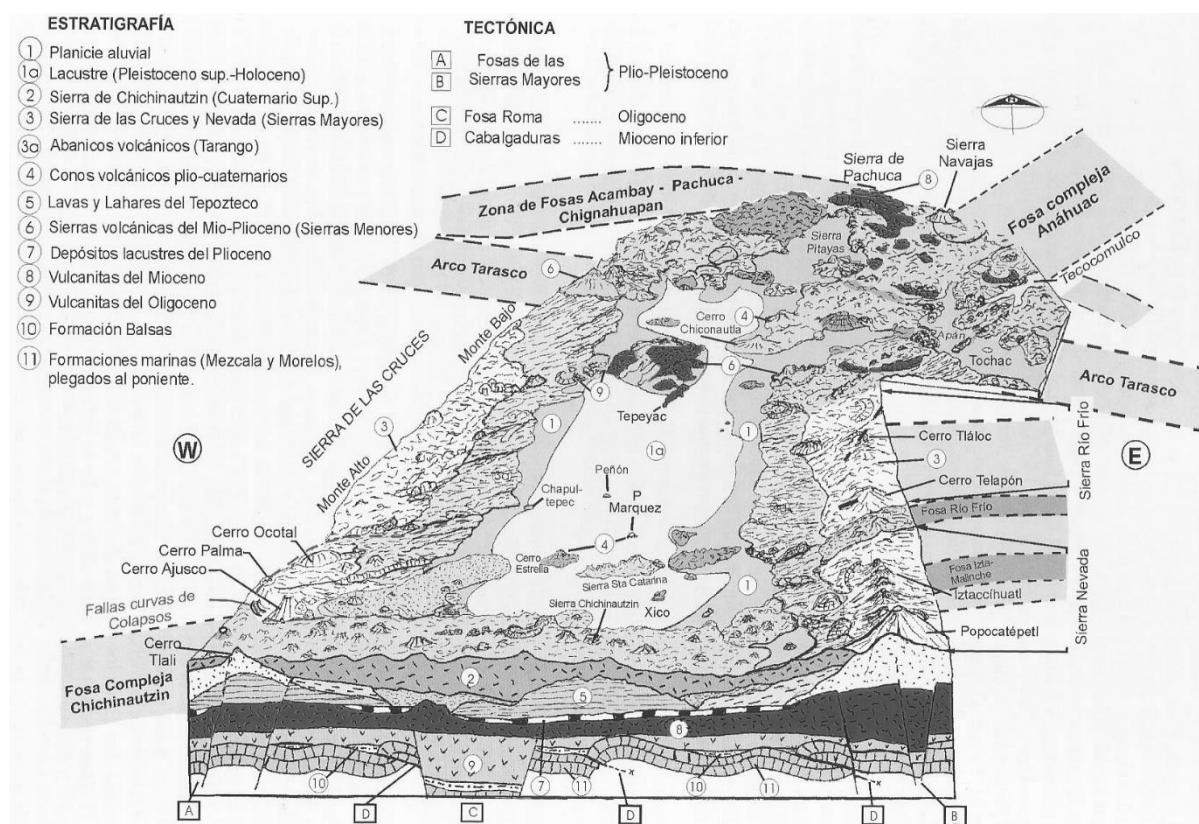


Figura 2.1. Geología y estratigrafía de la cuenca del Valle de México
(Santoyo et al., 2005)

depósitos en el fondo del lago que consistían en materiales aluviales, cenizas volcánicas y morrenas glaciales. Todos estos materiales han dado lugar en la actualidad a unas arcillas de alta plasticidad que en el centro de la Ciudad, en la denominada zona III, tienen hasta 50 metros de profundidad, 30 metros o menos en la zona II o de transición, mientras que la zona I corresponde a las arenas del piemonte de las cordilleras que delimitan la región hidrográfica (Santoyo et al., 2005).

En las zonas altas de la cuenca predominaban las comunidades de pino-encino y bosques mesófilos con presencia de cedros y Alisos, principalmente hacia Tlapacoya. Al acercarse a las orillas del lago se encontraban especies riparias, de transición de humedal a tierra firme, como el ahuehuete, el sauce, herbáceas, gramíneas, ciperáceas y liliáceas típicas de las zonas lacustres, como el tule, las espadañas y la palma roja, principalmente. En las laderas del suelo somero había plantas xerófitas como el maguey y la lechuguilla, esto principalmente pero no exclusivo a la región más árida. En las pocas zonas naturales y áreas verdes que han escapado a la urbanización, todavía se presenta en menor medida esta división de los ecosistemas originarios de la cuenca. Entre la fauna se encontraban el venado cola blanca, el tlacoyote, el berrendo, el pecarí, el coyote, aves acuáticas y migratorias. Dentro del lago habitaban principalmente el ajolote, el charal, el pescado blanco y tortugas. Todos estos animales formaron parte de la dieta de los habitantes precolombinos de la cuenca (Imaz, 1989).

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

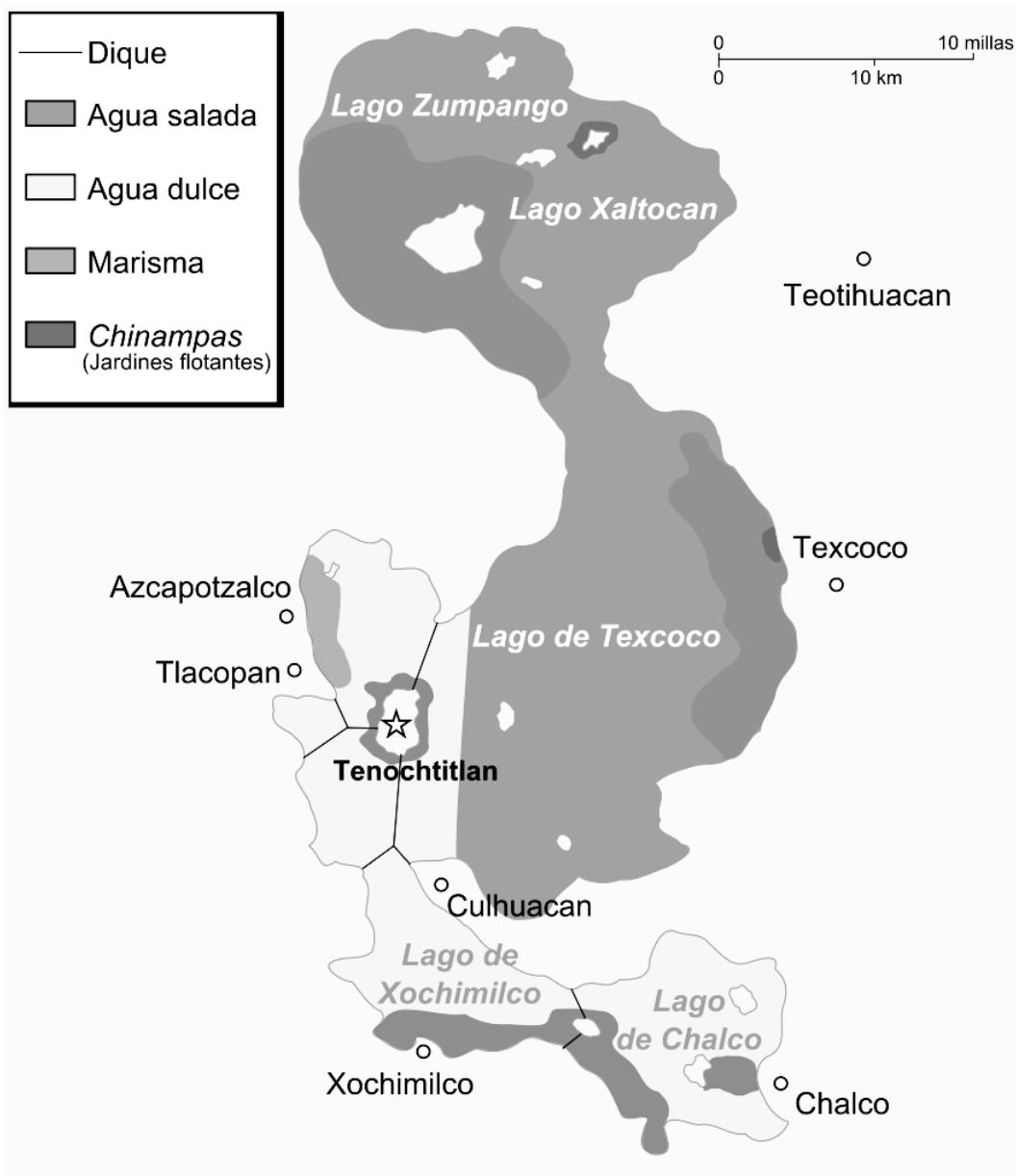


Figura 2.2. Lagos de la cuenca del Valle de México, ca. 1519
(Wikimedia, 2007)

Historia

Existe evidencia de campos de cultivo desde el 2500 a.C., por lo que los primeros habitantes se ubicaron en el horizonte preclásico. Había pequeños asentamientos sobre las riveras del Lago Xaltocan; los principales eran Tlapacoya y Tlatilco, aunque también existieron poblados en Amecameca. La población total de la época no sumaba más de 1000 habitantes (Imaz, 1989).

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

Durante el periodo clásico aumenta la población de manera considerable. Se fundan dos grandes culturas en la zona; en el sur se encuentra Cuicuilco, mientras que al norte de los lagos está Teotihuacán. La ciudad de Cuicuilco fue sepultada por la última erupción del volcán Xitle, y se cree que gran parte del Pedregal de San Ángel descansa sobre las ruinas de esta gran urbe (Pastrana, 2018). Teotihuacán por su parte contaba con más de 100,000 habitantes, lo que generó que el resto de la zona se volviera rural y disminuyera la población por una migración interna; en su momento de máximo apogeo fue una de las seis ciudades más grandes del mundo. Para finales del clásico, la ciudad ya había sido abandonada y se desconoce mucho sobre su cultura, puesto que los mexicas ya la conocieron como ruinas y se consideraba a la civilización con un carácter mítico. Se cree que las causas del abandono fueron la combinación de una fuerte sequía junto con una sobreexplotación de los recursos. El bosque que rodeaba a la ciudad fue deforestado para obtener energía y quemar la cal para la producción del estuco que recubría a las pirámides y otras edificaciones (Nalda, 2007).

Posteriormente empezó una gran migración de grupos del norte que compartían el náhuatl como lenguaje común y se establecieron en diferentes ciudades-estado. Para el siglo XIV, la cuenca ya se encuentra densamente poblada con asentamientos como Azcapotzalco, Culhuacán, Texcoco, Mixcoac y Tlacopan. Los aztecas fueron el último grupo en migrar y a su llegada fueron relegados a un islote en el centro del lago de Texcoco. Ahí se fundó en 1335 d.C. la ciudad de Tenochtitlán. En tan sólo siglo y medio, el pueblo mexica dominó al resto de las ciudades-estados por medio de la guerra y alianzas para establecer un sistema de avasallamiento y tributos que se extendía hasta los Tarascos en Michoacán y su influencia fue tal que tuvieron lazos de comercio con los mayas (Parsons, 2007).

El islote creció ganando terreno sobre el lago y se mostró una gran planeación urbana con un ordenamiento cartesiano con cuatro grandes avenidas o calzadas que unían a la ciudad con tierra firme en cada punto cardinal. Existían calles pavimentadas, canales, y vialidades que eran mitad calle y mitad canal. Se contaba con acueductos que abastecían el agua potable desde los múltiples manantiales a la ciudad y con un sistema de drenaje y de recolección de residuos, infraestructura inexistente para la época en muchas ciudades europeas (Carballal y Flores, 2004). Fray Toribio de Benavente, se expresó así: *¿Qué es aquesto que vemos? ¿Esta es ilusión o encantamiento? Tan grandes cosas y tan admirables han estado tanto tiempo encubiertas a los hombres que pensaban tener noticia del mundo? (...) Estaban tan limpias y barridas todas las calles y calzadas de esta gran ciudad, que no había cosa en que tropezar*" (1903) Se estima que la ciudad tenía en su apogeo 300,000 habitantes, lo que también la convertiría en la ciudad más grande de su época (Matos, 2007) (Figura 2.3.).

En 1492 América fue descubierta por Cristóbal Colón, mientras que en 1519 empezaron las expediciones a la América continental por parte de Hernán Cortés, culminando en 1521 con la caída de Tenochtitlan. Enfermedades como la viruela, desconocidas en el nuevo mundo, y el odio del resto de las ciudades-estado hacia los aztecas ayudaron a los pocos hombres de Cortés a asegurar la victoria. Eventualmente la Ciudad de México se convertiría en la capital del Virreinato de la Nueva España, la colonia más importante de España, diez veces más rica que la siguiente

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

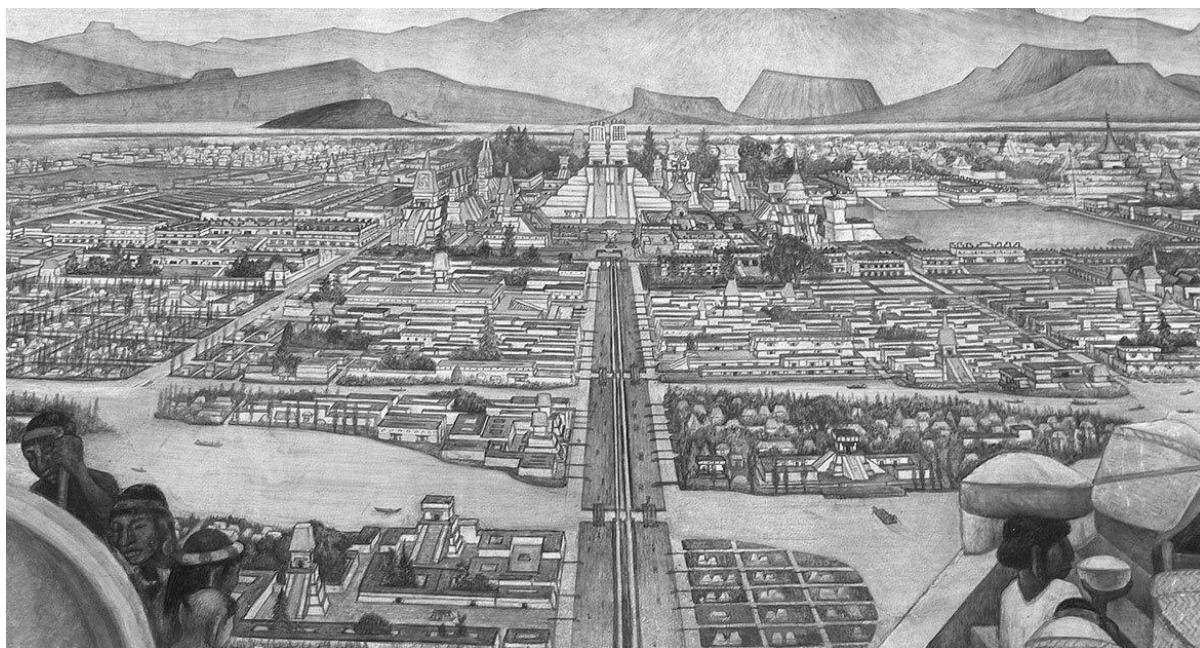


Figura 2.3. Representación pictórica de Tenochtitlan
(Rivera, 1945)

colonia, el Perú, y desde donde se controlaba todo el comercio con Filipinas y el resto de Asia. Las enfermedades diezmaron la población y durante varios siglos no se pudo superar el máximo de Tenochtitlan; la cuenca pasó de tener más de un millón de habitantes en 1500 a poco más de 100,000 en 1700. Aun así, se generó una gran expansión territorial sobre el lago. Se tomó gran cantidad de agua de éste, hubo desvío de corrientes para riego y ya incluso en 1524 se notaba el cambio de nivel de la superficie libre del agua. Hubo gran riqueza durante la colonia y fue descrita en el siglo XVIII como "*La Ciudad de los Palacios*" por Alexander Von Humboldt (Imaz, 1989).

Una serie de restricciones económicas por parte de la colonia, aunadas a un creciente nacionalismo americano llevaron a la guerra de independencia y su culminación en 1821. En sus primeros años existió gran inestabilidad política y social por peleas internas de grupos de poder; se perdió gran cantidad de territorio en el norte por parte de Estados Unidos, en el sur se independizó Centroamérica, hubo dos imperios y se tuvo invasiones de Estados Unidos, Francia e Inglaterra. La estabilidad regresó con los largos gobiernos de Benito Juárez y Porfirio Díaz, el primero de los cuales hizo gran cantidad de reformas legales. Díaz por su parte puso en marcha el desarrollo económico del país y construyó gran cantidad de infraestructura a lo largo de la república y en la capital, todo a costa de un gobierno autoritario y opresor y de gran desigualdad económica.

En el centenario de la independencia existió gran inestabilidad política que llevó a la Revolución mexicana que trajo más de 5 años de conflicto. Una vez estabilizado el país, se generó un nuevo *statu quo* con el Partido Revolucionario Institucional y sus antecesores, partidos a los que pertenecerían por los siguientes 75 años los presidentes. Existió una gran expansión y crecimiento económico, que ocasionó que

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

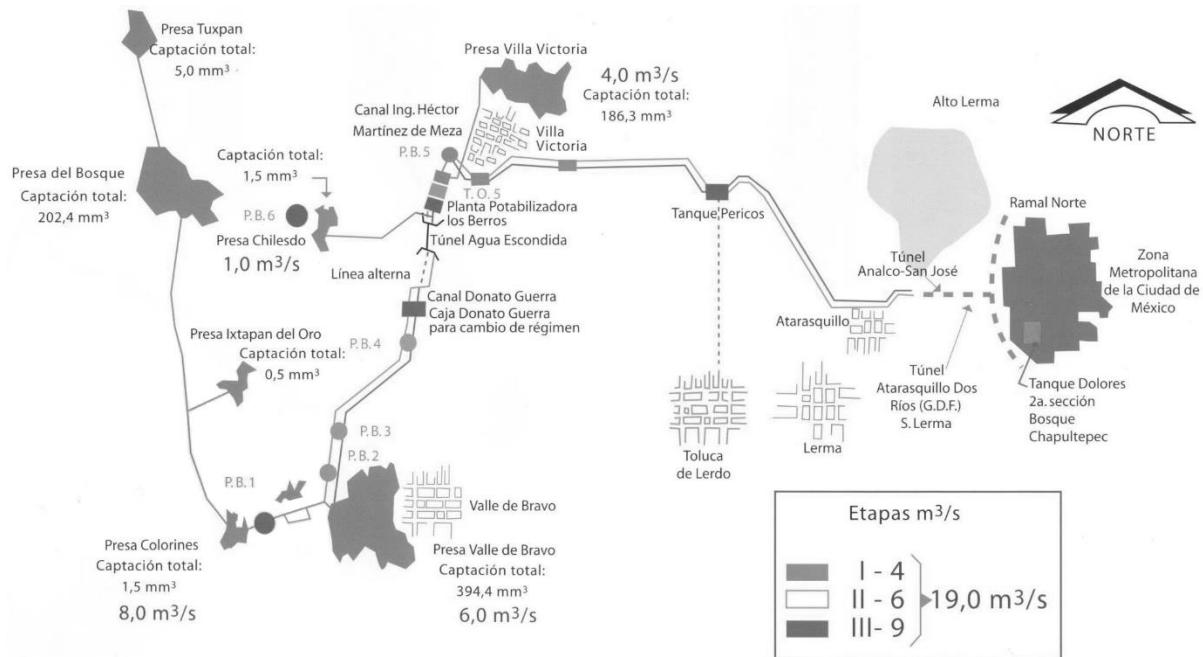


Figura 2.4. Sistema Lerma-Cutzamala
(CONAGUA, 2005)

la ciudad aumentara su población y su extensión en más de 5 veces durante la segunda mitad del siglo, exacerbando los problemas que ya sufría la ciudad (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016). A partir de los años setenta, se presenta mayor descontento social y una fuerte crisis económica, por lo que en el año 2000 se da un cambio de partido en el gobierno, caracterizado por un periodo de estabilidad económica pero también del inicio de la guerra contra el narcotráfico, que ha afectado grandes regiones del país y ha traído decenas de miles de muertos. La ciudad de México se ha posicionado en la actualidad como la décimo octava en PIB a nivel mundial y tiene más de 20 millones de habitantes, poniéndola entre las 7 ciudades más grandes del mundo (ONU, 2016).

Metabolismo urbano del Valle de México

La ciudad de México es la urbe más importante del país y por consiguiente tiene una gran área de influencia sobre el territorio nacional y depende de insumos de gran parte del país. Todos los estados del país suministran insumos a la ciudad y también gran parte de estos provienen de otras naciones debido a la globalización.

El 40% del agua consumida proviene del sistema Lerma-Cutzamala. En los años cincuenta, se construyó el sistema Lerma que desvió el gasto del río del mismo nombre para llevarlo hasta un gran cárcamo en Chapultepec, desde donde se realizaba la distribución a la mayor parte de la ciudad; en la actualidad, el río Lerma es de los más contaminados del mundo. La explosión demográfica de los años sesenta y setenta obligó a expandir el sistema y tomar parte del caudal de la parte alta del río Cutzamala que antes era utilizada para riego y generación de electricidad en el sistema de presas de Valle de Bravo. A través de un sistema de 7 presas y 6 plantas de

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

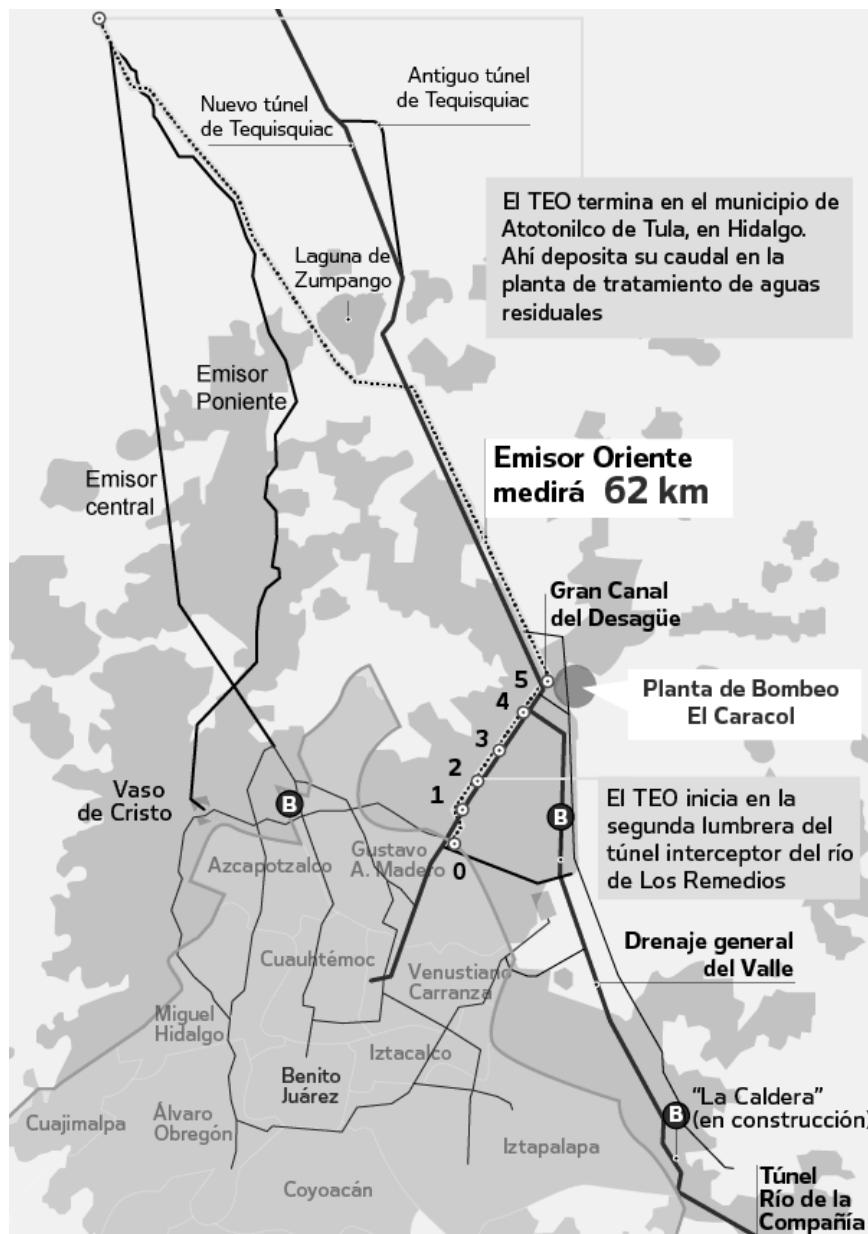


Figura 2.5. Sistema de drenaje profundo de la ZMVM
(El Universal, 2013)

bombeo que atraviesa los estados de Michoacán y México, se lleva el agua a la población de la ciudad. Para el estado de México, se toma un volumen de agua que llega a los diferentes municipios del poniente, norte y oriente de la zona metropolitana a través del distribuidor de agua denominado Macrocircuito, mientras que en el sur de la ciudad se denomina Acuaférico, cuya construcción no ha podido ser terminada desde 2001. Existe un gran número de tanques de almacenamiento a lo largo de la ciudad que proveen agua a las redes de distribución que alimentan a las casas. Además hay cárcamos de rebombeo que permiten librarse de la accidentada topografía local (CONAGUA, 2005) (Figura 2.4).

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México



Figura 2.6a. Sistema carretero de México
(SEP 2013)



Figura 2.6b. Red de ferrocarriles de México
(Wikimedia 2014b)

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

La mayor parte de los municipios y alcaldías del poniente de la ciudad de México no cuentan con colectores de drenaje, por lo que las corrientes superficiales sirven como drenajes a cielo abierto que conducen principalmente a la presa San Joaquín y al vaso regulador el Cristo, que fueron construidos originalmente en los años cincuenta para almacenar agua pluvial y evitar inundaciones. Parte de las aguas residuales del norponiente circulan por el túnel emisor poniente para llegar al túnel emisor oriente y por el río de los remedios para llegar al gran canal. Casi todos los colectores del centro de la ciudad deben llevar el agua a plantas de rebombeo para librar la diferencia de altura y existen algunas plantas de tratamiento dentro de la ciudad, como la del cerro de la Estrella, que es la de mayor tamaño pero devuelve sus lodos al drenaje.

Los emisores de la ciudad son el túnel emisor central, que tiene daño y su capacidad de conducción deteriorada; el gran canal, que por el hundimiento regional ahora tiene pendiente negativa; y el túnel emisor oriente, que ha sufrido diversos retrasos en su construcción. Todos llegan a Hidalgo al valle del Mezquital, donde las aguas residuales no tratadas han regado tradicionalmente los sembradíos para luego alimentar al río Tula, otro de los ríos más contaminados del país. Recientemente se construyó la planta de tratamiento de Atotonilco, la más grande del mundo para sanear las aguas residuales de la zona metropolitana (CONAGUA, 2012) (Figura 2.5).

Gran parte de los insumos fabricados que se adquieren en la ciudad provienen del polo de producción industrial más importante del país, que abarca los estados de México, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro y Aguascalientes y empieza en Tepotzotlán, en el extremo norte de la ciudad. La ciudad tiene puertos de altura cercanos, entre ellos Veracruz, Coatzacoalcos, Lázaro Cárdenas y Manzanillo. Existen vías férreas que conectan con las maquilas del norte del país y Estados Unidos. El sistema carretero del país está centrado alrededor de la ciudad y se puede acceder fácilmente a los cuatro puntos cardinales en automóvil o autobús (Figs. 2.6a y 2.6b).

La Ciudad de México sólo cuenta con rellenos sanitarios para la disposición final de sus residuos sólidos. Dentro de la demarcación de la capital existía uno sólo: el bordo poniente, que fue cerrado en 2011 por haber rebasado su capacidad. Ahora se deben llevar los residuos a 5 diferentes rellenos sanitarios en el Estado de México, que han tenido problemas por huelgas, falta de seguridad en la operación y riñas políticas, lo que pone en riesgo la extracción de residuos sólidos de la ciudad. Todas las alcaldías tienen plantas de composta y estaciones de transferencia, algunas de las cuales se encuentran cerradas, como la de Tecamachalco, por problemas con los habitantes locales. Existen además 3 plantas de separación de residuos y reciclaje (SEMARNAT, 2015).

Recientemente se ha propuesto la construcción de una planta de biodigestión y otra de termovalorización para recuperar materia prima y energía de los residuos sólidos. La planta de biodigestión tuvo conflictos con el nuevo aeropuerto, lo que ha obligado a revisar su licitación y deja incertidumbre tras el anuncio de la cancelación de este último. La planta de termovalorización sería construida por Veolia y proveería de energía al Metro, pero la Jefa de Gobierno electa para el periodo 2018-2024 y otros candidatos en las elecciones del 2018 se han pronunciado en su contra.

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

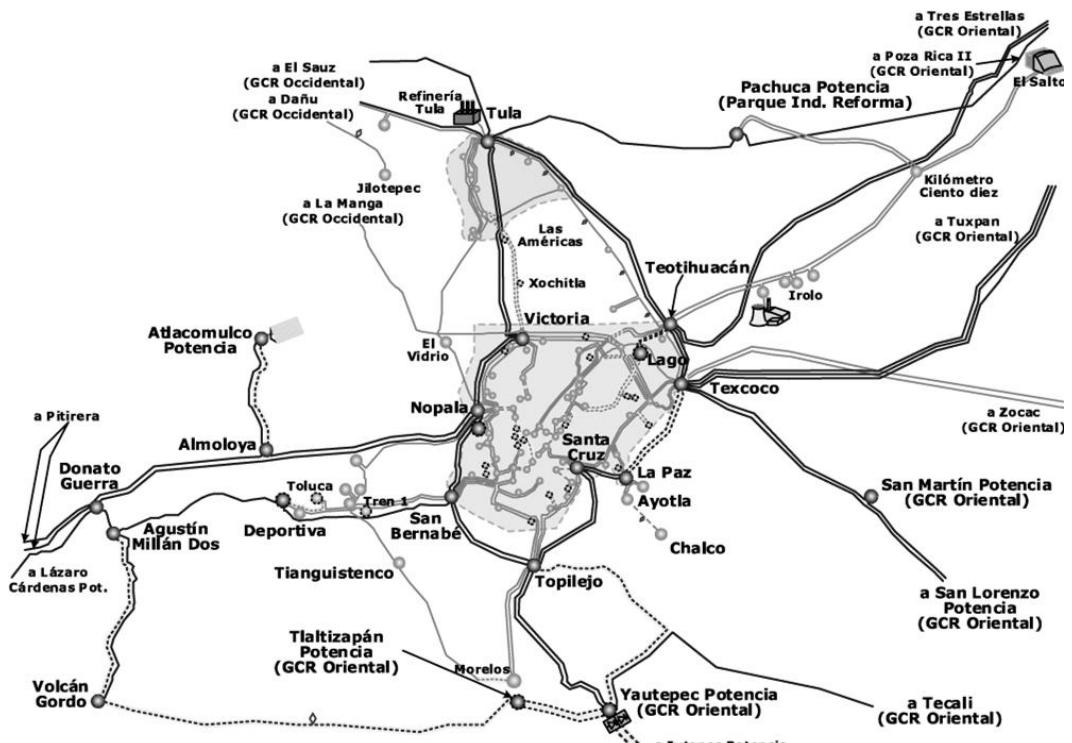


Figura 2.7a. Sistema Eléctrico Nacional, región centro de México (CENACE, 2018)

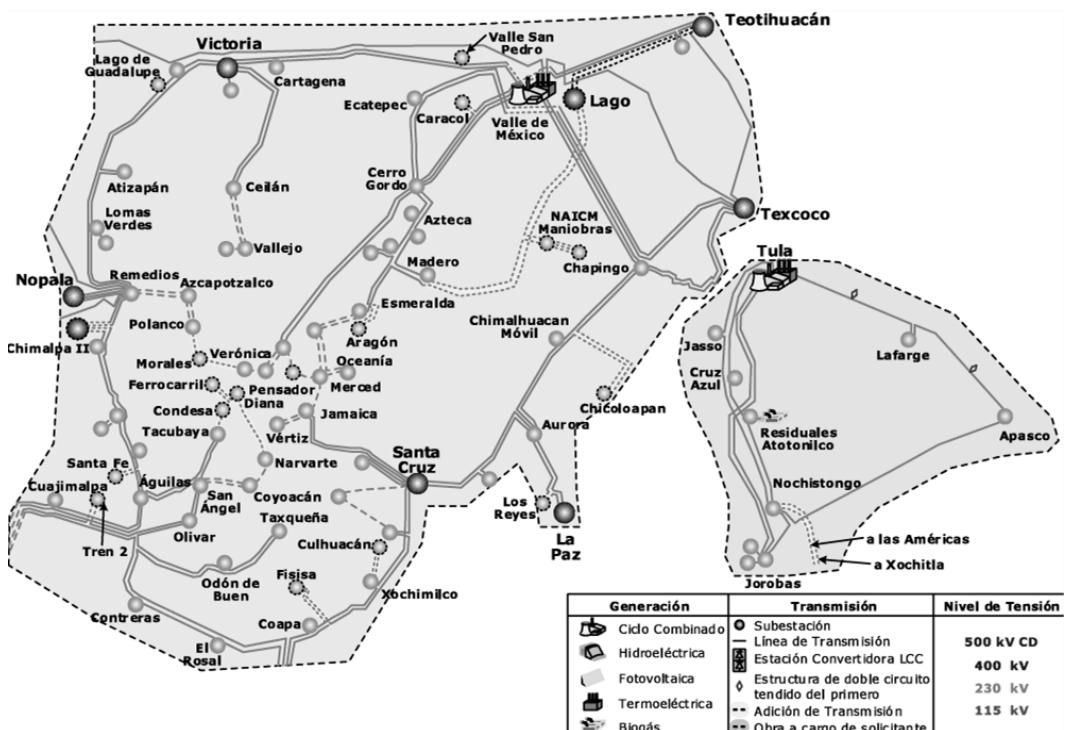


Figura 2.7b. Sistema Eléctrico Nacional, ZMVM (CENACE, 2018)

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

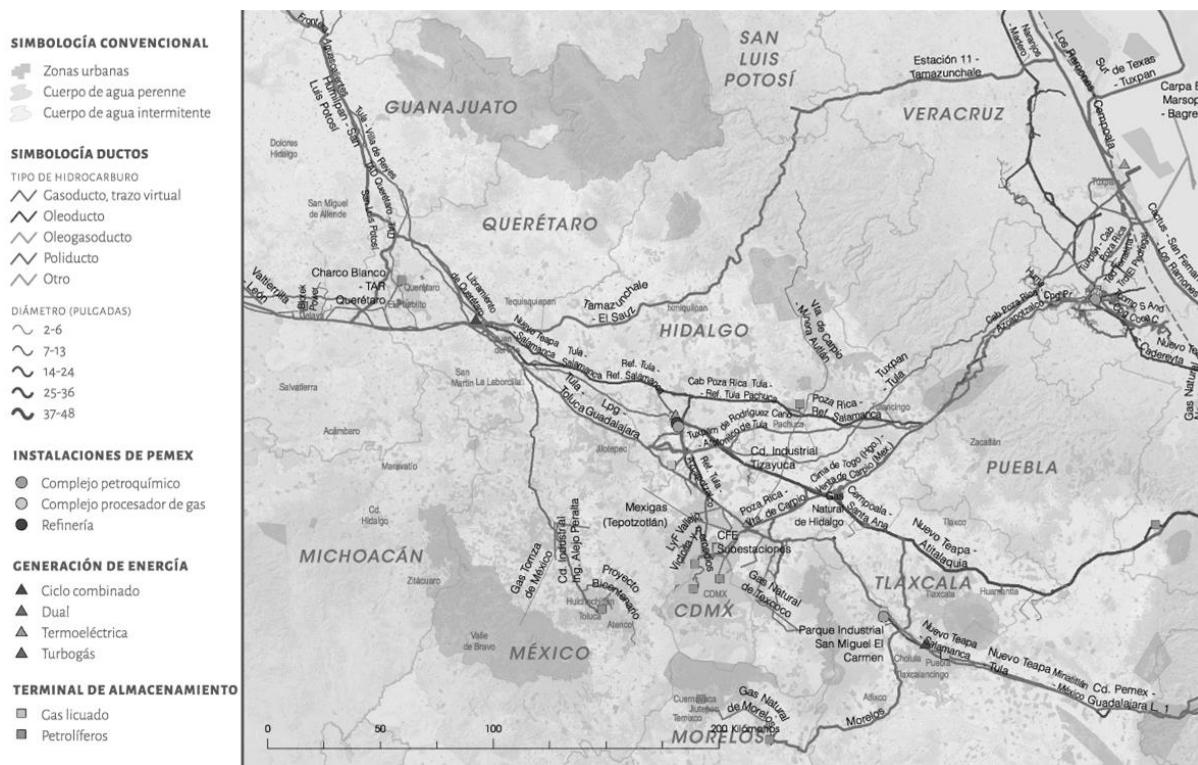


Figura 2.7c. Redes de transporte de combustible del centro de México (Llano 2017)

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es el mayor consumidor de energía eléctrica de todo el país. Como todo el sistema eléctrico nacional está interconectado, es difícil aseverar el origen de las fracciones de energía que alimentan a la ciudad. Sin embargo, existen grandes obras que nos proveen mayoritariamente de energía, como la planta de energía nuclear de Laguna Verde en el sur de Veracruz, el sistema de centrales hidroeléctricas del río Balsas, como el Caracol e Infiernillo, y el de los ríos Grijalva-Usumacinta, como Angostura, Malpaso, Peñitas y Chicoasén, y plantas termoeléctricas en el centro del país, como la de Tula, Hidalgo. Se ha construido recientemente una línea de transmisión en corriente directa de gran voltaje para conectar de manera eficiente a la ciudad con los generadores eólicos de la Ventosa en Oaxaca con gran eficiencia y saciar la siempre creciente demanda eléctrica de la capital (CENACE, 2018) (Figs. 2.7a y 2.7b). También existen oleoductos y gasoductos que aportan el recurso desde los cuatro puntos cardinales, y en Tula hay una refinería que produce gasolina y diésel, entre otros combustibles (Figura 2.7c).

Problemáticas

Como se ha comentado, existía en el Valle de México una gran diversidad de ecosistemas de acuerdo a las características geográficas de cada región y del microclima presente. La explosión demográfica ocasionó en primera instancia una destrucción sistemática de los bosques de la cuenca. Esto provocó la caída de Teotihuacán, y para la colonia se estima que para construir los templos católicos se requerían

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

25,000 troncos cada año para pilotear las estructuras (Imaz, 1989). A su vez, un porcentaje importante de la fauna desapareció de la zona y se alejó a otras regiones donde no había aún presencia del hombre. La desaparición gradual del lago también supuso la pérdida del hábitat de muchas especies, y la posterior contaminación del agua ha impedido incluso la vida en muchos cauces; por ejemplo, el municipio de Naucalpan reconoce que el 100% de sus escurrimientos de agua al aire libre se encuentran gravemente contaminados y no pueden sustentar vida acuática (Desarrollo Urbano Naucalpan, 2007). La pérdida del agua en la cuenca también ha puesto en riesgo a especies de aves migratorias que viajan por todo el continente y tenían como zona de descanso los pantanos de Texcoco (CONABIO, 2010).

La sustitución del lago por zonas urbanizadas ha generado que gran parte de la ciudad se encuentre por debajo del nivel histórico promedio de la zona lacustre. Además, en lagos de cuencas endorreicas el nivel de la superficie libre del agua puede variar considerablemente a lo largo del tiempo dependiendo de la variación de la precipitación anual dentro de la cuenca. El hundimiento regional asociado a la consolidación primaria de la arcilla bajo las cargas de las construcciones y a la extracción de agua del subsuelo ha hecho que zonas del centro histórico se hayan hundido hasta 10 metros en el último siglo, lo que ha exacerbado la condición de sumersión con respecto a la línea histórica del lago (Santoyo *et al.*, 2005).

La ciudad ha estado sujeta a inundaciones desde la época prehispánica. Nezahualcóyotl construyó un dique que separó las aguas salobres de las dulces y permitió tener una mayor regulación del nivel del agua. Después, se presentó una inundación en Tenochtitlan que destruyó las obras de un nuevo acueducto. Posterior a la conquista, se intentó reconstruir el dique con el albarradón de Ecatepec, pero no tuvo el mismo éxito y un par de décadas después de ésta, hubo una inundación que duró tres años y llevó a los españoles a considerar el cambio de ubicación de la capital. En el centro histórico existen marcas que indican que el nivel máximo de otra inundación llegó a ser de hasta dos metros y medio. Durante el siglo XVIII, se logró abrir la cuenca de manera artificial por medio del tajo de Nochistongo, mientras que en los albores del siglo XX Porfirio Díaz inauguró el Gran Canal de Desagüe, con lo que se logró el objetivo de drenar los lagos (CONAGUA, 2012).

En los años sesenta se pavimentaron 80 kilómetros de ríos y se construyó el Emisor Central. Recientemente se ha construido el Emisor Oriente para aumentar la capacidad de descarga de la ciudad. Muchas de las grandes avenidas de la ciudad solían ser ríos y sus nombres lo atestiguan, como Avenida Canal de Miramontes, Viaducto Río de la Piedad, Viaducto Miguel Alemán, Eje 10 Río la Magdalena, entre muchas otras calles. Todas las temporadas de lluvias se generan inundaciones de menor intensidad, que se conocen en el habla popular como encharcamientos. Las colonias ubicadas en la antigua locación de los lagos con menor altitud sobre el nivel del mar, como Texcoco y Chalco, sufren cotidianamente de fuertes inundaciones (CONAGUA, 2012).

El 60% del agua que se consume en la ciudad proviene del recurso subterráneo, el cual se encuentra sobreexplotado y con poca capacidad de recarga debido a la plancha impermeable de asfalto y a la erosión del suelo en zonas de recarga por la deforestación. El resto del agua es traída de otras cuencas a través de sistemas kilométricos de gran costo y en regiones sujetas a sequías. El sur de México sufrió la

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

peor sequía registrada en 2016 y existe la posibilidad de que para 2100 se pierdan el 100% de las tierras cultivables del país debido al cambio climático (UK Met Office, 2011). Esto genera la paradoja de que se tiene tanto una fuerte tendencia hacia inundaciones como hacia sequías, y nos encontramos entre la lista de las ciudades con mayor riesgo a quedarse sin suministro de agua potable, después de Ciudad del Cabo y São Paulo (IPCC, 2013). Una gran parte de la población sufriría ante una situación tal, porque el sistema de abastecimiento es muy poco eficiente y existe una importante cantidad de zonas que reciben agua con una calidad deplorable y deben recibirla una vez a la semana por tandeos en pipas.

Se ha expuesto ya que el país se encuentra sobre el Cinturón de Fuego, y los sismos que ocurren a cientos de kilómetros se amplifican en el suelo proveniente de un ambiente de depósito lacustre, generando grandes aceleraciones que ocasionan fuertes daños en la infraestructura. El sismo de 1985 ha sido el que más daños ha ocasionado, mientras que durante el terremoto de 2017 se observó una mayor aceleración en el suelo (Sismología e Ingeniería UNAM, 2017). De los varios volcanes que rodean a la cuenca, el Popocatépetl entró nuevamente en actividad a finales de los noventa y ya ha tenido múltiples exhalaciones que depositan gran cantidad de cenizas sobre la ciudad; el riesgo de una erupción mayor permanece latente.

Como toda la ciudad se encuentra rodeada de cadenas montañosas, existe un régimen de flujo eólico casi estático; los pocos vientos que se presentan fluyen de norte a sur y chocan contra el Ajusco, lo que evita que se dispersen. Una apertura orográfica de la cuenca en el sureste ocasiona también flujos desde el sur que chocan con los que provienen del norte, por lo que se generan ciclones de recirculación y un estancamiento del aire (SEDEMA, 2005) (Figura 2.8). En el norte de la ciudad se encuentra el mayor polo de actividad industrial, y las plumas de contaminación son transportadas directamente al centro de la ciudad. Al oriente se tiene un clima mucho más seco y los vientos levantan la polvareda de arcilla y aumentan la cantidad de partículas suspendidas.

Al ser una de las urbes más pobladas del planeta y al no contar con una infraestructura vial de transporte público adecuada, se presenta con unos de los mayores tráficos del planeta. Esto se agrega a un parque vehicular envejecido, particularmente en el transporte público de baja densidad y en el transporte de carga, y a que la gasolina mexicana cuenta con gran contenido de fósforo. Todo esto ocasiona una cubeta donde se atrapa la contaminación atmosférica que provoca natas densas de *smog* que usualmente impiden ver las montañas que delimitan a la cuenca.

Según datos oficiales, se ha reducido en gran manera la contaminación atmosférica desde 1990 cuando la ONU declaró que era la ciudad más contaminada del mundo, aunque se ha cuestionado la fiabilidad de los datos recientes medidos por las estaciones (Correa *et al.*, 2013). Cada año se presenta al menos una contingencia ambiental nivel 1, mientras que en 2016 se presentaron diez contingencias nivel 1, el mayor nivel de contaminación desde 1992, donde en 4 ocasiones se decretó el nivel 2 de contingencia. A partir de los últimos dos años, se ha dado un incremento en la mala calidad del aire, con graves afectaciones a la salud (SEDEMA, 2018). Casi el 50% de las emisiones provienen del parque vehicular, mientras que dos tercios de los viajes se realizan en transporte público (IEA, 2016), el cual en su modalidad con

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

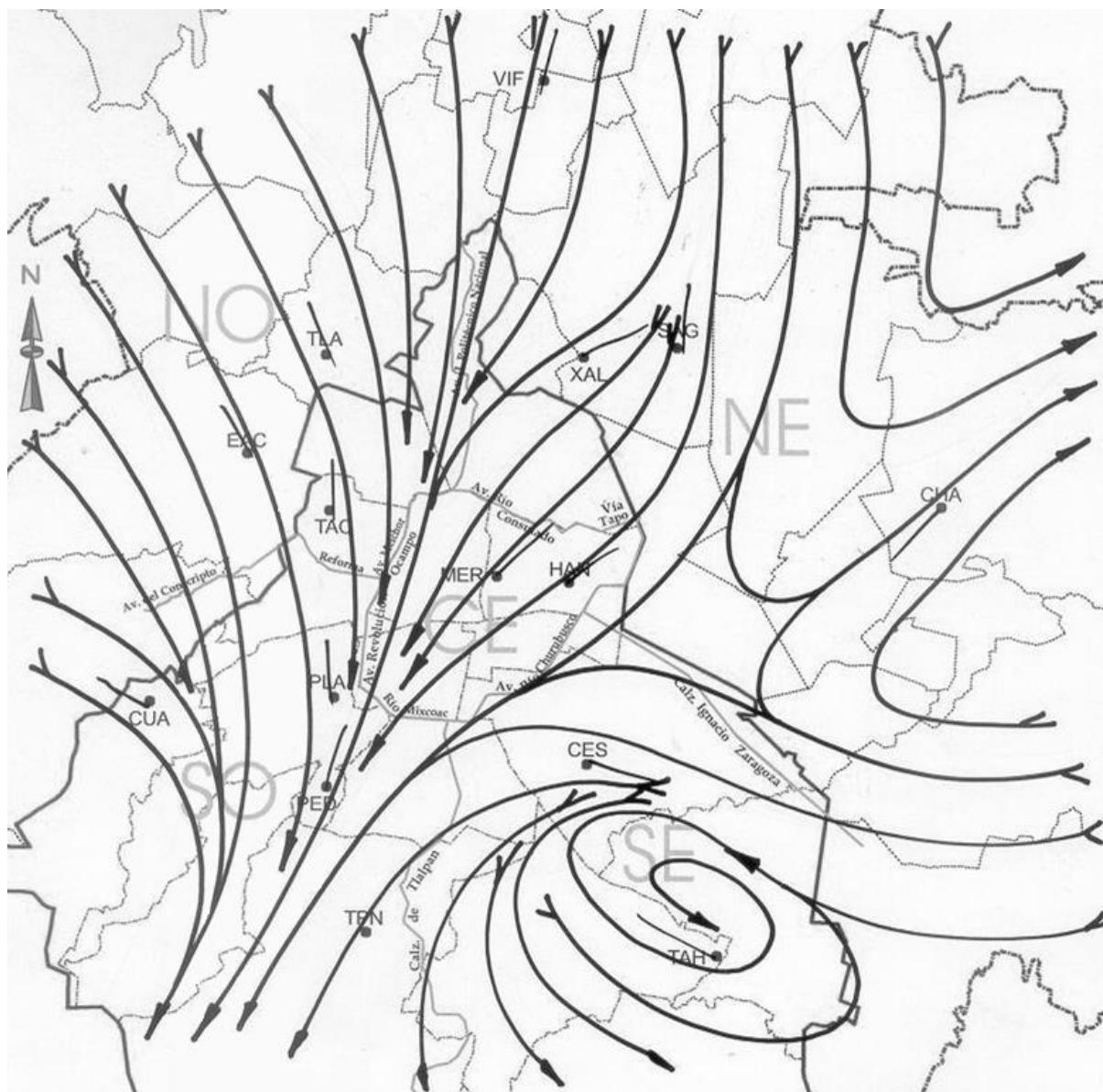


Figura 2.8. Promedio anual del patrón de circulación del viento en la ZMVM, 19:00
(SEDEMA, 2005)

estaciones formales (metro, metrobús y tren ligero) sólo cubre el 39% de la superficie de la zona metropolitana (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016).

Existe también un gran riesgo por descontento social. La desigualdad en la ciudad es muy grande; se cuenta con un índice de Gini de 0.507, donde el 0 representa que todos tienen la misma riqueza y el 1 la máxima desigualdad. Hay polos de gran desarrollo inmobiliario y de concentración del capital como Santa Fe y colonias de muy alto nivel socio económico, como las Lomas de Chapultepec en el poniente y el Pedregal en el sur, pero se tiene un nivel de desigualdad similar al de Suazilandia y un 28.5% de la población está en situación de pobreza (Oficina de Resiliencia CDMX,

2. Desarrollo urbano de la cuenca del Valle de México

2016). Hay presencia de muchas zonas de asentamientos irregulares, una gran cantidad de personas sin acceso a agua limpia, y algunos estudios la nombran la ciudad con el peor tráfico del mundo (TomTom, 2017).

La ciudad está en el número 129 en el índice de la consultora Mercer en cuanto a calidad de vida (2018), y se presentan 14 homicidios por cada mil habitantes, contra el promedio de 3.6 de la OCDE (INEGI, 2017). En años recientes, los municipios del estado de México en la Zona Metropolitana del Valle de México han tenido un gran salto en cuanto a violencia y Ecatepec y Naucalpan se encuentran dentro de los municipios más peligrosos del país (Seguridad, Justicia y Paz, 2017). Hay una alta incidencia de crímenes pero con poca presencia de crimen organizado en la Ciudad de México, una impartición de justicia muy parcial y con poco apego al estado de derecho, gran presencia de trabajo informal, una corrupción rampante y ampliamente extendida y una aparente inestabilidad política.

Hay poco más de 20 millones de habitantes en la actualidad y se espera que en 2030 llegue a casi 24 millones, con la mayor parte del crecimiento concentrado en el norte de la ciudad, en los municipios del Estado de México. Tanto ahí como en el sur se ha dado un rápido desarrollo sin planeación, creando fuertes problemas de movilidad y generando asentamientos irregulares en zonas de laderas inestables, terrenos inundables y áreas prioritarias para la recarga del acuífero (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016).

La ciudad recientemente ha adquirido el estatus de entidad Federativa y ha promulgado su constitución, por lo que la aprobación de su presupuesto y su gobernanza ya no dependerá de la Federación, lo que le permitirá tener un mayor empoderamiento local. Los municipios del Estado de México tienen una autoridad limitada pero de importancia para las obras públicas y el desarrollo urbano. Existen casos de cooperación entre entidades, como en la construcción de la línea B del metro y la verificación vehicular, pero por lo general existe dificultad para la coordinación de políticas, sobre todo por la presencia de diferentes partidos políticos en cada demarcación.

La ciudad de México está sujeta a una importante cantidad de factores externos e internos que generan incertidumbre. Muchos de los riesgos naturales se ven aumentados o complementados por los de origen antropogénico, y juntos crean una compleja distribución del riesgo a lo largo de la ciudad que tiene la notable característica de ser muy desigual, afectando de sobremanera a los más desfavorecidos. La implementación de medidas para mitigar estos riesgos en la ciudad presenta retos que requieren soluciones innovadoras para tener éxito.

3. Resiliencia urbana

Desarrollo histórico del concepto de resiliencia

La Real Academia de la Lengua Española define la resiliencia tanto como la capacidad de adaptación ante situaciones adversas, como la habilidad de un sistema para recuperar su estado inicial posterior a una perturbación (RAE, 2014). Es notable que esto incluye tanto la perspectiva del concepto desde un punto de vista psicológico en la primera definición, como con un enfoque ingenieril o analítico en la segunda. En sí, la palabra tiene su origen en el inglés y a su vez en el latín *resilire*, que significa rebotar (RAE, 2014). Así, el significado etimológico parece sugerir la segunda visión, en cuanto al retorno al estado original.

Dentro del ámbito académico, la resiliencia empezó a ser estudiada a finales de los años sesenta por psicólogos, y desde entonces ha tenido una amplia aplicación tanto en este medio como en estudios médicos. Emmy Werner estudió a un grupo de infantes en Kauai, Hawái, que eran hijos de padres alcohólicos o con enfermedades mentales. Ella descubrió que mientras dos tercios de los niños estudiados presentaban un comportamiento similar al de sus padres al alcanzar la adolescencia, existía un grupo que no presentaba estos comportamientos destructivos y cuyas características les permitían responder mejor ante situaciones adversas, a los que se les llamó el grupo resiliente (Werner y Smith, 1979).

Casi a la par de los primeros desarrollos en materia psicológica, el término apareció a su vez en el ámbito de la ecología. C. S. Holling publicó su artículo seminal en 1973 y ha formado la base de muchos estudios posteriores (Meerow *et al.*, 2016). En su publicación, rechaza la idea tradicional existente hasta el momento en la que se suponen sistemas cerca de su estado de equilibrio, y postula la importancia de las transiciones entre diferentes condiciones estables. Define, por una parte, la estabilidad como la minimización de las fluctuaciones de una variable con respecto a un valor de adaptación, e. g., la población de una especie que se mantiene prácticamente constante.

Por el contrario, para Holling la resiliencia se refiere a un equilibrio más sutil donde se preservan las relaciones e interdependencias y no necesariamente la magnitud de las variables. Como ejemplo da la interrelación entre el Abeto Balsámico, la Pícea y la polilla *Choristoneura freemani*. La polilla destruye al Abeto pero no a la Pícea, mientras que el Abeto suele desplazar a la Pícea. La gran mayoría del tiempo, la polilla es extremadamente rara, pero cuando aumenta demasiado la densidad de Abetos y existe una sequía prolongada por varios años, la población de polillas se sale de control y destruye a casi todos los Abetos para dejar lugar de nuevo a la Pícea, que eventualmente será desplazada por el Abeto. La población de la polilla es muy poco estable, pero da una gran resiliencia a su especie y al ecosistema (Holling, 1973).

3. Resiliencia urbana

Dadas las definiciones que propone Holling, la segunda definición de la RAE quedaría dentro de la estabilidad, o como un concepto de resiliencia ingenieril. En ambientes diseñados por los humanos, se controla la mayor cantidad posible de variables y en caso de perturbación se busca regresar lo más rápido posible al estado original conocido y controlado. Por el contrario, se tiene que en la resiliencia ecológica existen varios posibles estados de equilibrio entre los que fluctúa la población de una o varias especies.

Estudios más recientes sugieren un nuevo paradigma de no-equilibrio en el que se desecha por completo la noción de estabilidad y se toma la fluctuación y el cambio como norma, es decir, se tiene una estabilidad dinámica (Meerow *et al.*, 2016). De tal manera se considera que el sistema está en evolución constante y debe mantener una integridad de las relaciones entre los componentes para mantener una operación óptima ante el nuevo panorama. Es a este caso al que se asemejan los sistemas humanos que deben ser capaces de ser seguros ante una falla, en vez de fallar de manera segura ante una situación previsible (Ahern, 2011).

En su revisión sobre definiciones, Meerow *et al.* marcan una diferencia entre la resiliencia y la adaptación (2016). Para ellos la adaptación se refiere a casos particulares, y de tal manera, resta flexibilidad a un sistema. Por el contrario, prefieren el término adaptabilidad, que supone la habilidad de adaptación general. Al final de su artículo, Holling dice que un sistema resiliente debe poder "*absorber y acomodar eventos futuros en cualquier forma inesperada que puedan tomar*" (Holling, 1973).

Concepto de resiliencia urbana

El concepto de resiliencia puede ser adaptado al ámbito de los asentamientos humanos, donde se conoce este concepto como resiliencia urbana. El término ha sido definido de múltiples maneras, pero Meerow *et al.* buscan dar una definición completa y comprensiva. Para ellos la resiliencia urbana se define como:

"La habilidad de un sistema urbano y de todas sus redes socio-ecológicas y socio-técnicas constituyentes a través de una escala temporal y espacial de mantener o regresar rápidamente a las funciones deseadas en caso de una perturbación, de adaptarse al cambio, y de rápidamente transformar sistemas que limitan la capacidad de adaptabilidad futura o actual." (2016)

La iniciativa de 100 Ciudades Resilientes de la Fundación Rockefeller, la define como la "*capacidad de las ciudades para funcionar de tal manera que las personas que viven y habiten en ellas – particularmente los pobres y los vulnerables – sobrevivan y prosperen sin importar con qué impactos o tensiones se encuentren*" (Arup, 2014).

Mientras que la definición de Meerow *et al.* intenta abarcar todos los recovecos posibles del concepto de resiliencia, la Fundación Rockefeller da una definición más sencilla y humana, debido a que considera a los factores sociales de la gente que habita en las ciudades. Considera que existen riesgos de gran alcance e inmediatos, los impactos, mientras que hay efectos de menor fuerza pero que tienen un efecto

desgastante a largo plazo, las tensiones. A su vez, divide las características de una ciudad resiliente en cuatro factores: Estrategia y liderazgo, Bienestar y Salud, Economía y Sociedad, e Infraestructura y Ecosistemas. Como es posible observar, el estudio de la resiliencia urbana es un campo interdisciplinario que para su análisis y solución requiere de la participación de un sector muy amplio y diverso de profesionales.

El factor social de la resiliencia urbana es sumamente importante. Durante los sismos del 19 de septiembre de 1985 y de 2017 en la Ciudad de México fue posible observar que frente a una saturación del sistema institucional la población tomó la batuta y se organizó para poder resolver la situación. De esta manera, una ciudad que tenga habitantes resilientes en el sentido psicológico tendrá una mayor resiliencia del sistema a gran escala. Sin embargo, al ser una disciplina tan grande, no se puede abarcar en un solo trabajo el estudio de todas las facetas de la resiliencia, por lo que en este trabajo se ahondará sobre el aspecto que atañe principalmente a los ingenieros civiles y ambientales, dígase la infraestructura y los ecosistemas.

La actividad industrial humana ha causado que liberemos grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera a un ritmo mucho mayor que en cualquier otra época geológica (IPCC, 2013). Esto está ocasionando un incremento en la temperatura media del planeta y un desbalance de los ciclos naturales, lo cual va a causa mayor incertidumbre con respecto al clima y desastres naturales. Algunos efectos del cambio climático serán el incremento del nivel del mar, huracanes y tormentas de mayor intensidad, sequías prolongadas, ondas de calor extremo, y mayor riesgo de inundaciones, lo que presentará más impactos críticos e impondrá retos para el desarrollo de la resiliencia en ciudades en vías de gran crecimiento y desarrollo.

Existen varios factores y cualidades que se presentan en las ciudades resilientes y las definen como tal. La Fundación Rockefeller ha comenzado por encontrar las características de un sistema resiliente. Debe ser reflexivo, reconociendo la inherente y creciente incertidumbre y cambio en el mundo actual; robusto, teniendo activos físicos bien planeados para que resistan desastres naturales sin daño significativo; redundante, con diversidad y capacidad de sobra para acomodar disruptiones y picos de demanda; flexible, para que pueda cambiar, evolucionar y adaptarse en respuesta a circunstancias cambiantes; ingenioso, para que se puedan encontrar de manera rápida nuevas formas de alcanzar metas o saciar necesidades; inclusivo, que considere a todos los afectados y partes interesadas, incluyendo a los más vulnerables; e integrado, con una alineación entre sus subsistemas (Arup, 2014). Estos elementos se tratarán con más detalle en el capítulo cuatro sobre infraestructura distribuida.

A su vez, existen doce cualidades que tiene una ciudad resiliente. Éstas son una mínima vulnerabilidad humana, de tal manera que se sacien las necesidades de todos; tener empleos y modos de sustento diversos; contar protecciones efectivas para la salud humana y la vida, con un buen sistema de salud y de atención a las emergencias; poseer una identidad colectiva y apoyo de la comunidad, con una fuerte integración social; la existencia de una seguridad comprensiva y estado de derecho, que incluya impartición de justicia y combate al crimen; una economía sostenible, con salud financiera para atraer inversiones; una exposición y fragilidad reducidas, con cuidado del medio ambiente y planeación urbana adecuada; la provisión efectiva

3. Resiliencia urbana

de servicios críticos, teniendo una planeación ante contingencias; tener sistemas de comunicaciones y de movilidad confiables, con sistemas diversos y asequibles por la población; contar con un liderazgo y una administración efectiva en el gobierno, empresas y sociedad civil; permitir empoderar a las partes interesadas, con educación para todos y acceso a la información; y hacer una planeación de desarrollo integrada, con una visión de ciudad y planes cotidianamente revisados y actualizados (Arup, 2014).

En general es posible observar que una ciudad resiliente es una bien planeada y con una adecuada administración. Por lo general también es necesario que se trate de una ciudad rica y con los recursos adecuados para proveer de estas doce cualidades a todos los habitantes. Por esta última razón existe gran desigualdad en el acceso a la resiliencia, lo cual se exacerba al ver que las ciudades con menos recursos son las más vulnerables a los impactos del cambio climático.

Muchos asentamientos humanos se construyeron en zonas con fácil acceso a recursos naturales, pero a su vez esta facilidad de acceso los hacía más vulnerables a desastres naturales. A lo largo del tiempo muchas ciudades se adaptaron y se especializaron para resistir los embates del clima particulares a su región. Sin embargo, con el cambio climático tenderá a aumentar la incertidumbre del clima y la magnitud de los desastres que llegarán de manera inesperada. Las zonas urbanas deberán crear mayor resiliencia y tener mejor adaptabilidad para hacer frente ante los potenciales efectos devastadores del cambio climático, varios de los cuales ya estamos sintiendo. El 60% de las ciudades del mundo con una población de más de 5 millones de habitantes, y 12 de las 16 ciudades con más de 10 millones de habitantes en 2007 se encuentran a menos de 100 kilómetros de la costa y a menos de 100 metros sobre el nivel del mar, por lo que se encuentran en riesgo por el aumento del nivel del mar, y serán fuertemente afectadas por el calentamiento global (IPCC, 2007).

La justicia ambiental también es un asunto que debe ser resuelto por la resiliencia urbana. Históricamente los asentamientos de la gente con más dinero se han ubicado en las mejores zonas geográficas con mejor acceso a recursos y menos riesgo y exposición ante desastres. Además es en estas zonas donde más se invierte en infraestructura y donde mayor mantenimiento se le da. Estos barrios bien planeados y construidos son muy resilientes.

En las zonas de bajos recursos sucede todo lo contrario. El ostracismo que sufre la población de menor ingreso los marginan a asentamientos irregulares en espacios no autorizados, como barrancas y laderas de ríos, donde previamente no había construcciones debido al riesgo que presentan esas zonas. Por si fuera poco, estas zonas cuentan con infraestructura muy deficiente que falla fácilmente. Los pobres serán los más afectados por el cambio climático debido a que se encuentran en zonas de riesgo, tienen infraestructura deficiente, y no cuentan con los recursos para tomar las acciones pertinentes. Por esta razón, la resiliencia urbana debe enfocarse en estos grupos vulnerables y buscar disminuir la desigualdad (Arup, 2014).

Institucionalización de la resiliencia urbana

En los últimos años ha existido la iniciativa desde múltiples ejes para tomar acciones que combatan el cambio climático para mitigar los efectos más graves que éste pudiera causar. La primera piedra fue puesta por La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, adoptada en la cumbre de Río de Janeiro de 1992. Su objetivo es "*estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas (sic) peligrosas en el sistema climático*" (CMNUCC, 1992).

Para cumplir este objetivo se implementó el Protocolo de Kioto en 1997 donde las naciones del mundo se comprometen a tener reducciones en sus emisiones de gases de efecto invernadero. Estas contribuciones eran obligatorias; sin embargo, Estados Unidos no formó parte del tratado, China e India no contaban con contribuciones obligatorias, y Canadá salió del tratado en 2011 debido a sus inversiones en arenas bituminosas. Esto limitó considerablemente la efectividad del tratado. Los países en vías de desarrollo, con la menor responsabilidad por el cambio climático, quedaron fuera del Anexo I y su participación consistió en proponer políticas para el desarrollo sostenible, donde se incluyen medidas para el incremento de la resiliencia. (Encyclopædia Britannica, 2017).

En 2015 todos los países del mundo firmaron un nuevo tratado conocido como el Acuerdo de París cuyo objetivo es mantener el incremento de temperatura debido al cambio climático por debajo de 2° C y limitarlo idealmente a menos de 1.5 °C. Para este efecto, los países presentan Contribuciones Nacionales Determinadas donde voluntariamente proponen un objetivo de reducción de gases de efecto invernadero. Para lograrlo, se establece en el inciso b) del artículo 1: "*Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero*" (UNFCCC, 2015), es decir, se reconoce a la capacidad de adaptación y resiliencia por ejes principales para combatir al cambio climático.

En el artículo 7 se ahonda más en la materia, diciendo que es "*un desafío mundial (...) componente fundamental de la respuesta mundial a largo plazo frente al cambio climático (...) cuyo fin es proteger a las personas, los medios de vida y los ecosistemas*" (CMNUCC, 2015). De esta forma se considera a la resiliencia como fundamental para la supervivencia humana. Para lograr este objetivo, se debe considerar el intercambio de información, fortalecimiento de los arreglos institucionales y aumento de la eficacia y durabilidad de las soluciones que se tomen.

En 2000, durante la cumbre del Milenio, la ONU presentó los ocho objetivos del Desarrollo Milenio para en 2015 para resolver los principales males que aquejan a la humanidad (Encyclopædia Britannica, 2018). Pocos países tuvieron éxito en cumplir estos objetivos, que fueron sustituidos por los Objetivos del Desarrollo Sustentable en 2016. Estos 17 objetivos no distinguen entre países desarrollados y no desarrollados, son más comprensivos y buscan la transversalidad y compatibilidad entre ellos, de tal manera que las acciones para su solución involucren varios objetivos a la vez. Casi todos estos objetivos aplican para crear resiliencia urbana, pero existe uno en particular que ataña a los asentamientos urbanos y es el número 11: Hacer que las ciudades y asentamientos humanos sean más inclusivos, seguros, resilientes

3. Resiliencia urbana

y sustentables. Entre otras cosas este objetivo propone el mejoramiento de asentamientos irregulares, la expansión del transporte público, una planeación integrada y participativa, reducir el impacto ambiental de las ciudades, aumentar las áreas verdes, y el apoyo a las comunidades más desfavorecidas (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015).

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre la Vivienda y el Desarrollo Urbano Sostenible de 2016 en Quito se presentó la Nueva Agenda Urbana, que pretende dar lineamientos generales para el desarrollo urbano alrededor del mundo, donde en la sección de desarrollo urbano resiliente y ambientalmente sostenible se empieza por aceptar que "*las ciudades y los asentamientos humanos se enfrentan a amenazas sin precedentes (...) que los centros urbanos de todo el mundo, especialmente en los países en desarrollo, suelen tener características que exacerbaban la vulnerabilidad de esos centros y sus habitantes*" (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2017)

Para lograr superar los retos que esto supone propone a los gobiernos de las diferentes naciones del mundo "*promover la creación y el mantenimiento de redes bien conectadas y distribuidas de espacios públicos de calidad, abiertos, seguros, inclusivos, accesibles, verdes y destinados a fines múltiples*". Se deberá cambiar el enfoque de planeación y gestión de los recursos hídricos, de los desechos y tomar en cuenta a los edificios como herramientas para el desarrollo sostenible de las ciudades, mitigando los riesgos de acuerdo al Marco de Sendái para la Reducción de los Riesgos por Desastres de la ONU firmado en 2015.

Además de las múltiples iniciativas de las diferentes dependencias de la ONU, la *Rockefeller Foundation* ha creado la iniciativa de 100 Ciudades Resilientes como celebración de su centésimo aniversario. Con esto se pretende ayudar a ciudades alrededor del mundo con el conocimiento y el financiamiento para incrementar su resiliencia ante el mundo cambiante. Junto con Arup, una consultora inglesa, han desarrollado el Marco de Resiliencia Urbana y el Índice de Resiliencia Urbana para ayudar a las ciudades tener resultados medibles de las acciones que tomen.

El Índice De Resiliencia Urbana definido por Arup ayuda a comparar las diferentes propuestas de políticas públicas y a poder tomar decisiones gubernamentales basadas en la evidencia. Dentro de los diferentes aspectos comentados con anterioridad que definen la resiliencia de una ciudad se definen variables cualitativas y cuantitativas que permiten dar una calificación a una ciudad que participe en el programa de la *Rockefeller Foundation*. Algunas de estas variables son el acceso a la educación, la calidad del proceso de planeación urbana, el nivel de monitoreo de riesgo, el mantenimiento de la infraestructura pública, la existencia de códigos y normas y su observancia, la operación del sistema de transporte, la impartición de justicia, las finanzas públicas, el sentido de pertenencia de la población, el acceso a servicios básicos, las políticas laborales, la calidad y el acceso al sistema de salud, entre otros (Arup, 2014). Existen, además del sistema de Arup, otros sistemas de evaluación de la resiliencia de una ciudad, como el de la institución global ICLEI, *International Council for Local Environmental Initiatives*, con sede en Bonn, Alemania.

Otras iniciativas que existen para aumentar la resiliencia urbana a nivel global con la cooperación de diferentes ciudades son el Grupo de Liderazgo Climático, o

C40, del cual la Ciudad de México forma parte, y se conforma por 40 ciudades alrededor del mundo. En Asia también existe la ACCCRN, o *Asian Cities Climate Change Resilience Network*, que es apoyada por ICLEI. El Banco Mundial y el Banco Interamericano de Desarrollo también han llevado a cabo acciones para ayudar a países en vías de desarrollo a aumentar su resiliencia.

Resiliencia urbana de la ciudad de México

La ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo, y por esta razón sufre de manera exacerbada de fuertes problemas que ponen en mayor riesgo a su población. El crecimiento de la ciudad ha superado la capacidad de planeación y acción del gobierno local y federal, por lo que la expansión de la ciudad se ha llevado a cabo de manera desordenada. La ubicación de la ciudad en lo que solía ser un lago dentro de una cuenca endorreica y la mala gestión del recurso hídrico, además de las peculiaridades hidrometeorológicas y geológicas de la región, han ocasionado la mayor parte de los problemas que se presentan en la actualidad en la zona metropolitana del Valle de México.

La Ciudad de México forma parte del primer grupo de ciudades seleccionadas por la *Rockefeller Foundation* para formar parte de la iniciativa de 100 Ciudades Resilientes. El ex Jefe de Gobierno Miguel Ángel Mancera, firmó el acuerdo con la fundación en 2015 y en 2016 se publicó la Estrategia de Resiliencia de la Ciudad de México. Se definen los principales impactos a los que podría estar sujeta la ciudad, entre ellos terremotos, contingencias ambientales, desabasto de agua potable, conflicto social, inundaciones, deslaves, sequías, crisis económicas, epidemias, erupciones volcánicas, incendios forestales y socavones. Se consideran como tensiones en orden de importancia a la inequidad social, la pobreza, la concentración de riqueza, el descontento social, la falta de coordinación metropolitana, el crecimiento de zonas urbanas, la cultura de la ilegalidad, la exclusión y el aislamiento social, la falta de planeación integrada, la congestión vehicular, la sobre explotación del acuífero, la falta de gestión y gobernanza territorial, la asimetría de inversión, la calidad del aire, las oportunidades y derechos, la inseguridad, y la pérdida de la base productiva, varios de los cuales han sido expuesto en el capítulo 2.

La estrategia involucra 5 ejes principales de trabajo para resolver las problemáticas de la ciudad, que son: fomentar la coordinación regional, impulsar la resiliencia hídrica como nuevo paradigma para el manejo del agua en la cuenca de México, planear para la resiliencia urbana y territorial, mejorar la movilidad a través de un sistema integrado, seguro y sustentable y desarrollar la innovación y la capacidad adaptativa. Cada eje involucra acciones que se realizarán en conjunto con varias dependencias del gobierno, la sociedad y la iniciativa privada para incrementar la habitabilidad y la resiliencia de la Ciudad de México. Se han establecido 3 marcos de acción temporal para llevar a cabo los objetivos propuestos: de 2016 a 2018 hasta el fin de la administración de Miguel Ángel Mancera, hacia 2025 con proyectos a mediano plazo, y hasta 2040 a largo plazo (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016).

Existen varios factores que probablemente no hayan sido considerados con la importancia que deberían en esta estrategia de resiliencia. Por una parte, dentro de

3. Resiliencia urbana

las tensiones no se considera a la corrupción en todos los niveles de la administración pública, lo cual se permea a la sociedad también. Dentro del Marco de Resiliencia Urbana de 100 Ciudades Resilientes se tiene como el quinto objetivo una seguridad comprensiva y respeto de la ley (Arup, 2014). La impartición de justicia en la Ciudad de México deja mucho que desear, empezando por los ministerios públicos y la policía. Sin que los habitantes tengan la certeza de que la autoridad vela por su seguridad y que la ley se les impartirá adecuadamente, es difícil mantener el estado de derecho que permita desarrollar la resiliencia urbana.

Otro problema es que casi no se toman en cuenta medidas para reducir la contaminación del aire y la gestión de residuos, que son otros de los problemas más importantes que se presentan en la ciudad. Los planes existentes no se vinculan directamente con la Estrategia de Resiliencia, pese a que la Secretaría del Medio Ambiente es la encargada de estas problemáticas. La falta de integración de estas problemáticas puede evitar el desarrollo de la resiliencia en otros rubros de la ciudad, puesto que ésta se trata de un sistema íntimamente interconectado.

La Oficina de Resiliencia de la Ciudad de México considera al recurso hídrico como uno de los mayores problemas potenciales y actuales que tiene la ciudad. El documento reconoce que los acuíferos se están explotando de tal manera que en 30 o 40 años serán completamente insuficientes, mientras que compara a la ciudad con California por el riesgo de sequías graves que puede haber (2016). Una política hídrica debería estar en la prioridad de acciones del gobierno de la ciudad para mejorar las condiciones de los habitantes más desfavorecidos.

4. Infraestructura distribuida

Teoría de redes

Como ha sido analizado en el capítulo 1, el enfoque del metabolismo urbano de las ciudades implica su estudio como redes de elementos tanto físicos como abstractos íntimamente interconectados. Las relaciones entre estos elementos de las redes urbanas refleja la actividad socioeconómica de la población. Debido a esto, es de interés el estudiar de manera sistematizada el concepto general de redes y su comportamiento, así como su reacción ante eventos de diversa índole. Esto permite comprender mejor las características que inciden en la resiliencia de las grandes metrópolis del mundo.

Una red es un conjunto de elementos que se encuentran relacionados entre sí. Estas relaciones pueden tener una gran fuerza o intensidad, o por el contrario ser débiles. Los elementos se conocen como nodos y sus relaciones como conexiones. Estas últimas pueden ser tanto físicas como lógicas, con sentido dirigido o sin él. En muchas redes, las conexiones sirven como medios de difusión, donde los componentes transportados pueden ser físicos o tratarse de información. En cualquiera de los dos casos, la conexión tiene una capacidad para llevar una cierta cantidad de componentes a una tasa dada, llamada la capacidad de flujo (Borgatti y Halgin, 2011).

Muchos fenómenos físicos pueden ser modelados y estudiados a través de redes, y esta filosofía de análisis es fundamental en la teoría de sistemas. Algunos ejemplos de redes son la infraestructura pública urbana, como las redes de distribución eléctrica y de agua potable, la actividad metabólica, las relaciones entre especies en un ecosistema, las relaciones de interacción social entre individuos de un grupo, y el internet, por mencionar algunas. La ciencia de redes se dedica al estudio de las representaciones en redes de fenómenos físicos, biológicos y sociales para crear modelos predictivos de éstos (National Research Council, 2005).

Dentro de las redes, se pueden clasificar a los nodos por la cantidad de conexiones que tienen con otros. De esta forma, surgen nodos con gran importancia que se conocen como *hubs* (Berlingerio, 2011) (Figura 4.1a). De ahí surgen subgrupos dentro de las redes con un número dado de nodos que tienen una cantidad de conexiones mucho mayor entre sí que hacia el resto de los nodos externos. Estas agrupaciones se conocen como *clusters* (Jeyaratnarajah, 2006) (Figura 4.1b). Un *cluster* puede formarse a partir de un *hub* como centro o no tener ningún nodo principal definido.

La cantidad de conexiones entre nodos se define como la interconexión del *cluster* o de la red, y la importancia de un nodo se da a través de la medida de centralidad. Existe una miríada de medidas de centralidad; algunas dan mayor importancia a la cantidad de conexiones de un nodo con otros *hubs*, mientras que otras metodologías dan mayor importancia a la cantidad de *clusters* que un nodo conecta entre sí. Otra medida importante dentro de una red es la máxima trayectoria mínima, que se obtiene al obtener la mínima trayectoria que conecta a un nodo dado con cualquier otro

4. Infraestructura distribuida

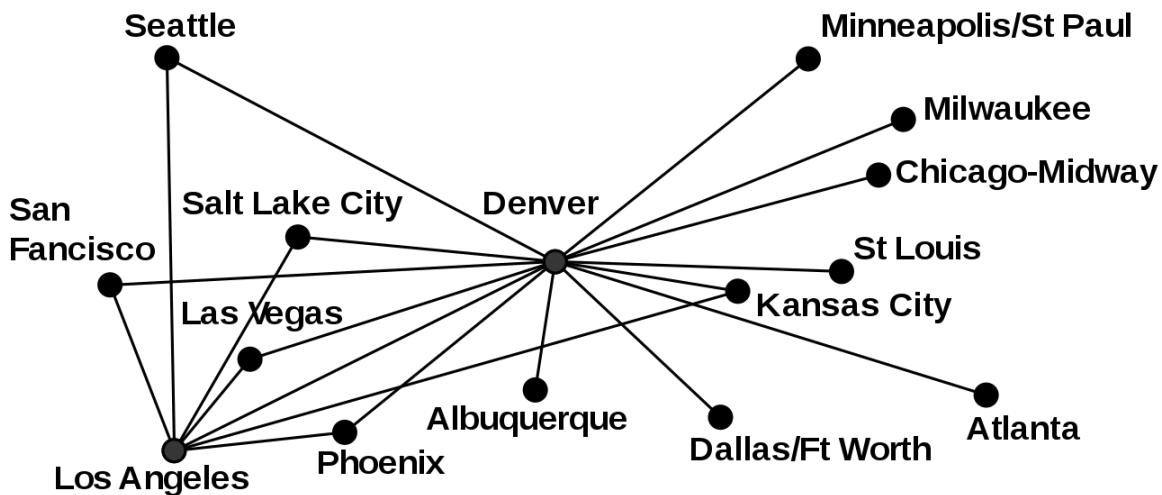


Figura 4.1a. Hubs dentro la red de aeropuertos de Estados Unidos
(Wikimedia, 2008a)

Los de Los Angeles y Denver cuentan con un número mayor de conexiones que el resto.

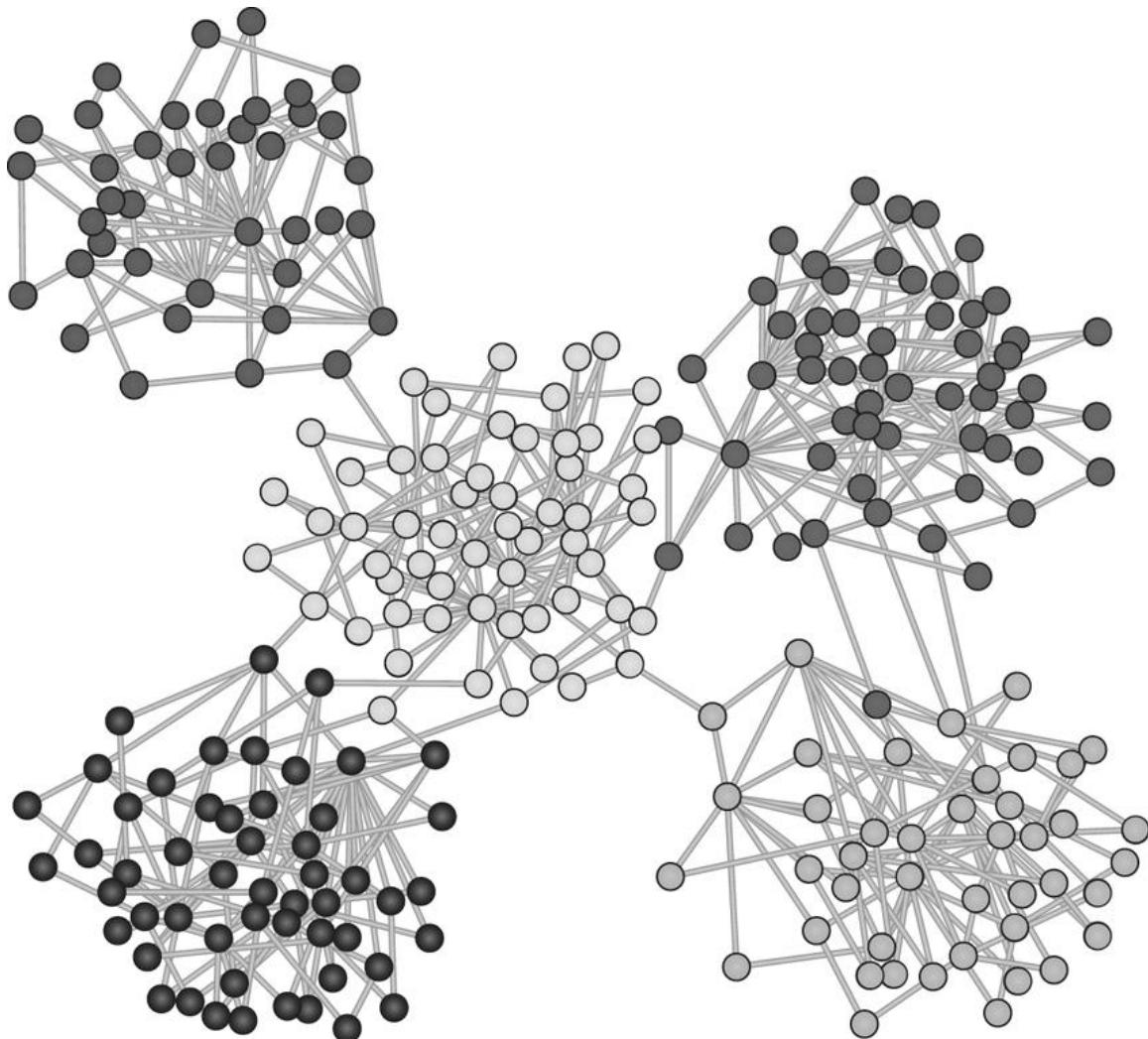


Figura 4.1b. Clusters en una red
(Müller y Hilgetag, 2008)

Cada tono representa un grupo de nodos altamente interconectados entre sí.

y buscar el máximo valor entre éstos. Este valor se llama el diámetro de la red y evalúa que tan amplia es o cuál es su extensión total (Habib, 2009).

La topología de una red es la clasificación de ésta de acuerdo al arreglo de las conexiones entre los elementos (Figura 4.2). Éste es un campo ampliamente estudiado en el ámbito de las tecnologías de la información, donde existen muchos protocolos para conectar un grupo de computadoras entre sí. La topología de una red influirá de manera fundamental en su comportamiento en condiciones estables y a su vez en condiciones inesperadas o de falla, y en última instancia en la resiliencia de la red (Gutfraind, 2012). La topología más sencilla se da entre dos nodos con una conexión directa entre sí, lo que evita elementos intermedios pero genera un punto único de falla. Para redes con múltiples elementos las topologías se vuelven cada vez más complejas. Las redes en bus cuentan con una sola conexión que comunica a todos los nodos entre sí, como si se tratase de un racimo. Las redes de agua potable a nivel de las tomas domiciliarias siguen este precepto, que da lugar a una importante eficiencia en la distancia total de las conexiones.

Cuando existe un *hub* que conecta a todos los nodos exclusivamente a través de él, se da una topología de estrella. Estas dos últimas clasificaciones tienen el mismo problema de puntos únicos de falla y la posibilidad de cuellos de botella a través del bus o del *hub* central. Una red en anillo es esencialmente una red de bus donde los extremos están conectados entre sí, lo cual agrega la ventaja de tener una trayectoria alternativa diferente en caso de disrupción de una conexión. La red más elaborada es la red de malla, donde todos los nodos están conectados entre sí, de tal manera que se tiene una gran cantidad de conexiones y caminos alternos, evitando la posibilidad de falla. Sin embargo, este tipo de redes son las más difíciles de administrar debido a su complejidad y rara vez son implementadas en forma pura, ya que el número de conexiones tiene una relación cuadrática contra el de los nodos, volviéndolas imprácticas para redes muy grandes. Existen redes con mallas incompletas donde no todas las conexiones posibles se presentan, y es posible combinar y anidar diferentes topologías para crear sistemas aún más complejos (Piumarta, 2018).

En el estudio teórico, se suelen analizar sistemas predecibles, con conexiones ya sea aleatorias o que sigan una ley definida (Frieze y Karónski, 2015). No obstante, en la vida real se presentan redes que combinan una parcialidad de ambas posibilidades, que además tienen una variación de sus características en dimensiones espaciales y temporales, que no tienen siempre límites bien definidos, que involucran procesos con incertidumbre y en donde no siempre se tiene información completa sobre su comportamiento ni de la totalidad o el detalle de los elementos que la conforman.

Es sumamente difícil el analizar con rigor matemático estas redes, dado que se trata de sistemas complejos altamente sensibles a los valores de inicio y de frontera, y una pequeña inexactitud en éstos o el no considerar alguna variable que podría parecer trivial, puede ocasionar que las simulaciones se alejen considerablemente del comportamiento real (Kellert, 1993). El estudio teórico de estos sistemas es aún un campo joven y fértil, y cada vez se desarrollan nuevas metodologías, entre ellas la ciencia de datos, que permiten comprender mejor el comportamiento de las redes.

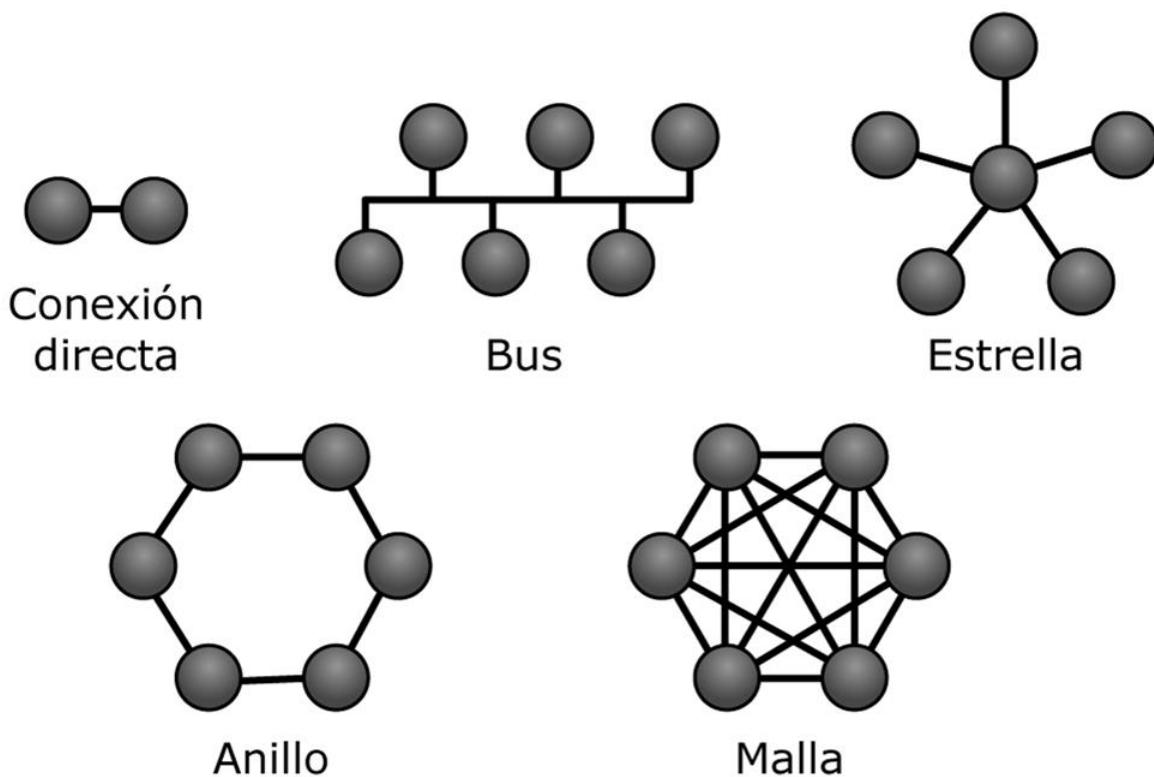


Figura 4.2. Topología de redes
Adaptado a partir de Wikimedia (2011)

reales y mediante procesos de calibración, el tener simulaciones con menores márgenes de error.

Comportamiento de redes

Uno de los problemas principales dentro del análisis de redes es el estudio de su comportamiento tanto estático como dinámico. En las redes de transporte, dentro de las cuales se ubican los diferentes servicios de la infraestructura urbana, es importante conocer las leyes que rigen la difusión de los insumos a través del medio de transporte. Puede ser conservativo, si el insumo inicial externo a la red se mantiene constante e inalterado hasta su salida de ésta, o no conservativo, si la operación real se aleja de esta idealización (*Newman et al.*, 2016).

Los insumos físicos no son tan líquidos, dinámicos ni volubles como las redes que manejan información abstracta, pero las complejas topologías de la infraestructura urbana, donde se tienen múltiples entradas y salidas, hacen que las características de los recursos varíen ampliamente a lo largo de todo el sistema. Por ende, es de suma importancia el considerar la variación y la transformación de los insumos a su paso por la red para conocer su comportamiento con mayor precisión. Como ejemplo, se puede dar la variación del contenido de cloro residual en el agua potable, o la necesidad del análisis fasorial en una red eléctrica para asegurar la sincronía y estabilidad del servicio a lo largo de áreas muy grandes.

Dentro de las redes de transporte también es importante la cuestión de su optimización. La conducción de los recursos implica un costo, por lo que se debe buscar la mayor eficiencia posible para minimizar las pérdidas. Dentro de sistemas discretos, como lo son las redes, la optimización es un problema complejo que no siempre se puede resolver de forma analítica (Halawa, 2016). Uno de los principales retos de los diseñadores y planeadores se presenta en el requisito de resolución de un problema que no se puede resolver de forma analítica, y en este caso se debe recurrir a la experiencia, a métodos empíricos y al método científico a través de prueba y error.

Si bien una red opera la mayor parte del tiempo bajo condiciones estables y predecibles, existen casos transitorios, de incertidumbre, o de alteración del servicio. Cuando al menos un nodo o una conexión dejan de funcionar, o tienen una disruptión y sus condiciones de operación se alejan de los rangos convencionales, se dice que se presenta una falla dentro de la red. Las fallas pueden ser localizadas, donde sólo un nodo o un *cluster* se ven afectados, o general, donde el problema tiene un alcance de toda la red. A su vez, la falla puede ser parcial, donde se altera pero no se detiene la operación, o total, cuando deja de funcionar la red o alguno de sus elementos.

La tolerancia ante la falla de un sistema determina su resiliencia. Dado que una red no se compone de sistemas aislados, una falla local suele extenderse y puede llegar a volverse general. El peor de estos casos es la falla en cascada. Cuando se presenta esta situación, un elemento individual falla debido a que su capacidad se ve superada. Posteriormente, si el resto de las conexiones están trabajando cerca del límite de su capacidad, se presentan fallas sucesivas cuando el flujo que transitaba sobre el elemento que falla se distribuye al resto de la red y hace que se supere la capacidad de estos componentes, y así sucesivamente hasta que se da una falla general total (Hines, 2008). Esto puede llegar a ser catastrófico, como ha sucedido en las redes eléctricas donde el problema puede empezar con algo tan sencillo como la falla de un solo transformador.

Otro tipo de falla menos dañina que la de cascada es la falla caminante. En este caso, se da una falla local por una excedencia de la capacidad, la cual se transmite y genera otra falla local adyacente. Cuando el problema se transmite al *cluster* aledaño, se libera la capacidad de la región original y desaparece la primera falla local. Sin embargo, la segunda falla local genera a su vez una tercera falla local antes de liberarse. De esta manera la falla se va recorriendo a lo largo de la red sin provocar un problema general, e incluso puede llegar a transitar múltiples veces por el mismo *cluster* antes de corregirse (Leskovec, 2007). Es este el caso de muchos *brownouts* y *rolling blackouts* en las redes eléctricas y de los tandeos en las redes de agua potable cuando se dan de manera intermitente y no planeada por los organismos operadores.

Existe otro tipo de falla que es el más difícil de detectar y de corregir. La falla bizantina se da cuando un elemento no opera de manera correcta pero reporta que sí lo está haciendo, o cuando algunos elementos de la red reportan que hay un problema pero otros no lo detectan (Driscoll *et al.*, 2003). Este tipo de problemas se presentan principalmente en las redes de información, pero conforme las redes físicas se vuelvan inteligentes al integrar el manejo de datos en tiempo real, se tendrá cada vez una mayor vulnerabilidad ante este problema.

4. Infraestructura distribuida

Muchas redes reales conviven entre sí con otras dentro de un marco espacial y temporal. Si bien se trata de sistemas que a primera vista pudiesen parecer aislados y no tener relación alguna entre sí, existen factores externos o incluso nodos internos que los pueden relacionar entre sí, provocando una fuerte interdependencia. Cambios en variables externas globales pueden afectar de distintas maneras a múltiples sistemas a la vez, teniendo complejos efectos generales. Además, la falla de un sistema puede también conllevar a la afectación de otros, provocando ciclos de reforzamiento positivo que dificultan el resolver las disruptiones originales. No se debe subestimar el efecto que puede tener la interdependencia de diferentes redes dentro de una ciudad, por lo que se deben estudiar estas relaciones para tener un mejor conocimiento del sistema global.

Resiliencia de redes

Se ha explicado ya en el capítulo 3 que existen diferentes acepciones del término resiliencia, dependiendo del contexto en el que se esté hablando. Sin embargo, se puede decir de manera común que las redes que presentan estas características tienen elementos que coinciden. La red debe estar bien diseñada, en el caso de los sistemas construidos, como la infraestructura, y debe operar de manera organizada y eficiente, en el caso de los sistemas naturales y sociales. La resiliencia de una red es función de la capacidad individual de cada uno de sus nodos y la fuerza de las conexiones que existen entre ellos, de la cantidad de conexiones que existen entre elementos, y la capacidad de estos elementos de modificar sus conexiones, construir nuevas y destruir las necesarias de acuerdo a las condiciones exteriores, que pueden llegar a ser altamente variables.

Un ejemplo se puede encontrar en la red social de una persona. Un individuo puede sobrellevar mejor su vida cotidiana y algún evento inesperado si cuenta con gran cantidad de conocidos aunque sea de manera superficial, tiene una cierta cantidad de amigos muy cercanos y de gran confianza, y si tiene la capacidad de socializar, hacer nuevos amigos y realizar *networking*, pero también para cortar relaciones y amistades tóxicas que le puedan afectar. Las neuronas dentro del cerebro actúan de manera similar. La capacidad de una persona depende más de la cantidad de conexiones presentes y de la sinapsis generada, que del número de neuronas, y se ha comprobado que después de un evento que involucre daño cerebral, se puede presentar el surgimiento de nuevas conexiones neuronales que inciden en la recuperación del paciente (Arias-Carrión *et al.*, 2007).

La resiliencia no es una cualidad en sí, sino que es consecuencia de otras características fundamentales presentes en una red que funcione adecuadamente, como la redundancia, la robustez, la flexibilidad y la integración de sus componentes (Arup, 2014). La redundancia se refiere a la existencia de las suficientes conexiones entre distintos nodos, tal que se generen múltiples rutas para conectar a dos nodos entre sí (Figura 4.3a). De esta manera, durante la operación normal de la red, existe una capacidad de sobra que es utilizada en caso de un evento de intensidad inusitada. Sin embargo, debe evitarse la redundancia innecesaria, porque representa un gasto considerable de recursos que nunca serán utilizados.

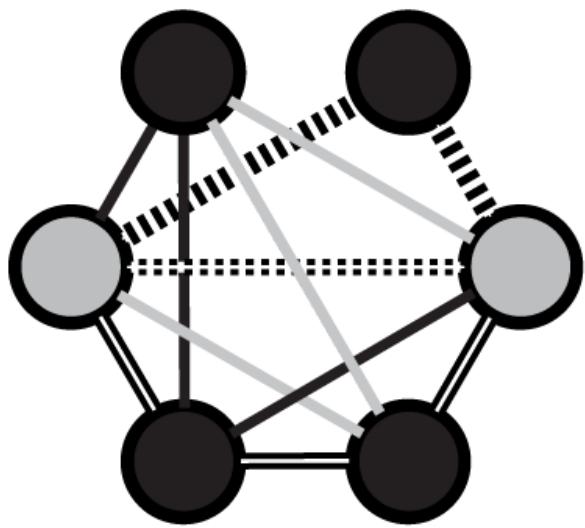


Figura 4.3a. Existencia de múltiples caminos en un sistema redundante
Modificada a partir de Wikimedia (2011)

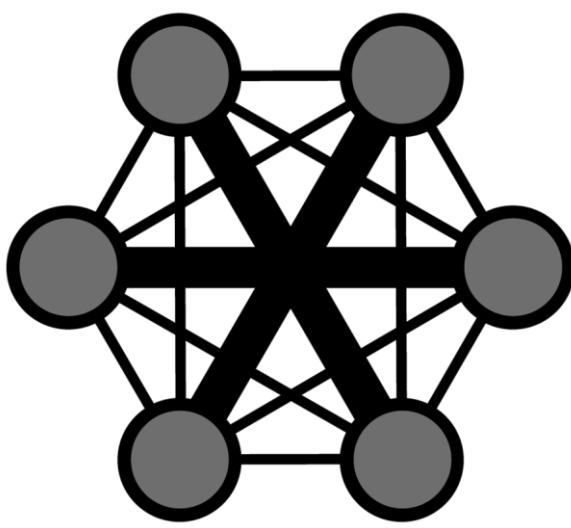


Figura 4.3b. Robustez en la red provista por sobrecapacidad planeada en conexiones importantes
Modificada a partir de Wikimedia (2011)

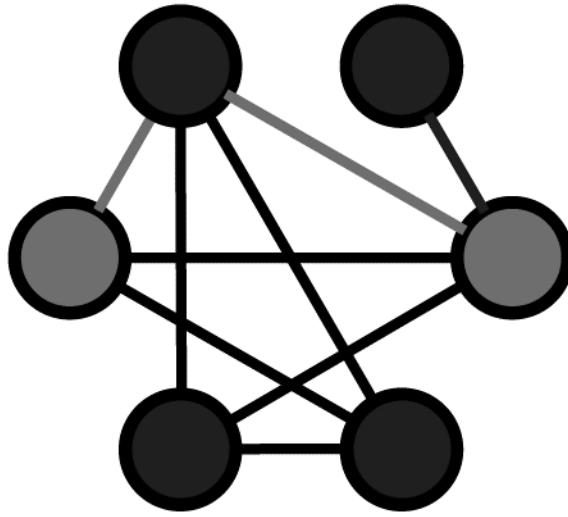
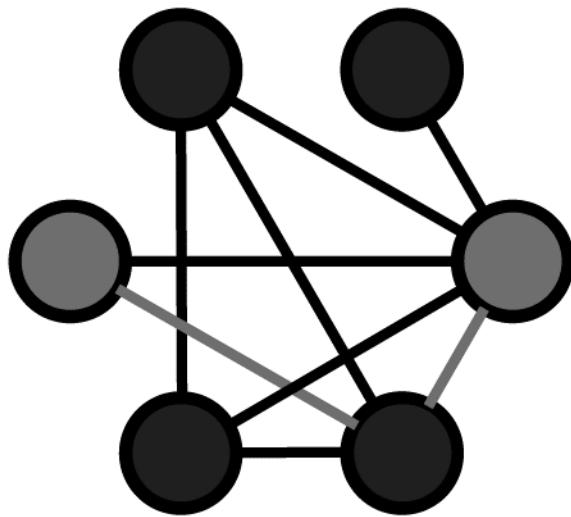


Figura 4.3c. Nuevos caminos creados en una red flexible tras disruptión de la ruta original
Modificado a partir de Wikimedia (2011)

La robustez se refiere a una capacidad suficiente de las conexiones para evitar que una ruta en particular se vea excedida durante sucesos extremos (Figura 4.3b). Para esto hay que reconocer la incertidumbre de los eventos externos, y tener suficiente información estadística para poder predecir adecuadamente la capacidad necesaria sin que los costos de la sobrecapacidad sean mayores a los de los daños. Esta es una filosofía fundamental en la ingeniería estructural, donde debe encontrarse un balance entre seguridad y costo (Meli, 1985). Por otra parte, una red flexible es capaz de modificar su operación para adaptarse a nuevas condiciones ambientales de forma eficiente al modificar sus conexiones para encontrar nuevas y mejores rutas para el transporte a través de sus elementos (Figura 4.3c).

4. Infraestructura distribuida

Por último, una red integrada funciona monolíticamente y con una organización unitaria. Esta organización puede ser central, como en el caso de los seres humanos que controlan la mayor parte de su cuerpo a través del cerebro, o descentralizada, como una colonia de hormigas o abejas, donde no existe un nodo que dicte instrucciones sino que más bien cada nodo individual tiene leyes de comportamiento hacia elementos exteriores y con respecto a otros nodos. Estas instrucciones son sencillas pero logran un comportamiento complejo a gran escala al combinar todas las acciones individuales (Ahmed y Glasgow, 2012). Existen incluso organismos macroscópicos compuestos por seres individuales unicelulares que han demostrado la habilidad de resolver complejos problemas computacionales y de transporte (Martini, 2011). Esto se logra a través de la optimización global del sistema.

La optimización del comportamiento individual de todos los componentes no representa necesariamente una optimización global, puesto que en el comportamiento ideal del todo es posible que haya subcomponentes que no funcionen a toda su capacidad, si eso beneficia a los otros elementos. Por esta razón, la integración de una red permite agregar el comportamiento de cada nodo para conseguir la mejor operación a gran escala (Moreno, 2009).

Una red resiliente ideal entonces será adaptable a cualquier falla que se presente de tal manera que no exista posibilidad de disruptión en la operación. Ante cualquier eventualidad posible, la red modifica su topología, sus conexiones y sus leyes de operación para seguir en funcionamiento dentro de intervalos aceptables. De esta manera no existen fallas en realidad, sólo periodos transitorios de estabilización de la red hacia nuevas condiciones de operación. Se comentó en el capítulo 3 que existen sistemas que son seguros ante la falla. Un evento que generaría una falla en un sistema convencional, únicamente provoca el cambio de un estado de equilibrio a otro dentro una red resiliente ideal.

Por el contrario, los sistemas humanos convencionales se diseñan para que fallen de manera segura. Cuando se presenta un evento que excede la capacidad del sistema, el sistema falla, pero no de forma catastrófica. Se cambia a un modo de operación de seguridad, donde o se disminuye la operación, generalmente en el rango bajo o incluso fuera de los estándares normales, o simplemente se mantienen exclusivamente las actividades vitales hasta que se reestablezcan las condiciones ambientales de operación aceptable. El funcionar dentro un modo de operación de seguridad es un lujo que los centros urbanos de la actualidad no se pueden dar, debido a su dinamismo y a la supervivencia de los millones de habitantes que dependen de los servicios básicos (Ahern, 2011).

Redes urbanas descentralizadas

Una población requiere de una gran cantidad de insumos para poder prosperar. Estos recursos suelen ser provistos por nodos centrales de generación o de transporte, tras lo cual se mueven a través de la red de infraestructura pública para llegar al usuario final. A partir del nodo de origen, las redes de infraestructura se abren de manera típica como un árbol jerárquico, distribuyendo los recursos en primera instancia a través de vías de gran capacidad que se ramifican a vías más pequeñas hasta

Suministro

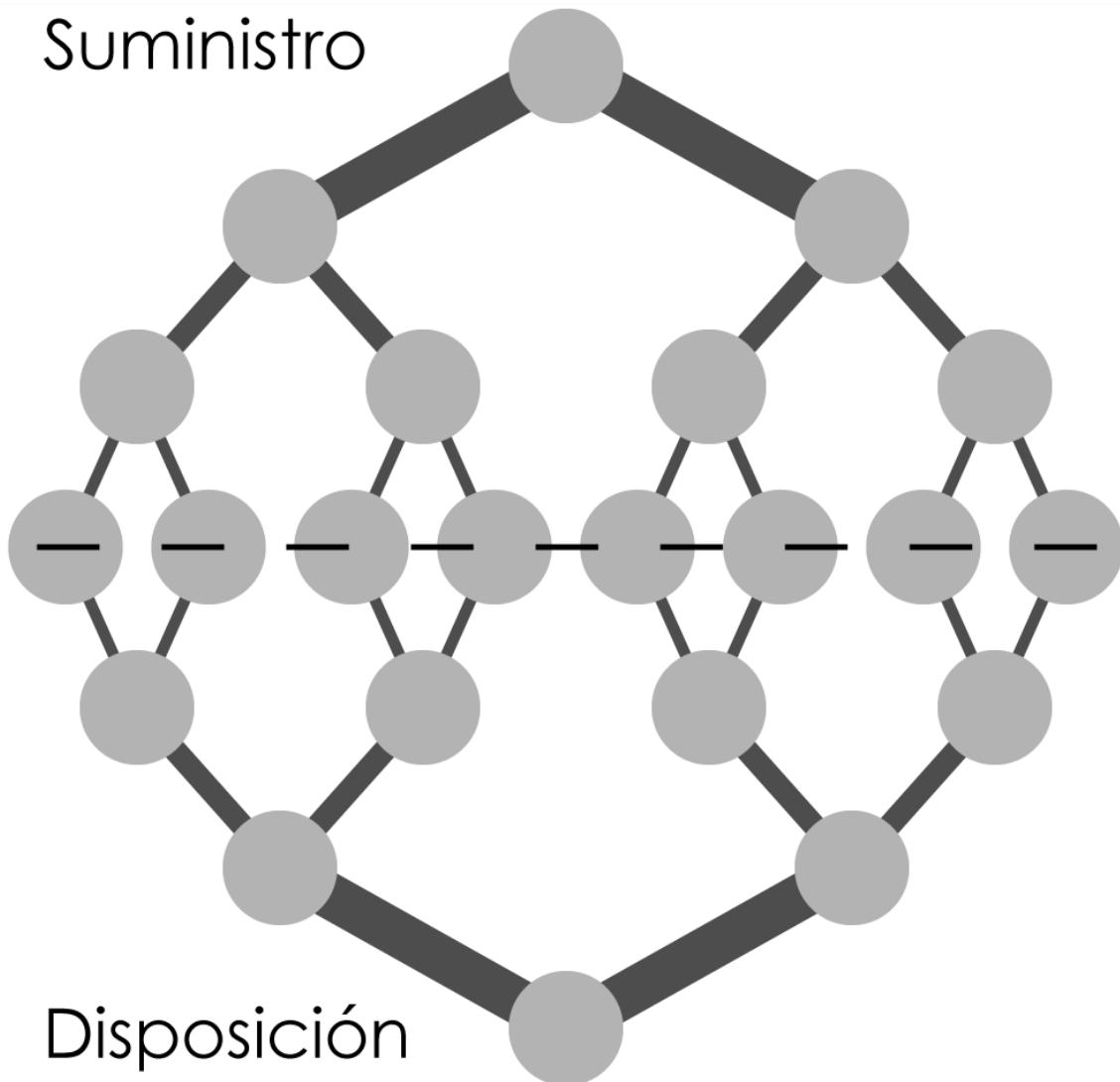


Figura 4.3. Topología típica de redes urbanas
(Wikimedia, 2006a)

llegar al usuario final. La misma organización se refleja de manera inversa en la distribución de las redes de recolección de residuos (Figura 4.4). Existen ciertos tipos de redes urbanas que cuentan con un mayor nivel de interconexión entre sus elementos, como las redes de agua potable, y la infraestructura vial. Ambas combinan la jerarquía con un sistema altamente mallado y permeable, lo cual genera gran cantidad de caminos alternativos, logrando que la red tenga un importante grado de redundancia, pero que a la vez exista una gran dificultad para tener control sobre la operación del sistema. En el capítulo 6 se comenta más acerca de la topología de la red de distribución de agua potable y su sectorización.

Otro tipo de redes como las de transmisión y distribución eléctrica presentan menos conexiones entre sus nodos, pero de igual manera cuentan con topologías similares a anillos para tener varias rutas y dar mayor resiliencia al sistema (Hines *et al.*, 2010). De cualquier manera, casi todos los sistemas urbanos dependen de

4. Infraestructura distribuida

nodos individuales de gran importancia, como la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco, que purifica casi toda el agua de la ciudad, o la planta potabilizadora “Los Berros” y el resto del sistema Cutzamala. Se ha podido comprobar la falta de resiliencia de la red de agua cuando es necesario hacer cortes en el sistema Cutzamala para mantenimiento, ya sea preventivo o emergente, y gran parte de la ciudad se queda sin agua (Aldaz, 2016). De la misma manera, se hizo evidente que el exceso de dependencia en el Emisor Central podría tener consecuencias catastróficas en caso de su falla, por lo que se decidió empezar la construcción del Emisor Oriente dado el deterioro del anterior (CONAGUA, 2012).

Todas las actividades de diseño de infraestructura urbana requieren un pensamiento sistémico en el que se definan las fronteras del problema, los elementos para solucionarlo, y su funcionamiento. La buena práctica en ingeniería contempla ya un funcionamiento adecuado ante eventualidades y la capacidad de rápida recuperación del sistema. Dentro de la planeación urbana se tienen también herramientas para crear políticas y tomar decisiones basadas en evidencia utilizando el método científico, las cuales se deben combinar con principios sociológicos, psicológicos y artísticos para lograr una adecuada convivencia del ser humano con su medio. Es importante el promover estas filosofías de diseño y contar con mecanismos que aseguren su aplicación en la planeación de la infraestructura urbana, así como con estructuras de gobierno que puedan asegurar la calidad de la implementación física del sistema.

El problema que se presenta al planeador es la proyección a futuro de las variables del sistema, tanto en el caso de la población, como en su uso de insumos y generación de residuos, y en las variables meteorológicas y su incertidumbre debido al cambio climático, así como la distribución espacial y temporal de estos factores y su afectación local y global dentro del sistema. Será importante también contar con un pensamiento holístico, considerando por completo al sistema urbano y tomando en cuenta las interacciones, muchas veces de un comportamiento no lineal, entre diferentes redes dentro de la ciudad. De esta forma, para poder incrementar la resiliencia urbana desde la etapa de planeación debe proveerse a los diseñadores y tomadores de decisiones con mayor información estadística, herramientas más poderosas de análisis de información, mejores modelos predictivos y nuevas metodologías para el análisis de las redes complejas y los resultados de las interacciones del sistema.

Se pueden obtener también los beneficios de la resiliencia urbana al cambiar el enfoque de funcionamiento de la infraestructura. En vez del método tradicional de construir cada vez obras más grandes de las cuales dependan cada vez más habitantes y cuya falla sea potencialmente más desastrosa aún, puede optarse por el desarrollo de elementos del sistema que actúen de forma puntual y distribuida. Así, en vez de tener una sola gran planta de tratamiento y una descarga al río Tula, se puede optar por tener múltiples plantas de menor tamaño y varios elementos que dispongan y reutilicen el agua *in situ*, con un menor costo y mayores beneficios locales, lo cual es discutido en los capítulos 5 y 6.

En el caso de la energía, tecnologías como los paneles fotovoltaicos permiten también una generación distribuida en cada hogar que tiene el potencial de eliminar el estrés excesivo de la infraestructura eléctrica y obtener una mayor eficiencia en el uso de la energía al disminuir las distancias recorridas, como se explica en el capítulo

7. Las grandes obras de infraestructura suelen tener tiempos de construcción largos y por ser proyectos particulares requieren una extendida planeación y diseño para ajustarse a las condiciones particulares de la ciudad.

La infraestructura distribuida consta por lo general de productos fabricados en serie, por lo que cada vez que se producen más partes se aprovechan las economías de escala para reducir costos y tiempos de producción. También, al tratarse de elementos genéricos y modulares, se crean sistemas altamente versátiles y adaptables a un amplio rango de condiciones de campo, por lo que su instalación, puesta en marcha y operación es más sencilla y su construcción más rápida (Ardani *et al.*, 2018). Tal es el caso de los paneles fotovoltaicos y las plantas de tratamiento compactas.

Cuando los problemas urbanos se parten en componentes más sencillos, resulta más fácil resolverlos. Es más fácil, por ejemplo, tratar el agua residual de un edificio, de una industria, o de una pequeña comunidad que vierta sus aguas al río Lerma, que proceder a limpiar la totalidad del cauce con una obra y en un solo paso. La infraestructura distribuida no propone soluciones inmediatas y totales a los problemas, sino que ataca un punto entre la mirada de los focos existentes. Es con el agregado de estas acciones a lo largo del tiempo con lo cual se pretende proveer los servicios necesitados por la población con mayores beneficios que con el uso de infraestructura centralizada.

En comunidades rurales y aisladas donde no existe infraestructura, es más sencillo y barato realizar pequeñas obras descentralizadas que extender los grandes sistemas urbanos y nacionales, tanto en el caso de la energía eléctrica (Engelmeier y Duby, 2017), como en el de las redes hidrosanitarias (Nelson, 2008). También se ha demostrado que la implementación de tecnologías distribuidas con planeación regional puede tener importantes beneficios en los grandes asentamientos del mundo para los casos de la infraestructura verde, tratada con detalle en el capítulo 6, y la generación distribuida con energías renovables, analizada el capítulo 7.

Este nuevo paradigma de los servicios es atractivo a su vez para los asentamientos irregulares, los cuales por su carácter ilegal no suelen contar con infraestructura pública centralizada de calidad, como se ha explicado con anterioridad en los capítulos 1 y 3. La dificultad de acceso, la falta de estado de derecho, los accidentes orográficos, y la vulnerabilidad geográfica de estas zonas dificultan aún más la provisión de servicios básicos, además que los proveedores privados y los gobiernos no están dispuestos a invertir las grandes sumas necesarias en una población que no paga impuestos y que no tendrá el consumo suficiente para generar un buen retorno de la inversión.

Las soluciones de bajo costo, y tecnologías de funcionamiento *in situ*, pueden ayudar a proveer servicios sin tener que conectarse a redes que no son compatibles con la configuración y situación de los asentamientos irregulares. A su vez permiten mejorar el nivel de vida de una gran cantidad de habitantes en un corto plazo, por lo que la implementación de la infraestructura distribuida en estas regiones puede ayudar dramáticamente en la resiliencia local y general de la ciudad.

4. Infraestructura distribuida

Sin embargo, existen riesgos ante la implementación de la infraestructura distribuida. Como se ha comentado en el caso de redes altamente malladas, se puede perder el control de la red. En el caso de las plantas de tratamiento, es más sencillo verificar la calidad del agua tratada de una gran planta que la de cientos de proyectos distribuidos en un área de gran tamaño. Esto se puede corregir si se da un incentivo para que quien trate el agua se interese en su calidad, al obligarlos a reutilizar esa agua tratada, por ejemplo.

La generación distribuida puede presentar problemas de estabilidad de la red eléctrica, principalmente de incrementos de tensión, distorsión armónica, y disminución del factor de potencia en redes de distribución. Se debe analizar la capacidad de cada circuito y tener lineamientos a cumplir por el generador distribuido (CFE Distribución, 2018). Como se puede ver, estos problemas se pueden resolver creando estructuras de gobierno y normas regulatorias robustas y organismos de verificación y cumplimiento confiables, para poder asegurar que la operación distribuida sea adecuada y segura para la población en general. Son necesarias también pruebas de concepto y experimentos urbanos para probar la factibilidad de la solución propuesta. Estos temas se analizan en el capítulo 10.

Otro punto en contra de la infraestructura distribuida que podría surgir es el costo mayor que existe por insumo o residuo manejado. Es más barato el metro cúbico de agua tratada cuando se genera en una planta como Atotonilco, que tratará más de 30 m³/s, que en una pequeña planta que trate tan sólo un centenar de litros por día. Lo mismo sucede con la generación de energía fotovoltaica en un sistema de un par de kW de una casa, que en un parque solar de varios MW. Se comentaron ya casos en que sucede lo contrario y no es más barata la infraestructura central. Otro punto que refuta este problema es que la infraestructura distribuida provee de servicios adicionales y auxiliares que ayudan a la estabilidad del sistema, lo que le confiere beneficios adicionales que no siempre son analizados en términos económicos. Este tipo de servicios se analizan para redes eléctricas en el capítulo 7.

Por otro lado, estas implementaciones tienen el potencial de reducir el impacto ambiental y la huella ecológica de las grandes ciudades un elemento a la vez, así como de reducir las externalidades que afectan a la población local. Como ejemplo, la verticalización de los centros urbanos y el aumento de la densidad poblacional traerán consecuencias negativas importantes en la calidad de vida urbana, pero la solución a estos problemas se puede encontrar en los mismos edificios que los generarían, tal como se trata en el capítulo 8. Es también importante hacer notar que el mejor funcionamiento de las redes descentralizadas será como complemento de una red central, ya que ambas pueden mejorar su eficiencia mutuamente.

Será necesario hacer mayores estudios y simulaciones técnicas y económicas para analizar en qué casos es más viable el uso de infraestructura centralizada, distribuida o una combinación de éstas. Es de esta manera como la infraestructura distribuida puede jugar un rol importante en el incremento de la resiliencia urbana y ayudar a facilitar su implementación en las ciudades con menores recursos para que puedan enfrentarse mejor a los retos e incertidumbres que depara el resto del siglo XXI.

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

Servicios ecológicos

El ser humano ha vivido en simbiosis con la naturaleza desde sus orígenes. A lo largo de los siglos, hemos aprendido a aprovechar los recursos de la naturaleza para el desarrollo de nuestras actividades socioeconómicas y culturales. De esta manera, hemos hecho que la naturaleza esté a nuestro servicio. Los recursos que hemos aprovechado se encuentran de manera natural en la tierra. Dentro de los ciclos de los ecosistemas se produce una economía circular; existen organismos que generan un recurso que es aprovechado siempre por algún otro. Además, la evolución ha logrado que los ecosistemas trabajen en conjunto con las fuerzas geológicas, aumentando la escala de las materias primas que se generan y reciclan. Estos beneficios que los humanos obtenemos de los ecosistemas y sus componentes se pueden denominar como servicios ecológicos, los cuales provienen de seres vivos pertenecientes a los cinco reinos.

Los servicios ecológicos nos proveen de una gran cantidad de beneficios para nuestra subsistencia, salud y actividades económicas. En 2006 se publicó un extenso reporte hecho por el Panel de Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. En este documento se presentó el primer tratamiento sistémico de los servicios ecológicos y se clasificaron en cuatro categorías. La primera clasificación corresponde a los servicios de soporte, que permiten a los ecosistemas el proveer servicios; se incluyen el reciclaje de nutrientes y la formación del suelo. A partir de éstos surge la segunda categoría, que son los servicios de aprovisionamiento, entre los que están la comida, materias primas, diversidad genética, agua y energía. Además existen servicios de regulación, como la polinización, la captura de carbono y regulación climática, la purificación y tratamiento de agua, residuos y aire, y el control de plagas.

Por último se encuentran los servicios culturales, que pueden ser de recreación, terapéuticos, uso en la identidad histórica, cultural y espiritual, y de descubrimiento científico y de educación. Estos últimos servicios ecológicos no siempre se consideran como tales porque si bien en este caso la naturaleza funge como influencia en nuestra cultura, nosotros le hemos dado un valor extrínseco, lo que sería análogo a la transformación de la materia prima por parte de la industria (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Es posible observar que el metabolismo urbano depende fundamentalmente de los servicios ecológicos para aprovisionarse de sus insumos, transformarlos y aprovecharlos y disponer de los subproductos. Estos servicios se encuentran de manera directa o indirecta en toda la cadena del metabolismo y debido a la gran concentración de seres humanos en los asentamientos urbanos, se requiere de ecosistemas que cubran considerables extensiones superficiales y cuenten con una importante biomasa. Dichos ecosistemas se pueden encontrar dentro de la gran área de influencia de la ciudad o incluso dentro de la frontera interna, indicando que se encuentran mezclados dentro del tejido urbano. En estudios más recientes, se ha encontrado

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

también que existe un gran valor de los ecosistemas para promover la resiliencia urbana y que mientras más se presenten los servicios ecológicos en calidad, cantidad y diversidad, se contará con una mayor resiliencia. A su vez, si los ecosistemas urbanos y sus servicios que nos proveen se ven comprometidos o degradados, se aumentará la vulnerabilidad de los asentamientos ante tensiones e impactos que podrían haber sido absorbidos o mitigados como parte de los servicios ecológicos.

Se ha estudiado ampliamente la función de los ecosistemas para mitigar impactos, como la disipación de la energía de las avenidas en ríos por parte de los ecosistemas riparios (Wang y Banzhaf, 2018). No obstante, es importante involucrar en la planeación urbana a los servicios ecológicos que ayuden a reducir las tensiones crónicas, como la purificación del aire por parte de la vegetación urbana (Jayasooriya *et al.*, 2017).

La urbanización cada vez genera una mayor presión sobre las áreas naturales y se espera que esto empeorará con el crecimiento poblacional y el aumento de la urbanización a lo largo del siglo XXI. La consecuente pérdida de servicios ecológicos generará fuertes problemas para las ciudades, y se tendrán consecuencias y afectaciones que pueden resultar en muchas pérdidas económicas. Deberá tenerse una nueva visión de desarrollo y planeación urbana para no comprometer los recursos de las generaciones futuras.

Afectaciones por pérdida de servicios ecológicos

Cuando una ciudad pierde sus áreas verdes y sus servicios ecológicos, se encuentra más vulnerable a diversos sucesos, como a la isla de calor urbano, a inundaciones, sequías, y a un empeoramiento de la calidad del aire. El suplir estos servicios ecológicos tiene un costo previamente inexistente de provisión y de mantenimiento. Esto es debido a que una de las características inherentes de los ecosistemas es que nos dan beneficios de manera prácticamente gratuita y que son autosuficientes.

La principal fuente de energía que mueve el motor biogeoquímico superficial de la tierra es la energía de la radiación solar que incide sobre la superficie terrestre. Tras entrar a la atmósfera, la radiación puede ser absorbida por las nubes y posteriormente transmitida de forma dispersa. Otra posibilidad es que incida directamente sobre el terreno, la vegetación o las estructuras antropogénicas, generando un incremento de su temperatura. Tanto en la superficie como en las nubes, existirá siempre una cantidad de radiación que se reflejará, mientras que parte del aumento de temperatura se perderá como radiación infrarroja. El equilibrio térmico resultante, y por consiguiente la temperatura del objeto, será dependiente de las características radiativas de su superficie.

Esta característica de reflectancia de las superficies terrestres se conoce como albedo, y la variación de éste de acuerdo a cada terreno explica en parte las diferencias climáticas geográficas. En los polos, como el hielo es esencialmente blanco, se tiene un albedo muy alto que permite expulsar el calor y mantener las bajas temperaturas. Por el contrario el océano tiene un albedo mucho más bajo, por lo cual ha absorbido la mayor parte del calor adicional que ha generado el cambio climático,

amortiguando temporalmente el incremento de temperatura de las plataformas continentales (IPCC, 2014a).

Las ciudades sufren un efecto conocido como la isla de calor urbano, donde las temperaturas promedio suelen ser unos cuantos grados centígrados más altas que en zonas aledañas rurales o naturales, un efecto que se hace mucho más notorio en la noche que en el día por la inercia de la disipación térmica. Las superficies producto de la ingeniería humana como el asfalto, cuentan con un albedo muy bajo comparado con zonas vegetadas o con suelo expuesto, por lo que absorben una mayor cantidad de radiación, aumentando la temperatura del aire en la vecindad. Un factor adicional es la gran cantidad de fuentes de contaminación térmica en las ciudades, como los gases de escape de los automóviles.

Muchas ciudades han visto un dramático incremento del efecto de isla de calor debido a una tala desmedida de árboles para la expansión de la infraestructura vial. Las consecuencias son un mayor consumo de agua per cápita, más casos de golpe de calor, una mayor tasa de evapotranspiración, la evaporación del agua en el suelo superficial antes de su infiltración subterránea, y un incremento en el consumo energético por la climatización de espacios. Se ha buscado resolver este problema con un mayor número de áreas verdes y con la instalación de pavimentos y superficies más claras y con mayor albedo (Buchin *et al.*, 2016).

El concreto y el asfalto tienen también la característica de ser prácticamente impermeables, contrastado con el suelo, que de acuerdo a sus características granulométricas, tiene valores variables de permeabilidad. En una cuenca natural, existe un porcentaje de la precipitación que se infiltra y recarga el acuífero, lo que se refleja en el coeficiente de escurrimiento. El resto de la precipitación llega a las corrientes para generar un gasto que varía estacionalmente de acuerdo a la temporada de lluvias, y al cual se han acoplado las especies del ecosistema fluvial y ripario. Por el contrario, en una cuenca urbana el suelo es remplazado por superficies impermeables. Dicha condición tiene varios efectos. En primer lugar se disminuye la capacidad de recarga del acuífero, mientras que se sigue extrayendo la misma cantidad de agua para el suministro de la población. Después, el pavimento guarda los contaminantes provenientes de automóviles, como gasolina y aceites, y la lluvia los transporta directo a las corrientes, sin un proceso de filtración previo por parte del suelo (Schueler, 2000).

Con mayores superficies impermeables, se generan grandes gastos en el drenaje y en las corrientes naturales. Lo primero puede ocasionar que en tormentas se rebase el sistema y se presenten inundaciones urbanas, que pueden llegar a ser de gran magnitud. Por su parte, si las plantas de tratamiento y las obras de descarga ven sus gastos máximos superados, se presenta una descarga de aguas residuales sin tratar directo al cuerpo de agua (Dong *et al.*, 2017). En las corrientes naturales, se modifica el hidrograma y se elimina el régimen de inundaciones periódicas, por lo que especies acostumbradas a períodos de gastos muy bajos y otros con gran flujo están en riesgo de desaparecer si no son capaces de acostumbrarse a la nueva condición más homogénea. Así se genera una cadena de pérdida de biodiversidad y ecosistemas, que a su vez incide en una pérdida de servicios ecológicos y un aumento de vulnerabilidad y disminución de resiliencia, que pone en mayor riesgo a aún más ecosistemas (Zommers *et al.*, 2014).

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

Cuando no se tienen los beneficios que proveen los ecosistemas, se debe construir infraestructura que tenga funciones análogas. Esta infraestructura de concreto, o infraestructura gris, se suele contrastar con la infraestructura verde o natural. Así, cuando no se tiene recarga del acuífero y salidas naturales en los manantiales, se deben construir acueductos, presas, obras de trasvase y pozos de infiltración. Si la precipitación no se infiltra, debe existir un drenaje pluvial y plantas de tratamiento por la falta de filtración del suelo y la contaminación del pavimento. En China incluso ya se están construyendo grandes filtros de aire que funcionan con energía solar porque la poca vegetación de las ciudades no es suficiente para purificar el aire contaminado producto de la actividad industrial y del sector transporte (Cyranoski, 2018). Esta infraestructura es muy costosa y como se mencionó, involucra impactos adicionales que se reflejan en mayor pérdida de los servicios ecológicos.

Infraestructura verde

El término de infraestructura verde se refiere a los sistemas físicos naturales que mediante los procesos de sus ecosistemas y los servicios ecológicos que nos proveen son de utilidad y juegan un rol importante en el metabolismo urbano de una ciudad. Se trata de un cambio de enfoque en cuanto al uso de las áreas verdes de una ciudad, ya que muchas urbes ya cuentan de manera inadvertida con infraestructura verde que les provee de servicios ecológicos sin que se hubiese considerado de tal manera. Puesto así, se trata de una filosofía de la planeación de infraestructura y del urbanismo donde un parque es mucho más que sólo un parque, ya que se trasciende de la función tradicional de recreación a otros usos que tradicionalmente son servidos por la infraestructura gris, o de concreto, sin pretender suplir a esta última, sino más bien trabajando de manera simbiótica para crear valor conjunto y de forma más eficiente.

La infraestructura verde puede encontrarse de manera natural en zonas no desarrolladas ni aprovechadas sustancialmente por el hombre, donde se preservan los ecosistemas y poblaciones saludables de flora y fauna. Estas regiones son cada vez más difíciles de encontrar, puesto que el 75% de la tierra firme del planeta se encuentra intervenida por el hombre, cifra que aumentará al 90% para 2050 (IPBES, 2018); además, el 30% de las reservas naturales en todo el mundo muestran deterioro y gran actividad y desarrollo por parte del ser humano (Jones *et al.*, 2018).

Sin embargo, siguen existiendo ecosistemas que proveen importantes servicios ecológicos, como los bosques que recargan el acuífero y filtran el aire; los glaciares que dan agua potable; los manglares que disipan la energía de tsunamis y huracanes; los arrecifes que sirven al mismo propósito y generan la arena natural de lugares como Cancún; humedales y pantanos, que filtran el agua, capturan CO₂ y regulan inundaciones; entre muchos otros. Gran cantidad de estos ecosistemas se encuentran fuera de las ciudades, pero son útiles y aportan al metabolismo urbano como nodos externos del sistema dentro del área de influencia de la ciudad. También se presentan en ocasiones dentro de la ciudad, como los bosques urbanos, ríos y lagos, humedales urbanos, y manglares y arrecifes en ciudades costeras.

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

Dentro de las ciudades también se han construido y planeado obras de infraestructura verde, que pueden ir desde una jardinera en una acera, pasando por un parque, hasta un desarrollo a nivel de cuenca o región. Cualquier área verde en la ciudad funge como infraestructura verde, pero hay diseños particulares multifuncionales que hacen más con menos espacio. Existen una gran cantidad de desarrollos que principalmente atañen al manejo de la hidrología y el drenaje urbano, pero también ayudan a purificar el aire y combatir la isla de calor urbana. Entre estos sistemas destacan la captación pluvial, donde se almacena *in situ* el agua de lluvia precipitada, se purifica y se reutiliza para riego o incluso para consumo humano (Figura 5.1a). En las azoteas verdes o naturadas se coloca sobre la losa una geomembrana, un dren artificial, un geotextil, y sobre esto un sustrato donde crece vegetación (Figura 5.1b). Dicha solución sirve para mejorar la envolvente térmica del edificio y para retener temporalmente agua de lluvia, así como para proveer un hábitat a pequeñas especies.

También existen jardines de lluvia, biofiltración o biorretención, que son pequeñas depresiones del terreno con un material permeable y gran cantidad de vegetación que ayudan en la filtración y tratamiento del agua, así como en la infiltración al acuífero y la evapotranspiración (Figura 5.1c). Los humedales artificiales imitan a sus símiles naturales con suelos saturados, especies vegetales semiacuáticas y la presencia o no de agua superficial. Pueden tratar incluso aguas negras mientras transportan linealmente el recurso hídrico (Figura 5.1d). Otra solución que ayuda principalmente a mitigar la isla de calor urbano es el dosel arbóreo o canopia urbana, que hace referencia a los bosques con altos árboles cuyas copas bloquean el paso de la luz. El plantar árboles a lo largo de camellones y banquetas puede generar este efecto refrescante en las ciudades y ayudar a crear corredores de vida silvestre para evitar la fragmentación de hábitats (CNT, 2010) (Figura 5.1e).

A veces también se incluyen elementos que no son necesariamente naturales, pero ayudan a la disminución de la contaminación o la recuperación de servicios ecológicos. Los pavimentos permeables ayudan a recuperar las características de infiltración de la cuenca urbana, alimentando a los acuíferos y disminuyendo gastos máximos de avenidas hidráulicas (Figura 5.1f). Las ciclopistas (Figura 5.1g), biciestacionamientos (Figura 5.1h) y otros elementos incentivan el uso de la bicicleta al generar un ambiente más seguro. Esto a su vez disminuye el uso del automóvil, lo que reduce la contaminación atmosférica y la de las superficies de la cuenca urbana.

La principal ventaja de la infraestructura verde, es que es multifuncional, económica, autosustentable y distribuida por naturaleza, lo que hace que cumpla con todos los objetivos de la infraestructura distribuida analizados en el capítulo 4 y ayude a desarrollar la resiliencia urbana. De acuerdo a la EPA, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, la infraestructura verde sirve para "*administrar el agua y crear ambientes urbanos más saludables*" (2016). A su vez, es útil para combatir el cambio climático, al disminuir el impacto de inundaciones, sequías, calor urbano y proveer protección ante el daño costero y la erosión, aumentar la provisión de agua y mejorar su calidad. Wang y Banzhaf identifican otras funciones, entre las que destacan: mantener la fertilidad del suelo, control biológico, polinización, diversidad genética, captura de carbono, calidad del aire, recreación y ejercicio, mejora de imagen,

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

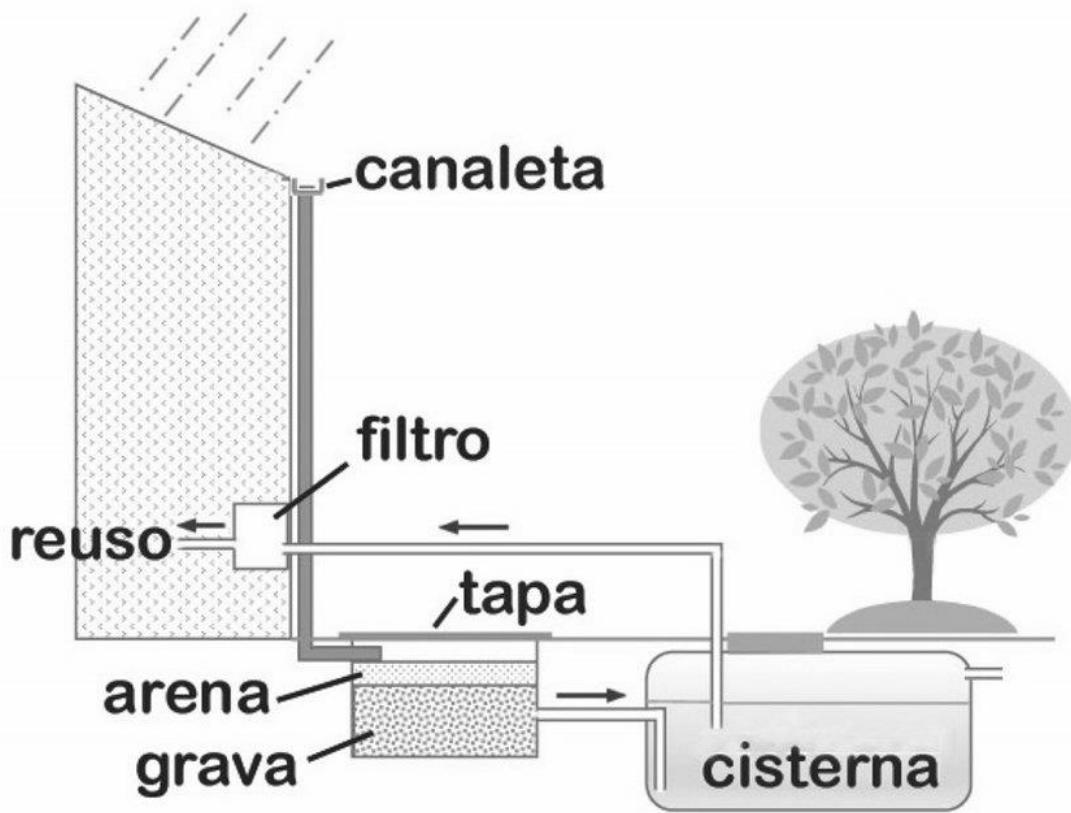


Figura 5.1a. Componentes de un sistema de captación pluvial
(Mélida y Rubio, 2014)

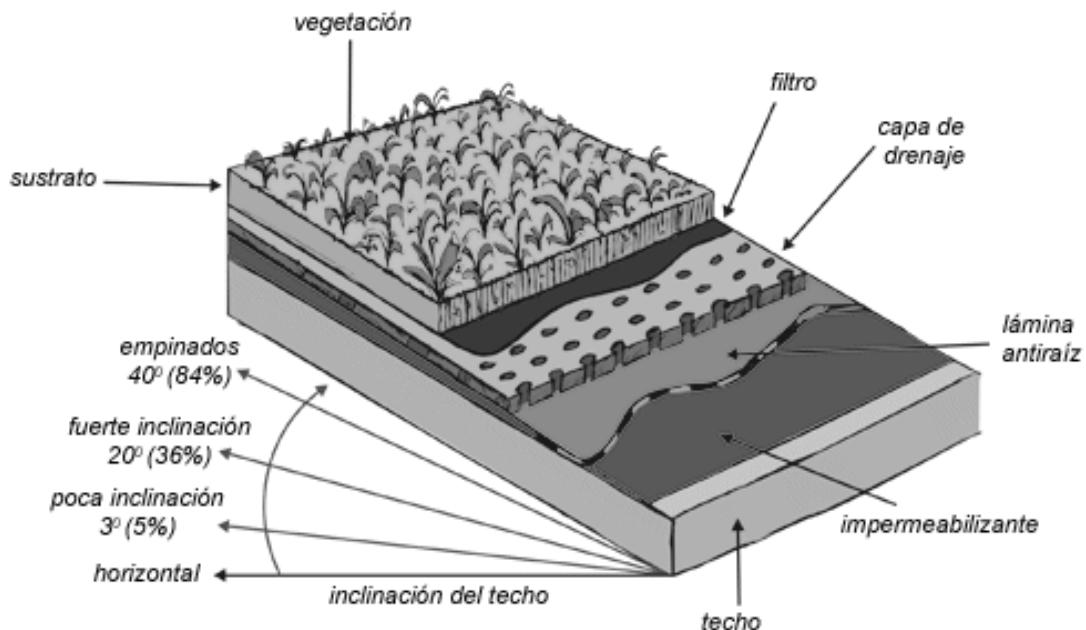


Figura 5.1b. Capas de una azotea verde
(CUBASOLAR, 2014)

JARDIN DE LLUVIA EN RESIDENCIAS

esquema de funcionamiento

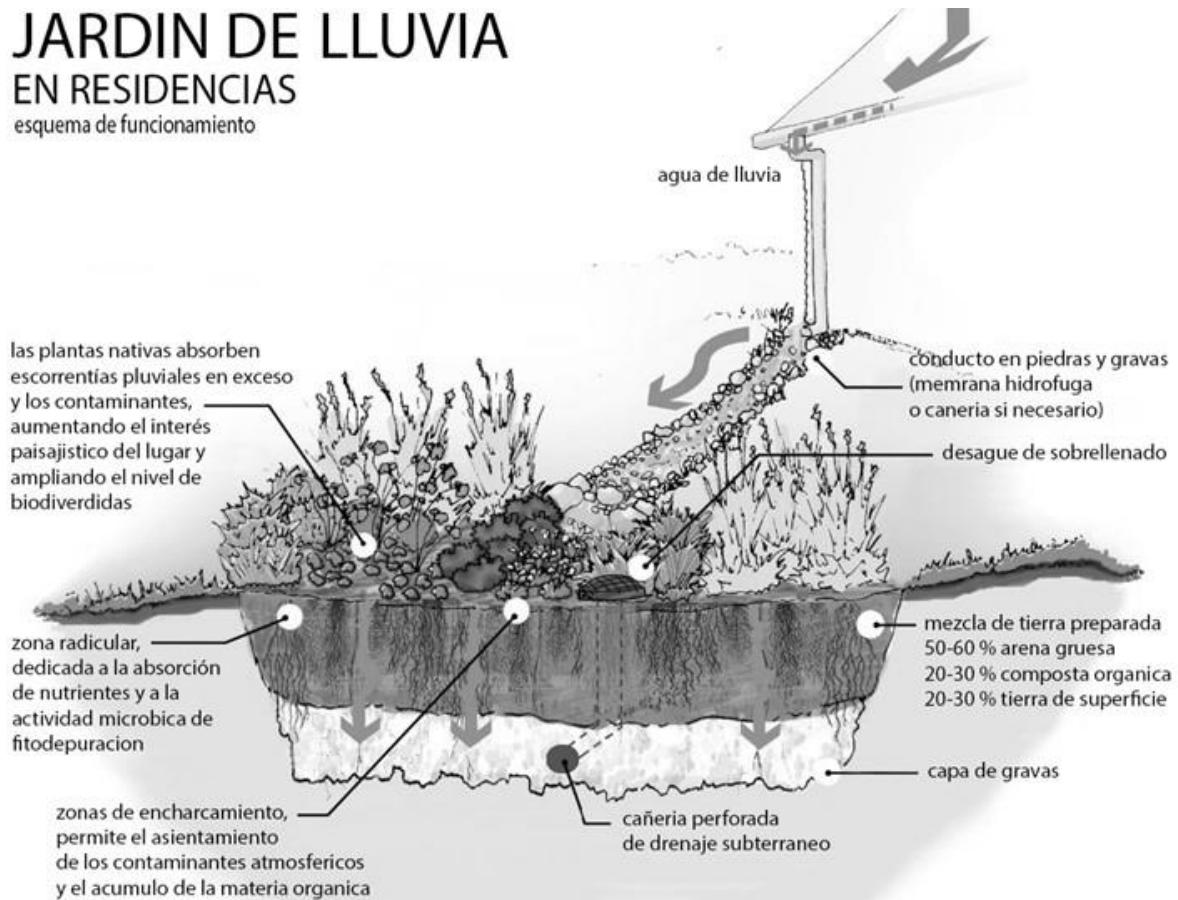


Figura 5.1c. Funcionamiento de los jardines de lluvia o biorretención
(Aragao, 2017)

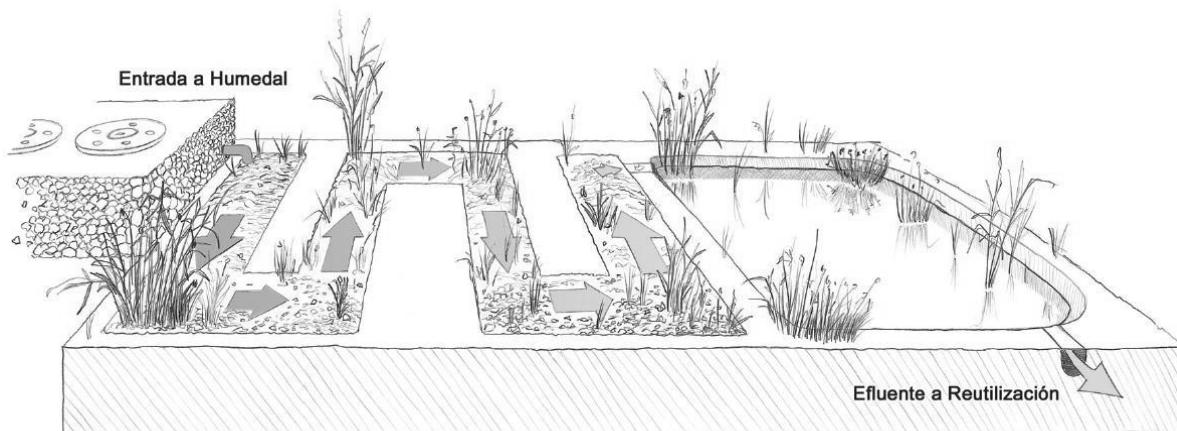


Figura 5.1d. Tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales
(Fuentes, 2011)

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos



Figura 5.1e. Dosal arbóreo en Seattle
(Kaplan y McClure, 2017)

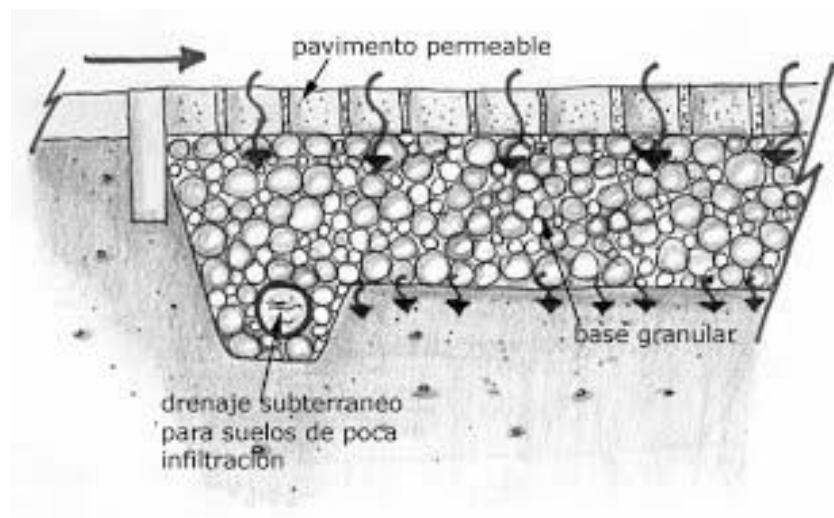


Figura 5.1f. Esquema de un pavimento permeable
(Universidad del Norte, 2018)

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos



Figura 5.1g. Ciclopistas en Silicon Valley
(Silicon Valley Bicycle Coalition, 2017)



Figura 5.1h. Biciestacionamiento en la Ciudad de México
(Manuel, 2014)

En ciclopistas y biciestacionamientos se puede aprovechar el espacio disponible en planta y la poca carga que recibe el suelo y el pavimento para combinar esta implementación con otros tipos de infraestructura verde, como el pavimento permeable.

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

empleo e inversión, turismo, investigación, educación, y valor histórico (Wang y Banzhaf, 2018).

La multifuncionalidad de algunos de estos espacios, como los parques, se pudo observar en la Ciudad de México durante el sismo de 2017, cuando estos lugares reivindicaron su valor social, volviéndose centros de acopio, de organización y de refugio.

Es importante hacer notar que existe infraestructura verde de buena y mala calidad, así como bien conservada y en estado de deterioro. Esto afecta negativamente a la provisión de servicios ecológicos y la capacidad de autosustentabilidad del sistema. Por ello es importante planear adecuadamente los proyectos desde su concepción, generar una estrategia de operación y mantenimiento aunque los requisitos sean menores que en la infraestructura gris, asegurar fondos para el ciclo de vida del proyecto, e involucrar y educar a la población en una cultura de la preservación de la infraestructura verde. Además se deben generar los mecanismos legales para la protección de las áreas verdes, porque muchas veces los funcionarios públicos consideran a estas zonas como espacio desarrollable gratuito. El marco legal adecuado, junto con una población empoderada y que se sienta responsable por la infraestructura verde, puede crear los movimientos ciudadanos necesarios para su protección, también conocidos como *grassroots movements* por su surgimiento de abajo hacia arriba en la pirámide política y social, análogo al crecimiento de una planta (Foweraker, 2001).

Infraestructura verde en la Ciudad de México

La Ciudad de México cuenta con grandes extensiones de terrenos y ecosistemas que proveen servicios ecológicos fundamentales para la población. Sin embargo, una gran cantidad de esta infraestructura verde natural se encuentra amenazada por la presión de la urbanización, fenómeno que se acrecienta por la corrupción en la ordenación territorial y la falta de protección de las áreas naturales protegidas y las reservas naturales. A lo largo del poniente y el sur de la Ciudad de México, del occidente del Estado de México y del norte de Morelos existe una zona con geografía accidentada, suelo permeable no saturado y un ecosistema de bosque templado que se conoce como el Bosque de Agua. Toda esta región es fundamental para el abastecimiento de agua potable de la capital debido a que es la principal fuente de recarga del acuífero del Valle de México. Esta región se encuentra comprometida por la deforestación, la erosión del suelo y por la contaminación de los cauces de agua (Greenpeace, 2006).

El gobierno de Nueva York tiene uno de los servicios de agua potable más puros de Estados Unidos, y para lograr esto la administración invierte fuertemente en la preservación de los ecosistemas que proveen el recurso, lo que permite que se destine poco dinero al tratamiento de agua (Hu, 2018). De manera similar en la Ciudad de México, el cuidar del Bosque de Agua nos daría grandes ahorros en tratamiento y bombeo de agua.

Los remanentes del Lago de Texcoco en el oriente de la ciudad también aportan gran cantidad de servicios ecológicos. Al tener la cota más baja del valle, la reserva

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

funciona como un vaso de regulación y almacenamiento de avenidas hidráulicas, además de aportar humedales que purifican el agua, sirven de hábitat para aves migratorias y evitan la dispersión de partículas finas provenientes del suelo. Otras regiones muy importantes para la recarga del acuífero son el Pedregal de San Ángel, Xochimilco y Milpa Alta, y los cerros de la Estrella y de Guadalupe. Estas zonas a su vez, también tienen riesgo por la creciente urbanización, la pavimentación del terreno y los asentamientos irregulares.

La zona centro de la cuenca del Valle de México no presenta condiciones ideales para la construcción de proyectos de infraestructura verde; los principales factores limitantes son el suelo arcilloso, que cuenta con muy baja permeabilidad; el alto nivel del manto freático, que requiere de grandes cargas hidráulicas para lograr la presencia de un flujo subsuperficial; y la escasez de agua, que dificulta la irrigación en la larga temporada de sequía. Factores que aminoran estos defectos son la presencia de lentes de arena a profundidades medias que podrían facilitar la infiltración y el hecho de que toda la arcilla se encuentra totalmente saturada, lo cual evitaría problemas por suelos expansivos parcialmente saturados. En las zonas de lomeríos se facilita mucho más la infiltración del agua por la presencia de arenas y roca volcánica altamente porosa.

La Ciudad de México es ideal para la implementación de proyectos de infraestructura verde, debido a que los principales problemas que presenta pueden ser atacados por un enfoque de preservación de la naturaleza y de los servicios que nos provee. No es necesario tener grandes proyectos puntuales, e incluso puede llegar a ser más barato y eficiente el tener pequeñas implementaciones de manera distribuida a lo largo de la ciudad. En las zonas con terreno del tipo I se deben tomar grandes medidas que faciliten la infiltración. En la franja de Santa Fe – Interlomas – La Herradura en el poniente de la ciudad existe la mayor cantidad de condominios y calles cerradas de todo el planeta (Giglia, 2015). Estas vialidades tienen muy poco tránsito vehicular pesado, por lo que son ideales para la implementación de pavimentos permeables.

En la zona del Pedregal de San Ángel, por el contrario, debe buscarse regresar a los ecosistemas originales mediante el xeripaisajismo, que involucre especies vegetales locales que requieran poca agua de riego o estén acostumbradas la estacionalidad natural de las lluvias en la región. Aquí debería buscarse levantar el césped y el suelo que de manera antinatural ha sido traído y regresar al paisaje de tierra volcánica y malpaís originario.

Por otra parte, en el lecho del antiguo lago, se debe buscar almacenar agua para abatir el hidrograma del drenaje, ralentizarla, filtrarla, y tratarla mientras se transporta. Se puede adoptar a gran escala la presencia de humedales en las jardineras a lo largo de las banquetas para servir a estos propósitos. Además, debe buscarse eliminar los incentivos negativos que puedan existir para la adopción de azoteas verdes. Por el contrario, debe promoverse su utilización o incluso normarlo, como se discute en el capítulo 8. Lo mismo aplica para muros verdes, siempre y cuando tanto para estos desarrollos como para las azoteas verdes se obligue a seguir los principios del xeripaisajismo, la creación de hábitat para polinizadores utilizando una variedad de plantas que aseguren una cubierta floral todo el año, y la prohibición del uso de césped y del riego con agua potable (UMD Extension, 2001).

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

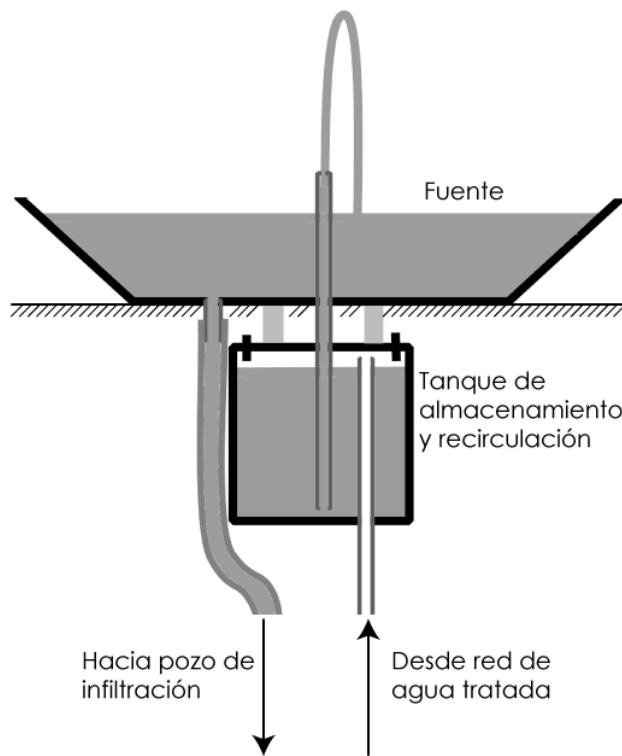


Figura 5.2a. Fuentes como pozos de infiltración.

Modificado a partir de Young (2008)

El pozo de infiltración se encuentra oculto, debajo de la fuente.

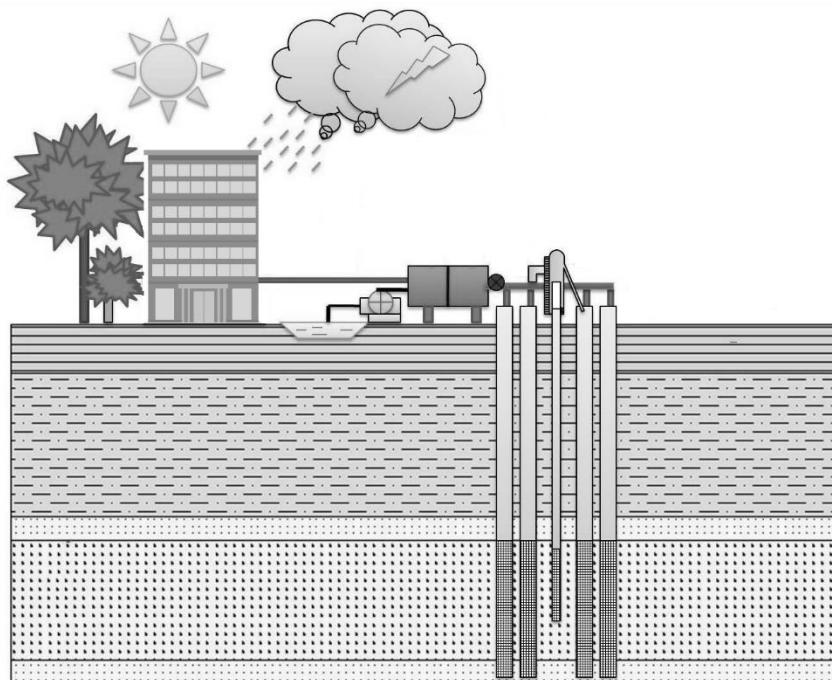


Figura 5.2b. Edificios con pozos de infiltración integrados

Modificado a partir de Hasan (2015)

El pozo de infiltración puede ubicarse directamente debajo del edificio, para ahorrar espacio en un entorno urbano.



Figura 5.2c. Parque que funge como tanque de tormenta en Rotterdam, Países Bajos
(Keeton, 2014)

La cancha de *basketball* de este parque se encuentra dentro de una ligera depresión. Cuando llueve, cambia su función hacia un cárcamo de almacenamiento pluvial.

Se debe aprovechar donde sea posible la existencia de lentes de arena para favorecer la infiltración. Los pozos de extracción abandonados que existen a lo largo de toda la ciudad deberían convertirse en pozos de infiltración (Santoyo *et al.*, 2005), y también se pueden construir más pozos que infiltrén agua tratada aprovechando otros elementos del paisaje urbano para evitar el uso de más espacio, como sería el caso de las tantas fuentes sin usar que hay a lo largo de la ciudad (Figura 5.2a). Existen ya desde 2011 propuestas en SACMEX para instalar pozos de infiltración en las pilas del segundo piso del periférico, aprovechando la diferencia de altura que ya se tiene, pero no han llegado más allá de una etapa de planeación temprana (Roya-
celli, 2011).

Además, en los rascacielos y otros edificios altos de la ciudad, se pueden instalar sistemas que traten el agua gris por cada cierto grupo de pisos y la agreguen a un sistema de infiltración, lo que reduciría la necesidad de disipación de energía en la evacuación de agua y el uso de energía en bombeo para infiltración (Figura 5.2b). En este caso, el principal reto será el evitar daños por golpe de ariete en los puntos cercanos a la profundidad de desplante del edificio, así como el estudio de las posibles afectaciones de un flujo subterráneo en la vecindad de la cimentación. Por otra parte, hay que buscar aumentar los espacios como parques y estadios que puedan almacenar grandes volúmenes de agua durante eventos de tormenta, como se hace en Holanda para reducir la carga del sistema de drenaje (Rotterdam Network Exchange, 2015) (Figura 5.2c).

El diseño e implementación de infraestructura verde es aún incipiente en la ciudad. Existe un puñado de proyectos específicos de este tipo, entre los que destacan

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos



Figura 5.3a. Ecoducto, parque lineal sobre Viaducto Río la Piedad, CDMX (MEDM, 2018)

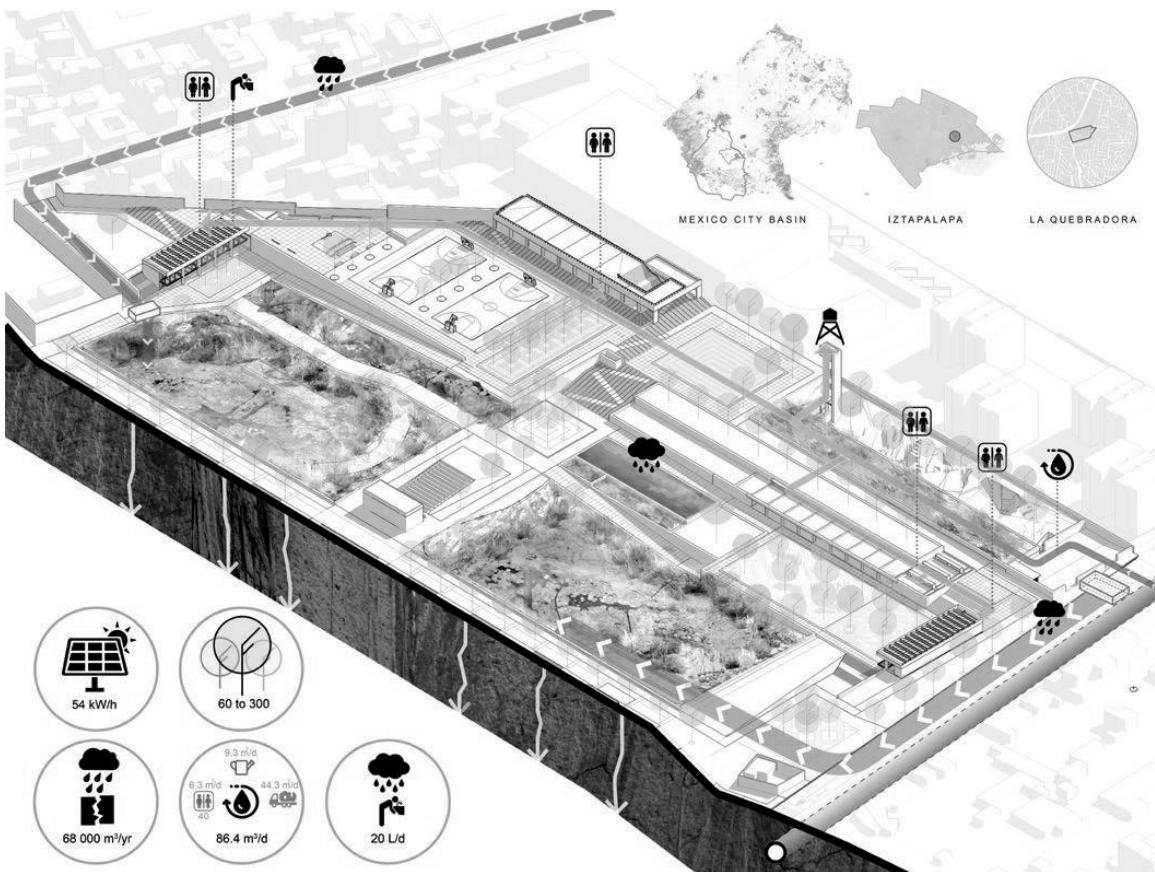


Figura 5.3b. Parque hídrico la Quebradora, Iztapalapa, CDMX (Perló y Castro, 2017)



Figura 5.3c. Abandono de parque lineal la Viga, enero 2018
(Villa, 2018)

el Ecoducto y el Parque Hídrico la Quebradora, ambos con el agua como eje principal. El Ecoducto se localiza sobre el entubado del Río Churubusco, en cuatro tramos al oeste de insurgentes. Consiste en un parque lineal con humedales para el tratamiento de una fracción de las aguas residuales que circulan por debajo; también busca proveer un hábitat para especies urbanas, principalmente insectos polinizadores (Licona, 2018) (Figura 5.3a).

El Parque Hídrico la Quebradora se encuentra en los lomeríos de Iztapalapa y su principal función será la de ayudar a la retención, filtración, e infiltración al acuífero de la precipitación. Este proyecto a su vez ganó el premio Holcim LaFarge por la innovación de su enfoque, ya que gran parte del agua potable de la zona se obtiene por extracción del subsuelo (Perló y Castro, 2017) (Figura 5.3b). Ambas iniciativas tienen además una visión social. Ayudan a aumentar la cantidad de áreas verdes, sobre todo en regiones donde hay muy pocos metros cuadrados por habitante, lo cual fomentará la participación, la cohesión social y la salud de la población. Existen otros proyectos como el Parque Bicentenario en el terreno de la antigua refinería 18 de marzo y el aumento gradual de las estaciones del sistema Ecobici y las ciclopistas a lo largo de la ciudad.

Hay también, sin embargo, algunos casos de fracasos en la ciudad. Se generó el Proyecto del Parque Lineal la Viga, que contaba también con tratamiento de agua y almacenamiento para evitar inundaciones. El parque se empezó a construir y debió terminarse para 2017, pero en la actualidad la obra inconclusa se encuentra en el olvido (Navarrete, 2018) (Figura 5.3c). Factores que influyeron en la falla fueron la

5. Infraestructura verde y servicios ecológicos

corrupción, la falta de interés por parte del gobierno y el no incluir en el proceso de diseño e implementación a la población aledaña directamente beneficiada por el proyecto. Otras propuestas se han vendido como infraestructura verde, pero han escondido una intención comercial que ha generado un rechazo por parte de la población, como el Parque Lineal Chapultepec y la Gran Rueda de la Fortuna que se iba a construir en un terreno abandonado de la primera sección de Chapultepec. Además los pulmones de la ciudad como el Bosque de Chapultepec se encuentran en riesgo, con grandes obras en las Lomas y en Reforma comiendo lentamente el área de esta zona, donde existen también terrenos abandonados en litigios por megaproyectos, como el antiguo acuario y delfinario de la 3º sección (Madrigal, 2015).

Las barrancas del poniente del Valle de México se encuentran altamente contaminadas y cada vez más afectadas por la urbanización, sobre todo en los municipios de Tlalnepantla, Naucalpan y Huixquilucan y en las alcaldías de Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Tlalpan (INE, 2007). Otros proyectos no han tenido el éxito esperado, como los proyectos de calles completas que incluyen el carril combinado de bicicleta y autobús, sobretodo porque los usuarios tienen miedo de andar en bicicleta al lado de unos choferes percibidos como malos conductores (Ornelas, 2017). El éxito de la implementación de la infraestructura verde en el futuro dependerá en gran medida del control que se logre ejercer sobre el desarrollo urbano. Si no se adopta con la premura necesaria, se deberá invertir una cantidad mucho mayor en la infraestructura gris que supla estos servicios.

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

Abastecimiento tradicional y problemáticas

Un sistema de abastecimiento de agua potable se compone de una obra de captación, tratamiento y purificación, de la conducción, almacenamiento, distribución, y sistemas auxiliares, como cárcamos de rebombeo y tanques de regulación de presión (Figura 6.1). La obra de captación obtiene de manera directa el agua a partir de su fuente, ya sea un lago, río, manantial, o acuífero. Las obras pueden ser canales de toma, presas, obras de rebose para manantiales, pichanchas en lagos, o pozos para extracción del agua subterránea. Después existe la línea de conducción, también referida en ocasiones como acueducto, que es una tubería que transporta el agua de un lugar a otro, por lo que solo tiene una entrada y una salida, y se procura que funciona a conducción por gravedad.

El agua debe ser tratada para cumplir con las normas pertinentes de agua para consumo humano, y para esto se tienen plantas de potabilización, que usan procesos químicos para flocular y sedimentar los contaminantes y para eliminar posibles patógenos con cloro, ozono, o rayos ultravioleta. La planta de potabilización puede estar junto a la obra de captación, junto al tanque de almacenamiento, o en un punto intermedio, dependiendo de las condiciones geográficas locales.

Para que las casas puedan disfrutar de un suministro adecuado, se utilizan tanques de almacenamiento, que tienen la función de proveer presión en la red independientemente de la presencia de energía eléctrica. También sirven para tener un volumen almacenado en caso de disrupción de los componentes anteriores o de que se requiera un gran volumen de agua en poco tiempo, como para combatir un incendio urbano. A partir del tanque de almacenamiento el agua entra a una malla de tuberías que transportan el agua a cada consumidor. La red de distribución suele tener una jerarquía donde existen tuberías primarias de mayor diámetro y secundarias con gran cantidad de tomas para uso particular. Si existen muchas diferencias topográficas, pueden existir cárcamos de rebombeo para alcanzar mayores alturas o distancias, o tanques rompedores de presión para evitar presiones muy altas en zonas bajas. También se pueden utilizar tanques de regulación para amortiguar una demanda o una oferta variable (César, 1994).

En las grandes ciudades como el Valle de México, las redes de abastecimiento son altamente complejas por su dimensión y la cantidad de componentes con los que cuentan. Además, se tienen problemas presupuestales, lo que conlleva a una falta de mantenimiento adecuado que, aunado a la antigüedad de ciertos componentes, se presenta como una gran cantidad de fallas en el sistema. De acuerdo con datos oficiales, hasta el 40% del agua potable en la Ciudad de México se pierde por fugas y tomas clandestinas (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016). Casi toda la red tiene problemas de presiones insuficientes y eventuales faltas de agua, por lo que todos los usuarios instalan cisternas o tinacos para sortear esta problemática. Existen zonas, sobre todo en el oriente de la ciudad, donde el agua no está disponible en la red

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

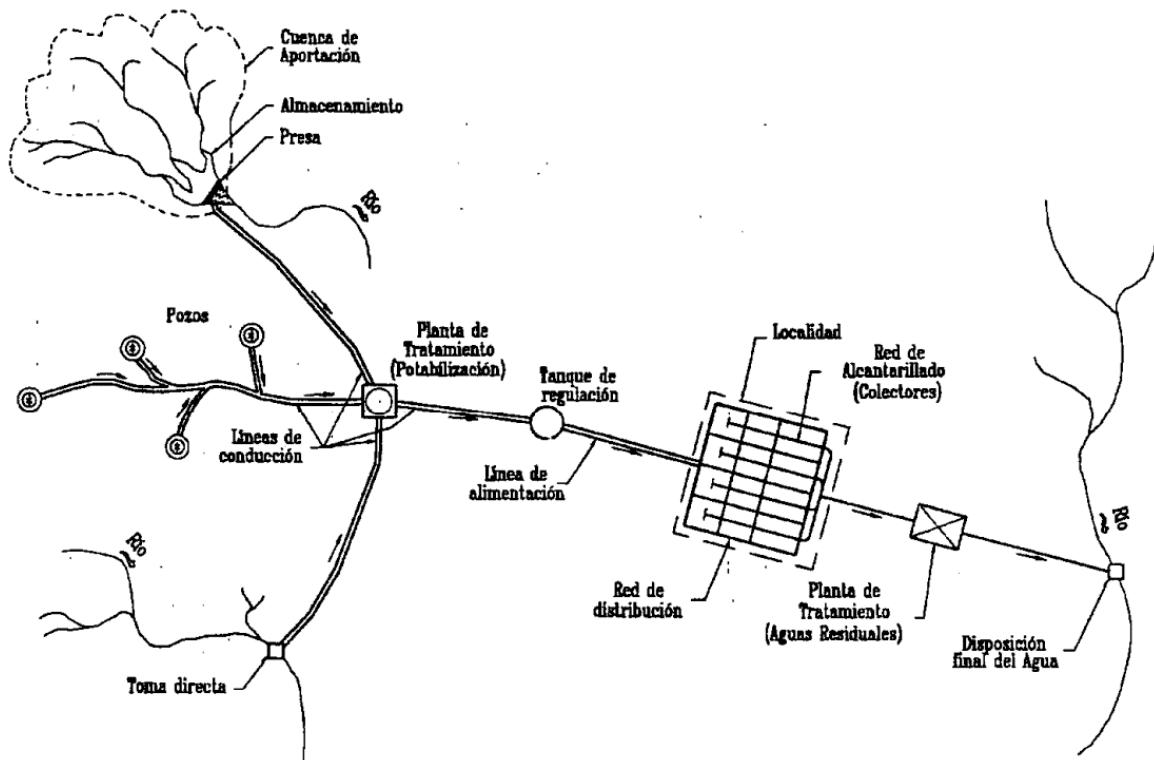


Figura 6.1. Sistema de abastecimiento de agua potable
(Madrid Poceros, 2014)

durante todo el día. Incluso en muchos lugares de la ciudad, el agua se debe llevar a los habitantes por pipas, lo cual se conoce como tandeo. En ciertas colonias el tandeo es realizado por el gobierno de la ciudad y es gratuito, pero también existe una importante mafia que trafica con pipas de agua (Gómez y Palerm, 2015).

El agua potable del sistema Cutzamala proviene tanto del río Lerma como del Cutzamala, dos de las corrientes más contaminadas del país. Además, una de las últimas presas del sistema, Valle de Bravo, tiene fuertes problemas de contaminación porque toda la población dispone de sus aguas residuales sin tratar en el embalse, que originalmente debería ser de agua para eventual consumo humano (ProValle, 2013). Sin embargo, la planta de tratamiento Los Berros logra obtener una gran calidad del agua, aunque sea a expensas de un importante consumo de recursos (CONAGUA, 2005). La calidad del agua se va degradando a lo largo de la red de distribución por la antigüedad de las tuberías. Existe poco control de la calidad del agua extraída del subsuelo y prácticamente no se le da tratamiento, por lo que se puede encontrar un amplio espectro de contaminantes a lo largo de la ciudad (SAC-MEX, 2013).

El cambio del suelo por superficies impermeables de asfalto y de concreto ha contribuido a que el acuífero del Valle de México se encuentre con un alto estrés hidrológico, debido a que la tasa de extracción es mucho mayor a la tasa de recarga. Se estima que para 2025 o 2030 el agua subterránea será insuficiente y estará prácticamente agotada (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016). La poca agua que se puede

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

infilar en el poniente de la ciudad en las corrientes a cielo abierto tiene mala calidad y contamina al acuífero. Además durante el sismo se dieron graves afectaciones al sistema de abastecimiento, principalmente en Xochimilco, donde la población estuvo casi dos semanas sin suministro de agua potable (Animal Político, 2017).

Infraestructura sustentable de abastecimiento

Existen muchos desarrollos recientes en la planeación y construcción de redes de abastecimiento de agua potable que pretenden resolver los problemas expuestos anteriormente. Una de las soluciones propuestas para dar un servicio más homogéneo en la red es la sectorización, sobre todo con respecto a las presiones que ocasionan la gran cantidad de pérdidas en la red de la Ciudad de México. Las redes de distribución de agua potable tienen una topología de malla altamente interconectada, y esto le da una gran resiliencia a la red, debido a que si hay alguna disrupción en un conducto, existen muchos caminos alternativos para mantener el suministro a los nodos afectados.

Sin embargo, también se presenta una problemática por una distribución e interconectividad excesiva de la red, ya que se dificulta de gran manera el control de los gastos suministrados y un monitoreo de las pérdidas existentes, precisamente debido a la enorme cantidad de conexiones que hay, aunado a la falta de mantenimiento de la infraestructura. Se presenta también un problema similar al existente en los ordenamientos urbanos cartesianos, donde se traza la red de manera estricta sin tener en cuenta las diferencias topográficas. Esto ocasiona que existan zonas con presiones de operación muy altas y viceversa.

La solución de sectorización de redes crea zonas de suministro aisladas del resto de los sectores. Cada sector es alimentado en alrededor de dos puntos a partir de la red de distribución primaria. En estos puntos de entrada se pueden colocar medidores de gasto para controlar de manera puntual las pérdidas, y si es necesario también válvulas reductoras de presión, para evitar problemas de altas presiones en el sector. Se tiene también el beneficio que se crea una separación entre la red primaria y la red secundaria, donde la primera tiene una menor cantidad de ramificaciones de menor jerarquía y puede transportar el agua de manera más eficiente a sectores más lejanos (Figs. 6.2a y 6.2b).

La creación de los sectores obedece a varios factores como la cantidad de usuarios y sus patrones de consumo, la variación de la demanda en el día, la topografía y las características de la red existente. La forma más sencilla de sectorizar redes es cerrar las válvulas limítrofes del sector, lo que permite tener los beneficios de la sectorización sin perder los de una alta conectividad en caso de disrupciones en la red. En ocasiones también es necesario instalar nuevas tuberías y eliminar conexiones colocando tapas ciegas, aunque esto último le quita una eventual resiliencia a la red. Los sectores mantienen dos entradas de la red secundaria por la misma razón, para mantener múltiples posibles rutas para el agua potable.

La sectorización de redes tiene múltiples beneficios si se realiza de manera adecuada. Se muestra una nivelación de presiones, reducción de los puntos con alta

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

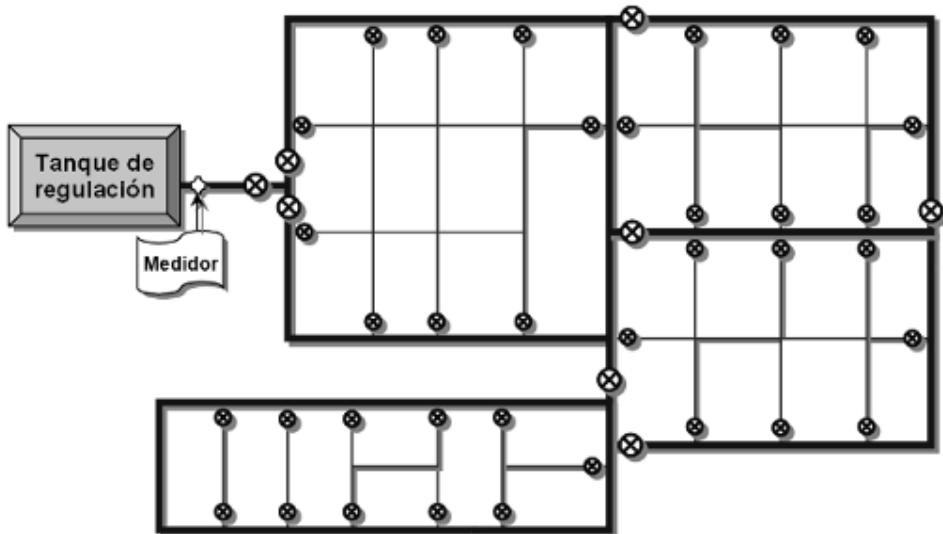


Figura 6.2a. Red no sectorizada de distribución de agua
(Fragoso et al., 2016)

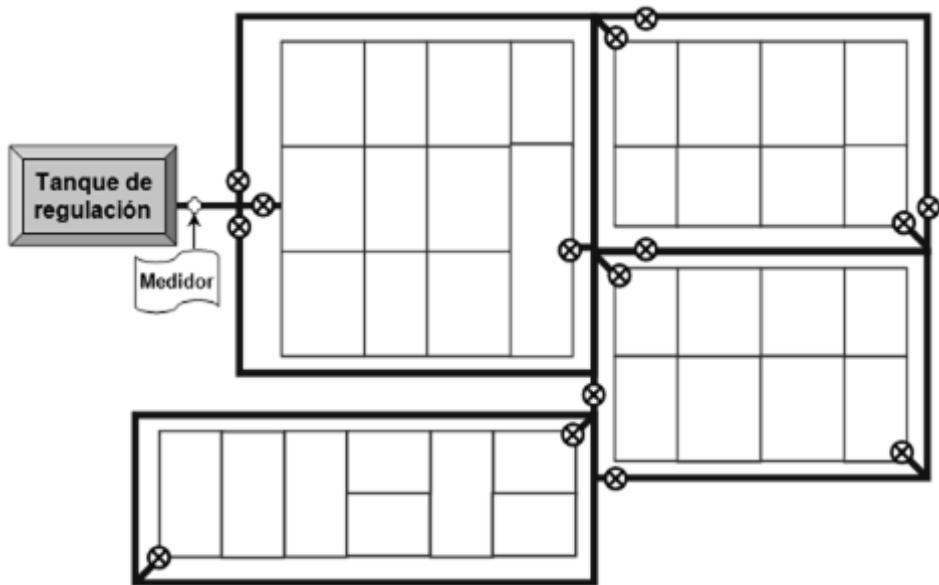


Figura 6.2b. Red sectorizada de distribución de agua
(Fragoso et al., 2016)

presión y aumento en los de bajo nivel. Además se tiene un importante ahorro energético en gastos de bombeo manteniendo el mismo suministro de agua. La reducción de la presión disminuye a su vez las fugas del sistema. Por último, se pueden colocar puntos de control en los accesos a cada sector e instrumentarlos para medir presión y gasto. La instrumentación de redes permite tener un control de las condiciones de operación en tiempo real y detectar fugas a través de gastos mínimos y comparaciones históricas. Se puede tener además un modelo computacional calibrado cuyo rendimiento se esté comparando en tiempo real contra la operación del sistema. También, así es mucho más sencillo detectar tomas clandestinas y encontrar la ubicación exacta de las fugas, reduciendo tiempos de mantenimiento (Fragoso et al., 2016).



Figura 6.3a. Pelotas de plástico sobre embalses
(MFAME, 2015)



Figura 6.3b. Sistemas fotovoltaicos en canales de irrigación
(SolarEnviro. 2014)

Otro punto donde se genera una gran cantidad de pérdidas de agua potable es en los acueductos en conducciones y embalses a cielo abierto. Tanto en California como en la India se han encontrado soluciones para evitar la evaporación de un recurso valioso y escaso. Desde el 2010 California ha atravesado la peor sequía de su historia y una de las soluciones encontradas para disminuir las pérdidas de agua fue la colocación de pelotas de plástico sobre los embalses de agua potable (Figura 6.3a). Esto crea una superficie protectora que evita la contaminación del agua, su evaporación, y también impide la reacción del cloro residual con la luz solar, creando potencialmente compuestos altamente nocivos para los seres humanos. Es importante notar que estas soluciones solo se deben aplicar en zonas sin movimiento de agua y donde se tenga agua potable por lo que no pueda existir un ecosistema acuático en

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

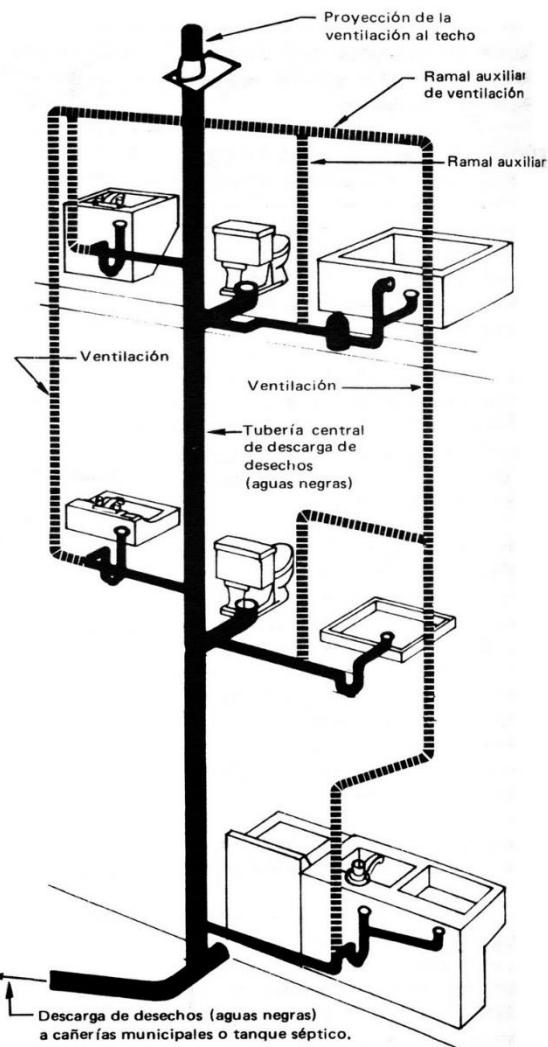


Figura 6.4a. Sistema de drenaje privado
(Olmán, 2010)

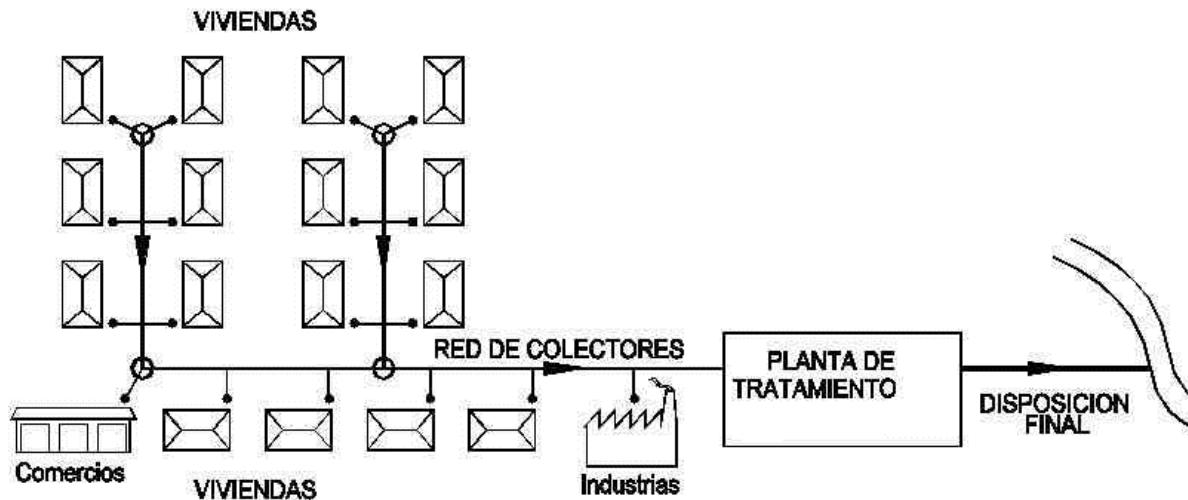


Figura 6.4b. Sistema de drenaje público
(Carcamo, 2012)

el embalse o tanque de almacenamiento que se pueda ver afectado para la falta de oxigenación y de luz (Haghghi, 2018).

En la India se están implementando sistemas fotovoltaicos lineales que fungen además como cubiertas para canales de irrigación (Figura 6.3b). Se evita que la radiación solar llegue al agua y se genera un ambiente local de alta humedad relativa, lo que ayuda a disminuir aún más la evaporación del agua. Por otra parte, se aprovecha el espacio para la generación de energía eléctrica, se evitan cambios de uso de suelo a favor de instalaciones fotovoltaicas, y aumenta la eficiencia de los paneles solares por la reducción de temperatura del agua circulando debajo de ellas (Business Standard, 2012). Sin embargo, debe existir un muy buen diseño de estos sistemas porque un desbordamiento podría ser muy peligroso para la infraestructura y para los habitantes por el acarreo de material por la avenida. En el sistema Cutzamala existen varios canales que podrían aprovechar este tipo de sistemas.

Drenaje tradicional y problemáticas

El sistema sanitario urbano tradicional se encuentra fuertemente centralizado, lo que presenta vulnerabilidad y poca resiliencia ante la disruptión de algún nodo del sistema. Típicamente, consiste de un sistema privado en los inmuebles y de un sistema público en las vialidades. El sistema privado surge de los muebles hidrosanitarios, que descargan su drenaje por tuberías hacia caídas centrales, que pueden ser combinadas o separar el agua pluvial y la residual, o incluso también las aguas grises y negras. El cambio de dirección vertical a horizontal se presenta en un registro, a partir del cual surge el albañal que representa la frontera final del sistema privado (Figura 6.4a). En la parte pública, el albañal se conecta a la red de atarjeas que recibe las descargas domiciliarias y se lleva a los colectores, que únicamente transportan el agua residual hasta las lumbreñas que conectan con los interceptores y posteriormente los emisores hasta el punto de descarga, donde suele existir una planta de tratamiento (Figura 6.4b). En ocasiones también existen tanques de regulación para control de avenidas y cárcamos de rebombeo para sortear accidentes topográficos.

La gran mayoría del agua residual en México no se trata (de la Peña, 2013), por lo que el agua residual se descarga de manera directa en los cuerpos de agua como ríos y lagos. El aumento de carga orgánica genera una disminución en el oxígeno disuelto del agua lo cual, aunado a los patógenos, conlleva a la muerte de las especies del ecosistema. Cuando el agua se trata a un nivel secundario y se descarga, sigue teniendo niveles importantes de nitrógeno y fósforo, nutrientes que permiten un crecimiento explosivo de algas y por el cual se presenta el fenómeno de eutrofización en lagos. En este caso, disminuye también el nivel de oxígeno en el agua y la descomposición de la materia orgánica hace que se presente un azolve gradual. Incluso en caso de haber tratado hasta un nivel terciario el agua residual, una descarga continua con un hidrograma típico de una población genera perturbaciones en el régimen de flujo de ríos y lagos y la estacionalidad y variabilidad del gasto, que cómo se mencionó en el capítulo 5, aumenta la vulnerabilidad del ecosistema.

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

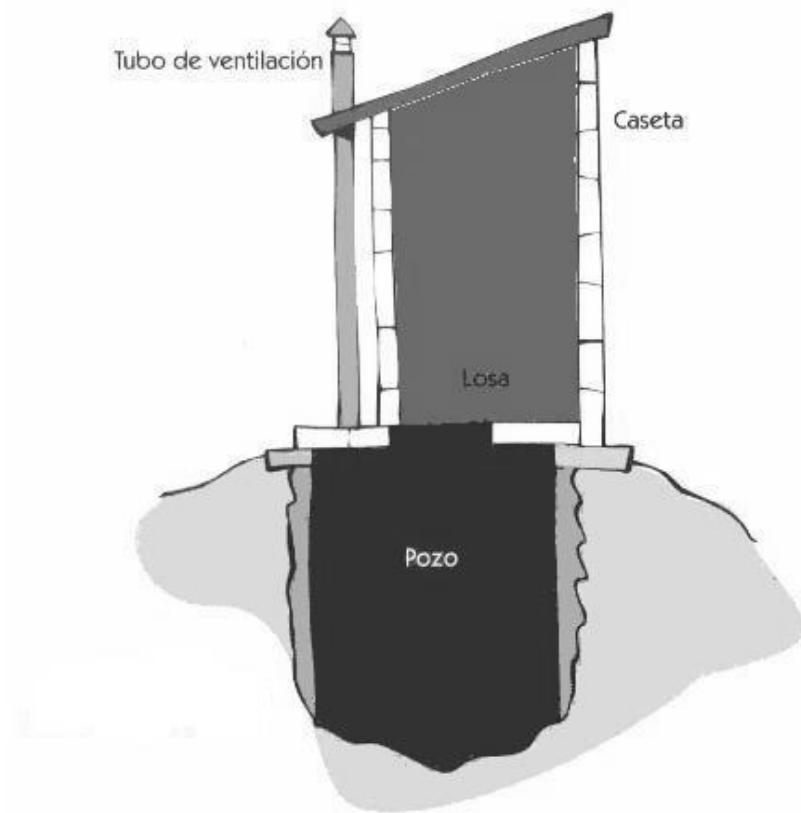


Figura 6.5a. Elementos de una letrina de hoyo
(PAHO, 2000)

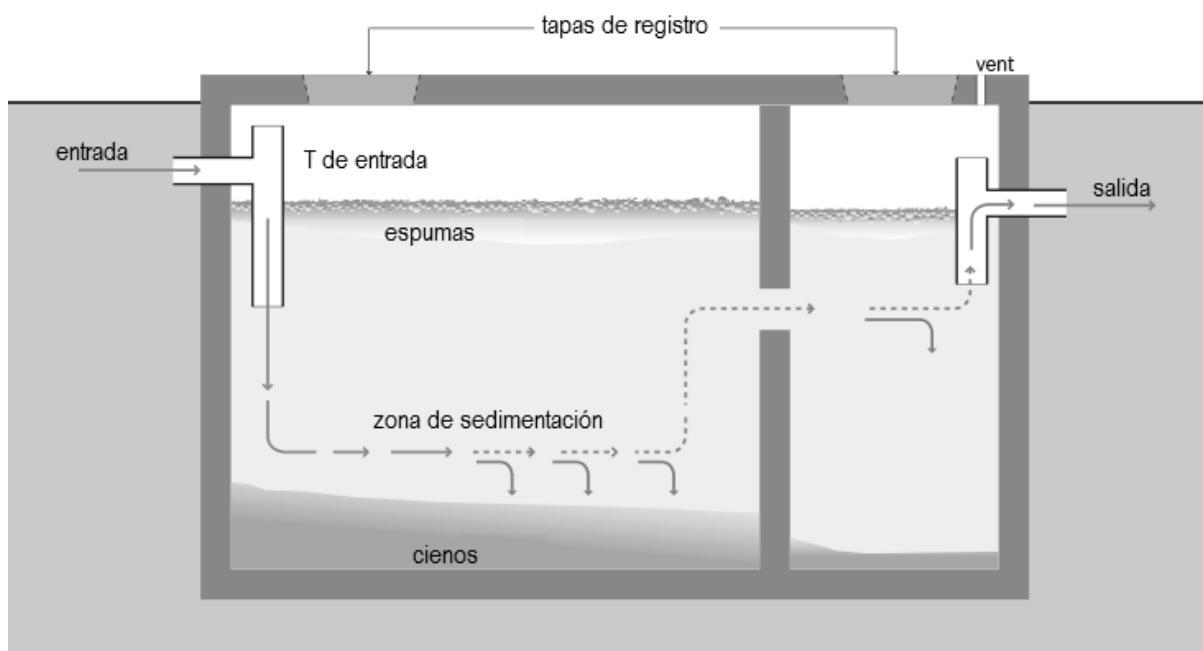


Figura 6.5b. Funcionamiento de una fosa séptica
(Wikimedia, 2017)

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

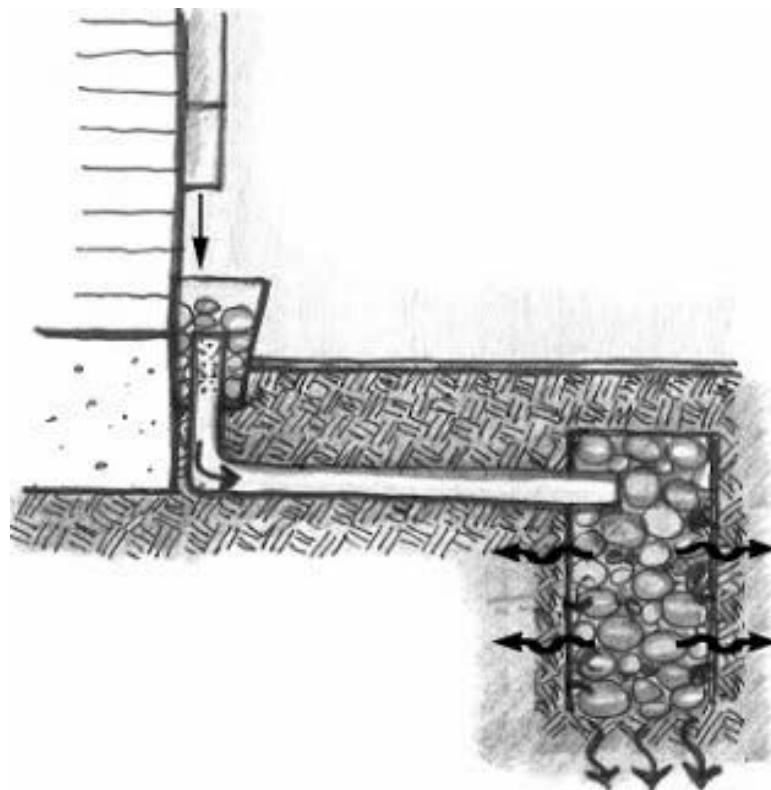


Figura 6.5c. Pozo superficial de infiltración
(Universidad del Norte, 2018)

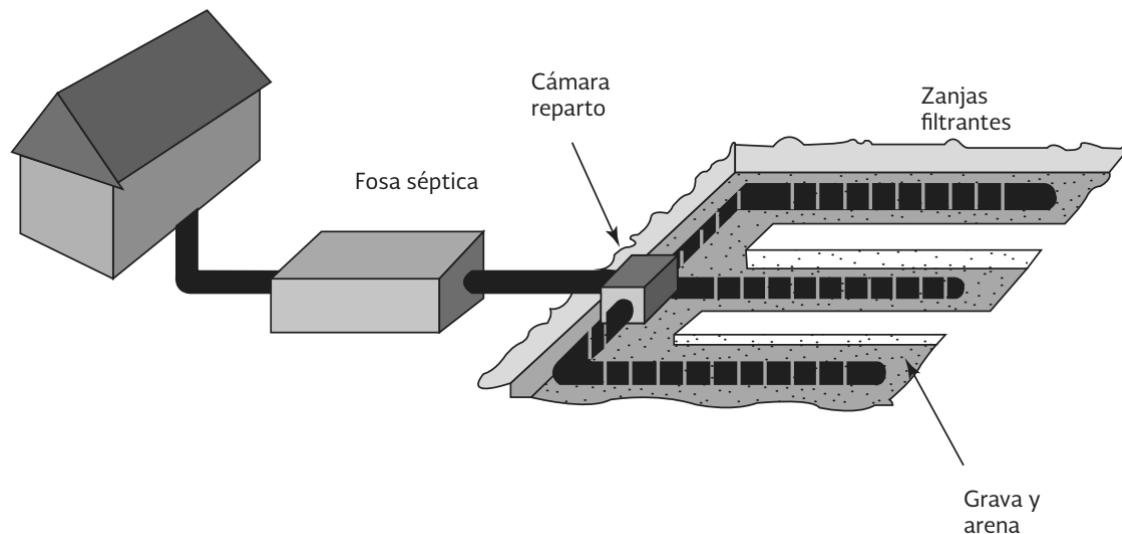


Figura 6.5d. Componentes de un sistema de zanjas filtrantes
(CONAGUA. 2015)

Además, en cuencas endorreicas como en la capital de México es necesario hacer un trasvase para la disposición del agua residual, lo que disminuye la infiltración y aumenta el estrés hídrico en la cuenca de origen y aumenta el agua disponible en la

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

cuenca de destino, alterando a su vez el ecosistema. Debido a estas razones es importante encontrar nuevas soluciones para el tratamiento y la disposición de las aguas residuales que permitan mantener un alto nivel de resiliencia en el asentamiento urbano y que funcione de manera sustentable y disminuyan los impactos en el medio ambiente.

La Ciudad de México tiene un sistema de drenaje altamente centralizado donde prácticamente la totalidad del agua residual se canaliza por los emisores hacia la cuenca del río Tula, donde será tratada por la Planta de tratamiento de Aguas residuales Atotonilco, la más grande del mundo, capaz de tratar más de 35 m³/s (Bello, 2016). Otra planta de tratamiento de tamaño importante dentro de la ciudad es la del Cerro de la Estrella que trata parte del gasto del Río Churubusco y envía su efluente a Xochimilco para mantener el nivel de agua. Otras plantas grandes son la de Santa Fe, San Juan de Aragón, Coyoacán y Ciudad Deportiva (SEDEMA, 2002). Se ha evidenciado el riesgo de tal centralización de la infraestructura al descubrirse que el Túnel Emisor Central tenía una fuerte corrosión debido a los gases producto de la digestión anaerobia del agua residual. Se calculó que en caso de falla del túnel podría presentarse una inundación de metro y medio en el centro de la Ciudad; eso fue uno de los motivos por el que se emprendió la construcción del Túnel Emisor Oriente (CONAGUA, 2012). Si la planta de Cerro de la Estrella fallara, se perdería el suministro en Xochimilco y los canales se secarían rápidamente.

La red sanitaria de la ciudad también es fuertemente vulnerable a impactos por desastres naturales. Lluvias torrenciales superan la capacidad del sistema, causando inundaciones, y movimientos telúricos pueden fracturar las tuberías, por lo cual ya se están empezando a utilizar tuberías de material más flexible como el PEAD y otros plásticos. La falta de cultura de no tirar basura en la calle ayuda a tapar rejillas y azolvar tuberías. Por otro lado, una tensión crónica del sistema como el hundimiento regional, puede ayudar al rompimiento de las tuberías y a la pérdida de capacidad de conducción por la disminución de la pendiente. Las tuberías rotas eventualmente generan socavones que ponen en riesgo a la infraestructura superficial y a las vidas de las personas.

Soluciones distribuidas en drenaje

En las zonas rurales y otros lugares donde no existe un sistema central de drenaje, se presentan de manera natural soluciones distribuidas para el tratamiento y disposición de aguas residuales (Nelson, 2008). El sistema más primitivo de este tipo son las letrinas de hoyo (Figura 6.5a). En este caso, se realiza una zanja superficial sobre la cual se coloca el sanitario y su cubierta, que pueden variar en su nivel de sofisticación. Se puede ir colocando gradualmente aserrín y tierra para evitar malos olores, sobre todo si no se piensa vaciar la zanja. Dentro de ésta, se da un proceso de digestión de los residuos, mientras que el agua se infiltra en el subsuelo. Dependiendo de las condiciones del terreno, éste filtra en mayor o menor medida los contaminantes del agua y eventualmente mata a los microorganismos ya sea por falta de oxígeno o de nutrientes. Esta tecnología sigue siendo usada en muchas zonas rurales de países en vías de desarrollo, pero presenta la desventaja de contaminar el

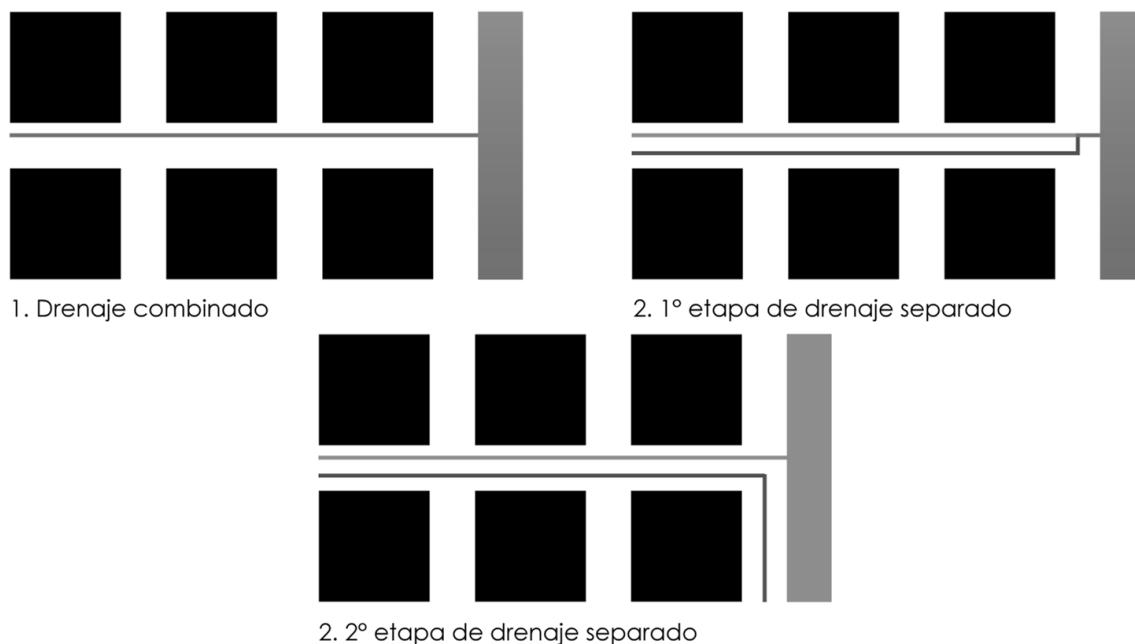


Figura 6.6a. Extensión gradual del drenaje separado
Elaboración propia

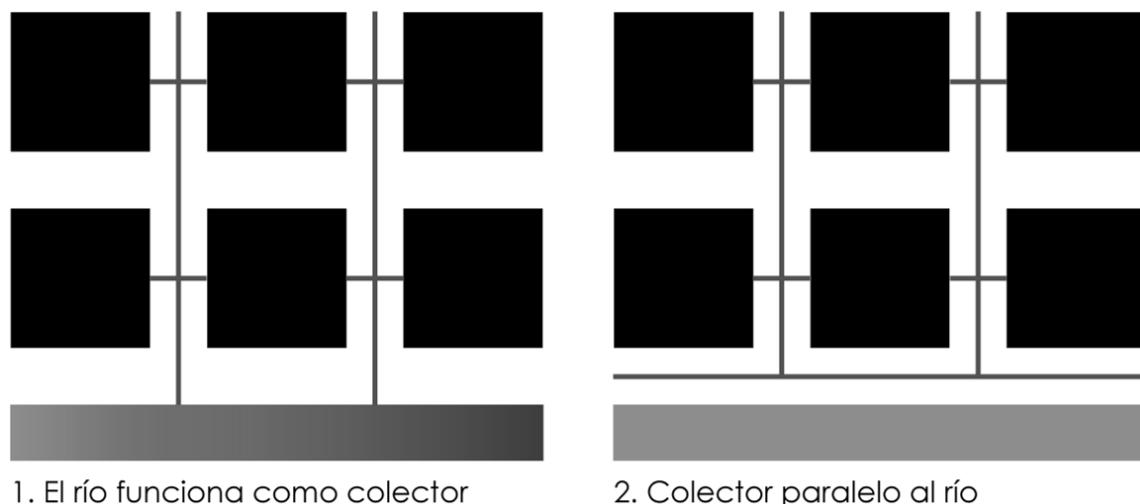


Figura 6.6b. Construcción de colectores paralelos a escurrimientos
Elaboración propia

recurso hídrico subterráneo de forma muy sencilla, situación que empeora cuando la familia que usa la letrina saca su agua de un pozo cercano (Brian, 2012).

Posteriormente se han desarrollado las fosas sépticas (Figura 6.5b), donde antes de la disposición del agua residual para su infiltración en el terreno, existe un tanque de retención, donde se presentan condiciones anaerobias que promueven la digestión y reducción de los residuos sólidos. Además, el aumento del periodo de retención hidráulica aumenta la eficiencia del tratamiento y favorece la sedimentación. El efluente resultante tiene mejor calidad y menos patógenos, por lo que su infiltración

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

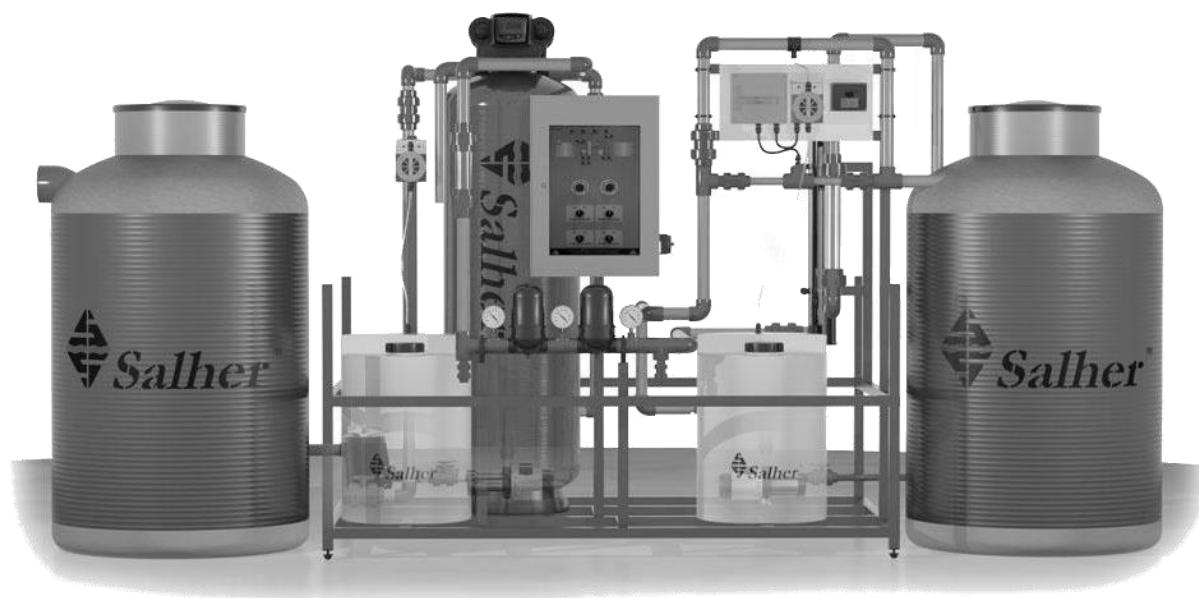


Figura 6.7a. plantas de tratamiento terciarias compactas
(GEE Aguas Residuales, 2013)



Figura 6.7b. sistemas de tratamiento biológico en edificios
Modificado a partir de González (2013)

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable



Figura 6.7c. Plantas de tratamiento en contenedores
(Biomicrobe Technology, 2018)



Figura 6.7d. plantas de tratamiento en tinacos
(H2O Inter Pro France, 2018)

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

en el subsuelo se puede hacer de manera más segura (Rosales, 2005). Para la disposición en el suelo del agua tratada, se puede usar un pozo superficial de infiltración (Figura 6.5c) con material graduado que mejore la filtración o una zanja de infiltración si se trata el agua residual en el punto de generación (Figura 6.5d). Una zanja de infiltración consiste en un ordenamiento horizontal de tuberías con perforaciones en sus extremos en una cama superficial de material graduado, con un funcionamiento similar al pozo de infiltración. En ambos casos es muy importante conocer la permeabilidad del suelo y maximizar el área de contacto con éste para tener un mayor gasto de infiltración (CONAGUA, 2015).

Los sistemas mencionados con anterioridad tienen la limitación de falta de practicidad a grandes escalas, por lo que en las ciudades se desarrolla el sistema de drenaje urbano con tratamiento centralizado para la disposición final del agua en corrientes. Gran parte del sistema de drenaje de la ciudad es un drenaje combinado, donde fluye a la vez agua residual y agua pluvial, a diferencia del drenaje separado, donde cada tipo de avenida tiene su conducto. La desventaja del primer sistema es que en temporada de secas queda muy sobredimensionado y que se aumenta considerablemente el volumen de agua residual al combinar con el agua pluvial que tiene una carga mucho menor de contaminantes (CONAGUA, 2015).

En las zonas del poniente y sur de la ciudad existen muchas pequeñas corrientes que aún están descubiertas, hacia las cuales podría canalizarse el agua pluvial. En este caso, para aumentar la sustentabilidad del sistema de drenaje se podría comenzar por tener la política de sustituir el drenaje combinado por un drenaje separado, calle por calle y tramo por tramo de manera gradual. En la mayor parte de las ocasiones el drenaje pluvial no tendrá salida natural y se deberá mezclar de nuevo con el drenaje combinado, pero cuando se cambie el siguiente tramo se tendrá una mayor extensión de drenaje separado (Figura 6.6a). Eventualmente se alcanzará un punto razonable de descarga en una corriente. En ocasiones sí existe un drenaje separado pero el pluvial lleva también aguas residuales, o el drenaje combinado descarga en alguna corriente debido a la falta de colectores, como ha sucedido en el poniente de la Zona Metropolitana debido a la explosión demográfica y la falta del desarrollo de infraestructura (Breña, 2003).

En el centro de la ciudad la solución que se tomó para estos problemas en los años sesenta fue entubar los ríos (Villasana y Gómez, 2017), pero en la actualidad se puede construir un colector sobre las vialidades paralelas a las corrientes y separar las descargas (Figura 6.6b). En el drenaje pluvial de la ciudad será importante considerar obras de infraestructura verde para disminuir la carga de contaminantes provenientes de las superficies pavimentadas y de la contaminación atmosférica. A gran escala, se podría haber contemplado que de entre el Túnel Emisor Oriente, el Central, y el Gran Canal, existiera una fracción de éstos que sólo condujera agua pluvial y el resto aguas residuales.

El conducir el agua residual de la Ciudad de México hacia la cuenca del río Tula requiere una gran cantidad de energía porque se debe pasar por muchas estaciones de rebombeo, e incluso en la actualidad el Gran Canal ya tiene una pendiente negativa. Se puede tener una mayor eficiencia en nuestro sistema de drenaje al tratar el agua residual en su punto de generación y disponerla puntualmente. Además, el tener una sola planta de tratamiento para toda el agua residual de la ciudad es un

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

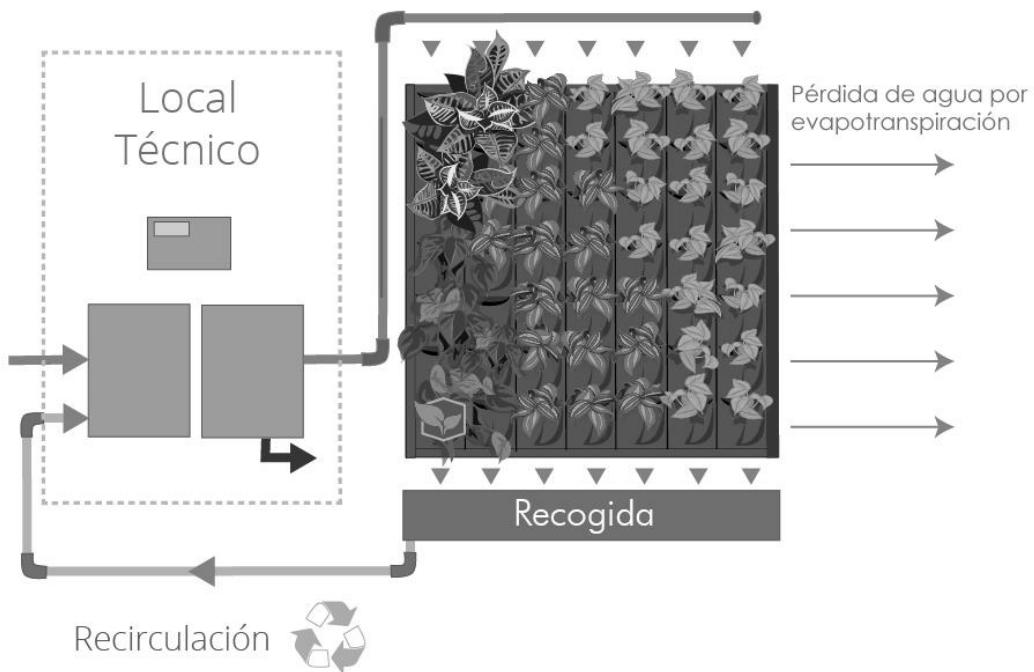


Figura 6.8a. evapotranspiración en muros verdes
Modificado a partir de Terapia Urbana (2018)

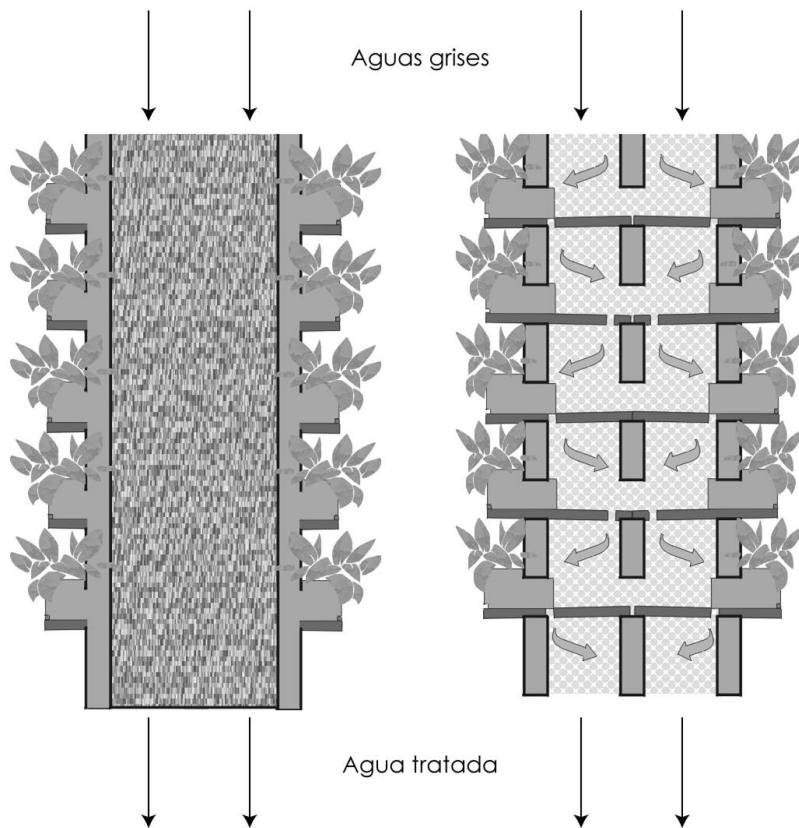


Figura 6.8b. humedales verticales
Modificado a partir de Günther (1998)

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

punto débil que violenta los principios de redundancia para la resiliencia urbana. Una red distribuida de plantas de tratamiento pequeñas podría ser mucho más segura y eficiente. Los grandes edificios que se están desarrollando en los últimos años cuentan con espacio suficiente para acomodar plantas de tratamiento; esto se puede lograr a través de plantas compactas con tratamiento terciario (Figura 6.7a) o incluso con sistemas de tanques biológicos a pequeña escala (Figura 6.7b).

Existen ya sistemas de tratamiento móviles y compactos basados en contendores industriales (ClearFox, 2016) (Figura 6.7c) o en tinacos para edificios más pequeños (H₂O Inter Pro France, 2018) (Figura 6.7d). Estos grandes desarrollos suele tener también una considerable extensión de áreas verdes y de recreación. Diseñando éstas áreas con principios de infraestructura verde se pueden usar humedales para tratar el agua y a la vez mantener el riego de las áreas verdes durante épocas de secas.

El tratar el agua en sitio reduce la carga de las grandes plantas de tratamiento, pero no la del sistema de conducción. Dicho problema se puede solucionar a su vez con sistemas de disposición del agua *in situ*. Éstos corresponden a las tecnologías de infraestructura verde y se pueden clasificar por la forma de disposición final del agua. Existen sistemas que disponen del agua por evapotranspiración, función que realizan parcialmente los humedales, las azoteas verdes y los jardines de lluvia pero que corresponde principalmente a los muros verdes (Figura 6.8a). Los muros verdes son fuertemente criticados, porque se venden como una solución sustentable pero tienen grandes requisitos de riego porque el sustrato sobre el que se colocan las plantas, que suele ser una fibra o tela, tiene una fuerte tasa de evaporación (Manso y Castro-Gomes, 2015). Esto no es sustentable si se usa agua potable para su riego, pero puede serlo si se usa agua tratada, en cuyo caso se alivia la carga del drenaje y se disminuye el efecto de isla de calor urbana debido a la transformación de calor sensible en calor latente. Se han hecho incluso diseños de humedales verticales que tratan aguas grises como la FolkeWall (Günther, 1998) (Figura 6.8b).

Otra forma de disponer del agua residual es mediante la infiltración. De esta función y sus limitaciones en la Ciudad de México ya se ha hablado en el capítulo 5, con los jardines de infiltración y la mención de los pozos de infiltración. En este último caso cabe mencionar que es importante alcanzar los lentes de arena para aumentar el gasto, y aprovechar las diferencias de altura disponibles para evitar costos de bombeo. Otra solución en terrenos permeables sería colocar pequeños pozos de infiltración en todos los registros de la red de atarjeas de drenaje pluvial (Figura 6.9a). También existen lagunas de infiltración, que funguen como tanques de regulación de avenidas pero al tener un fondo de suelo y no de concreto, permiten la infiltración gradual del agua, ayudada por la carga hidráulica generada por el nivel del agua en la laguna (Figura 6.9b).

En la zona de suelo I, sobre todo en el poniente y sur de la ciudad, existe gran cantidad de cavidades, ya sea por el flujo volcánico o por minas abandonadas. Es necesario hacer un censo geofísico de estas irregularidades para evitar problemas geotécnicos y estructurales y para evaluar el potencial de ciertas cavernas para la recarga del acuífero y como almacenamiento de agua de lluvia, así como para inundarlas con agua tratada y tener una gran tasa de infiltración. En 2006 el lago

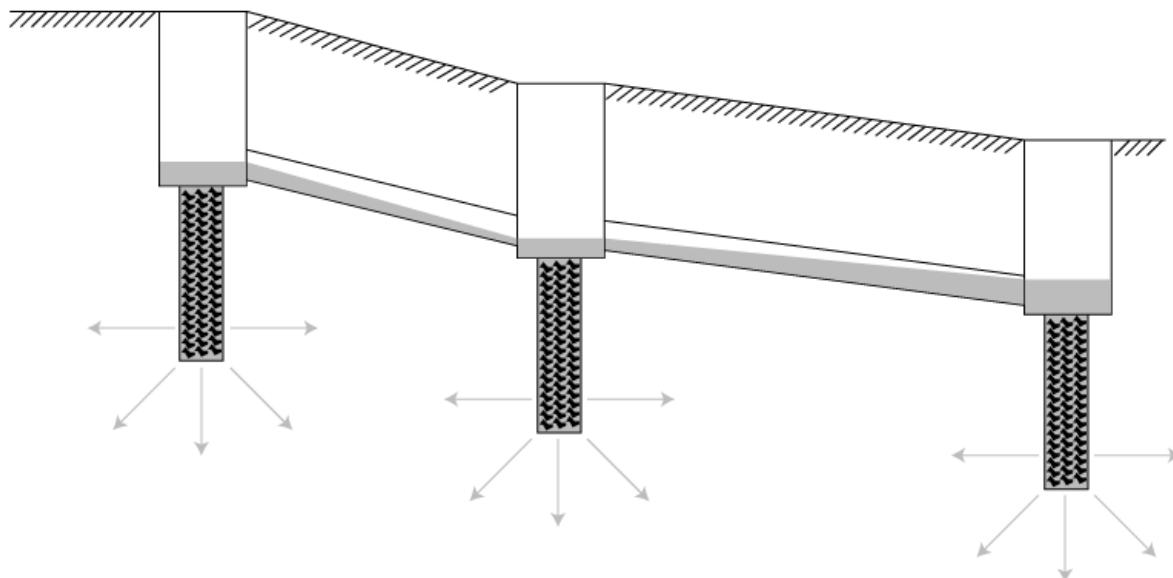


Figura 6.9a. pozos de infiltración en registros
Elaboración propia

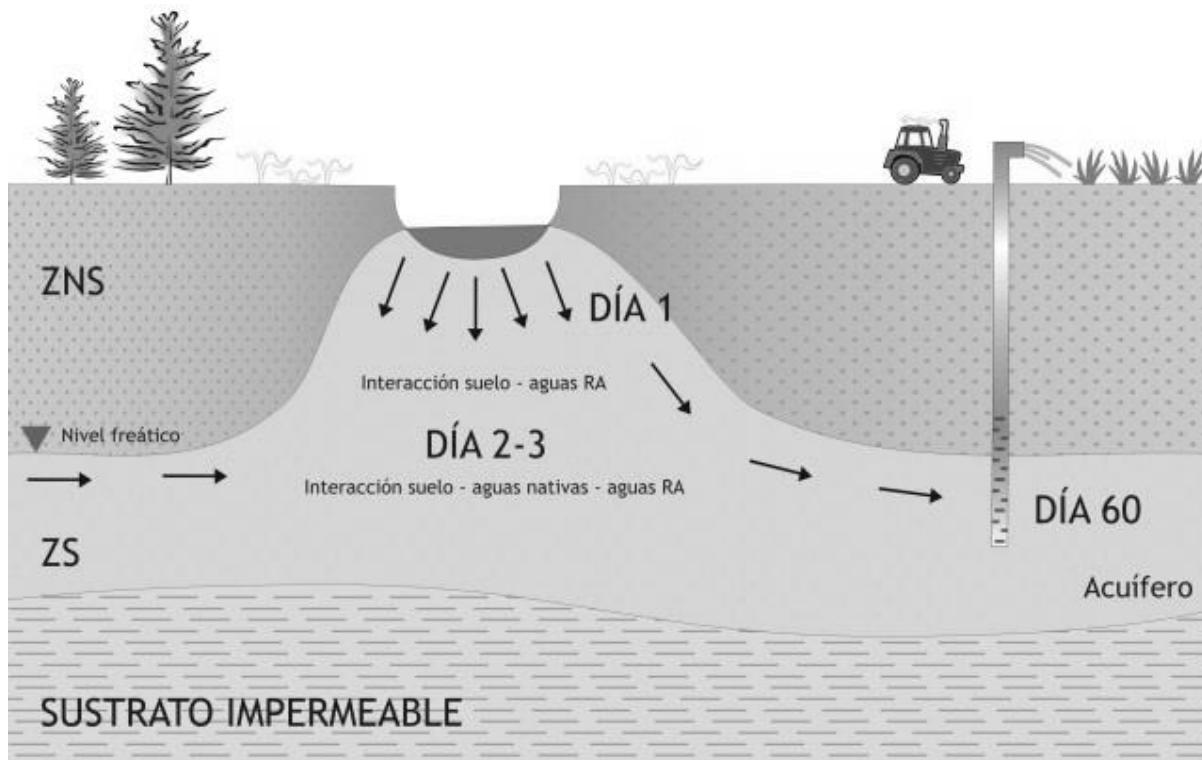


Figura 6.9b. lagunas de infiltración
(Wikimedia, 2006b)

6. Sistema hidrosanitario eficiente y sustentable

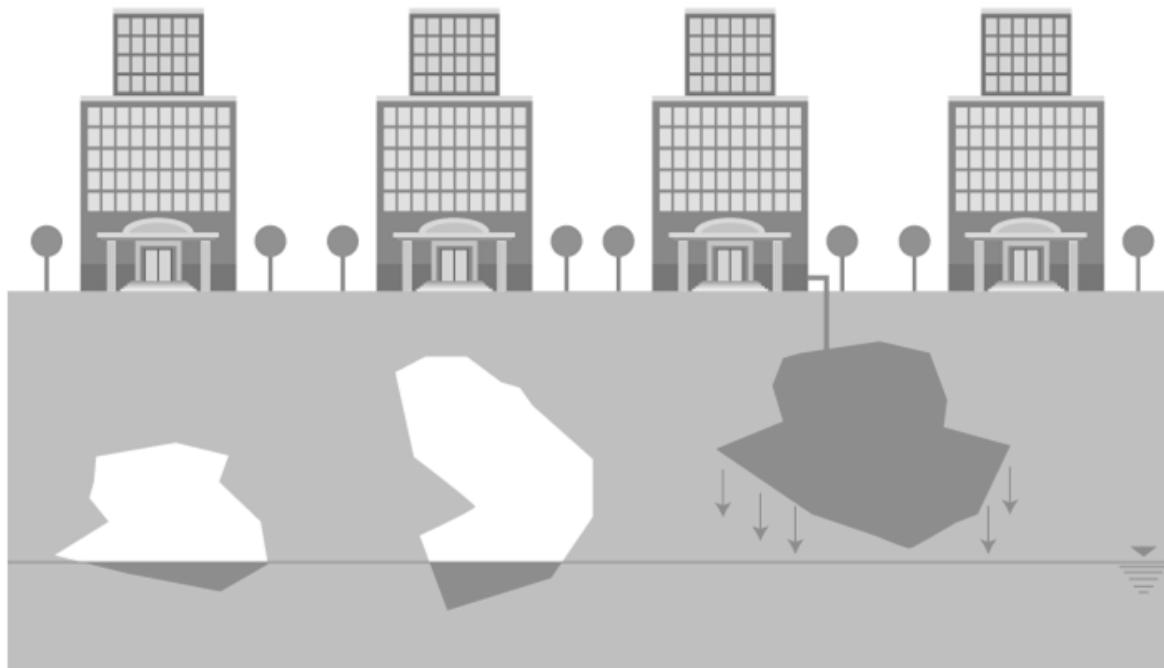


Figura 6.9c. infiltración a cuevas y minas
Elaboración propia con gráficos de Freepik (2018)

mayor de Chapultepec tuvo una fractura en el fondo de concreto que llevaba a una mina

abandonada por la cual se filtró toda el agua del lago, incluida la fauna acuática (Bolaños, 2006). Con la construcción de la nueva planta de tratamiento de Chapultepec y el saneamiento del agua eutrofizada del lago (El Economista, 2016), se podría explorar la posibilidad de la infiltración hacia estas cuevas subterráneas (Figura 6.9c). En este caso también se deberá llevar a cabo un extenso estudio geotécnico para evaluar la seguridad de la propuesta antes de su implementación.

Por último, otra solución posible es la generación de un corto circuito en el ciclo hidrológico, mediante la reutilización del agua tratada. Esto aporta los mayores ahorros energéticos y presenta el menor impacto ambiental, además de fomentar la verificación de la calidad del agua por el tratador, que a su vez será el nuevo consumidor. Las aguas residuales pueden reutilizarse para riego o para servicios como mingitorios y excusados. En países como Singapur ya se mezcla parte del agua tratada en el suministro de agua potable (Lee y Pin, 2016), pero esto presenta aún fuertes retos frente al estigma existente. Mediante obras de captación sencillas, se puede recuperar el agua pluvial en los inmuebles y reusarla.

7. Energías renovables y generación distribuida

Consumo energético urbano

Las regiones urbanas son los mayores consumidores de energía eléctrica en el planeta (Sugahara y Bermont, 2016). Se ha vuelto tan ubicuo este servicio, que no hay prácticamente actividad alguna en una ciudad que no dependa de su funcionamiento para llevarse a cabo correctamente. Es importante notar que la energía eléctrica sólo representa una fracción del consumo energético en ciudades, ya que la otra corresponde a la energía térmica proveniente de combustibles fósiles, que aún impera en el transporte. En México, esta última forma de energía representa la mitad del consumo energético (IEA, 2016). Por su parte, la energía eléctrica en ciudades se utiliza principalmente para iluminación, calefacción y climatización de espacios, uso de aparatos eléctricos y electrónicos, y actividades industriales.

El nivel de bienestar económico de muchas ciudades es notable por la calidad de su infraestructura y servicio eléctrico, y en asentamientos irregulares, es notable la falta total de este servicio, o su poca confiabilidad. En países como Nigeria, Vietnam, India, Etiopía y Zimbabue, un porcentaje considerable de la población urbana no tiene aún acceso a este servicio, y uno de los principales motores del desarrollo económico llevados a cabo por los gobiernos es la electrificación, pese al elevado costo que implica lograrlo cuando se tiene una población que se incrementa rápidamente (Engelmeier y Duby, 2017).

Se ha dicho ya en el capítulo 1 que por su magnitud y por los contaminantes que generan, las centrales eléctricas no suelen encontrarse dentro de los núcleos urbanos, sino más bien a cientos de kilómetros, donde se encuentra disponible el recurso. Por ejemplo, la Ciudad de México cuenta con solamente cinco pequeñas centrales de generación eléctrica, todas de turbogás de 32 MW (CFE, 2016), pese a que concentra un 17% del PIB nacional (INEGI, 2016). Por tanto, las plantas generadoras generan externalidades a habitantes que pocos beneficios obtienen de ellas. Entre las problemáticas que se tienen son despojo de tierras, destrucción de ecosistemas, contaminación y problemas de salud. Desarrollos con gran potencial, como la zona eólica del Istmo de Tehuantepec, deben considerar a los habitantes locales en la planeación para mantener su reputación como energías limpias (PODER, 2011).

Algunas de las fuentes de energía que pueden crear electricidad para una ciudad son la energía hidroeléctrica, geotérmica, carboeléctrica, de combustión de gas, eólica, solar fotovoltaica, solar termoeléctrica, de biomasa, entre otras, por mencionar a los tipos principales. Algunas de estas formas de energía se prestan exclusivamente a centrales masivas, como en el caso de la carboeléctrica, pero también existen algunas que pueden tener desarrollos incluso a muy pequeña escala, como la energía solar. Estas últimas formas de generación eléctrica tienen el potencial de ubicarse dentro de las zonas urbanas, creando una generación distribuida que puede traer grandes beneficios para la resiliencia local.

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

La energía eléctrica se ha vuelto fundamental para el bienestar humano en la actualidad, por lo que la disrupción de su servicio puede ocasionar graves problemas. Existen servicios que por su importancia no pueden ver interrumpido su suministro, como es el caso de los hospitales. Otros, como las telecomunicaciones, tienen afectaciones de orden superior, ya que su falta entorpece las actividades de restablecimiento del servicio eléctrico. Las centrales eléctricas suelen depender de la estabilidad de la red para funcionar y existen pocas que pueden realizar un inicio “en negro”, es decir, sin presencia de tensión en las líneas de transmisión. Una notable excepción a este problema son las centrales hidroeléctricas y las turbinas eólicas en presencia de viento, por lo que la existencia de estas plantas ayuda a dar resiliencia a una red eléctrica (EPRI, 2013).

Cuando existe un desbalance entre la oferta y la demanda de energía, la cual debe funcionar de forma instantánea y sin posibilidad de amortiguamiento, el suministro suele tener variaciones de voltaje y de frecuencia que pueden ocasionar la falla de alguno de los elementos de la red. Cuando esto sucede, se puede llegar a presentar una falla en cascada. Si se pierde una de las rutas posibles y la carga permanece constante, la corriente deberá viajar por una ruta alterna, la cual ya está utilizada a un porcentaje de su capacidad. Si la nueva corriente excede la capacidad de la ruta alterna, se generará una nueva falla. Todas las nuevas rutas que se generen tendrán una capacidad excedida y se dará la cascada de fallas (Hines *et al.*, 2009). Esto puede llegar a ocasionar un apagón en un área muy extendida, y es lo que sucedió en 2003 en Nueva York y Toronto con el gran apagón del noreste de Estados Unidos y parte de Canadá (DOE, 2004).

En otras ciudades existe siempre una asimetría entre la oferta y la demanda potencial de energía, por lo que en horas pico y con condiciones normales, siempre se generaría un apagón. Para evitar esta situación, se hacen apagones controlados en diferentes zonas de la ciudad a lo largo del día, condición que se conoce como *rolling blackout* en inglés o desprendimiento de carga en español (Syadli *et al.*, 2016). La Habana es un ejemplo prominente de esto, aunque este tipo de eventos se han disminuido de gran manera desde los días del periodo especial en la década de 1990 (Nova, 2016).

Otro asunto de importancia en las redes eléctricas es la calidad de la energía. Los aparatos electrónicos actuales pueden funcionar adecuadamente dentro de un rango angosto de frecuencias y voltajes, y la presencia de distorsión armónica también tiene un efecto negativo y puede llegar a ocasionar daños (Phips, 1991). Cuando existe un exceso de generación, se presenta un incremento de la frecuencia o del voltaje para mantener la potencia constante y viceversa. De esta manera es posible controlar y ajustar la oferta contra la demanda en el mercado eléctrico (Ibraheem *et al.*, 2005).

A la vez, se debe buscar mantener constantes las variables eléctricas para asegurar la calidad del suministro, por lo cual las empresas eléctricas requieren de activos que les provean servicios auxiliares de estabilización de la red. Esto se puede lograr a través de centrales eléctricas de menor tamaño que puedan variar su producción rápidamente y de dispositivos electrónicos como transformadores y bancos de capacitores (Švigrík *et al.*, 2008). Un descenso súbito en el voltaje de una red, pero que se estabiliza y no se convierte en un apagón, se conoce como un *brownout*, por

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

la asociación con la reducción de la intensidad de la luz en focos incandescentes (Seymour, 2011).

Las redes eléctricas son constituidas por infraestructura masiva que puede resultar muy vulnerable ante desastres naturales, muchos de los cuales serán incrementados por el cambio climático (IPCC 2013). Las ciudades costeras han tenido problemas durante tormentas, huracanes e inundaciones, porque muchos de los transformadores de las redes de distribución se encuentran a nivel o por debajo del nivel de calle, y cuando se inundan y dejan de funcionar, impiden el uso de plantas de bombeo para aliviar las inundaciones (DOE 2013). Las olas de calor hacen que se pueda disipar menos calor en centrales generadoras termoeléctricas y nucleoeléctricas y que funcionen a un menor nivel de eficiencia o que tengan que apagarse por completo, como sucedió en 2003, 2006, 2015 y 2018 en Europa (Rathi, 2018).

En Japón se observó que en 2011 un terremoto y su posterior tsunami ocasionaron el peor desastre nuclear en la historia en Fukushima, que dejó sin luz a millones de habitantes en Tokio (Synolakis y Kânoğlu, 2015). Puerto Rico, por su parte, perdió el 100% de su suministro eléctrico a raíz del huracán María, y más de un mes después más del 70% de los habitantes no lo había podido recuperar (Reuters, 2017). En los meses posteriores a este huracán, se desató una ola de suicidios en el protectorado estadounidense, lo que pone en evidencia las implicaciones indirectas que pueden tener este tipo de desastres (Telesur, 2018). Toda la infraestructura eléctrica que se construya en el futuro deberá diseñarse contemplando eventos extremos de mayor intensidad y con mayor frecuencia para evitar fallas que puedan tener consecuencias graves.

Tanto apagones como problemas en la calidad de la red eléctrica tienen fuertes impactos en la actividad económica y en la calidad de vida de los habitantes de una ciudad. Este problema se exacerba porque las fallas se suelen presentar en los momentos de mayor demanda eléctrica. Un ejemplo es durante una ola de calor, cuando se dispara el uso de aire acondicionado a un nivel para el cual puede no estar preparada una red eléctrica. En este caso, un apagón puede llegar a ser letal para los habitantes más vulnerables. Es entonces evidente que la resiliencia urbana está íntimamente relacionada con la resiliencia de la red eléctrica de la zona en cuestión, sobre todo por la dependencia de otros servicios e infraestructura con el suministro eléctrico, como ya se ha comentado.

Para que los habitantes de una zona urbana puedan resistir desastres naturales, deben planearse redes eléctricas más robustas y con capacidad de sobra ante picos de demanda, con rutas redundantes, con múltiples centrales eléctricas con diversos regímenes de variabilidad de la generación, y con una mayor distribución geográfica de los nodos de la red. Muchas de estas características ya se han comentado como cualidades de sistemas resilientes en los capítulos 3 y 4. Existen además múltiples desarrollos recientes en la ingeniería eléctrica que permiten lograr estos objetivos en una red eléctrica, como las redes inteligentes, las microrredes, las energías renovables, la demanda variable, V2G (*vehicle to grid*) y la generación distribuida.

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

Energías renovables en zonas urbanas

Se define a las energías renovables como aquellas que aprovechan recursos que se restauran de manera natural en escalas equiparables a una vida humana. En este rubro entra la energía hidroeléctrica, solar, eólica, de biomasa, geotérmica (dependiendo de cada campo geotérmico particular) y las diferentes formas emergentes de energía marina. Esta definición debe contrastarse contra la de energía limpia, que se refiere a energía con bajas emisiones o bajo impacto ambiental. Esta segunda clasificación deja mucho mayor lugar a discusión, ya que por ejemplo, la energía hidroeléctrica puede tener emisiones casi nulas, salvo que exista descomposición anaerobia de materia orgánica en la zona inundada que libere metano (Pinguelli y Schaeffer, 1995), y su impacto ambiental puede ser muy grande (Wildi, 2010).

La energía de la biomasa libera más gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos que la quema de carbón, pero como proviene de materia orgánica que captó carbono para crecer, se llega a considerar que es una energía limpia (Searchinger *et al.*, 2009). La combustión de gas se vende como energía limpia, pero esto sólo es en comparación con el carbón, ya que sigue siendo un combustible fósil. Existe ya “carbón limpio”, mediante la captura y almacenamiento de carbono, pero el carbono almacenado se suele usar para ayudar en la extracción de petróleo, generando gran cantidad de emisiones de forma indirecta (Yujia, 2014).

Otra energía que a veces se considera limpia es la nuclear porque casi no genera emisiones en su operación, sin considerar el impacto ambiental de la extracción constante de uranio. Sin embargo, sus residuos radiactivos son extremadamente peligrosos y aún no se cuenta con una manera completamente segura de disponer de ellas (UNEP, 2007). La energía geotérmica tiene muy pocas emisiones cuando es en circuito abierto, y prácticamente ninguna en circuito cerrado, y tiene un impacto ambiental muy bajo (Ármansson y Kristmannsdóttir, 1992). Bien planeadas, la energía solar y eólica son las de menor impacto, porque si bien dependen de la minería para sus materiales, sus componentes tienen un peso mínimo contra la magnitud de la generación eléctrica que proveen (Gipe, 2004).

La principal causa del cambio climático son las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de fuentes antropogénicas (CMNUCC, 1992), seguido de la degradación del suelo y destrucción de ecosistemas por parte del ser humano (IPBES, 2018). La industria de la energía tiene un impacto considerable en las causas antes mencionadas, y se estima que para evitar los peores efectos del calentamiento global, se debe lograr la descarbonización del sector energético eléctrico lo más temprano posible en la segunda mitad del siglo XXI. La única forma razonable de lograr esto es con la penetración de un porcentaje fuertemente mayoritario de energías renovables. La fracción restante se podrá cubrir con la opción más económica entre la captura de carbono, energía nuclear, almacenamiento, o incluso más energía renovable (IPCC, 2014b). Es entonces una necesidad y un hecho inminente la transición energética.

Se ha establecido ya que las formas de energía renovable pueden funcionar dentro de un gran rango de escalas de aplicación. Dentro de regiones urbanas, existe la posibilidad de la integración de estos modelos, primordialmente de la energía solar y de la energía geotérmica para climatización, en escalas de microgeneración. Estas

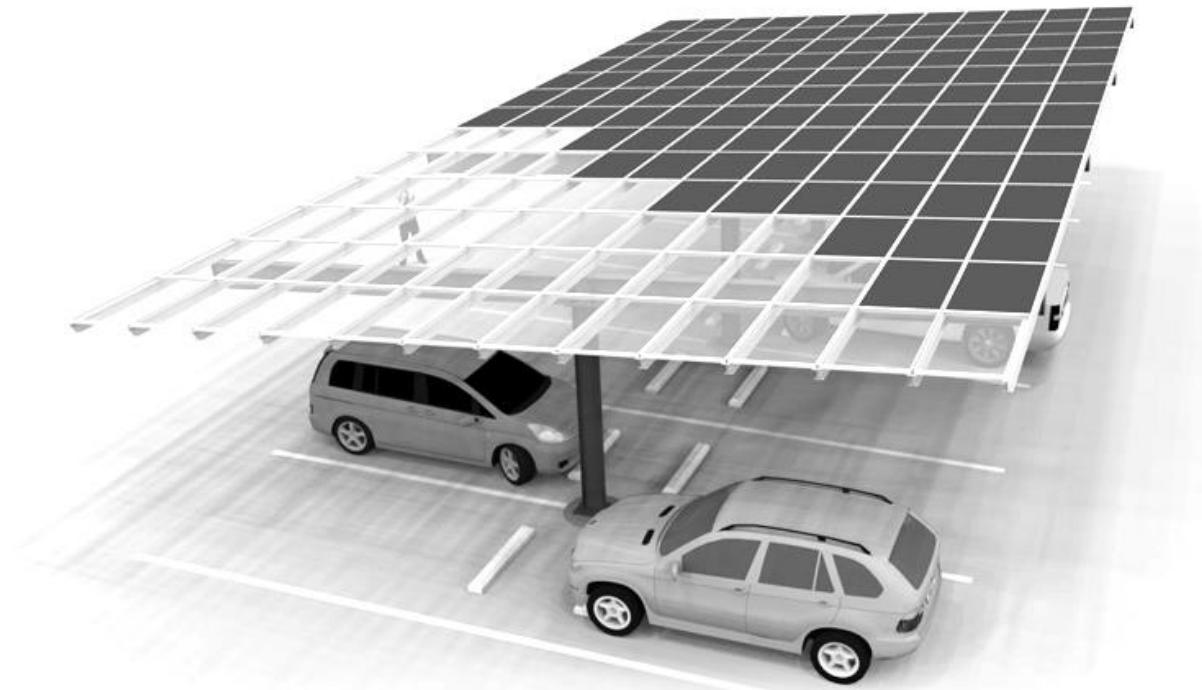


Figura 7.1a. Paneles fotovoltaicos en estacionamientos
(Tanweer, 2018)



Figura 7.1b. Carril de bicicletas con cubierta solar entre Daejeon y Sejong, Corea
(City of Sejong, 2017)

Se puede aplicar el mismo principio de este carril de bicicleta a las vías superficiales y elevadas de metro con rodadura neumática en la CDMX para evitar la marcha lenta en caso de lluvia.

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

dos tecnologías se pueden implementar a nivel de edificios individuales y traer beneficios en la disminución de consumo de recursos en edificaciones, tema que es discutido en el capítulo 8. Existen también muchos espacios con una gran área disponible en la ciudad, a los cuales la energía fotovoltaica les puede traer beneficios adicionales fungiendo como cubierta. Se pueden instalar paneles fotovoltaicos en estacionamientos, cubriendo a los automóviles de la intemperie (Tanweer, 2018) (Figura 7.1a). Esta aplicación es notable en el Instituto de Ciencias Biomédicas de Ciudad Universitaria.

Otro uso que no ha sido explorado en la Ciudad de México, sería para proteger las vías superficiales del sistema Metro. Debido a los problemas de hundimiento regional en la ciudad, se ha optado por construir la mayoría de las líneas de Metro con trenes neumáticos, ya que permiten una tracción en las pendientes pronunciadas que se generan por hundimientos diferenciales (Bureau, 2013). Además, se han construido muchos kilómetros de vía, ya sea a nivel de piso, o en vías elevadas. Las llantas de hule pierden mucho más tracción que las ruedas metálicas ante rieles mojados, por lo que en época de lluvias se generan importantes retrasos por marcha lenta (Páramo, 2017).

En sectores como la línea 5 a la altura de Misterios, sobre el Circuito Interior, se ha puesto ya un techo de lámina que protege a las vías, pero a lo largo de toda la línea 2 sobre Tlalpan no existe ninguna medida para evitar este problema. La tensión de alimentación para tracción en el metro es de 750 V en CD (STC, 2008), por lo que se puede diseñar un sistema de paneles fotovoltaicos que sirva de techo para las vías sin agregar un considerable peso adicional a la cimentación, y que alimente a la red de tracción del metro, evitando el paso de inversión de CD a CA y teniendo por consiguiente un mejor aprovechamiento de la energía (Figura 7.1b).

Al contrario de otros mercados como Alemania, en la Ciudad de México apenas empieza la adopción de la energía solar (Viscidi, 2018). Esto podría parecer ilógico porque la ciudad de México tiene el doble de radiación solar diaria que cualquier lugar de Alemania (NASA, 2018). Las barreras para su adopción han sido el elevado costo de la tecnología contra el bajo poder adquisitivo de los mexicanos, el subsidio a las tarifas eléctricas, y la falta de instrumentos para el financiamiento. En primera instancia, el costo de la energía fotovoltaica ha demostrado un decrecimiento exponencial (Ran *et al.*, 2017), y a escala de generación se han roto récords de los menores precios en el mundo en México (Deign, 2017). Después, el subsidio del más del 60% de la tarifa eléctrica residencial es un cargo fiscal insostenible para CFE, de tal manera que para aliviar su deuda eventualmente tendrá que disminuirlo o desaparecerlo gradualmente, como se ha hecho con las tarifas comerciales. Además, una tendencia al alza del precio de los combustibles fósiles y un mercado de carbón podrían incrementar la presión hacia el aumentar de las tarifas eléctricas.

Daniel Chacón en la Iniciativa Climática México propone no aumentar las tarifas, pero usar el subsidio eléctrico para instalar paneles solares en todos los hogares de México, lo que acabaría con el déficit presupuestario de CFE sin cargo al usuario (2013). Una propuesta similar fue hecha por Ricardo Anaya durante su campaña presidencial. Por último, ya se están extendiendo esquemas de PPA, *power purchase agreement*, donde el usuario no necesita realizar una inversión para adquirir un sistema fotovoltaico, sino que renta su azotea y compra la energía solar a menor precio

que a CFE (Kollins *et al.*, 2010). Por estas razones, existe un gran potencial para la implementación de energías renovables dentro de la Ciudad de México, y será un mercado que seguirá creciendo a un ritmo vertiginoso, con múltiples beneficios para los habitantes de la ciudad.

Redes inteligentes

El rápido desarrollo de las tecnologías de la información, su integración con otras tecnologías ya existentes, y de desarrollos particulares como el internet y la inteligencia artificial han permitido la creación de sistemas dinámicos y más resilientes. La implementación en el sistema eléctrico se ha conocido como la *smart grid*, o red eléctrica inteligente. Este tipo de redes aprovechan la ciencia de datos y el análisis estadístico de la gran cantidad de información que puede ser recopilada de sus usuarios para mejorar su comportamiento. Es importante para poder tener una transición hacia estos desarrollos el sustituir los equipos analógicos por dispositivos digitales que puedan recabar los datos necesarios del usuario y tener un medio de comunicación para poderla transmitir. La implementación de las redes inteligentes permitirá un mejor uso de los recursos y una respuesta más rápida ante eventualidades, por lo que se tiene mucho potencial para asegurar la continuidad del suministro eléctrico en condiciones críticas. (DOE, 2009).

En primera instancia, el componente más sencillo en este tipo de sistemas serán los medidores inteligentes. Su función más básica es tener un registro histórico del consumo y de la demanda con una resolución que permita conocer la evolución de su comportamiento a lo largo del tiempo (FERC, 2008). Con el agregado de todos los medidores digitales, se puede conocer en tiempo real el comportamiento del sistema, y se tiene una medida adicional, además de la regulación por variación de frecuencia y de voltaje, para conocer el cambio de la demanda y ajustar consecuentemente la generación eléctrica para mantener la estabilidad de la red. Por otra parte, se puede hacer un análisis histórico para crear tendencias en la variación del consumo y encontrar patrones de comportamiento diario y estacional. Con esta información se diseña una mejor y más eficiente política de operación y de crecimiento a largo plazo de la capacidad instalada, además de poder notar puntos críticos de operación y zonas débiles de la red.

Se necesita tener una manera de hacer llegar esa información a la agencia central de análisis. Algunos medidores, como los que CFE ha instalado recientemente para sustituir a los equipos analógicos, tienen un sensor por el que se puede descargar la información de manera puntual, por lo que se pierde la posibilidad de tener una simulación de alta resolución en tiempo real (CFE, 2006). Otros medidores aprovechan la conexión a internet de cada edificio para transmitir su información, pero esto puede crear problemas de seguridad en la red local. Una opción mejor es tener una conexión a la red GRPS de celular, aunque esto conlleva el pago por este servicio (Enphase, 2017).

El tener una instalación de telecomunicaciones que sirva específicamente a los medidores genera una red paralela al suministro eléctrico que tendría un costo adicional insostenible. Sin embargo, esta idea sí ha sido explorada, sobre todo a nivel

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

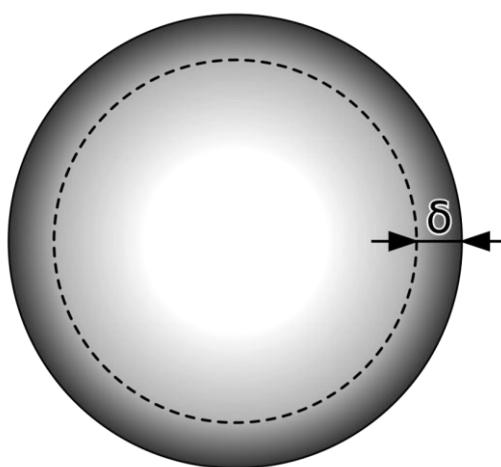


Figura 7.2a. Efecto piel en conductores eléctricos con altas frecuencias y tensiones
(Wikimedia, 2008b)

Se puede observar como varía la distribución de la densidad de corriente a lo largo del radio del conductor.

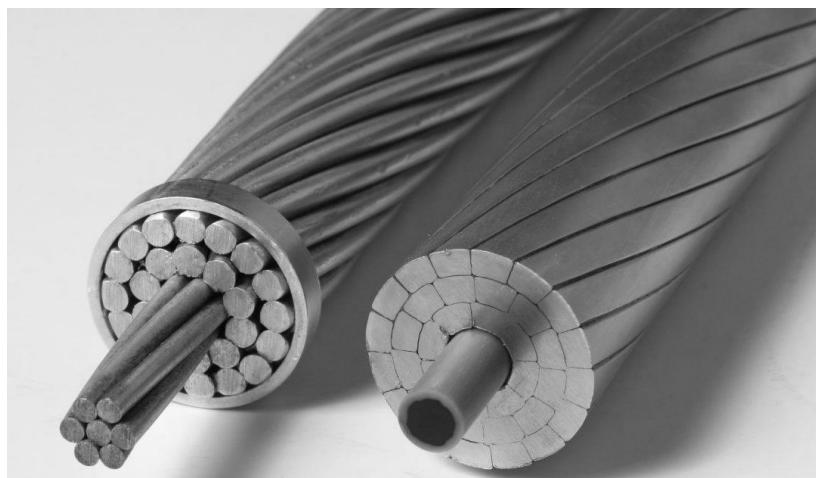


Figura 7.2b. Alma de fibra óptica en conductores de alta tensión
(Bryant, 2017)

El alma de los conductores de transmisión no lleva corriente, pero contiene un refuerzo típicamente de acero, como se puede apreciar en la imagen. Se ha propuesto colocar en este espacio un alma de fibra óptica.

transmisión. En conductores a grandes voltajes se observa un efecto pelicular; la corriente no se distribuye uniformemente sobre el área transversal, sino que se concentra en una capa límitrofe exterior (Figura 7.2a). Por esta razón los cables de transmisión siempre son delgados y para llevar una mayor corriente se opta por tener un mayor número de conductores (Mathew y Arun, 2017).

Otra opción que ha sido explorada es el tener un conductor con un alma interior de fibra óptica para telecomunicaciones (Ikeya *et al.*, 1986). En un conductor con sección transversal de dona se presenta una gran disminución del efecto pelicular, y se le da un uso de mayor valor al alma que normalmente tendría una densidad de corriente baja (Figura 7.2b). Otra ventaja es que se aprovecha de doble manera el

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

uso de suelo de las torres de transmisión. No se ha aplicado en gran escala debido a las limitaciones técnicas de resistencia de materiales y a que es poco usual que una empresa dé servicio eléctrico y de telecomunicaciones a la vez.

Otra opción que ha sido explorada y ha encontrado mayores aplicaciones es la comunicación por línea de potencia. En esta tecnología se transmite información a través de los conductores eléctricos mediante el uso de una muy ligera distorsión armónica, similar a la modulación de frecuencia y de amplitud en las ondas de radio (Serna, 2011). La problemática que se presenta en este caso es la afectación que puedan ocasionar los armónicos a equipos electrónicos sensibles si no se hace de manera correcta.

Una de las principales aplicaciones que se han encontrado para las redes eléctricas inteligentes es el manejo de la demanda. Las redes eléctricas se encuentran en su punto de mayor vulnerabilidad en el momento de mayor demanda. Este problema puede aumentar con las energías renovables, ya que la energía solar fotovoltaica y eólica son intermitentes, y la magnitud y ubicación temporal de la generación tienen una inherente incertidumbre. En un mundo con un 100% de energías renovables, el tener un intervalo de confianza aceptable en el cumplimiento de la demanda pico requiere contar con un exceso de capacidad instalada, generando grandes incrementos en el costo de la energía (Taneja *et al.*, 2013).

Existen varias soluciones para este problema. La primera es la diversificación de formas de energía renovable, ya que las energías geotérmica, hidroeléctrica, marina y de biomasa no tienen problemas de intermitencia. Otra opción es contar con una mayor distribución geográfica de las centrales eléctricas para evitar fenómenos meteorológicos locales. Para evitar la pérdida de energía en el transporte es necesario a su vez instalar conexiones de larga distancia en altos voltajes de corriente directa, como ha sido realizado entre la región eólica del Istmo y el centro del país.

Existe la posibilidad de aprovechar los datos de consumo en tiempo real de una red inteligente. En caso de un pico de demanda, se puede pedir a una cierta cantidad de usuarios que disminuyan su consumo o retrasen el uso de ciertos equipos para amortiguar el pico. Este control se puede realizar de forma automática si se confiere control a la red, o mediante señales de precio, donde el costo de la electricidad sigue a la curva de la demanda y el mecanismo de mercado se encarga de que los usuarios regulen de forma natural su consumo, es decir, con un precio dinámico de la energía (FERC, 2018). Equipos como aires acondicionados, lavadoras, refrigeradores, entre otros, pueden retrasar su arranque algunos segundos o incluso minutos sin mayores afectaciones para evitar la simultaneidad de picos de arranque. Este tipo de medidas ya han sido implementadas en varios países (Vincenzo y Bossart, 2012), ya que industrias como las acereras y sus hornos de fundición tienen la misma capacidad que los electrodomésticos ya comentados.

Por otra parte, la llegada masiva de los automóviles eléctricos puede significar un riesgo o un gran beneficio para una red eléctrica, dependiendo de las decisiones que se tomen. Por un lado, se tendrá un fuerte incremento en el consumo, para el cuál no existen aún las centrales, y en la demanda, para lo cual no está preparada la red. Si se maneja la demanda de carga de estos vehículos, estos problemas prácticamente desaparecen, e incluso ayudan a nivelar la curva del consumo cuando se

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

favorece la carga en periodos de baja demanda, particularmente en la madrugada. Un beneficio adicional será la tecnología *vehicle to grid* (V2G). Un carro eléctrico es esencialmente una enorme batería móvil. Entonces, aparte de recibir energía para cargarse, puede enviar energía a la red en periodos de punta, ayudando a estabilizarla. El vehículo seguirá siendo un consumidor neto de energía, puesto que no genera nada, pero dará como beneficio una mayor resiliencia del sistema eléctrico (Rauf *et al.*, 2016).

Existe una preocupación en el caso de las redes inteligentes relativo a la privacidad y a la seguridad. Para tener un funcionamiento adecuado se debe recopilar una gran cantidad de información que idealmente debe ser utilizada exclusivamente para fines estadísticos, pero la compañía que los posee puede utilizar esa información específica de cada individuo para su beneficio o incluso venderla a otros terceros. Estas compañías sabrán todo sobre nuestros hábitos de consumo y nuestro quehacer diario. Si la empresa eléctrica es pública, se vuelve trivial para el gobierno el espiar a sus ciudadanos.

Además, la red eléctrica confiere control remoto de una gran cantidad de equipos. Desde uno o varios puntos se deben poder controlar el funcionamiento de centrales eléctricas, interruptores y subestaciones, e incluso equipos eléctricos individuales. Esto genera una gran oportunidad para el terrorismo cibernético. En 2017, en lo que pareció ser únicamente un ejercicio de sus capacidades, un equipo de hackers rusos logró obtener control completo sobre la red eléctrica estadounidense, pero no hicieron ninguna modificación que ocasionara daños (Sanger, 2018). Es por esta razón, que uno de los posibles impactos a la resiliencia de las ciudades futuras serán los ataques informáticos (Campbell, 2015). Debe contarse con las regulaciones necesarias para asegurar la privacidad de los usuarios y para desarrollar los sistemas de seguridad necesarios para evitar desastres debido a una disruptión del servicio en momentos críticos.

Generación eléctrica distribuida

Las redes eléctricas convencionales tienen gran interconectividad, lo cual las vuelve sistemas muy complejos pero altamente resilientes a embates. Sin embargo, su transporte de bienes se lleva a cabo de forma esencialmente lineal. Un puñado de centrales eléctricas de gran capacidad son el punto de origen y el destino es de la misma manera un puñado de ciudades de gran tamaño y consumo. Por ende, la falla de alguna central de generación crea un evento ante el cual se tiene una adaptabilidad mucho menor de la red. Esto puede tener efectos más graves, ya que toda la red puede quedar inhabilitada, incluso secciones sin problema alguno. En países en desarrollo, donde la población crece rápidamente y la red eléctrica no puede seguir el paso, se deben buscar nuevos planteamientos que puedan llevar electricidad a una población altamente dispersa en comunidades rurales, como sucede en muchos países de África y Asia.

En la actualidad se tiene un proceso de interconexión de las redes nacionales a nivel de regiones globales para resolver problemas de variación en oferta y demanda a gran escala, pero hasta hace algunos años, cada país tenía una o varia redes que

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

funcionaban como una isla y cuya estabilidad dependía completamente de sus elementos internos (Charpentier y Schenk, 1995). Esto es aún el caso de la península de Baja California, aunque en mayo de 2018 empezó la licitación para realizar la interconexión con todo el país (SENER, 2018). En este caso, las centrales eléctricas deben poder asegurar un suministro estable en todo momento. En vez de llevar líneas de transmisión de redes centrales por cientos de kilómetros a pequeñas comunidades, como hizo Estados Unidos y Francia para electrificar todo el país (Gipe, 2004), se pueden emular estas redes “isla” a menor escala y llevar este recurso a más personas y a un menor costo (Mumtaz y Bayram, 2017).

Estas “microrredes” pueden contar con una fuente de energía renovable y un sistema de almacenamiento para dar luz a una pequeña comunidad. Esto es más útil para el desarrollo económico de las poblaciones que los sistemas de pago por uso, donde se instala un pequeño sistema por hogar que se va abonando por pequeños pagos y típicamente sólo permite el uso de pocas luces y carga de celulares (Vendeirinho, 2018). En México el FSUE, el Fondo del Servicio Universal Eléctrico, está desarrollando microrredes eléctricas para las poblaciones que se encuentren a más de cinco kilómetros de la red eléctrica más cercana (FSUE, 2018).

Las microrredes no necesariamente deben ser sistemas completamente aislados, sino que pueden formar subsistemas de una red de mayor tamaño. En este caso, las microrredes funcionan como un respaldo en caso de disrupción del servicio (Mumtaz y Bayram, 2017). Las microrredes deben contar en su interior con todos los elementos de una red convencional, dígase generadores, consumidores, y sistemas de seguridad. Por otra parte, deben tener puntos de interconexión con la red global. Idealmente se contará con al menos dos puntos de conexión para tener múltiples rutas. Si se presenta una falla en el sistema a gran escala, los puntos de interconexión tendrán interruptores que se desconectarán automáticamente en caso de falta de tensión o inestabilidad del suministro. Similar a una planta de emergencia dentro de un edificio, inmediatamente el sistema de generación cubre el consumo de la microrred eléctrica. Normalmente estas redes contarán con un sistema de almacenamiento que pueda amortiguar la variabilidad de la fuente de generación renovable y que pueda estabilizar el transitorio generado en el momento de desconexión de la red principal.

Para la implementación de esta tecnología en ciudades puede aprovecharse la existencia de una gran cantidad de redes de distribución, teniendo como punto de desconexión el transformador o la subestación eléctrica. Puede observarse que se deberá seguir un proceso similar al que se lleva a cabo con la sectorización de redes de agua potable, que se comentan en el capítulo 6. El uso de microrredes permitiría una mejor integración de las energías renovables y le daría mayor resiliencia a una ciudad al evitar apagones generalizados.

En las redes eléctricas convencionales, se tiene exclusivamente elementos consumidores y elementos productores. Como en la actualidad cada edificio individual puede contar ya con su propio sistema de generación eléctrica a través de un sistema fotovoltaico, se empiezan a borrar las fronteras entre productores y consumidores. Ahora un edificio puede ser un consumidor en una hora del día, y enviar energía a la red en otras horas, volviéndose un *prosumer*, de las palabras en inglés *producer* y *consumer*. Se habla del efecto que esto tendrá en la democratización de la energía,

7. Energías renovables y microrredes eléctricas

porque ahora serán los individuos quienes serán los dueños del medio de producción de electricidad en vez de un generador central, y la suma de toda la población será la que mantenga en funcionamiento a la red eléctrica (Parag y Sovacool, 2016). Esta visión, evidentemente, no es favorable para las grandes compañías eléctricas, quienes han tomado medidas para evitar el desarrollo de la energía solar distribuida, porque además consideran que disminuirán sus ventas. En México, CFE impuso un amparo en 2016 para evitar que individuos vendan sus excedentes de energía, pero a mediados de 2018 lo retiró sin ofrecer comentarios (García, 2018).

Una red distribuida de generación no puede sustituir por completo a la generación central, y ambos sistemas se complementan. Uno de los beneficios es que se libera el estrés de la red de distribución por una falta de capacidad, lo que evita que la compañía eléctrica haga fuertes inversiones para aumentar su capacidad, lo cual no aumenta sus ventas. Además, se disminuyen los picos de demanda. Esto evita que se preñan las centrales eléctricas de pico, que pueden variar rápidamente su producción pero tienen un costo de generación muy alto (Risto y Aija, 2008), lo cual disminuye la utilidad de empresas que maneja tarifas planas.

Los inversores de sistemas fotovoltaicos pueden compensar el factor de potencia (Enphase, 2018), lo que beneficia a las compañías porque evita las pérdidas, y pronto además podrán tener inercia para estabilizar la red. De esta manera, la empresa ya no tiene que invertir en estos servicios auxiliares porque el usuario ya lo está realizando de forma gratuita. Además, la penetración de la energía renovable facilitará la implementación de estaciones de carga para automóviles eléctricos, que sí serán una nueva fuente de ingresos para unas compañías que han visto sus ventas estancadas desde hace varias décadas (Rauf *et al.*, 2016).

Existen muchas preocupaciones por la estabilidad de la red en caso de una alta penetración de energía solar distribuida en la ciudad. Un importante problema es la curva de "pato", que se refiere a la condición de un súbito incremento en la demanda eléctrica vespertina posterior al decremento de la producción fotovoltaica y se llama así por la similitud de la gráfica con el lomo de un pato (Figura 7.3). La pendiente de la curva es tan grande que las centrales térmicas convencionales no pueden ajustar su producción a un ritmo adecuado (Denholm *et al.*, 2015). Este problema sólo se presenta en zonas templadas donde la demanda máxima ocurre al atardecer, al contrario de zonas con gran uso de aire acondicionado.

En Australia durante el verano de 2018 la demanda máxima fue cubierta consistentemente por la producción de parques solares y sistemas de almacenamiento, pese a repetidas fallas de centrales térmicas (Green Energy Markets, 2018). La eficiencia energética puede disminuir este problema, porque el pico de demanda se genera usualmente por calefacción e iluminación (Denholm *et al.*, 2015). El viento suele ser más fuerte en la noche debido a las inversiones térmicas y los chorros nocturnos, por lo que sistemas híbridos eólicos y solares sufren menos en los picos de demanda (Gipe, 2004). Otras formas de energía renovable, como las centrales hidroeléctricas, presentan una de las mayores tasas de variación de la generación con inercias de segundos gracias a la posibilidad de modificación de la apertura de las compuertas de la turbina, mientras que las centrales carboeléctricas y las nucleares tienen una inercia de horas o incluso días (EPRI, 2013).

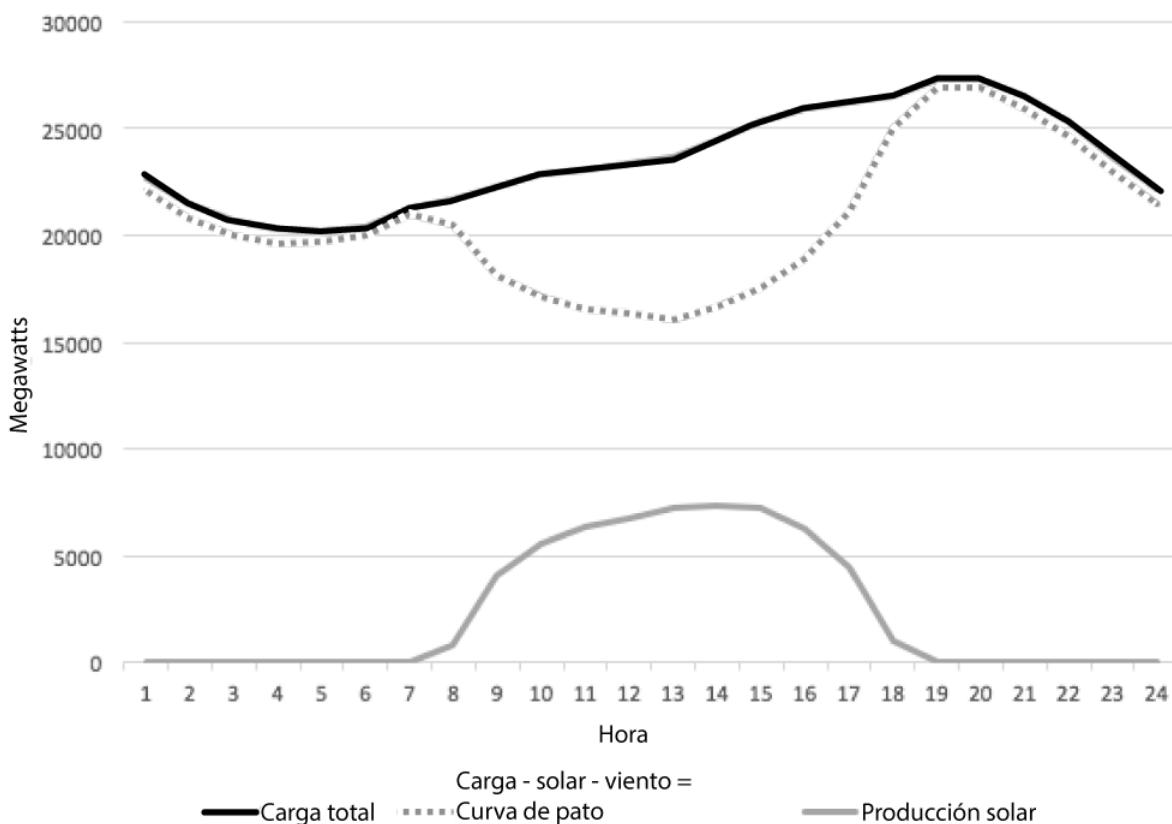


Figura 7.3. Curva de pato en la demanda de energía en California el 22 de octubre de 2016.
Adaptado a partir de Wikimedia (2016)

Otra problemática de la energía solar es la falta de inercia para estabilización de frecuencia, por lo que pequeños transitorios pueden apagar un sistema fotovoltaico funcional rápidamente (Enphase, 2018). Ya existen en el mercado sincroinversores, que emulan la inercia física de turbinas, lo que ayudará a estabilizar una red con energía solar (Manoj *et al.*, 2018). Se argumenta también que la capacidad de las redes de transmisión y distribución no será suficiente puesto que fueron diseñadas para transportar energía en un sentido y no en dos (Bayindir *et al.*, 2018). Será necesario invertir en la modernización de la red eléctrica, pero no con sumas tan exorbitantes como proponen los detractores de la energía. En las redes de distribución urbana, debe aumentarse la redundancia de la red, su interconectividad, crear microrredes aislables y asegurar que las subestaciones estén diseñadas de forma simétrica para que funcionen de forma satisfactoria en ambos sentidos.

China, después de expandir de forma incontrolada su capacidad eólica, se ha dado cuenta que sin una modernización de la red eléctrica existirá un desperdicio importante de energía (Zhou y Lu, 2017). Con el complemento de redes inteligentes, almacenamiento y control de la demanda, se disminuye aún más el problema. La existencia de un porcentaje mayoritario de energías renovables a nivel distribuido es entonces viable y benéfico para los usuarios, las compañías eléctricas y para el bienestar general de una ciudad.

8. Edificios autosuficientes

Uso de recursos

Los edificios son uno de los subsistemas más importantes dentro de la estructura urbana; sirven como microcentros de actividad donde se llevan a cabo las diversas funciones que mantienen a un centro urbano y a su población. Casi todas las redes de transporte de una ciudad llevan los recursos hasta los diferentes inmuebles, donde son aprovechados y convertidos en desechos o coproductos. Las edificaciones se pueden clasificar de acuerdo a las funciones que realizan dentro del metabolismo urbano, puesto que existen industrias que transforman la materia prima y le agregan valor, edificios administrativos o de gobierno, y construcciones primordialmente residenciales o habitacionales. También existen edificios que se dedican a la neutralización o tratamiento de los residuos generados dentro de una ciudad, aunque en ocasiones estos ya no se encuentren dentro de la frontera física urbana.

Para poder sustentar las actividades que se llevan a cabo dentro de un edificio, éste necesita tener a su vez un complejo sistema que requiere insumos y los transforma. Es posible también entonces considerar que así como existe un metabolismo urbano, cada inmueble se podrá modelar y se comportará de acuerdo a su metabolismo. Para poder transportar los recursos para su utilización, un edificio debe contar con redes que muevan los diferentes tipos de materias primas. Estas redes son análogas en su mayoría a las redes de infraestructura pública en una ciudad, puesto que transportan el mismo tipo de recursos y de residuos, pero a menor escala. Así, un edificio cuenta con una infraestructura hidrosanitaria, con una instalación eléctrica y en muchas ocasiones una instalación de gas.

Algunas construcciones de gran altura cuentan con conductos para disponer de los residuos sólidos desde los niveles altos, y por lo general se tienen zonas de disposición y recolección de éstos, con la ocasional separación *in situ*. En muchos inmuebles comerciales se tienen zonas de descarga para el ingreso de productos y alimentos, y se cuenta con vialidades y estacionamientos para vehículos. La conducción de personas se hace a través de pasillos, escaleras y otros elementos arquitectónicos. Todas estas redes internas tienen un punto de conexión con la red pública, lo cual permite el libre transporte de bienes y logra que un edificio no pueda estar aislado de la demanda de recursos de las construcciones aledañas y de la ciudad en general.

Al analizar a un edificio a través de su metabolismo, éste va a tener una huella dentro del tejido urbano. La huella es de carácter físico, puesto que ocupa un área en planta y se la dedica a un uso de suelo específico, el cual debe competir por espacios limitados con otros usos de suelo. Además, existe una huella ecológica debido al consumo de insumos y la generación de residuos. Debido a esta presión del limitado espacio físico, se ha tenido la tendencia de verticalizar las construcciones en las zonas urbanas con mayor desarrollo. Esto quiere decir que cada vez los edificios albergan más habitantes por metro cuadrado de terreno y se genera mayor actividad

8. Edificios autosuficientes

dentro de ellos. Por ende, consumen más recursos y un menor espacio requiere cada vez una mayor área de influencia para satisfacer el metabolismo del edificio. Sin embargo, el tener un edificio con mayor densidad también genera una ventaja en cuanto a eficiencia para el transporte de insumos, puesto que los recursos necesarios para una población mayor se pueden depositar en un solo punto, en vez de transportarlos a una gran cantidad de establecimientos que estén esparcidos a lo largo de un área extendida (Chen *et al.*, 2008).

Con un diseño adecuado y con las nuevas tecnologías existentes, se pueden crear construcciones cuyo consumo de recursos sea mínimo. De esta manera, una gran ciudad con rascacielos podría tener un impacto similar a una pequeña población. Debe pugnarse por crear edificios cada vez con una menor huella, e incluso buscar que sean completamente autosuficientes, es decir, que puedan funcionar sin utilizar insumos ni crear residuos al exterior. Esta independencia de las redes de la ciudad le daría una gran resiliencia al edificio, puesto que sería muy versátil y se vería poco afectado en caso de la disrupción de alguno de los servicios externos ante un impacto, además de que ayudaría a aliviar las tensiones crónicas que afecten a la ciudad, como el abastecimiento de agua potable. Sin embargo, edificio autosuficiente no debería estar aislado ni desconectado de la red externa, para poder tener aún mayor resiliencia y que en caso de falla de sus sistemas de autosuficiencia pueda depender aún de la red urbana.

Una gran ciudad se compone de miles de edificios, cada uno con sus propias instalaciones y consumo de recursos. El metabolismo de todos los edificios dentro un asentamiento se suma para crear el metabolismo urbano de la región. Entonces pueden existir grandes discrepancias en el comportamiento de cada edificio. Algunos tendrán una huella ecológica mínima per cápita, mientras que otros serán grandes consumidores. Si se quiere disminuir el impacto que tiene una ciudad en su medio, se presenta un gran reto al tener que mejorar la situación de una gran cantidad de subsistemas con una cantidad igual de partes interesadas y tomadoras de decisiones. Deben existir puntos de referencia que ayuden a cada edificación individual a saber qué se espera de su comportamiento y qué acciones se deben tomar para reducir su uso de insumos. Esto implica también que la reducción del uso de recursos no se logrará mediante una obra o acción centralizada puesto que se trata de un problema típico de la infraestructura distribuida; se debe tener un control y supervisión central para la suma de un gran número de acciones individuales que generarán un impacto notable.

Durante su etapa inicial de crecimiento, la ciudad de México no contaba con grandes restricciones de espacio. Apenas en el último par de décadas la urbanización ha llegado hasta las zonas con terreno accidentado donde cada vez es más caro y riesgoso construir. Debido a esto, ha empezado la tendencia conocida como *infill*, o desarrollo interno, donde en vez de seguir en desarrollo en zonas naturales limítrofes, se demuelen edificaciones ya existentes para construir con más pisos y mayor densidad (The Housing Partnership, 2003). Sin embargo, las difíciles condiciones del suelo han dificultado la construcción de gran cantidad de rascacielos; incluso el edificio más alto de México se encuentra en Monterrey y no en la Ciudad de México (Stark, 2016). Pese a esto, se pueden encontrar una franca tendencia hacia la verticalización en

zonas de la ciudad como Santa Fe, el Nuevo Polanco, la alcaldía de Benito Juárez y Reforma (Valdés, 2017).

La ciudad de México ya tiene problemas de abasto de agua, de tráfico, mala calidad del aire, entre otras cosas, y el desarrollo de edificios de gran densidad sin una visión de planeación urbana pone en riesgo la resiliencia de la ciudad (Vite, 2005). Deben tomarse medidas para permitir un desarrollo económico pero que se realice en la dirección adecuada para mejorar la sustentabilidad de la ciudad.

Infraestructura sustentable

La forma más sencilla de reducir el consumo de recursos de un edificio es desde su concepción. También es posible el adecuarlo para que sea más sustentable pero se tiene un alcance menor y un costo mayor (Zhenjun et al., 2012). Un edificio debe concebirse correctamente desde su forma y función a través de la arquitectura bioclimática. Esta disciplina consiste en diseñar los edificios de acuerdo al clima y características físicas locales, de tal manera que su consumo de recursos se encuentre optimizado y minimizado para su región (Watson, 2013). La orientación de paredes y otros elementos arquitectónicos permite aprovechar sombras y luz natural para cubrir los requisitos energéticos del edificio y no tener flujos excesivos de calor que afecten negativamente su rendimiento.

Es importante considerar la estacionalidad del clima, del viento, de la posición solar y de la precipitación para hacer viviendas cómodas a lo largo del año. Se pueden utilizar diferencias de presión para generar flujos de aire sin requerimientos energéticos y aprovechar otros elementos naturales para que beneficien al ocupante. Muchas de las técnicas utilizadas por la arquitectura bioclimática corresponden al conocimiento tradicional, que se refiere a las técnicas de construcción utilizadas en la antigüedad que se están recuperando por la eficiencia energética que confieren de manera pasiva a un edificio (Scardigno, 2014).

De esta manera, la infraestructura verde tiene un gran campo de aplicación dentro de la sustentabilidad en edificios. Diferentes implementaciones de infraestructura verde en las zonas del edificio pueden cumplir diversas funciones y generar beneficios, muchos de los cuales se han comentado ya en el capítulo 5. La infraestructura verde puede ayudar en el manejo de la política hídrica del edificio, como se verá más adelante, a través de sistemas de filtración y tratamiento, captación de agua pluvial, retención de avenidas hidráulicas, infiltración al subsuelo y reúso de agua. Por otra parte, la infraestructura verde tiene un rol importante en la regulación térmica de los espacios. Una azotea verde funciona como un amortiguador térmico para los niveles superiores de un edificio, reduciendo la carga de refrigeración necesaria en esos pisos (Kolokotsa, 2017). Se puede dar sombreado estacional al sur de la construcción mediante árboles caducifolios. Estos son los árboles que pierden su follaje en el invierno, por lo que pueden bloquear la radiación solar en verano y dejarla pasar en invierno. Al norte del inmueble se puede dar aislamiento del viento mediante especies perennes.

El contar con áreas verdes, por su parte, puede reducir de manera local el efecto de isla de calor urbana. Los muros verdes pueden tener también este efecto y ayudar

8. Edificios autosuficientes

a través de la evapotranspiración, siempre y cuando se diseñen con principios de xeropaisajismo para reducir el consumo de agua. El aplicar este último principio en el diseño de infraestructura verde para edificaciones es fundamental, porque por lo general las áreas verdes implementadas en edificios se encuentran aisladas de otros espacios naturales. Al funcionar como islas, estos espacios se vuelven más vulnerables. Es común, sobre todo en muros verdes, que no se siga el itinerario de mantenimiento establecido y que por consiguiente la infraestructura verde se convierta en una externalidad con la cual hay que lidiar (Ekren, 2017). Además, el usar especies locales ayuda a la preservación de ecosistemas urbanos, favoreciendo a polinizadores y creando corredores de biodiversidad. Otro punto a favor es el valor estético que se tiene cuando se integran las áreas verdes adecuadamente.

Una fuerte área de oportunidad existente en edificaciones es el consumo energético. Si se siguen los principios ya comentados de arquitectura bioclimática, se puede reducir en gran medida los requisitos de climatización y de iluminación de espacios. Además, es necesario diseñar de manera correcta la envolvente del edificio, la cual representa la frontera térmica entre los espacios interiores climatizados y los exteriores. En las zonas con climas fríos y templados se ha desarrollado de manera importante el uso de aislamiento térmico y otras medidas de envolvente térmica, como los espacios no climatizados no habitados, flujos de aire, y la masa térmica para aprovechar la inercia diaria de la transferencia de calor. Esto ha sido necesario para evitar grandes consumos por calefacción en invierno (Kosny *et al.*, 2013).

En climas más cálidos se ha tenido tendencia a ignorar la envolvente térmica por la falta de meses de frío extremo (Al-Homoud, 2004). Sin embargo, en verano se requiere el uso de aire acondicionado, que tiene un gran consumo energético. El cambio climático exacerbará las ondas de calor, lo que aumentará la carga de climatización en muchas zonas de México (IEA, 2016). Esto ocasionará un fuerte impacto en el sistema eléctrico, debido al pico de demanda generado en la hora de mayor calor, y por esta razón es necesario empezar a actuar en materia de eficiencia energética en el país. A su vez, se ha mostrado un fuerte desarrollo en tecnologías como iluminación LED y electrodomésticos eficientes para reducir aún más el consumo de una edificación.

La energía eléctrica utilizada por un edificio debe provenir de grandes centrales generadoras que se encuentran a cientos de kilómetros de la ciudad. Los combustibles para energía térmica como el gas natural también se fabrican en plantas que en ocasiones están incluso en otras ciudades. Incluso un edificio con muchas implementaciones para la conservación de la energía va a seguir consumiendo del exterior una fracción de ésta y tendrá un punto de ineficiencia en el transporte del recurso a lo largo de una gran distancia.

Sobre el área que ocupa un edificio existen ya recursos que pueden ser aprovechados por la edificación para eliminar incluso por completo su dependencia energética del exterior. Estas medidas pueden hacer que una construcción tenga un consumo neto de energía nulo, es decir, que el balance de producción y consumo sea cero. Sin embargo, el edificio debe permanecer conectado a la red porque la producción no siempre coincidirá con el consumo. Pese a esto, la condición del edificio como *prosumer* da beneficios de estabilidad a la red eléctrica nacional, como se ha comentado con la energía distribuida en el capítulo 7.

Las formas en que un edificio puede aprovechar las energías renovables es a través de la radiación incidente sobre él, las características térmicas del suelo, y el aprovechamiento de la biomasa. Pese a que existan certificaciones sustentables que permiten el uso del recurso eólico, por lo general no es económicamente viable en zonas urbanas, porque suele haber poco viento dentro de las ciudades por la gran cantidad de obstáculos, y a que un edificio genera mucha turbulencia a su alrededor, cuando una turbina necesita idealmente de un flujo laminar (Gipe, 2004). La biomasa de los residuos orgánicos se puede convertir en biocombustibles para uso térmico, aunque es mejor convertirla en composta para secuestrar el carbono en el suelo, ayudando a combatir el cambio climático y a restaurar ecosistemas, además de disminuir el mantenimiento de las áreas verdes (Dumitrescu, 2014).

Por otra parte, el aprovechamiento de la energía solar requiere un gran espacio en planta, y en grandes edificios el espacio disponible en la azotea sería insuficiente para cumplir con su consumo energético, mientras que el área que se destinaría a captadores solares podría ser más valiosa como un *roof garden*. Por el contrario, en edificios de pocos niveles, el aprovechar la azotea puede proveer casi la totalidad del agua caliente y electricidad de la construcción (Russo *et al.*, 2011). La capacidad térmica del suelo hace que a poca profundidad su temperatura sea estable durante casi todo el año, por lo que en verano se puede usar una bomba de calor geotérmica para climatizar y en invierno para calefacción (NREL, 1998).

Los edificios también tienen potencial para el aprovechamiento de formas poco convencionales de almacenamiento que permitirían reducir su dependencia de la red eléctrica. El agua ubicada en los tinacos tiene una energía potencial que muchas veces debe ser regulada por válvulas de presión para evitar daños en los pisos inferiores. En vez de estas válvulas se podrían diseñar turbinas que capten la energía (Figura 8.1a). Los elevadores también cuentan con energía potencial cuando se ubican en el piso más alto, por lo que también se podría diseñar un generador para aprovechar la energía desperdiciada durante su descenso (Figura 8.1b). Estas formas de almacenamiento funcionarían de manera análoga a los recuperadores de energía en los frenos de autos eléctricos e híbridos, conocidos como frenos regenerativos (Clegg, 1996) (Figura 8.1c).

Existen múltiples certificaciones que permiten a un edificio demostrar que es sustentable. La más famosa de todas es LEED, *Leadership in Environmental Design*, del USGBC, *United States Green Building Council*. Funciona por un sistema de puntos de acuerdo a las medidas que se tomen, y según la cantidad de puntos obtenidos se obtiene una medalla de rendimiento, ya sea Plata, Oro o Platino (GSA, 2014). El equivalente en Inglaterra es BREEAM. Estos sistemas han sido criticados por no adaptarse al clima y consumo energético local, por favorecer medidas improductivas como energía eólica urbana, implementar un estilo de arquitectura internacional, y que en general los edificios no resultan más eficientes que los no certificados, además que no se mide la operación real del edificio (Orr, 2014).

En muchas ocasiones estos certificados se buscan para dar plusvalía a la construcción y acaban funcionando como *greenwash*, para dar la apariencia de sustentabilidad cuando no existe (Alejos, 2014). Otras certificaciones que buscan evaluar la operación del edificio son *PassivHaus* y *EnergyPlus*, que certifican a edificios que producen toda o más de la energía que consumen (FENERCOM, 2011). Por otro lado,

8. Edificios autosuficientes

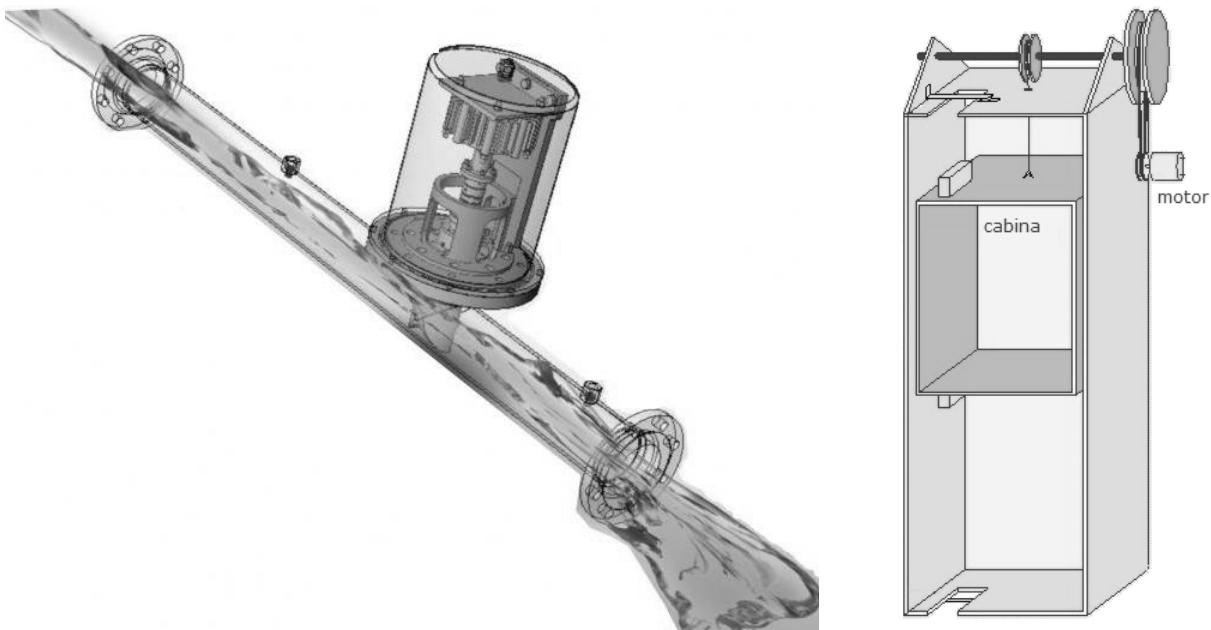


Figura 8.1a. Turbinas en instalaciones hidráulicas de edificios

Figura izquierda, (PolyU Hong Kong, 2012)

Figura 8.1b. Recuperación de energía en elevadores

Figura derecha, (Jurado, 2012)

Las turbinas en instalaciones hidráulicas podrían realizar la misma función de control de presión que las válvulas reguladoras y además tener una pequeña generación eléctrica. En el elevador, el motor funcionaría como generador para recuperar la energía potencial durante el descenso del ascensor.

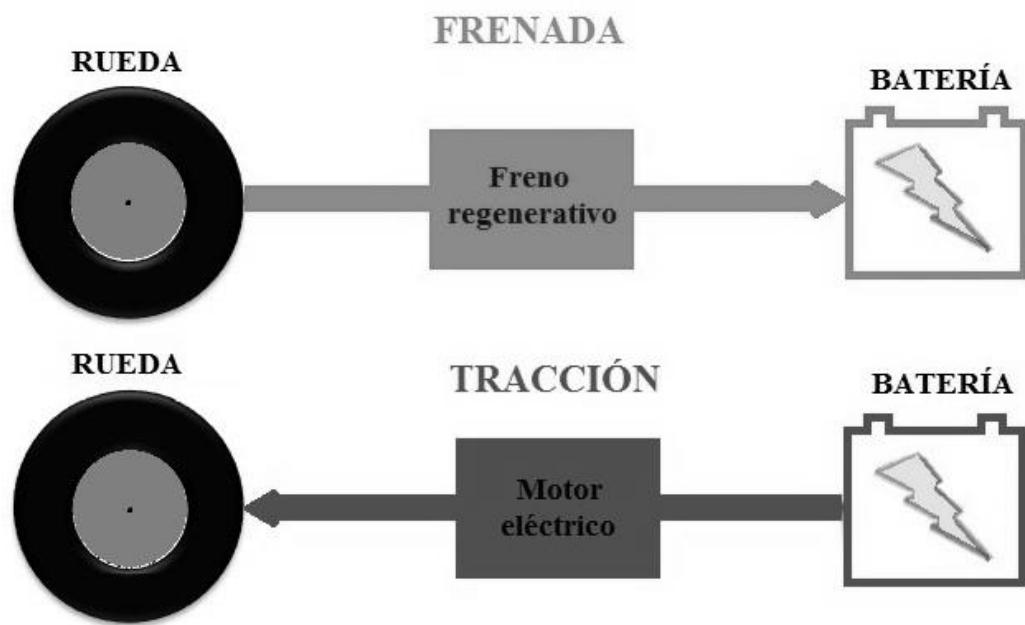


Figura 8.1c. Frenos regenerativos

(Tecnyo, 2013)

El freno regenerativo recupera parte de la energía utilizada, mejorando la eficiencia del sistema. Las dos propuestas anteriores funcionan bajo un principio similar.

el *Living Future Institute* tiene su propia certificación, el *Living Building Challenge*, que es mucho más estricta y adaptable que LEED y BREEAM, y por consiguiente muy pocos edificios la han podido obtener (ILFI, 2016). Es importante tener certificaciones para conocer los edificios que sí cumplen con los requisitos de sustentabilidad para contribuir a la resiliencia, pero es un error común pensar que la certificación es el fin y no el medio, lo cual inhibe la integración de proyectos individuales al plan urbano colectivo.

Economía circular

La economía es la ciencia que estudia la administración de los recursos escasos (Hoag, 2006). Como tal, la economía circular es una disciplina que propone solucionar el problema de la escasez mediante la disminución del uso de materias primas a través del aprovechamiento de los residuos, es decir, propone cerrar el bucle de la cadena de producción (Korhonen, et al., 2018). Esto coincide con las ideas de la Ecología Industrial, donde se tiene una filosofía de producción inspirada en la naturaleza. En los ecosistemas no existen desechos, simplemente coproductos de operaciones que se vuelven los insumos de otra. No existe en realidad una cadena alimenticia con un elemento superior, sino más bien un ciclo de reciclaje constante de nutrientes (Webb and Boltt, 1990). Estos principios pueden ser adaptados en la concepción de edificios cero, que equivale a tener una construcción autosuficiente. Se pueden crear edificios cero emisiones, aprovechando la eficiencia energética y energías renovables comentadas con anterioridad. También se puede aplicar el concepto a un consumo cero de agua y a una generación cero de residuos.

Uno de los mayores impactos que tendrá el aumento de la densidad habitacional en las urbes del mundo será en el consumo de agua (Chhipi-Shrestha et al., 2017). Las redes de abastecimiento que ya se encuentran estresadas tendrán que cumplir con nuevas demandas para las cuales no están diseñadas, lo que conlleva a problemas de presión y escasez de suministro. En cuanto al drenaje, un mayor gasto puede implicar fuertes riesgos de inundación. Estos problemas se acentúan si se lleva a cabo un desarrollo puntual sin contar con planes de urbanización en los cuales se considere la actualización de la infraestructura pública (Vite, 2005). La guerra contra la falta de agua en las ciudades se ganará en los edificios y a nivel de las demandas individuales, no con grandes obras de infraestructura. Por esta razón es necesario tener una nueva política de manejo hídrico en las construcciones, para minimizar la demanda de agua potable y las descargas de aguas residuales.

Para tener un consumo mínimo de agua, la red hidrosanitaria debe estar optimizada hacia este objetivo. Tradicionalmente los edificios cuentan con dos redes de abastecimiento, una de agua fría y otra de agua caliente sanitaria (ACS), mientras que el drenaje suele ser combinado. Esto no favorece ni la separación de los residuos de acuerdo a su grado de contaminación ni el reciclaje del recurso. Se puede agregar una red adicional de abastecimiento con agua tratada para usos sin contacto directo con los humanos, como para los sanitarios, mingitorios y riego de áreas verdes. Si se le da el tratamiento adecuado al agua, puede incluso mezclarse el agua tratada con el suministro convencional. En cuanto al drenaje, es buena práctica dividir las bajadas de drenaje en pluvial y sanitario, para tener un mejor dimensionado y uso

8. Edificios autosuficientes

más eficiente de la infraestructura. El agua pluvial no debe verterse por ningún motivo al drenaje público, salvo en contados casos de tormentas excepcionales. Este suministro requiere un tratamiento mínimo (FAO, 2013) y puede servir fácilmente a los usos de agua reciclada o de agua potable sin fuertes costos adicionales.

El agua residual debería separarse desde su origen en aguas negras, originadas en tazas de baño y mingitorios, y en aguas grises o jabonosas, provenientes de lavabos, fregaderos, regaderas, entre otros. Las aguas grises son fácilmente tratables con métodos químicos y mecánicos sencillos, y se pueden implementar proyectos de infraestructura verde para su limpieza y reúso. Las aguas negras requieren más procesos y energía para su limpieza, y en proyectos de pequeña escala no será práctico su tratamiento, por lo que tendría que ser vertida al drenaje. Pese a esto, si se utilizan muebles hidrosanitarios eficientes y de bajo consumo, puede reducirse a un mínimo el coeficiente de retorno del agua al drenaje. En edificios más grandes, es posible la implementación de pequeñas plantas de tratamiento para el reúso máximo del agua dentro de éstos, como ha sido expuesto en el capítulo 6.

El otro impacto principal que existe en las edificaciones es la generación de residuos sólidos. En la Ciudad de México ya existe una norma que obliga a separar los residuos sólidos (SEDEMA, 2015), pero su cumplimiento es poco y muchos edificios no cuentan con la infraestructura para incentivar la separación de residuos y reciclaje. Es más sencillo separar los residuos inmediatamente después de su creación y en su lugar de origen, que en una estación de transferencia o de reciclaje donde ya se ha generado una mezcla y existen lixiviados por la descomposición de los residuos. La administración de un edificio tiene la autoridad suficiente para obligar a sus inquilinos a seguir un régimen de separación de residuos que vaya más allá de los residuos orgánicos e inorgánicos. Es sencillo separar de origen cartón y papel, Tetrapak, vidrio, PET, plásticos, y aluminio si existen los contenedores generales adecuadamente marcados y se provee a los habitantes con los propios, además de tener una supervisión de la disposición de los residuos.

En edificios con áreas verdes puede existir una sección dedicada a la fabricación de composta para uso en éstas zonas, por lo que se eliminaría la entrega de residuos orgánicos al sistema de recolección de basura. Con el dinero que se obtenga del reciclaje de todos los habitantes, puede pagarse parte de un salario digno al personal que se dedique a esta actividad dentro del edificio. A su vez será necesario tomar las medidas adecuadas de higiene para minimizar los lixiviados y los malos olores, para no generar una mala imagen y estigmas alrededor de la actividad de reciclaje.

Normatividad

Como ya se ha comentado, existe un gran potencial para concebir edificios cuya dependencia del metabolismo urbano sea mínima y que contribuyan a la resiliencia y estabilidad de una ciudad. Existe aún mucha desinformación al respecto acerca de la efectividad de estas medidas y del costo que pudieran tener. Es cierto que un edificio sustentable suele ser más caro que uno convencional, pero los costos a lo largo de su ciclo de vida resultan ser menores (Kats, 2003). Esto es sin considerar el costo de las externalidades generadas por edificios que sean grandes consumidores

de recursos. Estos costos adicionales no son absorbidos directamente ni por el constructor ni por el inquilino, sino que afectan negativamente a la generalidad de los habitantes de la población. Por esta razón es justificable que el gobierno intervenga con medidas de transferencia del costo hacia el generador de la externalidad, quien tiene la responsabilidad de subsanar los problemas generados a la población. En nombre del bien común, deben existir normas de carácter obligatorio para la creación de edificios más sustentables.

En la Ciudad de México, existe un reglamento de construcción que determina los procedimientos de construcción, el uso y reglamentación de espacios de habitación y de estacionamiento, y cuenta con unas Normas Técnicas Complementarias que regulan el diseño estructural de los mismos (Jefatura de Gobierno de la Ciudad de México, 2017). La última actualización de este reglamento ya ha tomado medidas para combatir el exceso de automóviles en la ciudad, estableciendo un límite superior para el número de espacios de estacionamiento cuando anteriormente existía un límite inferior. Existen, sin embargo, muchas áreas de oportunidad para las regulaciones que se deben exigir a las nuevas construcciones en la ciudad.

En otras zonas del mundo ya existen normas que exigen edificaciones sustentables. A partir de 2020, todos los nuevos edificios de California de tres niveles o menos deberán contar con aprovechamiento de la energía solar (California Energy Commission, 2018). Esta medida ha sido criticada por aumentar el costo de las hipotecas y disminuir la asequibilidad de la vivienda, pero se ha demostrado que el incremento de costo para el usuario es mínimo contra los beneficios y que se tiene un gran retorno de la inversión (Chediak *et al.*, 2018). En España existe el Código Técnico de la Edificación (CTE), donde todos los nuevos edificios tienen que contribuir una fracción de su consumo energético y de ACS mediante energía solar, de acuerdo al apartado HE-4 y HE 5 (Gobierno de España, 2006). En muchos países las normas de construcción son incluso más estrictas que algunas de las certificaciones como LEED y BREEAM (Economidou, 2012).

Cualquier exigencia de sustentabilidad deberá estar basada en las condiciones del terreno local y de acuerdo a la densidad y tamaño de la edificación. En primer lugar, no puede pedirse cumplir con un uso de energía solar si existen edificios en la vecindad que funcionan como obstáculos; en este caso se haría un uso muy poco eficiente de la energía renovable y debería existir una excepción. También debe tenerse en cuenta la altura del edificio porque ya se comentó con anterioridad que en el caso de edificios de muchos niveles, suelen existir mejores usos de suelo para la azotea que el cubrirla con paneles fotovoltaicos, además de que la fracción del consumo cubierta por energía renovable sería mínima. Por esta razón, la nueva norma del estado de California tiene una restricción sobre el número de niveles. Por otra parte, también se mencionó que es poco viable, por falta de economías de escala, el tratar las aguas negras en pequeños edificios. Teniendo estas consideraciones, se puede implementar una normativa de sustentabilidad que aplique a la totalidad de las nuevas construcciones, pero que sea lo suficientemente flexible para adecuarse al caso particular de cada una de ellas.

La norma podría dividirse en diferentes apartados que cubran cada área de interés. En primera instancia, puede existir un requisito de aprovechamiento sustentable de azoteas, en el que se le dé un uso obligatorio ya sea para energías renovables o

8. Edificios autosuficientes

como azotea verde, tomando en cuenta un diseño técnico adecuado. Esto se puede combinar con los beneficios fiscales ya existentes al respecto en la Ciudad de México, entre los que se encuentran una reducción adicional de 20% de pago de agua, descuento de hasta el 20% en predial, descuento del 20% al 40% en impuesto de nómina, y 100% de deducibilidad en el ISR por paneles solares en el primer año (Asamblea Legislativa del Distrito Federal, 2015). Se puede exigir la captación pluvial en todas las construcciones, exceptuando quizá únicamente a las viviendas unifamiliares. Todos los edificios de mediana y alta densidad deberían contar con red de abastecimiento de agua tratada y con red de drenaje triple. Los edificios de mayor extensión y altura, así como los de uso preponderantemente comercial e industrial deberían verse obligados a tener un porcentaje de reúso y tratamiento del agua, requisito que podría ir creciendo a lo largo de los años.

En cuanto a energías renovables, todos los edificios de baja y mediana densidad deberían contar con aportación de energía termosolar para ACS, y los edificios de mediana densidad con aportación de energía fotovoltaica. La eficiencia energética sería obligatoria en la construcción de edificios. Las normas europeas establecen usualmente valores "R" de resistencia térmica de las paredes de la envolvente térmica, pruebas de estanqueidad ante el flujo de aire, y consumos energéticos establecidos ya sea por metro cuadrado o por habitante (Economidou, 2012).

Una norma de sustentabilidad para edificios en la Ciudad de México podría además tener un beneficio para el crecimiento económico de una industria que ya ha ganado por sí sola gran ímpetu, lo cual además beneficiaría en la generación de riqueza en la ciudad. Muchas de estas medidas, como la creación de más redes hidro-sanitarias, son marginalmente más caras que un diseño tradicional cuando se plantean desde la construcción, por lo que el costo final adicional del edificio sería mínimo. La propuesta formal de una norma de sustentabilidad requeriría más estudios de factibilidad técnica y económica, por lo que existe una gran oportunidad para desarrollo posterior de las ideas postuladas aquí de manera breve para poder llegar a una propuesta de norma factible y realizable, que ayude a disminuir las tensiones crónicas ante las que se encuentra sujeta la ciudad.

9. Otros retos urbanos: aire y residuos sólidos

Calidad del aire en la Ciudad de México

Los principales contaminantes que se presentan en la Ciudad de México son las partículas menores a 10 micras (PM_{10}) y el ozono. El dióxido de azufre y los óxidos nitrosos (NO_x) se encuentran por debajo de los niveles recomendados por la OMS, pero se debe notar que el primero ocasiona la lluvia ácida, la cual se presenta en la ciudad, y los segundos son precursores de la reacción fotoquímica que genera el smog, formado principalmente por ozono (SEDEMA, 2017). Se estima que la contaminación del aire le cuesta a la ciudad un 2% anual de su PIB (WRI, 2014), y se ha encontrado que un importante efecto de una mala calidad del aire es una disminución en la inteligencia de la población (Zhang *et al.*, 2018). Además, presenta un factor de riesgo adicional para el desarrollo de enfermedades respiratorias crónicas (Bascom *et al.*, 1996).

Para dar un valor de la calidad del aire entendible por el ciudadano común se creó en 1982 el IMECA, o Índice Mexicano de la Calidad del Aire. Éste se encuentra basado en el AQI, o *Air Quality Index*, utilizado en Estados Unidos. Para cada contaminante se escogen los valores límite de exposición crónica y el de exposición aguda. Al primer valor se le da un puntaje arbitrario de 50, mientras que al segundo uno de 100; para el resto se hace una interpolación lineal. La cantidad final se selecciona como el mayor resultado entre todos los contaminantes. Para el cálculo del IMECA se consideran 5 contaminantes: dióxido de azufre, monóxido de carbono, NO_x , ozono, y PM_{10} . Se considera que debajo de 50 no existe riesgo alguno y entre 50 y 100 podrían estar afectados los grupos más vulnerables. Hacia 150 se tiene una calidad del aire mala, hacia 200 es muy mala y más allá es extremadamente mala y presenta serios riesgos a la salud (SEMARNAT, 2013). Se debe aclarar que los efectos de los contaminantes en la salud no son lineales, por lo que no se debe tomar al IMECA como un valor de la toxicidad del ambiente, sino como un indicador meramente informativo (Correa, 2011).

Anteriormente, a partir de 200 puntos de ozono o 160 de PM_{10} se decretaba una precontingencia, a los 240 de ozono o 175 de PM_{10} se declaraba la fase I de contingencia ambiental, y posterior a los 300 de ozono o 250 de PM_{10} la fase II (SEDEMA, 1999). A partir de 2016 se eliminó la precontingencia y se declara fase I a partir de 150 puntos de cualquier contaminante y fase II al superar los 200. Sin embargo, para declarar una contingencia por ozono, se debe superar el límite en cualquier estación, mientras que para PM_{10} debe excederse en al menos dos. También se cuenta ya con sistemas de modelación predictiva y con estaciones limítrofes con las cuales se puede dar un pronóstico previo de la activación de una contingencia.

Estas situaciones de alerta inciden en prohibiciones y mayores restricciones en las actividades que generan contaminantes. Se restringe la circulación de ciertos vehículos, se disminuye la actividad en industrias altamente contaminantes y se evi-

9. Otros retos urbanos: aires y residuos sólidos

tan trabajos que emitan partículas como la repavimentación o el pintado de automóviles al aire libre. También se recomienda a la población el limitar las actividades al exterior y en caso de una contingencia nivel II incluso se pueden suspender actividades en centros educativos (SEDEMA, 2016a).

Durante la década de 1990 se vivió la peor crisis ambiental en la Ciudad de México donde se tuvo en 1992 y 1993 varias declaratorias de contingencia fase II. Posterior a eso, se ha visto un franco descenso en la contaminación atmosférica (SEDEMA, 2018) (Figura 9.1). Esto se debió en parte al programa de verificación vehicular, donde se detectan los vehículos más contaminantes y viejos y se les restringe la circulación uno o varios días a la semana. Un efecto colateral fue un aumento en el índice de motorización de la ciudad, pero también ayudó a reducir emisiones (Centro Mario Molina, 2014).

Entre 2002 y 2016 no se presentó ninguna contingencia general, pero en ese último año se dieron varias crisis de contingencia nivel I (SEDEMA, 2018). A finales de ese año se cambiaron los criterios, e incluso la primera contingencia del año hubiera sido nivel II de acuerdo a los nuevos límites. La crisis de ese año se debió a una combinación de efectos meteorológicos, entre ellos el Niño y la corriente de chorro del hemisferio norte que incidió durante un periodo del año en la ciudad, pero también a causas antropogénicas (SEDEMA, 2017). Esto se presentó pese a que se hicieron cambios temporales en el programa Hoy No Circula; durante un tiempo todos los vehículos dejaban de circular un día al año (Rivera, 2016). También se habló que el causante fue el nuevo reglamento de tránsito que redujo velocidades, pero no se ha encontrado una causalidad entre estos dos hechos. De cualquier manera, la permanencia de contingencias durante 2017 y la primera mitad de 2018 sugieren que se está presentando un nuevo aumento en la contaminación debido al crecimiento de la ciudad.

Control de la contaminación atmosférica

La contaminación del aire es un problema crónico dentro de una ciudad, puesto que no ocasiona muertes de manera inmediata, pero si mina lentamente la salud de los habitantes y ocasiona grandes costos en el sistema de salud. Por esta razón, es importante su control para mejorar la resiliencia urbana de la capital. Se han tomado ya importantes medidas para controlarla. La verificación vehicular ha sido exitosa, pero sigue plagada de fuertes problemas de corrupción (Hernández, 2018). Se han entregado convertidores catalíticos para control de emisiones en vehículos viejos; se han instalado más estaciones de monitoreo hasta llegar a 34, entre las cuales ya se tienen algunas en las zonas limítrofes de la cuenca para tener control sobre la llegada de contaminantes externos; se cuenta ya con un modelo que tiene un horizonte predictivo de hasta 24 horas; y se ha lanzado un aplicación para celular donde la población puede verificar en tiempo real la calidad del aire (SEDEMA, 2016b). Sin embargo, el comportamiento reciente de la contaminación atmosférica ha demostrado que estas actividades no han sido suficientes.

Por una parte, se debe considerar la reducción de las emisiones de fuentes fijas. La Ciudad de México está viviendo una transición hacia un sistema económico post

9. Otros retos urbanos: aire y residuos sólidos

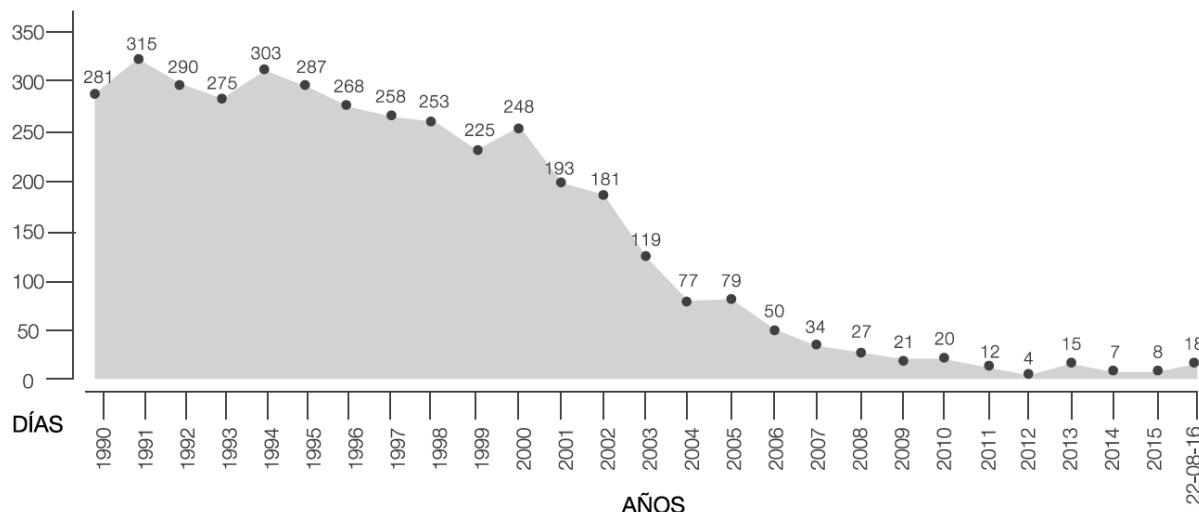


Figura 9.1. Días con valor IMECA mayor a 150, 1990-2016
(SEDEMA, 2016b)

industrial, donde las actividades de servicio y financieras tienen un mayor peso. Poco a poco han desaparecido las fábricas en la capital, y el gobierno tiene la capacidad de fomentar que esto suceda más rápidamente. La descentralización del país no se puede lograr si únicamente se sacan de la capital las dependencias estatales. Se deben crear los incentivos fiscales para que las industrias se establezcan fuera de la ciudad, procurando que sea incluso fuera de la zona industrial del norte del Estado de México e Hidalgo, porque ésta se encuentra al norte de la ciudad y el viento que viene de ahí transporta la contaminación de regreso al centro.

Mientras el transporte público siga siendo deficiente, cubra una porción limitada de la mancha urbana, sea inseguro, y de poca calidad, no van a existir los incentivos suficientes para lograr que una gran parte de la población se cambie a este sistema. Por lo demás, la capacidad del casi todos los medios de transporte público se encuentra rebasada, por lo que se dificulta el agregar más usuarios. El invertir en este tipo de movilidad sería una manera indirecta pero bastante efectiva para reducir la cantidad de emisiones totales. Además se debe dar prioridad al transporte eléctrico. Incluso si toda la energía eléctrica proviene de fuentes altamente contaminantes como el carbón y el petróleo, las grandes centrales eléctricas son más eficientes que el pequeño motor de un automóvil o un camión, por lo que se tienen menos emisiones resultantes (Anair y Mahmassani, 2012).

Las grandes centrales generadoras se encuentran fuera de la cuenca del Valle de México, por lo que la contaminación no se emite en una zona con una gran densidad poblacional, y al no haber un efecto tan pronunciado de inversión térmica fuera de la ciudad, se minimiza la producción de ozono troposférico. Sin embargo, a partir del nuevo milenio se ha minimizado la construcción de nuevas líneas de metro; en 18 años se construyó tan sólo una línea. En cambio se ha dedicado gran parte del presupuesto a infraestructura vehicular, la cual sólo utiliza un tercio de la población. Se ha invertido fuertemente en el segundo piso del periférico, y otra obra reciente de gran magnitud fue el paso a desnivel de Mixcoac, que en su primera semana de operación ya tenía rebasada su capacidad.

9. Otros retos urbanos: aires y residuos sólidos

El transporte público que se ha desarrollado en las últimas dos décadas ha sido el metrobús. Al viajar sobre un carril confinado y tener una ruta fija, se podría haber hecho la inversión para que los vehículos fueran eléctricos, como el trolebús, pero se decidió usar vehículos de diésel, incluso para la línea 7 que fue construida en 2018. Se ha cuestionado, igual que con todo el transporte concesionado, la baja vigilancia de las emisiones de estos vehículos (Ascensión, 2016). Una renovación a gran escala del metro es muy costosa, pero cada vez se hace más evidente su necesidad. Un metro con las mismas líneas pero con una infraestructura moderna tendría una capacidad mucho mayor, y al tener menos retrasos se volvería una opción viable para la población que tiene automóvil particular.

El transporte concesionado de baja densidad, donde se realiza la mayor parte de los viajes en transporte público, adolece principalmente de la inseguridad y de la falta de mantenimiento de las unidades. El gobierno puede tomar medidas para solucionar estos problemas, pero se debe tener la voluntad política para negociar con un sector que tiene gran capacidad de generar estragos en la ciudad en caso de declararse en huelga. Medidas sencillas para mejorar la calidad del servicio serían tener cámaras dentro de las unidades y un sistema de GPS en conjunto con una aplicación para celular para dar seguimiento en tiempo real de la ubicación del vehículo. Además, es necesario cambiar el esquema de concesión y que los conductores tengan un salario fijo para retirar el incentivo que tienen para manejar lo más rápido posible y evitar que hagan parada en cualquier sitio. Podría evaluarse como posibilidad que el gobierno se quede con todos los ingresos por pasaje y dé una renta fija al dueño de la unidad, sin importar la cantidad de usuarios que tomen el servicio, en vez del sistema actual que funciona de la manera inversa.

Por último, debemos subirnos en la tendencia de los camiones eléctricos, una tecnología madura que ya se utiliza en muchas partes del mundo. El gobierno de la ciudad ya se ha comprometido, como parte del C40, a que a partir de 2025 se adquieran exclusivamente autobuses eléctricos (Dovey, 2017), aunque no está claro si eso aplica también para los concesionarios. Sin embargo, esta fecha se antoja lejana al saber que China ya se tiene un 5% de la flotilla eléctrica, y que el 40% de las nuevas adquisiciones son de este tipo (Early, 2017).

Para los automóviles eléctricos privados se deben mejorar los pocos incentivos existentes. Algunas ideas son la posibilidad de deducir el 100% del ISR en el primer año; la exención total del IVA, del ISAN, y de la verificación vehicular; estacionamiento gratis en todos los parquímetros, con la posibilidad de extenderse a casi todos los estacionamientos públicos bajo convenio; peaje gratuito en todas las vías urbanas y carreteras federales y estatales del país; la obligación de las automotrices de tener un modelo eléctrico en exhibición, con capacitación del personal de ventas e incentivos del gobierno para promover su venta; la disminución de las primas de seguro que suelen ser más altas que para vehículos convencionales (Miles, 2018); la colaboración con los fabricantes de vehículos para que traigan a México modelos ya existentes en otros países; y el compromiso del gobierno de adquirir estos automóviles para uso oficial. Estas medidas podrían tener el doble efecto de reducir en gran medida la contaminación del aire y acelerar la industria automotriz y el crecimiento de la economía nacional.

El problema de la calidad del aire en la ciudad es complejo y no tiene una solución sencilla. Sin embargo, es imperante tratar el tema para asegurar la salud y calidad de vida de los habitantes. Por esta razón se debe tener como prioridad en el gobierno, e implementarse planes con coordinación regional, ya que no se trata de un problema local. Una posterior actualización del Plan de Resiliencia de la CDMX debería considerar como eje fundamental las acciones para reducir la contaminación.

Situación de residuos sólidos en la Ciudad de México

La ciudad de México es la mayor generadora de residuos sólidos en todo el país. Esto se debe tanto a que tiene la mayor población y a que sus habitantes generan un promedio de 1.7 kg de residuos sólidos al día, contra el promedio nacional que es de 1.3 kg (Reveles, 2018). En la actualidad, la Ciudad de México es la única entidad federativa que no cuenta con un relleno sanitario, por lo que los residuos generados se deben llevar a 5 diferentes rellenos privados en el Estado de México y Morelos (SEMARNAT, 2015). Sin embargo, hasta 2011 existía el Bordo Poniente, que solía ser el destino final de los residuos de los habitantes locales hasta que su capacidad se vio rebasada.

El sistema de recolección en la Ciudad de México se realiza a través de camiones recolectores que pasan casa por casa; existen también barrenderos, operadores de carritos de basura y barredoras automáticas. Se presenta además una gran informalidad en el trabajo de recolección. Casi todos los camiones recolectores tienen un chofer y un operador asalariados, pero cuentan además con voluntarios sin paga que viven de las propinas y de la revalorización de los residuos (Reveles, 2018). Por si fuera poco, al no haber asientos suficientes en la unidad, estas personas deben viajar sentadas sobre los residuos, exponiéndose al smog y a los lixiviados.

El personal y los voluntarios se dedican a hurgar en los residuos para encontrar elementos reciclables o algún otro objeto de valor que puedan vender. Todo lo que puedan recuperar es guardado en bolsas en el exterior de los compartimientos del camión, y como las piezas ya han estado en contacto con el resto de los residuos, gotean lixiviados en su paso por las calles. Para realizar esta actividad de separación y revalorización, conocida en México como pepena, el camión se debe detener en un sitio y las bolsas de basura deben ser abiertas, en cuyo proceso se pueden dejar residuos sin recoger en el piso. Los trabajadores de recolección son puestos en esta situación debido a los sueldos bajos que perciben, las malas condiciones laborales y el estigma que existe contra ellos. Por otra parte, en las colonias donde se dejan las bolsas de basura en cestos fuera de las casas, existen también pepenadores individuales que buscan entre las bolsas antes del paso del camión recolector. Es común que esta actividad provoque aún más residuos desperdigados en el piso, a su vez que estas personas tienen menores ingresos, están más marginadas, y están sujetas a mayores estigmas que los trabajadores de los camiones recolectores.

Los camiones recolectores llevan los residuos a las 12 estaciones de transferencia que existen en la ciudad, donde se envía cada tipo de residuo a su disposición final. Los reciclables se llevan a las tres plantas de selección y separación, mientras que los residuos orgánicos son transportados a la gran planta de composta en el bordo

9. Otros retos urbanos: aires y residuos sólidos

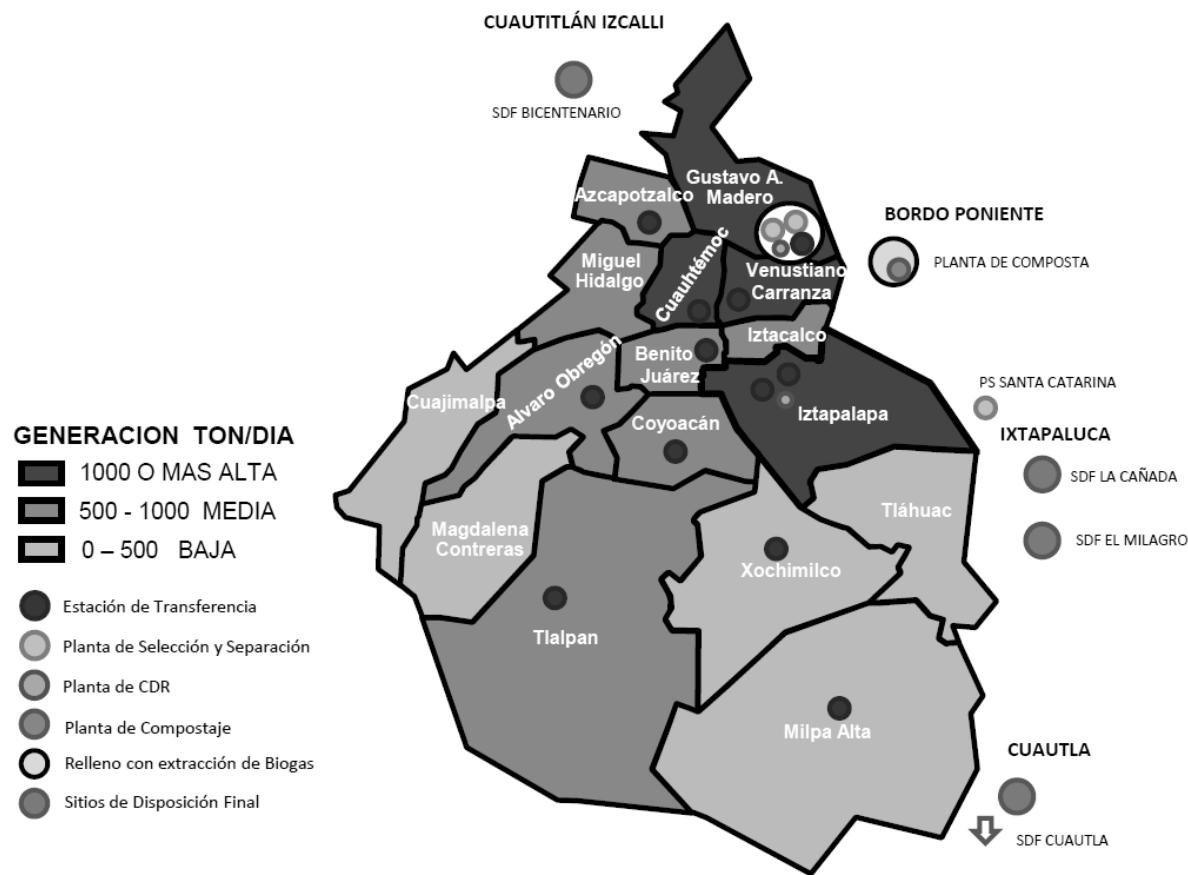


Figura 9.2. Sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México
(AGU, 2017)

No aparece representado el quinto relleno sanitario: Tepoztlán, en el Estado de México
(SEMARNAT, 2015)

poniente y a las pequeñas plantas de cada alcaldía, mientras que el resto son llevados a los rellenos sanitarios (Figura 9.2).

En la actualidad se generan 13,000 toneladas de residuos sólidos de manera diaria, lo que equivale a llenar diariamente la plancha del zócalo con una profundidad de un metro o a cubrir un volumen equivalente al Estadio Azteca cada mes. Del total de residuos, se recolectan 12,700 toneladas, mientras que el resto se quedan en los hogares sin recolectarse, se dirigen directo a las plantas de selección y separación a través de la actividad de pepena o simplemente se tiran en la calle o en los múltiples basureros clandestinos que existen en las barrancas del sur y poniente de la ciudad. Dos tercios de los residuos, dígase 8,600 toneladas, llegan a los rellenos sanitarios, que según datos oficiales funcionan apegados a la normatividad vigente. Las otras 4,100 toneladas se envían a diferentes procesos: 1,900 se reciclan, 1,400 se convierten en compostaje, mientras que 800 toneladas se utilizan en la planta de combustibles derivados de residuos en Iztapalapa (AGU, 2017). Esta planta tritura y seca los residuos para incinerarlos en cementerias en lugar de usar combustibles fósiles (Kopytynski, 2014).

En la Ciudad de México, al igual que en toda Latinoamérica, la principal y prácticamente única manera de disponer de los residuos sólidos urbanos es a través de rellenos sanitarios. Para la capital, esto representa un fuerte costo en transporte, y un importante potencial de contaminación. Los camiones recolectores son viejos y tienen muchas emisiones, además que la descomposición de los residuos orgánicos y plásticos en los rellenos sanitarios genera una importante cantidad de gases de efecto invernadero; se estima que tan sólo el Bordo Poniente emite una contaminación equivalente a un millón de carros al día (Méndez, 2016). Por otro lado, un mal manejo de los lixiviados puede suponer un importante riesgo de contaminación de los acuíferos superficiales.

En 2016 se cerraron brevemente los rellenos sanitarios del Estado de México, lo que generó problemas de acumulación de basura y evidenció la magnitud potencial de las afectaciones a la salud en caso de una disruptión mayor (Reforma, 2016). Además, los rellenos sanitarios representan un desperdicio de espacio al que se le podrían dar otros usos, y existen desarrolladores con pocos escrúpulos que han comprado rellenos clausurados y los han fraccionado para desarrollo inmobiliario, como sucedió en Santa Fe (Ramírez, 2012). Como es evidente, no existe aún un manejo sustentable de los residuos sólidos en la Ciudad de México y se presentan muchos riesgos potenciales.

Control de residuos sólidos

Se han hecho múltiples propuestas para disminuir la problemática y tener mayor control sobre los residuos que se generan en la ciudad. Sin embargo es siempre importante recordar la jerarquía de prioridades en cuanto a tratamiento de residuos: reducción, reutilización, reciclaje, valorización energética y disposición en rellenos (AGU, 2017). La mejor solución, aunque probablemente la más compleja y elusiva, es simplemente reducir la cantidad producida. Al respecto es muy importante la educación de la población, por lo que se deben crear campañas tanto como la inclusión prioritaria dentro de la educación básica y media.

La regulación y la normatividad deben buscar fomentar un uso de vida con menos residuos. Mediante la legislación, se puede crear una prohibición gradual de bolsas y cubiertos desechables, en cuyo caso existen ya alternativas biodegradables o reutilizables. Se debe además reducir el uso de empaque y embalaje necesario, y buscar disminuir el desperdicio de alimentos en restaurantes y supermercados. Eventualmente, se podrían llegar a eliminar los plásticos de un solo uso. Tal medida ya ha sido propuesta por varias ciudades y países pero hasta el momento ninguno ha tenido éxito (UNEP, 2018). En algunos países como Suiza y partes de Alemania se cobra por el volumen de basura recolectada (Morlok *et al.*, 2017), pero es probable que en México esto sólo fomentara los tiraderos clandestinos.

La siguiente prioridad en manejo de residuos es la reutilización, donde se disminuye el impacto ambiental de un objeto al darle múltiples usos y prorratear el consumo energético y de recursos en un tiempo mayor. En este sentido, se debe cambiar la filosofía de diseño de productos para lograrlo, aunque esto queda fuera de las posibilidades de la autoridad local. Sin embargo, se pueden utilizar incentivos para

9. Otros retos urbanos: aires y residuos sólidos

aumentar el uso de botellas de vidrio en bebidas y buscar el aumento del uso de filtros de agua para reducir el uso de PET.

Cuando un producto no se puede reutilizar, debe buscarse que se pueda reciclar en su totalidad. Por lo general, el proceso de reciclaje de cualquier insumo requiere entre un 70% y un 90% menos de energía que la producción a partir de materia prima, por lo que además resulta en una disminución de costos para la industria (Morris, 1996). Existen varias limitantes en el proceso de reciclado. Por ejemplo, el PET 100% reciclado, o rPET, no se puede hacer completamente translúcido y por esto muchas compañías optan por no usarlo. Sin embargo, algunas marcas como Ciel han comenzado a usar el tinte del rPET como parte de su identidad de marca (Coca-Cola México, 2017). Por otra parte, es un problema el tener una recolección adecuada de residuos para aumentar la recolección de producto reciclabl.

Algunas ciudades japonesas han demostrado que se pueden reciclar hasta un 90% de los residuos generados si éstos se separan con gran detalle (Garfield, 2018). En un caso práctico para la Ciudad de México, sería posible pedir a los recolectores que pidan que se les entreguen ya separados productos como PET, Tetrapak, vidrio, cartón y papel. Esto les ahorraría trabajo y les permitiría ganar más dinero con el reciclaje, ya que mucha gente no está dispuesta a llevar sus propios residuos a reciclar. Además, se puede aumentar el número de estaciones de recolección de estos productos en supermercados y centros comerciales para la gente que quiera llevarlos por ese medio. Para evitar quitar un ingreso a los trabajadores de recolección, se contrataría a los voluntarios para que vacíen y transporten las estaciones de recolección para reciclaje. Dentro del reciclaje también entra el compostaje, que puede tener gran valor en la captura de carbono y para dar mantenimiento a áreas verdes.

Finalmente, antes de disponer de los residuos a través de rellenos, se pueden transformar y convertir en energía, ya sea térmica o eléctrica. Existen varias formas de hacer esto. Los residuos orgánicos compostables se pueden llevar a plantas de biodigestión donde se genera metano que puede quemarse para obtener energía térmica (AGU, 2017); en la Ciudad de México ya se encuentra en licitación una planta tal, en conjunto con la central de termovalorización el Sarape. Sin embargo, en el balance de carbono para mitigar los efectos del cambio climático, es más conveniente convertir estos residuos en composta (Dumitrescu, 2014). El metano que se libera de rellenos sanitarios sí debe ser aprovechado para energía térmica en vez de simplemente quemarse al aire libre.

El resto de residuos orgánicos, donde se incluyen algunos formados por compuestos de carbono que típicamente se toman como inorgánicos, como los diferentes tipos de plásticos, son transformados en plantas de termovalorización. En una planta de termovalorización se hace una combustión controlada de los residuos y los gases resultantes se pasan por filtros para minimizar la cantidad de partículas finas y compuestos resultantes de combustión imperfecta como los óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre. En la actualidad no existe ninguna planta de este tipo en América Latina, mientras que en Estados Unidos, Canadá, Europa, Asia, e incluso África cuentan con esta tecnología (AGU, 2017). En Japón y Escandinavia casi la totalidad de los residuos sólidos se disponen de esta forma y es en estos lugares donde se cuenta con las tecnologías más avanzadas (Tsukahara, 2012). Sin bien es cierto que la generación eléctrica con esta tecnología no es completamente limpia ya que tiene más emisiones

9. Otros retos urbanos: aire y residuos sólidos

directas por tonelada de carbón, esto no considera las emisiones de ciclo de vida debidas a la minería de carbón y a que los rellenos sanitarios tienen también una importante cantidad de emisiones y de partículas PM10 y PM2.5 (Méndez, 2016).

Deben realizarse estudios más detallados en el caso de la Ciudad de México para hacer un balance de carbono adecuado y de otros contaminantes atmosféricos donde se evalúe el verdadero impacto en emisiones de efecto invernadero con la construcción de una planta termovalorizadora. De cualquier manera, la planta termovalorizadora el Sarape presenta beneficios importantes que pueden justificar la deuda que se adquiriría por parte del gobierno de la Ciudad de México, y se debe realizar una auténtica evaluación técnico-económica en vez de valoraciones puramente políticas.

Para poder asegurar una resiliencia adecuada de la urbe ante sucesos inesperados y otro tipo de desastres naturales es muy importante que existan planes de contingencia para la evacuación de residuos emergentes. Un caso muy relevante para la Ciudad de México es el caso de los residuos provenientes de demoliciones tras sismos. Tras un evento de este tipo, la Secretaría del Medio Ambiente debe implementar un programa de vigilancia para que se dispongan de manera adecuada y no ilegalmente.

Sin embargo, para lograr esto se debe tener un control adecuado en condiciones normales. Ya existe una planta de reciclado en el oriente de la ciudad, pero por su tamaño no cuenta con la capacidad de recibir todos los residuos generados. Tampoco existe algún incentivo mayor para que se dispongan los residuos de esta forma y no de manera clandestina en las barrancas del sur y poniente de la ciudad como es el caso usual. Tampoco existe un incentivo para el uso de agregados reciclados, por lo que la compra en la planta de reciclado es menor que los depósitos, por lo que se tiene una gradual acumulación que eventualmente rebasará la capacidad de la planta. Una norma que obligara a utilizar agregados reciclados sería de gran utilidad para empezar a resolver este problema.

Los electrodomésticos y electrónicos son otro tipo de residuos de manejo especial para los cuales ya se está realizando algo para evitar su disposición de manera convencional, debido a su carácter altamente contaminante. La Secretaría del Medio Ambiente organiza Reciclatrones en los cuales las personas y empresas pueden depositar sus residuos para que estos sean reciclados de manera adecuada por el gobierno. Se realizan entre cada dos y cuatro semanas en diferentes puntos de la ciudad para ir cubriendo las diferentes zonas geográficas.

Es importante además asegurar una adecuada vigilancia en el manejo de residuos peligrosos por parte de las empresas que los generen. Quien se dedique a reciclar y disponer de manera final de estos residuos, deberá seguir las buenas prácticas existentes para evitar afectaciones en la salud de la población. Los rellenos sanitarios especiales que existan deberán ser mucho más estrictos en las medidas de seguridad que un relleno convencional por el riesgo adicional que existe en caso de contaminación de los mantos acuíferos.

Otro aspecto pendiente en la Ciudad de México es el mejoramiento de la calidad del servicio de recolección y de las condiciones de vida y laborales de los trabajadores

9. Otros retos urbanos: aires y residuos sólidos

de esta industria. Se deben incrementar sueldos, eliminar el trabajo informal y mejorar las condiciones de higiene. Una mayor limpieza en la indumentaria de los trabajadores y de los camiones tendría un efecto doble: dar una mejor imagen ante la ciudadanía y tener beneficios en la salud de los trabajadores. El tener compartimientos internos o sacos en la parte superior de los camiones para los residuos separados evitaría el desperdigar residuos y lixiviados en la calle, y el que los ciudadanos entreguen los residuos lo más separados posible evitaría que se realice la apertura de bolsas de basura en la calle.

La construcción de nuevas plantas de reciclaje sería una oportunidad de trabajo para los voluntarios y pepenadores más marginados, lo que a la vez aumentaría los ingresos de los trabajadores que sí son actualmente asalariados. Existen muchas fronteras para la implementación de un sistema que opere de manera sustentable y al nivel de las expectativas de una ciudad populosa y próspera. La corrupción y los intereses políticos son uno de los más grandes frenos ante un cambio de paradigma, pero el factor más importante que trabaja en contra de la industria de los residuos sólidos y sus trabajadores es su invisibilidad ante la población, ya que una vez que tiramos nuestra basura y desaparece de nuestros ojos también lo hace de nuestra mente. Es por esto que se debe priorizar la educación de la población, primordialmente desde la juventud y tener una visión a largo plazo para resolver estos problemas de fondo.

10. Planeación regional metropolitana

Integración regional

La mancha urbana de la zona metropolitana del valle de México ha crecido de manera exponencial a lo largo del siglo pasado hasta tener más de 21 millones de habitantes y haber superado la frontera de la demarcación política de la Ciudad de México. En la actualidad, la extensión de la región urbanizada cubre adicionalmente una porción de las entidades federativas del Estado de México y de Hidalgo (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016). Debido a esta situación, existe una gran cantidad de gobiernos que tienen autoridad de toma de decisiones de manera local y actúan de acuerdo a sus necesidades regionales, muchas veces sin considerar que son parte de un sistema mayor que se encuentra íntimamente conectado. A esto hay que agregar que el gobierno federal tiene fuerte presencia en la región, puesto que en la Ciudad de México se encuentran depositados los tres poderes de la unión. Hasta 2016, la Ciudad de México se conocía como Distrito Federal y no contaba con constitución propia. Era una entidad federativa de carácter especial que si bien contaba con un Jefe de Gobierno elegido por los habitantes locales, no tenía poder en la decisión de su presupuesto (Cámara de Senadores, 2002).

El manejo de la infraestructura se encuentra considerablemente fragmentado en la zona metropolitana. El sistema Cutzamala está administrado por Conagua, organismo del gobierno federal, y vende por mayoreo el agua que viene desde el estado de Michoacán a OAPAS y SACMEX, los organismos del Estado de México y de la Ciudad de México, respectivamente. SACMEX tiene autoridad en toda la Ciudad de México, mientras que OAPAS entrega el agua al organismo operador de cada municipio (CONAGUA, 2005). El drenaje funciona de igual manera, con la red de atarjeas administrada por organismos locales y el drenaje profundo por la federación (CONAGUA, 2012).

En la Ciudad de México cada modo de transporte tiene su propio organismo operador. Uno de ellos es el Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC, 2007) que controla las 12 líneas de metro, con la línea B mayoritariamente en el Estado de México y con la línea A íntegramente dentro de éste (STC, 2018). El Sistema de Transportes Eléctricos (STE) administra las 8 líneas de trolebuses, autobuses eléctricos alimentados por una red de cableado elevada, y el tren ligero que va de Taxqueña a Xochimilco. El Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros de la Ciudad de México es un organismo descentralizado que controla al Metrobús. Sin embargo, existen empresas operadoras que son concesionarias de las rutas de transporte. El Mexibús opera de manera similar y es controlado por un organismo que depende del Estado de México.

El Tren Suburbano es concesionado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Los peseros, microbuses y taxis obtienen concesiones por las Secretarías de Transporte del Estado de México y de la Ciudad de México, aunque las regulaciones

10. Planeación regional metropolitana

son notoriamente diferentes en cada entidad. Dentro de estas distintas dependencias, incluso dentro de las que se encuentran dentro de la misma demarcación puede haber falta de comunicación (CTS Embarq, 2015). Las líneas 5 y 6 del Metrobús corren prácticamente en paralelo a las líneas 4 y 6 del Metro, respectivamente, y el plan de ampliación de la línea 5 del Metrobús (SOBSE, 2017) hasta la glorieta de Vaqueritos coincide exactamente con el de expansión de la línea 4 del Metro (Casado *et al.*, 1982). Las líneas 1 y 3 del Metrobús coinciden en el tramo norte de insurgentes con la línea 3 del Metro, por lo que las diferentes rutas de transporte compiten entre sí (Metrobús, 2018).

Otra problemática han sido las pugnas políticas entre los gobernadores de las distintas entidades. Tradicionalmente y hasta la actualidad han existido dos partidos políticos antagonistas gobernando en el Estado de México y la Ciudad de México, mientras que desde que existe el puesto de Jefe de Gobierno por elección popular en 1997, los mandatarios regionales han estado en disputa con el nivel de gobierno superior. Para el sexenio 2018-2024 será la primera vez que tanto Presidente como Jefe de Gobierno pertenezcan al mismo partido. Adicionalmente, una de las pocas atribuciones de las alcaldías ha sido la de otorgar permisos de construcción, que se ha tergiversado a permitir el cambio de usos de suelo, ocasionando un desarrollo urbano desordenado y que ha beneficiado a unos cuantos particulares debido a la rampante corrupción existente en este nivel de gobierno (Sosní, 2016).

El gobierno federal ha construido la mayor parte de las obras a gran escala dentro de la ciudad, incluyendo las primeras 11 líneas de metro y el drenaje profundo. El segundo piso del periférico y la línea 12 fueron construidas primordialmente por el gobierno local, teniendo esta última problemas operativos y de planeación debido a la corrupción (Cámara de Diputados del Distrito Federal, 2005).

Existen casos de cooperación regional, como el consenso con el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (Proaire), y la existencia de la verificación vehicular en los estados de México, Morelos y la Ciudad de México, además de la observancia de las contingencias ambientales en la Ciudad de México y el Estado de México (SEDEMA, 2016a). El Metro es también un ejemplo de cooperación entre estas últimas dos entidades y el gobierno federal, sobre todo en la construcción de las líneas A y B. Por otra parte, también hay ejemplos de coordinación fallida. La construcción del Acuaférico para distribuir agua por el sur de la ciudad hacia el oriente fue detenida debido a que Conagua, que llevaba la obra en ese momento, consideró que ya no se trataba de su área de influencia y que ésta debía ser terminada por SACMEX (SACMEX, 2016).

El sistema de fotomultas vehiculares no ha sido implementado en el Estado de México, y no existe una coordinación entre las bases de datos de registro vehicular de ambas entidades. Si un vehículo de esta entidad supera el límite de velocidad en la Ciudad de México, nunca tendrá que pagar una multa porque no será registrado en el sistema (Roa, 2018). Otros municipios, como Huixquilucan y Naucalpan, han optado incluso por eliminar por completo las multas dentro de su demarcación (Jiménez, 2018). La Comisión Federal de Electricidad, por su parte, tiene cuatro diferentes divisiones que coinciden y fragmentan la administración dentro de la ciudad (SENER, 2018).

La Zona Metropolitana del Valle de México está compuesta oficialmente por las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México, y 2 municipios de Hidalgo. Tienen 42% de la población, 53% y 5% respectivamente (Oficina de Resiliencia CDMX, 2016). Cada municipio tiene a su vez su ordenación territorial y plan de desarrollo urbano (SEDESOL, 2007). También existen igual número de policías locales (Gobierno del Estado de México, 2016b), y cada administración está encargada del mantenimiento de su infraestructura urbana. El resultado es la existencia de un sinnúmero de regulaciones que suelen chocar entre sí y ser contradictorias. Pese a la existencia de esta gran cantidad de divisiones administrativas, existe solamente una región urbanizada con un funcionamiento y metabolismo esencialmente unitario. Por esta razón debe existir una planeación general que considere a toda la región y que uniformice y elimine la variación en las políticas locales, para asegurar un funcionamiento coordinado y armónico de la región.

La existencia de comisiones metropolitanas puede ayudar en la planeación con una visión integrada. Desde hace tiempo se ha propuesto la creación de una Comisión Metropolitana de Transporte que unifique todos los medios que existen en la región dentro de un solo esquema de pago, de planeación a largo plazo, y de requisitos y verificación de la calidad (Gobierno del Estado de México, 2016a). Esto ha sido llevado a cabo en otras ciudades del mundo, como en Lyon, Francia que unió su sistema con las municipalidades circundantes, primordialmente con Villeurbanne. Esto les ha llevado a tener un gran éxito en la optimización global del sistema y la recaudación de fondos bajo una sola administración (Sytral, 2014).

Existe ya también un Programa de Ordenamiento para la Zona Metropolitana del Valle de México, pero no existen mecanismos aún para asegurar que los planes regionales estén en concordancia y que las autoridades locales respeten la zonificación y densidad habitacional determinada, particularmente para desarrollos individuales que no deberían ser permitidos si no están de acuerdo al plan metropolitano (SEDESOL, 2012). Sería conveniente también el buscar una unificación gradual de las dependencias que se encargan de la administración de la infraestructura y la provisión de servicios, particularmente en el caso de CFE y de los organismos operadores de agua. En este último caso es primordial lograr una unidad para impulsar medidas de austeridad frente a la inminente escasez de agua.

Acción para la resiliencia

Debe existir coordinación entre los diferentes escalones de gobierno y entre las administraciones de nivel paralelo involucrados para poder tener una mejor capacidad adaptativa y de respuesta dentro de la ciudad, lo cual incidirá en una mayor resiliencia urbana y seguridad para los habitantes. Esto constituye una de las mayores barreras para el desarrollo de cualidades positivas dentro de la zona metropolitana y en pocas ocasiones es considerada, por lo que puede frenar los logros obtenidos en otros ámbitos (Arup, 2014).

Se debe fomentar esta cooperación mediante el desarrollo de comisiones metropolitanas, mesas redondas para la discusión de temas de interés y la búsqueda de puntos de convergencia, y la aplicación de regulaciones comunes. La existencia de

10. Planeación regional metropolitana

un plan de Resiliencia de la Ciudad de México es de gran utilidad, pero tiene una visión y alcance limitado, por lo que no tiene la capacidad de realizar un cambio sustancial y de fondo en toda la mancha urbana. Debería pugnarse por la creación de una Oficina de Resiliencia Metropolitana, la redacción de un plan de Resiliencia de la Zona Metropolitana del Valle de México, y la obligación de los gobiernos locales de desarrollar sus propios planes de acción, basados en los regionales.

Medidas similares deberán ser tomadas con respecto a planes de contingencia. Entre el sismo del 19 de septiembre de 1985 y el de 2017 se hizo patente la efectividad que ha tenido la evolución de las Normas Técnicas Complementarias, debido a la reducción en más de un 90% de los edificios colapsados para un sismo que occasionó mayores aceleraciones en el suelo que el de 1985, con una mayor extensión de la mancha urbana que en aquel entonces (Sismología e Ingeniería UNAM, 2017). Los casos de edificios colapsados evidenciaron que la corrupción sigue siendo uno de los principales problemas.

En cuanto a la respuesta de emergencia, se tuvo de nuevo una gran participación y organización de la población, con iniciativas ciudadanas como verificado S19, donde se proporcionó en una plataforma SIG información en tiempo real y verídica sobre edificios colapsados y en riesgo y de requerimientos de auxilio y víveres. El gobierno y sus diferentes dependencias también tuvieron una importante participación, con el ejército demostrando su amplia capacidad en habilidades humanitarias y de rescate. Sin embargo, aquí fue notable una falta de coordinación entre las diferentes partes. Existieron conflictos y falta de comunicación entre voluntarios, rescatistas entrenados y el ejército.

Las brigadas de revisión estructural del CENAPRED, el Instituto de Ingeniería y diferentes instituciones de educación superior, realizaron exhaustivos análisis a un ritmo excepcional, pese a que se tuvo que formar en poco tiempo a una gran cantidad de voluntarios, y que debido a la falta de la transversalidad de la comunicación se presentaron revisiones repetidas, lo cual llegó a generar desconfianza entre la población (López, 2017). Otra falta de coordinación se muestra en que a un año del sismo aún existen edificios del sismo de 2017 e incluso aún de 1985 que no han sido demolidos, lo cual es responsabilidad del gobierno de la Ciudad de México (López, 2018). Debe aprenderse de estas experiencias para desarrollar planes de contingencia generales y locales que permitan actuar con mayor velocidad y precisión y aprovechar mejor a las tecnologías y al capital humano disponible.

Es importante que las medidas mencionadas con anterioridad se puedan permear desde los más altos niveles de gobierno hacia los funcionarios locales y cada individuo en particular para favorecer el empoderamiento local. Se ha comentado ya que uno de los principales atributos de una ciudad resiliente es el tener habitantes resilientes que sepan responder y actuar ante situaciones inesperadas y que se puedan reponer y continuar con su vida normal rápidamente ante eventos traumáticos. El gobierno tiene la capacidad de fomentar estas características a través de una educación adecuada y que haga a los habitantes conocer los riesgos de impactos y tensiones a los que se pueden ver expuestos al vivir en las características particulares de la ciudad. Esta educación debe proveerse desde el nivel básico, pero a su vez debe continuar a lo largo de la vida del individuo para mantener a la población actualizada de las nuevas políticas a seguir para prevenir la mayor cantidad de pérdidas humanas. Es

importante contar también con canales de comunicación confiables entre los habitantes y el gobierno para poder proveer a los ciudadanos con las noticias más recientes y las medidas a tomar en caso de un desastre natural (Arup, 2014).

Se ha dicho por una parte que debe existir un empoderamiento de los gobiernos locales, y por otra que deben existir planes que abarquen toda la región para tener un desarrollo en armonía. Estas dos medidas no son contradictorias entre sí. Las administraciones particulares deben tener la autoridad de tomar decisiones de acción y de prioridad de desarrollo en sus áreas de influencia de acuerdo a las condiciones y necesidades locales que ellos conocen mejor. Sin embargo, para asegurar desarrollos que cumplan con estándares de calidad y para procurar una disminución de la corrupción, deben existir lineamientos generales a seguir y auditorías de mayor nivel para detectar irregulares en los procesos locales.

En Asia se ha encontrado que esta combinación de responsabilidades puede ser la clave del éxito para un mejor desarrollo de infraestructura. En Vietnam se ha optado por hacer consultas ciudadanas sobre prioridades de obras públicas y las respuestas han sido compaginadas con las prioridades del gobierno nacional, para evitar problemas por una visión angosta de los habitantes y la falta de conocimiento de beneficios en su salud por parte de algunos desarrollos. En China se ha dejado el desarrollo de infraestructura y la búsqueda de financiamiento completamente en manos de las municipalidades, con la condición que se cumplan los lineamientos de calidad y las cuotas de desarrollo impuestas por el gobierno central. Esto ha devenido en la creación de un sistema competitivo donde el éxito de los funcionarios locales y de su carrera política depende de qué tan buena sea su aportación al desarrollo nacional (Peterson y Muzzini, 2005).

El empoderamiento local y los principios del federalismo permiten a un grupo de gobiernos de menor jerarquía el confrontar de manera conjunta el *statu quo* prevalente en un gobierno general, cuyas decisiones y políticas son percibidas como erróneas o en detrimento de la población. Este es el caso de los Estados Unidos de América, donde el presidente en funciones ha creado una guerra contra las acciones para frenar el cambio climático, contra el cuidado del medio ambiente, y ha implementado una medida antimigratoria extremista. La Agencia de Protección Ambiental, cuya misión fundamental es "*regresar los cuerpos de agua del país a su estado pescable y nadable*" (Copeland, 2016) fue dirigida hasta mediados de 2018 por Scott Pruitt, quien recibió grandes donaciones de empresas y fundaciones petroleras y ha tomado medidas para eliminar el Plan de Energía Limpia presentado por Obama y las regulaciones de emisiones vehiculares y eficiencia de combustibles, así como el derecho del estado de California de imponer sus propios estándares de eficiencia vehicular, que son más estrictos que en el resto del país (Daniels, 2018).

Por otra parte, el presidente Donald Trump ha anunciado la salida del Acuerdo de París, firmado y ratificado por todos y cada uno de los países del mundo. Muchos alcaldes y un porcentaje considerable de los gobernadores de los estados no están de acuerdo con estas políticas y han usado su poder local para tomar medidas y presentar políticas para dejar claro que aún se encuentran en pie por el combate contra el cambio climático (Waggoner, 2018). El empoderamiento local e individual permitirá a todos tomar las medidas que consideremos correctas sin importar si existe animadversión por parte de autoridades superiores. De esta manera, se tiene

10. Planeación regional metropolitana

el potencial de desarrollar más rápido la resiliencia local y evitar los peores efectos del calentamiento global.

Ciudad Universitaria como laboratorio urbano

La Universidad Nacional Autónoma de México es la mayor institución educativa y de investigación del país y cuenta con una calidad y nivel de corte internacional (Olivares, 2010). Su campus central, conocido como Ciudad Universitaria, es uno de los campus educativos más grandes del mundo (Milenio, 2015). Hace honor a su nombre puesto que cuenta con infraestructura pública, redes y flujo de insumos y residuos, inmuebles y una población, así como una actividad económica que hacen que cuente con su propio metabolismo urbano.

En general los servicios y la infraestructura funcionan bien y son de calidad, pero se reflejan muchos de los problemas que se viven en el país. Se han tenido problemas de inseguridad y corrupción en los elementos de vigilancia (Corona, 2018); muchos edificios no cuentan con una red central de drenaje y disponen de sus aguas residuales a través de las grietas de la roca volcánica tras un somero tratamiento en una fosa séptica; los sanitarios son insalubres debido a su suciedad, el vandalismo, su falta de mantenimiento, y la falta de papel y jabón; se presentan embotellamientos críticos durante las mañanas y las tardes; el agua es potable y se ha mejorado la operación de la red con su sectorización, pero el mobiliario para consumo humano está en mal estado, existen quejas de exceso de cloro residual y presencia de coliformes fecales (Pumagua, 2012).

Por último, los contenedores de recolección tienen los residuos sólidos expuestos al aire, lo que genera mal olor y presencia de vectores y lixiviados, mientras que se presenta la actividad de pepena, tras la cual se suelen dejar residuos esparcidos en el suelo al romper bolsas en búsqueda de objetos recuperables o de valor. En suma, Ciudad Universitaria se comporta como un microsistema urbano que replica las condiciones generales del macrosistema compuesto por la Ciudad de México y su zona metropolitana.

Dentro de las actividades de investigación de los Institutos de la UNAM, ya se llevan a cabo muchas pruebas y experimentos dentro de las inmediaciones de ciudad universitaria. La gran extensión y diversidad de su territorio permite también a los estudiantes realizar muchas actividades de campo dentro del campus. Los ingenieros civiles aprenden topografía y el uso de una estación total dentro del terreno accidentado de roca volcánica; estudian el sistema de abastecimiento y de tratamiento de agua del campus; realizan prácticas de geología donde identifican minerales y rocas; practican aforos vehiculares con distintos equipos, y realizan muchas actividades más dentro y fuera de los laboratorios de la institución.

También se han realizado proyectos que han surgido de propuestas de investigadores. El sistema Pumabús cuenta con 12 rutas que transportan de manera gratuita a los estudiantes y académicos dentro de un campus que es demasiado grande para recorrerse a pie de extremo a extremo. Surgió de un proyecto del Instituto de Investigación en Matemáticas Aplicadas y Sistemas, el IIMAS, donde se realizó una simulación de movilidad dentro de la universidad. En su momento se trató de un

proyecto muy controversial, pero al pasar de los años ha probado su gran éxito y utilidad dentro del sistema de movilidad interno del campus (Montenegro, 2012). Otros ejemplos son la ya mencionada sectorización de las redes de agua potable que abastecen a los diferentes edificios, y la implementación de una red de agua tratada para el riego de las áreas verdes (Pumagua, 2012). Además, se cuenta con un sistema de recolección de residuos separado en orgánicos y e inorgánicos, donde los primeros se llevan a una planta de composta que es utilizada para restaurar y mantener toda la vegetación existente dentro del campus central (Chavarría, 2004).

Si bien estos proyectos han sido de gran utilidad para el microsistema urbano de Ciudad Universitaria, no se ha aprovechado por completo la capacidad que se tiene para transformar el campus en una zona experimental y de innovación en materia urbana, donde se prueben las más nuevas propuestas, tecnologías y desarrollos de los investigadores en materia de infraestructura, urbanismo y movilidad a pequeña escala, para realizar pruebas de concepto y de aplicabilidad en la resolución de los problemas en cuestión. Existen barreras para la implementación de un laboratorio a gran escala de esta índole. Hay mucha burocracia en la universidad y es difícil contactar a otras áreas y conseguir autorización de instancias superiores, por lo que debería simplificarse la tramitología necesaria y mejorarse y abrirse los canales de comunicación dentro de la jerarquía transversal y vertical.

La universidad cuenta con un presupuesto mayor a los 40 mil millones de pesos anuales y recibe incrementos periódicos que reflejan en el peor de los casos la inflación del peso (Román, 2017), por lo que es difícil decir que se tienen problemas de falta de presupuesto, aunque esta situación podría cambiar en un futuro cercano, debido a que el incremento de la matrícula y el personal disminuye los recursos *per cápita*. Existen asignaciones inefficientes de dinero que deberán mejorarse y el extender mayores recursos a proyectos de investigación prometedores puede ayudar a aliviar esta situación, además de dar mayor transparencia a las finanzas y establecer mecanismos para evitar la corrupción. Por último debe existir una administración que esté dispuesta a apoyar estas iniciativas que tienen un carácter educativo y de investigación, además de beneficiar a la operación de la universidad.

De esta manera, la Universidad puede funcionar para realizar pruebas de concepto en materia de desarrollo de resiliencia urbana para su posterior aplicación a mayor escala en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Académicos de la UNAM ha realizado grandes aportes a la ciencia climática, el Acuerdo de Paris y los informes del IPCC (SEMARNAT, 2010), por lo que como otras Universidades como Bristol (Scott, 2018) se puede aprovechar el empoderamiento local que confiere la autonomía para comprometerse a tomar una acción acelerada contra el calentamiento global, al eliminar sus emisiones contaminantes y de efecto invernadero en un marco temporal próximo. Deberían desarrollarse también planes de resiliencia, de sustentabilidad, y de contingencia ante desastres naturales.

Es posible aplicar de manera experimental todos los conceptos que se han discutido en los capítulos anteriores. La gran mayoría de los edificios del campus tienen techos planos y como es poco común el uso de aire acondicionado, existe mucho espacio de azotea sin utilizar que se puede aprovechar para tener una generación eléctrica distribuida con energías renovables, para probar la posibilidad de tener altas tasas de penetración de energía solar. CU compra a CFE la energía eléctrica en media

10. Planeación regional metropolitana

tensión a partir de una red que proviene de la subestación de alta tensión Odón de Buen y su red interna funciona a 23 kV (Deras, 2017), por lo que las subestaciones generales se pueden aprovechar como punto de desconexión para la creación de una microrred eléctrica de respaldo.

Es importante cuidar la reserva ecológica del Pedregal de la presión de la urbanización y el desarrollo de edificios educativos, ya que nos provee de gran cantidad de servicios ecológicos. Uno de ellos es una alta tasa de infiltración al acuífero debido a que la roca volcánica permeable no se ha cubierto aún con suelo o pavimento menos permeable. Puede experimentarse con pavimentos claros y permeables en el resto de CU, se pueden tratar las aguas residuales mediante infraestructura verde de manera distribuida en cada edificio individual y se pueden instalar pozos de infiltración para favorecer la recarga del agua subterránea. En los edificios pueden empezar a aplicarse medidas de eficiencia energética, sobre todo en la iluminación y el uso de equipo de cómputo, y se puede recuperar el agua pluvial para su reutilización dentro de los mismos.

Existe la posibilidad de instalar una red de monitoreo de la calidad del aire con mayor resolución para estudiar efectos locales y favorecer el uso de transporte público eléctrico, híbrido, y de hidrógeno, así como de vehículos autónomos. La red de Pumabús se puede optimizar con sistemas de GPS y cámaras para mejorar la seguridad y permitir conocer el tiempo restante para la llegada del siguiente autobús. El aumentar la frecuencia y la calidad del servicio permitiría reducir la saturación y aumentar los pasajeros, lo podría ayudar a disminuir el uso del automóvil dentro del campus. Se deben probar por otro lado políticas para obtener un alto porcentaje de reciclaje y experimentar con medidas para disminuir la cantidad de residuos que llegan a rellenos sanitarios, como pueden ser las plantas de incineración y gasificación con tecnologías de reducción de emisiones.

Conclusiones: Visión a futuro

La Ciudad de México y su zona Metropolitana es una de las urbes más grandes del mundo y por tanto, una de las más caóticas y conflictivas. Tenemos una gran cantidad de problemáticas en el día a día que afectan la calidad de vida de los habitantes citadinos y que ralentizan el desarrollo económico. Estamos expuestos a una enorme variedad de desastres naturales que se empeoran con las tensiones crónicas cotidianas y la insuficiencia de la infraestructura tradicional. Los efectos del cambio climático exacerbarán estos eventos destructivos y occasionarán que tengamos que enfrentarnos a riesgos que desconocemos aún. Existe un gran porcentaje de la población en situación de pobreza, y el sector no despreciable en pobreza extrema será el más afectado debido a su falta de recursos y a su localización en zonas de gran vulnerabilidad. Esta situación se refleja a su vez en muchas otras grandes ciudades del planeta.

Ante esta incertidumbre futura existen dos visiones a futuro, ya sea una proactiva o una reactiva. Si no se toma ninguna acción, o si seguimos construyendo, administrando, y viviendo en nuestras ciudades de la misma manera insostenible de la que lo hemos hecho por las últimas décadas, no estaremos preparados ante los embates de la naturaleza y nuestras grandes urbes de la actualidad estarán condenadas a morir y perdurar como ruinas. Las poblaciones otrora urbanas se convertirán en una nueva especie de paria que vendrá en miles de millones en búsqueda de un mejor lugar donde vivir. El fracaso de las ciudades representará la falla misma de la civilización como la conocemos.

Sin embargo, esta visión apocalíptica puede ser fácilmente evitada. Hoy sabemos que es de suma importancia cambiar la forma en la que hacemos ciudad y que debemos involucrar a todas las personas afectadas e interesadas. A su vez, el ayudar a mejorar el nivel de vida de los que menos tienen es benéfico para toda la población, por lo que se deben tomar políticas que estén encaminadas realmente hacia el aumento de la productividad y hacia el fomento de la movilidad social y salarial, y no solamente a paliar la pobreza. El enfoque de la infraestructura tradicional centralizada tuvo un gran éxito en el desarrollo del nivel de vida de las potencias económicas durante el siglo XX. Las economías en desarrollo de la actualidad se encuentran, por el contrario, ante un panorama global muy diferente al de hace cien años, por lo que se deben encontrar soluciones innovadoras para resolver problemas urbanos complejos con una disponibilidad limitada de fondos. En este sentido, los enfoques distribuidos que se han discutido a lo largo de esta tesis tienen el potencial de ayudar a poblaciones marginadas y a mantener el mismo ritmo de construcción de infraestructura en las regiones globales que aún viven una explosión demográfica.

El lograr estos objetivos no será posible sin un adecuado estado de derecho que asegure que todas las regulaciones dadas se respeten. El hombre es imperfecto y por ende sus instituciones, lideradas por ellos mismos, también adolecen de este mal. El superar el pensamiento administrativo con una dimensión temporal limitada al periodo político y trascender hacia una visión colectiva del bienestar común futuro es el

Conclusiones

mayor reto que tenemos adelante. Ningún gobierno en el planeta, por mayor nivel de vida que tengan sus habitantes y por más avanzada que esté su economía, ha logrado alcanzar este nivel de lucidez en sus políticas públicas; la mayoría de los esfuerzos se quedan en buenas intenciones y no demuestran la urgencia que impera ante los grandes retos hacia el porvenir de la humanidad. Debemos tomar ya una acción como individuos; debemos movilizarnos ya como colectivo.

La solución sustentable para dar a todo ser humano una vida digna está en las ciudades, sólo necesitamos la voluntad para implementarla. Esto es particularmente cierto en México, y es por ello que es imperante el desarrollo de la resiliencia urbana dentro de nuestra ciudad, para que podamos recuperarnos satisfactoriamente de todos los desastres ante los que nos enfrentemos y podamos seguir siendo una nación de grandes sueños, fiestas y tradiciones; sólo así podremos vivir en armonía con el medio ambiente y la naturaleza y no contra ellos. Existen muchos retos para la implementación de este nuevo paradigma, pero se pueden sortear y una de las claves yace en la UNAM, que tiene todos los recursos y el espacio para convertirse en un polo de innovación donde surjan hoy las soluciones para las incógnitas de mañana. Necesitamos resolver las problemáticas que nos aquejan; sólo nosotros podemos lograrlo y nuestra supervivencia depende de ello.

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1a. Abstracción del metabolismo en modelo de caja negra..... | 12 |
| Figura 1.1b. Catabolismo y anabolismo | 12 |
| Figura 1.2. Ecosistema humano..... | 13 |
| Figura 1.3a. Elementos del sistema urbano | 14 |
| Figura 1.3b. Metabolismo urbano | 14 |
| Figura 1.4. Elementos de las redes urbanas | 16 |
| Figura 1.5c. Plan de Manhattan, Nueva York, EUA | 18 |
| Figura 1.5a. Plan cartesiano | 18 |
| Figura 1.5b. Plan de Milton Keynes, Londres, Inglaterra | 18 |
| Figura 1.5d. Plan de Oglethorpe, Savannah, Georgia, EUA..... | 18 |
| Figura 1.7a. Nuevo Urbanismo, barrios tradicionales vivos con uso de suelo mixto | 22 |
| Figura 1.7b. Desarrollo orientado al transporte público | 22 |
| Figura 2.1. Geología y estratigrafía de la cuenca del Valle de México..... | 28 |
| Figura 2.2. Lagos de la cuenca del Valle de México, ca. 1519 | 29 |
| Figura 2.3. Representación pictórica de Tenochtitlan..... | 31 |
| Figura 2.4. Sistema Lerma-Cutzamala..... | 32 |
| Figura 2.5. Sistema de drenaje profundo de la ZMVM..... | 33 |
| Figura 2.6a. Sistema carretero de México | 34 |
| Figura 2.6b. Red de ferrocarriles de México | 34 |
| Figura 2.7a. Sistema Eléctrico Nacional, región centro de México | 36 |
| Figura 2.7b. Sistema Eléctrico Nacional, ZMVM | 36 |
| Figura 2.7c. Redes de transporte de combustible del centro de México..... | 37 |
| Figura 2.8. Promedio anual del patrón de circulación del viento en la ZMVM, 19:00 | 40 |
| Figura 4.1a. <i>Hubs</i> dentro la red de aeropuertos de Estados Unidos | 52 |
| Figura 4.1b. <i>Clusters</i> en una red | 52 |
| Figura 4.2. Topología de redes | 54 |
| Figura 4.3b. Robustez en la red provista por sobrecapacidad planeada en conexiones importantes .. | 57 |
| Figura 4.3a. Existencia de múltiples caminos en un sistema redundante..... | 57 |
| Figura 4.3c. Nuevos caminos creados en una red flexible tras disrupción de la ruta original | 57 |
| Figura 4.3. Topología típica de redes urbanas | 59 |
| Figura 5.1a. Componentes de un sistema de captación pluvial | 68 |
| Figura 5.1b. Capas de una azotea verde..... | 68 |
| Figura 5.1c. Funcionamiento de los jardines de lluvia o biorretención..... | 69 |
| Figura 5.1d. Tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales..... | 69 |
| Figura 5.1e. Dosal arbóreo en Seattle | 70 |
| Figura 5.1f. Esquema de un pavimento permeable | 70 |

Índice de tablas y figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 5.1g. Ciclopistas en Silicon Valley | 71 |
| Figura 5.1h. Biciestacionamiento en la Ciudad de México..... | 71 |
| Figura 5.2a. Fuentes como pozos de infiltración. | 74 |
| Figura 5.2b. Edificios con pozos de infiltración integrados..... | 74 |
| Figura 5.2c. Parque que funge como tanque de tormenta en Rotterdam, Países Bajos..... | 75 |
| Figura 5.3a. Ecoducto, parque lineal sobre Viaducto Río la Piedad, CDMX | 76 |
| Figura 5.3b. Parque hídrico la Quebradora, Iztapalapa, CDMX..... | 76 |
| Figura 5.3c. Abandono de parque lineal la Viga, enero 2018 | 77 |
| Figura 6.1. Sistema de abastecimiento de agua potable | 80 |
| Figura 6.2a. Red no sectorizada de distribución de agua | 82 |
| Figura 6.2b. Red sectorizada de distribución de agua..... | 82 |
| Figura 6.3a. Pelotas de plástico sobre embalses | 83 |
| Figura 6.3b. Sistemas fotovoltaicos en canales de irrigación | 83 |
| Figura 6.4a. Sistema de drenaje privado | 84 |
| Figura 6.4b. Sistema de drenaje público..... | 84 |
| Figura 6.5a. Elementos de una letrina de hoyo..... | 86 |
| Figura 6.5b. Funcionamiento de una fosa séptica | 86 |
| Figura 6.5c. Pozo superficial de infiltración | 87 |
| Figura 6.5d. Componentes de un sistema de zanjas filtrantes | 87 |
| Figura 6.6a. Extensión gradual del drenaje separado | 89 |
| Figura 6.6b. Construcción de colectores paralelos a escurrimientos | 89 |
| Figura 6.7a. plantas de tratamiento terciarias compactas | 90 |
| Figura 6.7b. sistemas de tratamiento biológicos en edificios | 90 |
| Figura 6.7c. Plantas de tratamiento en contenedores | 91 |
| Figura 6.7d. plantas de tratamiento en tinacos | 91 |
| Figura 6.9a. pozos de infiltración en registros | 95 |
| Figura 6.9b. lagunas de infiltración | 95 |
| Figura 6.9c. infiltración a cuevas y minas | 96 |
| Figura 7.1a. Paneles fotovoltaicos en estacionamientos..... | 101 |
| Figura 7.1b. Carril de bicicletas con cubierta solar entre Daejeon y Sejong, Corea | 101 |
| Figura 7.2a. Efecto piel en conductores electricos con altas frecuencias y tensiones..... | 104 |
| Figura 7.2b. Alma de fibra óptica en conductores de alta tensión..... | 104 |
| Figura 7.3. Curva de pato en la demanda de energía en California el 22 de octubre de 2016..... | 109 |
| Figura 8.1a. Turbinas en instalaciones hidráulicas de edificios | 116 |
| Figura 8.1b. Recuperación de energía en elevadores..... | 116 |
| Figura 8.1c. Frenos regenerativos | 116 |
| Figura 9.1. Días con valor IMECA mayor a 150, 1990-2016 | 123 |
| Figura 9.2. Sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en la Ciudad de México | 126 |

Fuentes consultadas

1. AGU (Agencia de gestión urbana) (2017). El impacto ambiental de los Residuos en la Ciudad de México: Basura Cero.
2. Ahern, Jack (2011). From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100.
3. Ahmed, Hazem y Glasgow, Janice (2012). Swarm Intelligence: Concepts, Models, and Applications. Queen's University.
4. Aldaz, Phenélope (2016). Corte de agua pega a 4.5 millones de personas. *El Universal*.
5. Alejos Góngora, Claudia Lucía (2013). Greenwashing: Ser verde o parecerlo. Cuadernos de la Cátedra "la Caixa" de Responsabilidad Social de la Empresa y Gobierno Corporativo.
6. Al-Homoud, Mohammad S. (2004). The Effectiveness of Thermal Insulation in Different Types of Buildings in Hot Climates. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27.
7. Anair, Don y Mahmassani, Amine (2012). State of Charge: Electric Vehicles' Global Warming Emissions and Fuel-Cost Savings across the United States. Union of Concerned Scientists.
8. Animal Político (2017). Sismo dañó ductos del Sistema de Aguas en Chalco y Xochimilco; 700 mil personas afectadas. *Animal Político*. Web
9. Aragao, María (2017). El CAAP en Estilo Pilar. Centro Argentino de Arquitectos Paisajistas. Web. (imagen)
10. Ardani, Kristen *et al.* (2018). Cost-Reduction Roadmap for Residential Solar Photovoltaics (PV), (2017-2030)
11. Arias-Carrión, O. *et al.* (2007). Neurogénesis en el cerebro adulto. *Revisión en Neurociencia*, 44 (9).
12. Ármannsson, Halldór y Kristmannsdóttir, Hrefna (1992). Geothermal Environmental Impact. *Geothermics*, 21 (5/6).
13. Arup. (2014). City Resilience Framework. The Rockefeller Foundation
14. Asamblea General de las Naciones Unidas (2017) Nueva Agenda Urbana.
15. Asamblea Legislativa del Distrito Federal (2015). Código Fiscal del Distrito Federal.
16. Ascensión, Arturo (2016). Ya no suba, ya no hay lugares; los microbuses toman su ruta final en la CDMX. *Animal Político*. Web.
17. Barton, Jo y Pretty, Jules (2010). What is the Best Dose of Nature and Green Exercise for Improving Mental Health? A Multi-Study Analysis. *Environmental Science y Technology*, 44.
18. Bascom, Rebecca *et al.* (1996). Health effects of outdoor air pollution. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 156 (2).
19. Bayindir, Ramazan *et al.* (2016). Effects of Renewable Energy Sources on the Power System. 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control.
20. Beatley, T. (2000). Green Urbanism: Learning from European Cities.
21. Bello, Jesica (2016). Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco, México. Zofnass Program for Sustainable Infrastructure.
22. Berlingario, Michele (2011). The Pursuit of Hubbiness: Analysis of Hubs in Large Multidimensional Networks. *Journal of Computational Science*, 2 (3).
23. Biomicrobe Technology (2018). SBR Turnkey. Web. (imagen)
24. Birch, Eugene (1980). Radburn and the American Planning Movement. *Journal of the American Planning Association*, 46 (4).
25. Bolaños Sánchez, Ángel (2006). Empezó el relleno del Lago Mayor luego de reparar fractura en su base. *La Jornada*.
26. Borgatti, Stephen y Halgin, Daniel (2011). On Network Theory. *Organization Science*, 22 (5).
27. Breña Puyol, Agustín Felipe (2003). *Hidrología Urbana*.
28. Bryant, Dave (2017). High Performance Transmission Conductors Are Improving Grid Efficiency. CTC Global. Web. (imagen)

Fuentes consultadas

29. Buchin, O., Hoelscher, M. T., Meier, F., Nehls, T., y Ziegler, F. (2016). Evaluation of the health-risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. *Energy and Buildings*, 114.
30. Bureau, Marcos (2013). El Metro de la Ciudad de México utiliza llantas Bridgestone. Motorpasión México. Web.
31. California Energy Commission (2018). 2019 Building Energy Efficiency Standards. Efficiency Standards: California Code Of Regulations, Title 24, Part 6.
32. Cámara de Diputados del Distrito Federal (2005). Informes de la Comisión Especial para dar seguimiento al ejercicio de los recursos federales que se destinan o hayan destinado a la línea 12 del Metro. Anexo IV. Gaceta Parlamentaria.
33. Cámara de Senadores (2002). La autonomía política y económica del Distrito Federal. Boletín Informativo de la Cámara de Senadores, LVIII Legislatura, 16.
34. Campbell, Richard (2015). Cybersecurity Issues for the Bulk Power System.
35. Carballar, Margarita y Flores, María (2005). Elementos hidráulicos en el lago de México-Texcoco en el Posclásico. *Arqueología Mexicana: Lagos del Valle de México*, 68.
36. Carcamo Brüning, Allan (2012). Alcantarillado de bajo costo en el sector rural. Web. (Imagen)
37. Casado, F. y Romani, J. y Negrete, Ernesto (1982). Plan Maestro del Metro. Sistema de Transporte Colectivo Metro.
38. CENACE (Centro Nacional de Control de la Energía) (2018). Diagramas Unifilares del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2022.
39. Centro Mario Molina (2014). Evaluación del Programa Hoy No Circula.
40. César Valdez, Enrique (1994). Abastecimiento de agua potable Volumen I. Facultad de Ingeniería UNAM.
41. CFE (Comisión Federal de Electricidad) (2006). Especificación CFE GWH00-78. Watthorímetro monofásicos y polifásicos electrónicos, clase de exactitud 0,5.
42. CFE (Comisión Federal de Electricidad) (2016). Listado de centrales generadoras.
43. CFE Distribución (2018). Evolución y Resultados de los Estudios del Impacto de la Generación Distribuida en las Redes Generales de Distribución.
44. Chacón Anaya, Daniel (2015). Generación distribuida, solución al subsidio eléctrico. Energía a debate. Web.
45. Charpentier, J. P. y Schenk, K. (1995). International Power Interconnections: Moving from electricity exchange to competitive trade. Public policy for the private sector.
46. Chavarría, Rosa María (2004). Muestra la UNAM su tecnología ambiental. Gaceta de la UNAM.
47. Chediak, et al. (2018). California Becomes First State to Order Solar on New Homes. Bloomberg. Web.
48. Chen, Haiyan y Jia, Beisi y Lau, S. S. Y. (2008). Sustainable urban form for Chinese compact cities: Challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat International*, 32.
49. Chhipi-Shrestha, Gyan et al. (2017). Impacts of neighborhood densification on water-energy-carbon nexus: Investigating water distribution and residential landscaping system. *Journal of Cleaner Production*, 156.
50. City of Sejong (2015). Travel from Daejeon to Sejong by bike. Youtube. (video)
51. ClearFox (2016). Container sewage treatment plants. (web)
52. Clegg, S. J. (1996). A Review of Regenerative Braking Systems. Institute of Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 471.
53. CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
54. CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). (2015). Acuerdo de París.
55. CNT (Center for Neighborhood Technology) (2010). The Value of Green Infrastructure: A guide to Recognizing Its Economic, Environmental and Social Benefits.
56. CNU (Congress for the New Urbanism) (2001). New Urbanism Charter.
57. Coca-Cola México (2017). Informe de Sustentabilidad 2017.
58. CONABIO (Comisión Nacional para el conocimientos y uso de la Biodiversidad) (2010). Patrimonio natural de México. Cien casos de éxito.

59. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2005). Sistema Cutzamala: Agua para millones de mexicanos.
60. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2012). Construcción del Túnel Emisor Oriente.
61. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS).
62. Copeland, Claudia (2016). Clean Water Act: A Summary of the Law.
63. Corona, Salvador (2018). La inseguridad aún pega a CU. El Economista. Web
64. Correa, Armando (2011). Los Índices de Calidad del Aire: Alcances y Limitaciones. Conciencia Tecnológica, 42.
65. Correa, Armando *et al.* (2013). Análisis y Evaluación de la Contaminación del Aire del Valle de México. 3º Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático.
66. CTS Embarq (2005). Sistema Integrado de Transporte Público – SIT – de México D. F. Proyecto de Transformación del Transporte Público Concesionado. Diseño Conceptual
67. CUBASOLAR (Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental) (2014). Aniversario XX de Cubasolar. Web. (Imagen)
68. Cyranoski, David (2018). China tests giant air cleaner to combat urban smog. Nature, 555.
69. Daniel, Jeff (2018). California fights back with plan to counter Trump administration vehicle emissions rollback. CNBC. Web.
70. De la Peña, María Eugenia y Ducci, Jorge y Zamora, Viridiana (2013). Tratamiento de aguas residuales en México.
71. De Motolinía, Fray Toribio (1903). Memoriales de Fray Toribio de Motolinía: Manuscrito de la Colección del Señor Don Joaquín García Icazbalceta.
72. Deign, Jason (2018). Updated: Mexico's Energy Auction Just Logged the Lowest Solar Power Price on the Planet. Genn Tech Media. Web.
73. Denholm, Paul *et al.* (2015). Overgeneration from Solar Energy in California: A Field Guide to the Duck Chart. NREL (National Renewable Energy Laboratory).
74. Deras Campos, Josué Gabriel (2017). Modelado de la red eléctrica en media tensión de Ciudad Universitaria y diseño de un sistema para su monitoreo sincrofatorial. Tesis de Maestría, UNAM.
75. Desarrollo Urbano Naucalpan (2007). Plan Municipal de Desarrollo Urbano de Naucalpan de Juárez 2006-2009.
76. DOE (Department of Energy) (2004). Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations.
77. DOE (Department of Energy) (2009). The Smart Grid: An Introduction.
78. DOE (Department of Energy) (2013). Comparing the Impacts of Northeast Hurricanes on Energy Infrastructure.
79. Dong, X., Guo, H., y Zeng, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. Water Research, 124.
80. Dovey, Rachel (2017). 12 Cities Plan for Emissions-Free Neighborhoods. Next City: Inspiring Better Cities. Web.
81. Driscoll, Kevin *et al.* (2003). Byzantine Fault Tolerance, from Theory to Reality. 22nd International Conference on Computer Safety, Reliability and Security.
82. Dumitrescu, Lucia (2014). Recycling Biomass Waste to Compost. Sustainable Energy in the Built Environment – Steps Towards nZEB.
83. Early, Robert (2017). Electric Transport in China: Creation of a World-Leading Industry. China Carbon Forum and MotionEco.
84. Economidou, Marina (2012). Energy performance requirements for buildings in Europe. REHVA Journal.
85. Eken, Erdi (2017). Advantages and Risks of Vertical Gardens. Journal of Bartın Faculty of Forestry, 19 (1).
86. El Economista (2016). Planta de tratamiento de agua para Chapultepec costará casi 300 mdp. Web.
87. El Universal (2013). Túnel Emisor Oriente, la obra más grande del mundo. Web.
88. Encyclopædia Britannica (2017). Kyoto Protocol. Encyclopædia Britannica.

Fuentes consultadas

89. Encyclopædia Britannica (2018). United Nations Millenium Development Goals. Encyclopædia Britannica. Encyclopædia Britannica Inc., Chicago, EUA.
90. Engelmeier, Tobias y Duby, Sam (2017). In Africa, microgrids are changing people's lives. The Beam, 5.
91. Enphase (2017). Enphase IQ Envoy: Installation and Operation Manual.
92. Enphase (2018). Enphase IQ 6 and IQ 6 Micros Installation and Operation Manual.
93. EPA (Environmental Protection Agency) (2016). Green Infrastructure and Climate Change: Collaborating to Improve Community Resiliency.
94. EPRI (Electric Power Research Institute). Quantifying the Value of Hydropower in the Electric Grid: Final Report.
95. Ewing, Reid y Schieber, Richard y Zegeer, Charles (2003). Urban Sprawl as a Risk Factor in Motor Vehicle Occupant and Pedestrian Fatalities. American Journal of Public Health, 93 (9).
96. FAO (Food and Agriculture Organization) (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia: opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe.
97. FENERCOM (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid) (2011). Guía del estándar Passivhaus: Edificios de consumo energético casi nulo.
98. FERC (Federal Energy Regulatory Commission) (2008). Assessment of Demand Response y Advanced Metering.
99. Figueiredo, Lucas y Amorim, Luiz (2007). Decoding the urban grid: or why cities are neither trees nor perfect grids. 6th International Space Syntax Symposium.
100. Fischel, W. A. (2000). Zoning and land use regulation. Encyclopedia of law and economics, 2.
101. Foweraker, Joe (2001). Grassroots Movements, Political Activism and Social Development in Latin America: A Comparison of Chile and Brazil.
102. Fragoso, Lucio y Ruiz, Jaime y Toxky, Gerardo (2016). La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, XXXVII (2).
103. Freepik (2018). Variety of City Buildings. Web. (imagen)
104. Frieze, Alan y Karónski, Michał (2015). Introduction to Random Graphs.
105. FSUE (Fondo del Servicio Universal Eléctrico) (2018). BASES DEL CONCURSO NACIONAL PARA EJECUTORES CALIFICADOS CPN/FSUE/FIDE/04/2018 Para la Contratación de Proyectos Mediante Componente de Apoyo de Instalación de Sistemas Aislados de Electrificación para Comunidades Rurales y Zonas Urbanas Marginadas del Fondo de Servicio Universal Eléctrico.
106. Fu, Ran et al. (2017). U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017
107. Fuentes Beltrán, Rubén (2011). Humedal de Flujo Subsuperficial Vertical (HFSV). Sistemas de Depuración Natural. Web. (imagen)
108. García, Karol (2018). CFE destraba incentivos para detonar techos solares. El Economista. Web.
109. Garfield, Leanna (2018). The simple way this Japanese town has become nearly zero-waste. The Independent. Web.
110. GEE Aguas Residuales (2013). Tratamiento terciario. Web. (imagen)
111. Geller, G y Glücklich, D. (eds.) (2012). Sustainable Rural and Urban Ecosystems.
112. Giglia, Angela (2008). Gated Communities in Mexico City. Home Cultures, 5 (1).
113. Gipe, Paul (2004). Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business.
114. Gobierno de España (2006). Código Técnico de Edificación. Documento Básico HE Ahorro de Energía.
115. Gobierno del Estado de México (2016a). Acuerdo de declaración conjunta para la reanudación de actividades de la Comisión Metropolitana de Transporte y Vialidad. Gaceta del Gobierno del Estado de México
116. Gobierno del Estado de México (2016b). Decreto Número 75.- por el que se expide la ley que regula el uso de la fuerza pública en el Estado de México.
117. Gómez Valdez, Montserrat y Palerm Viqueira, Jacinta (2015) Abastecimiento de agua potable por pipas en el valle de Texcoco. Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 12 (4).
118. González Larenas, Carlos (2013). Planimetría 03: Elevaciones en arquitectura. MVBlog. Web. (imagen)
119. Green Energy Markets (2018). Renewable Energy Index, February 2018.
120. Greenpeace (2006). El gran bosque de agua.

- 121.** Grupos de Sismología e Ingeniería de la UNAM (2017). Nota informativa: ¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?
- 122.** GSA (U. S. General Services Administration) (2014). Green Building Certification System.
- 123.** Günther, Folke (1998). Innovative Technology. Urban Planning and Environmental Projects, Kimberley and Port Elizabeth.
- 124.** Gutfraind, Alexander (2012). Optimizing Network Topology for Cascade Resilience. Handbook of Optimization in Complex Networks: Communication and Social Networks.
- 125.** Gutiérrez, Mélida y Rubio Arias, Héctor O. (2014). Captación pluvial en Chihuahua: una alternativa sustentable. Tecnociencia Chihuahua, 3 (1). (imagen)
- 126.** H2O Inter Pro France (2018). Bio Pro S Home. Tratamiento biológico secuencial de aguas residuales domésticas.
- 127.** Habib, Michel (2009). Diameter and center computations in networks.
- 128.** Haghghi, Erfan y Madani, Kaveh y Hoekstra, Arjen (2018). The water footprint of water conservation using shade balls in California. Nature Sustainability, 1.
- 129.** Halawa, Moh'd Ishaq Abu *et al.* (2016). An optimal solution for transportation problem using computing modelling. 2016 International Conference on Engineering y MIS (ICEMIS).
- 130.** Hasan, Mahadi (2015). See How MAR Improves Groundwater Quality in Bangladesh. GeoBangla. Web. (imagen)
- 131.** Hernández, Olmán (2010). Sistemas de aguas potables y servidas domésticas. Taller de construcción, Escuela de Arquitectura, Universidad de Costa Rica. Web. (imagen)
- 132.** Hines, Paul *et al.* (2009). Cascading failures in power grids.
- 133.** Hines, Paul *et al.* (2010). The Topological and Electrical Structure of Power Grids.
- 134.** Hoag, Arleen J (2006). Introductory Economics.
- 135.** Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 4, 1-23.
- 136.** Hoornweg, Daniel y Pope, Kevin (2016). Population predictions for the world's largest cities in the 21st century. Environment y Urbanization, 29 (1).
- 137.** Hu, Winnie (2018). A Billion-Dollar Investment in New York's Water. New York Times. Web.
- 138.** Ibraheem *et al.* (2005). Recent philosophies of automatic generation control strategies in power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 20 (1).
- 139.** IDTP (Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo México) (2013). Desarrollo Orientado al Transporte. (imagen)
- 140.** IEA (International Energy Agency) (2016). Mexico Energy Outlook.
- 141.** Ikeya, Takao *et al.* (1986). Applications of Optical Fibers for Overhead Transmission Lines. IEEE Journal on selected areas in communications, 4(5).
- 142.** ILFI (International Living Future Institute) (2016). Living Building Challenge 3.0: A Visionary Path to a Regenerative Future.
- 143.** Imaz, Mireya (1989). Historia natural del Valle de México. Revista Ciencias UNAM, 5.
- 144.** INE (Instituto Nacional de Ecología) (2007). Memorial del Taller "Barrancas urbanas: Soluciones a la problemática ambiental y opciones de financiamiento".
- 145.** INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2016). Boletín de prensa núm. 529/16: Producto Interno Bruto por entidad federativa 2015.
- 146.** INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2017). Comunicado de prensa núm. 298/17: datos preliminares revelan que en 2016 se registraron 23 mil 953 homicidios
- 147.** Insel, Paul *et al.* (2017). Nutrition. Jones & Bartlett Learning
- 148.** IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) (2018). Thematic Assessment of Land Degradation and Restoration
- 149.** IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007). Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 150.** IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Fuentes consultadas

151. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014a). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
152. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014b). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
153. Jayasooriya, V. M., Ng, A. W. M., Muthukumaran, S., y Perera, B. J. C. (2017). Green infrastructure practices for improvement of urban air quality. *Urban Forestry and Urban Greening*, 21.
154. Jedwab, Rémi y Christiaensen, Luc y Gindelsky, Marina (2014). Rural Push, Urban Pull and... Urban Push? New Historical Evidence from Developing Countries. Working Papers 2014-04, The George Washington University, Institute for International Economic Policy.
155. Jefatura de Gobierno de la Ciudad de México (2017). Reglamento de construcciones para el distrito federal. Diario Oficial de la Ciudad de México.
156. Jeyaratnarajah, Niththyanathan (2002). Cluster-Based Networks. Helsinki University of Technology.
157. Jímenez Jacinto, Rebeca (2018). Suspenden infracciones en el Edomex para evitar extorsiones. *El Universal*. Web.
158. Jones, Kendall *et al.* (2018). One-third of global protected land is under intense human pressure. *Science*, 360.
159. Jurado López, Jorge (2012). Cuaderno de ejercicios de tecnología de 4º de E. S. O. (imagen)
160. Kaplan, Adiel y McClure, Robert (2017). Will Seattle (Finally) Protect Its Tree Canopy? *Seattle Weekly*. Web. (imagen)
161. Kats, Gregory H. (2003). Green Building Costs and Financial Benefits. *Greenspace Buildings*.
162. Keeton, Rachel (2014). A Storm-Water Drainage System Cleverly Disguised as a Park. *Next City*. Web. (imagen)
163. Kellert, Stephen (1993). In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems. University of Chicago Press
164. Kennedy *et al.* (2007). The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11, (2).
165. Kollins, Katharine *et al.* (2010). Solar PV Project Financing: Regulatory and Legislative Challenges for Third-Party PPA System Owners. NREL.
166. Kolokotsa, Dionysia (2017). Smart cooling systems for the urban environment. Using renewable technologies to face the urban climate change. *Solar Energy*, 154.
167. Kopytynski, Witold R. (2014). Fabricación de Combustibles Derivados de Residuos (CDR) para la Industria. Gerencia Ambiental.
168. Korhonen, Jouni *et al.* (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143.
169. Kosny, Jan *et al.* (2013). Cold Climate Building Enclosure Solutions. *Building Technologies Program*. Fraunhofer.
170. Le Corbusier (1925). Contemporary City. (imagen)
171. Lee, Hannah y Pin Tan, Thai (2016) Singapore's experience with reclaimed water: NEWater. *International Journal of Water Resources Development*, 32 (4).
172. Leskovec, Jure (2007). Diffusion and Cascading Behavior in Networks. Carnegie Mellon University.
173. Licona, María Sandra (2018). Participa UAM en la rehabilitación del Viaducto Río de la Piedad. Semanario de la UAM, 27.
174. Lilián, Hernández (2018). Exigen acabar con corrupción en verificentros. *Excélsior*. Web.
175. Llano, Manuel y Flores, C. (2017). Ductos, ¿por dónde circulan los hidrocarburos en México? (mapa)
176. López Dávila, Alfonso (2017). Ni la tragedia movió el corazón al México criminal: robos, desvío de ayuda, ataques a voluntarios... Sin Embargo. Web
177. López, Jonás (2018). Terminan dos demoliciones más de edificios dañados tras 19S. *Excélsior*. Web
178. Ma, Zhenjun y Cooper, Paul y Daly, Daniel y Ledo, Laia. (2012). Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, 55.
179. Madrid Poceros (2014). Estudios de los diferentes sistemas de abasto de edificios. Web. (imagen)

- 180.** Madrigal, Alejandro (2015). En riesgo, 35% de tercera sección de Chapultepec. Milenio. Web.
- 181.** Manoj, S. et al. (2018). Automatic Synchronverter: Inverter Lacking a Devoted Synchronization Unit. International Journal of Engineering y Technology, 7.
- 182.** Manuel, José (2014). Nuevo Biciestacionamiento en Pantitlán (Bikeparking). Mi Diario Urbano. Web (Imagen)
- 183.** Martini, Michael (2011). From Slime to Networks. University of Illinois.
- 184.** Mathew, Vincent y Arun, P. (2017). The skin effect: a fresh look. Physics Education, 52.
- 185.** Matos, Eduardo (2007). Posclásico Tardío (1200-1521 d.C.). El dominio mexica. Arqueología Mexicana: La Cuenca de México, 86.
- 186.** MEDM (México Está De Moda) (2018). La Ciudad de México hace gala del porque es la capital del diseño este 2018. Web. (Imagen)
- 187.** Meerow, S., Newell, J. P., y Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. Landscape and Urban Planning.
- 188.** Meli Piralla, Roberto (1985). Diseño estructural. Trillas.
- 189.** Méndez, Ernesto (2016). Bordo Poniente agrava la crisis; contamina diario como 1 millón de autos. Excélsior. Web.
- 190.** Mercer (2018). Mercer 2018 Quality of Living Survey. Worldwide Quality of Living Raking.
- 191.** Metrobús (2018). Plano de sistema.
- 192.** MFAME (2015). Shade Balls for Water Conservation. Web. (Imagen)
- 193.** Milenio (2015). ¿De qué tamaño es la UNAM? Web.
- 194.** Miles, Andy (2018). Is Insurance A Roadblock To Electric Vehicle Adoption? Clean Technica. Web.
- 195.** Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.
- 196.** Montenegro Arjona, Juan Carlos (2012). Sistema de Transporte en C. U.
- 197.** Moreno Bonett, Alberto (2009). Apuntes del curso: Teoría General de Sistemas. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- 198.** Morlok, Juergen et al. (2017). The Impact of Pay-As-You-Throw Schemes on Municipal Solid Waste Management: The Exemplar Case of the County of Aschaffenburg, Germany. Resources, 6 (8).
- 199.** Morris, Jeffrey (1996). Recycling versus incineration: an energy conservation analysis. Journal of Hazardous Materials, 47.
- 200.** Müller-Linow, Mark y Hilgetag, Claus C. (2008). Organization of Excitable Dynamics in Hierarchical Biological Networks. PLoS Computational Biology, 4 (9). (Imagen)
- 201.** Mumtaz, F., y Bayram, I. S. (2017). Planning, Operation, and Protection of Microgrids: An Overview. Energy Procedia, 107.
- 202.** Nalda, Enrique (2007). Epiclásico (650-900 d.C.). Caída de Teotihuacán y nuevas formas de organización. Arqueología Mexicana: La Cuenca de México, 86.
- 203.** NASA (2018). POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources). Web (mapa)
- 204.** National Research Council (2005). Network Science.
- 205.** Navarrete, Shelma (2018). Olvidan Reparar Parque la Viga. Reforma. Web.
- 206.** Nelson, Valerie (2008). New Approaches in Decentralized Water Infrastructure. Coalition for Alternative Wastewater Treatment.
- 207.** Newman, Mark et al. (2016). The Structure and Dynamics of Networks. Princeton University Press.
- 208.** Nova, Guillermo (2016). Does Cuba Face the Specter of Renewed Blackouts? Havana Times.
- 209.** NREL (National Renewable Energy Laboratory) (1998). Geothermal Heat Pumps. Energy Efficiency and Renewable Energy Clearinghouse.
- 210.** Oficina de Resiliencia CDMX. (2016). Estrategia de resiliencia CDMX.
- 211.** Olivares Alonso, Emir (2010). Instituciones públicas generan casi 50% de la investigación científica del país. La Jornada. Web.
- 212.** ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2016). The World's Cities in 2016 – Data Booklet.
- 213.** ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.
- 214.** ONU Hábitat (Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos) (2018). ONU – Hábitat. Por un mejor futuro urbano.
- 215.** ONU Hábitat (Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos). The Challenge of Slums: Global Report on Human Settlements 2003.

Fuentes consultadas

- 216.** Ornelas, Víctor Hugo (2017). Bici y transporte público, fórmula frágil para Bus bici. Milenio. Web.
- 217.** Orr, Robert (2014). The Problems with LEED. The Project for Lean Urbanism.
- 218.** PAHO (Pan American Health Organization) (2000). Tecnologías apropiadas en agua potable y saneamiento básico. (imagen)
- 219.** Parag, Yael and Sovacool, Benjamin K (2016). Electricity market design for the prosumer era. *Nature Energy*, 1.
- 220.** Parsons, Jeffrey (2007). Posclásico Temprano y Medio (900-1350 d.C.). Época de transición. *Arqueología Mexicana: La Cuenca de México*, 86.
- 221.** Pastrana, Alejandro (2018). La erupción del Xitle y su afectación a Cuicuilco. *Arqueología Mexicana: Cuicuilco. Estudios recientes y nuevos datos*, 151.
- 222.** Perló, Manuel y Castro, Loreta (2017). Hydropuncture: Publicly-accessible water retention and treatment complex, Mexico City, Mexico. Lafarge Holcim Awards.
- 223.** Peterson, G. E. y Muzzini, E. (2005). East Asia Decentralizes: Making Local Government Work. World Bank
- 224.** Phipps, James *et al.* (1991). Power Quality Harmonic Distortion on Distribution Systems. Rural Electric Power Conference.
- 225.** Pinguelli Rosa, Luiz y Schaeffer, Roberto (1995). Global warming potentials: The case of emissions from dams. *Energy Policy*, 23 (2).
- 226.** Piumarta, Ian (2018). Computer Networks. Ritsumeikan College.
- 227.** Placemakers (2018). Project Portfolio. (imagen)
- 228.** PODER (Project on Organizing, Development, Education and Research) (2011). El lado sucio de la industria eólica: el desarrollo y los derechos humanos en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca.
- 229.** PolyU Hong Kong (Hong Kong Polytechnic University) (2012). Electricity from water mains: PolyU's novel inline hydropower system for power generation from water pipelines. Technology Frontier. (imagen)
- 230.** ProValle (Patronato ProValle de Bravo A. C.) (2013). Nuestro Lago Valle de Bravo. Boletín de Patronato ProValle de Bravo A. C.
- 231.** Pumagua (2012). Informe de avances 2012. UNAM.
- 232.** Ramírez, Kenya (2012). Santa Fe pasó de tiradero a joya urbana. Excélsior. Web.
- 233.** Rathi, Akshat (2018). Europe's heatwave is forcing nuclear power plants to shut down. Quartz. Web.
- 234.** Rauf Bhatti, Abdul *et al.* (2016). A Comprehensive Overview of Electric Vehicle Charging using Renewable Energy. *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 7 (1).
- 235.** Real Academia Española (2014). Resiliencia. En Diccionario de la lengua española (23a ed.).
- 236.** Reed, Brian (2012). Latrine Slabs: an Engineer's Guide. Water, Engineering & Development Centre (WEDC)
- 237.** Reforma (2016). Cierra Edomex basureros a CDMX. Web.
- 238.** Reuters (2017). The long power restoration process in Puerto Rico. Web
- 239.** Reveles, César (2018). Ciudad de México, al borde del colapso por la generación excesiva de basura. Animal Político. Web.
- 240.** Risto, Tarjanne y Aija, Kivistö (2008). Comparison of electricity generation costs. Research Report, Lappeenranta University of Techology.
- 241.** Rivera, Astrid (2016). Hoy No Circula va para todos. El Universal. Web.
- 242.** Rivera, Diego (1945). La Gran Tenochtitlán. (pintura)
- 243.** Roa, Wendy (2018). Buscan que fotomultas apliquen a vehículos con placas de Edomex. Excélsior. Web
- 244.** Román, José Antonio (2017). Aprueba UNAM presupuesto para 2018; resulta "insuficiente": Graue. La Jornada. Web
- 245.** Rosales Escalante, Elías (2005). Conceptos teóricos base y aplicaciones. *Tecnología en Marcha*, 18 (2).
- 246.** Rotterdam Network Exchange (2015). Rotterdam Exchange: Water Management y Multi-Benefit Solutions
- 247.** Royacelli, Gabriela (2011). Agua del Periférico irá a 3 pozos de absorción. El Universal. Web.

- 248.** Russo, B. J. *et al.* (2011). Renewable Energy Requirements for Future Building Codes: Energy Generation and Economic Analysis.
- 249.** SACMEX (2016). El gran reto del agua en la Ciudad de México: Pasado, presente y prospectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo.
- 250.** SACMEX (Sistema de Aguas de la Ciudad de México) (2013). Documento Base del Foro La crisis del agua en la ciudad de México: retos y soluciones.
- 251.** Sanger, David (2018). Russian Hackers Appear to Shift Focus to U.S. Power Grid. The New York Times.
- 252.** Santoyo, Enrique y Ovando, E. y Mooser, F. y León, E. (2005). Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México.
- 253.** Scardigno, Nicola (2014). Toward an A Priori Sustainable Architecture. Arts, 3.
- 254.** Schueler, Thomas (2000). The Importance of Imperviousness. Watershed Protection Techniques, 1 (3).
- 255.** Scott, Katie (2018). University of Bristol pilots wellbeing and sustainability programme. Employee Benefits. Web.
- 256.** Searchinger, Timothy *et al.* (2009). Fixing a Critical Climate Accounting Error. Science, 326.
- 257.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México) (1999). Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas en el Distrito Federal. Gaceta Oficial del Distrito Federal.
- 258.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México) (2016b). CDMX Sustentable: Calidad del aire.
- 259.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México) (2017). Calidad del aire en la Ciudad de México: Informe 2016.
- 260.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal) (2002). Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación en el estado de Distrito Federal.
- 261.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal) (2005). Informe climatológico ambiental del Valle de México.
- 262.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal) (2015). Norma ambiental para el distrito federal nadf-024-ambt-2013, que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los residuos del distrito federal. Diario Oficial del Distrito Federal.
- 263.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal) (2018). Activación del Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas (PCAA) en la ZMVM. Contingencias (Fase I y Fase II).
- 264.** SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente) (2016a). Aviso por el que se da a conocer el Programa para Contingencias Ambientales Atmosféricas en la Ciudad de México. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- 265.** SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social) (2007). Plan o programa municipal de desarrollo urbano. Guía Metodológica.
- 266.** SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social) (2012). Programa de ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México, actualización 2012.
- 267.** Seguridad, Justicia y Paz (2017). La violencia en los municipios de México.
- 268.** SEMARNAT (2011). Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020
- 269.** SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y los Recursos Naturales) (2015). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México.
- 270.** SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2010). Participarán 22 científicos mexicanos en el 5º reporte de evaluación del IPCC.
- 271.** SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2013). Calidad del aire: una práctica de vida.
- 272.** SENER (Secretaría de Energía) (2018). Proyecto de interconexión Baja California – Sistema Interconectado Nacional.
- 273.** SEP (Secretaría de Educación Pública) (2013). Atlas de México, Cuarto grado.
- 274.** Serna, Víctor Hugo (2011). Comunicaciones a través de la red eléctrica – PLC Revista Española de Electrónica.

Fuentes consultadas

- 275.** Seymour, Joseph (2011). The Seven Types of Power Problems. Web.
- 276.** Silicon Valley Bicycle Coalition (2017). Class 4 Bike Lanes on Stevens Creek: Driveways, Bus Lanes y Traffic Lights. Web. (imagen)
- 277.** SOBSE (Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México) (2017). Metrobús Línea 5, ampliación. Proyecto conceptual.
- 278.** SolarEnviro (2014). India's Canal Solar Power Project. Web. (imagen)
- 279.** Sosní Solchaga, Francisco de Asís (2016). Un instrumento de transparencia focalizada para evitar la corrupción en el sector inmobiliario de la Ciudad de México. Tesina de maestría, CIDE.
- 280.** Stanislawski, Dan (1946). The Origin and Spread of the Grid-Pattern Town. Geographical Review, 36 (1).
- 281.** Stark, Roberto (2016). Torre Koi. Construcción y Tecnología en Concreto.
- 282.** STC (Sistema de Transporte Colectivo) (2007). Estatuto Orgánico del Sistema de Transporte Colectivo.
- 283.** STC (Sistema de Transporte Colectivo) (2008). Características del Material Rodante. Web
- 284.** STC (Sistema de Transporte Colectivo) (2018). Red del Metro.
- 285.** Sugahara, M. and L. Bermont (2016). Energy and Resilient Cities. OECD Regional Development Working Papers.
- 286.** Švigr, Nikola et al. (2008). Ancillary Services in Deregulated Power Systems. 8th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS.
- 287.** Syadli, Husna (2016). An Improved Load Shedding Scheduling Strategy for Solving Power Supply Defisit (sic). Jurnal Teknologi, 78.
- 288.** Synolakis C y Kânoğlu, U. (2015). The Fukushima accident was preventable. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences.
- 289.** Sytral (Syndicat Mixte des transports pour le Rhône et l'agglomération lyonnaise) (2014). Présentation du Plan de Mandat 2015-2020.
- 290.** Taneja, Jay et al. (2013). A Comparative Study of High Renewables Penetration Electricity Grids. 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications.
- 291.** Tanweer (2018). Solar Carport. (imagen)
- 292.** Tecnyo (2013). Sistema KERS: Freno regenerativo. Web (imagen)
- 293.** Telesur (2018). Puerto Rico: Suicide Spikes by 30 Percent After Hurricane Maria. Web
- 294.** Terapia Urbana (2018). Jardín vertical Fytotextile. Web. (imagen)
- 295.** The Housing Partnership (2003). Filling in the Spaces: Ten Essentials for Successful Urban Infill Housing.
- 296.** TomTom (2017). TomTom Traffic Index 2017: Mexico City Retains Crown of 'Most Traffic Congested City' in World.
- 297.** Tsukahara, Masanori (2012). Presentation of Japanese technology of waste to energy. Japanese Business Alliance for Smart Energy Worldwide.
- 298.** UK MET Office Hadley Centre (2011). Climate: Observations, projections and impacts, Mexico.
- 299.** UMD Extension (University of Maryland Extension) (2001). Xeriscaping and Conserving Water in the Landscape.
- 300.** UNEP (United Nations Environment Programme) (2007). Nuclear Waste: Is Everything Under Control?
- 301.** UNEP (United Nations Environment Programme) (2018). Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability.
- 302.** Universidad del Norte (2018). Recuperación de condiciones hidrológicas y reducción de caudales pico en cuencas urbanas consolidadas mediante alternativas sostenibles de almacenamiento disperso adaptadas a predios existentes. Web (imagen)
- 303.** Valdés Krieg, Viviana (2017). La vivienda vertical en México: diagnóstico y tendencias. Construcción y tecnología en concreto.
- 304.** Vendeirinho, Vivian (2018). Why 'mini' matters to achieve power for all. The Beam
- 305.** Villa, José Luis. (2018). Parque Lineal La Viga, en el olvido y vandalizada. El Big Data. Web. (imagen)
- 306.** Villasana, Carlos y Gómez, Ruth (2017). Los ríos de la ciudad que hoy ya no vemos. El Universal. Web.

- 307.** Vincenzo, Giordano y Bossart, Steven (2012). Assessing Smart Grid Benefits and Impacts: EU and U.S. Initiatives. NREL (National Energy Technologies Laboratory).
- 308.** Viscidi, Laura (2018). Mexico's Renewable Energy Future. Wilson Center.
- 309.** Vite Pérez, Miguel Ángel (2005). La problemática urbana de la Ciudad de México. Comercio Exterior, 55 (9).
- 310.** Waggoner, Martha (2018). Al Gore Says President Trump Not Yet as Damaging to Environment as He Feared. TIME. Web.
- 311.** Wang, J., y Banzhaf, E. (2018). Towards a better understanding of Green Infrastructure: A critical review. Ecological Indicators, 85.
- 312.** Watson, Donald (2013). Bioclimatic Design. Sustainable Built Environments.
- 313.** Webb, Paul y Boltt, Gill (1990). Food chain to food web: a natural progression? Journal of Biological Education, 24 (3).
- 314.** Werner, E. E., y Smith, R. S. (1979). A Report from the Kauai Longitudinal Study. Journal of the American Academy of Child Psychiatry, 18(2), 292–306.
- 315.** Wikimedia (2006a). Fat tree network. Web. (imagen)
- 316.** Wikimedia (2006b). Arcanal. Web. (imagen)
- 317.** Wikimedia (2007). Valle de México, ca.1519. Web. (imagen)
- 318.** Wikimedia (2008a). Modern hub-and-spoke system (circa 1995). Web. (imagen)
- 319.** Wikimedia (2008b). Skin depth. Web. (imagen)
- 320.** Wikimedia (2010). Milton Keynes Sector. (imagen)
- 321.** Wikimedia (2011). Network Topologies. Web. (imagen)
- 322.** Wikimedia (2013a). Le Corbusier's apartment house in Berlin. (imagen)
- 323.** Wikimedia (2013b). Downtown Brasilia. (imagen)
- 324.** Wikimedia (2014a). A diagram of three city grids at the same scale showing the differences in dimensions and configuration. (imagen)
- 325.** Wikimedia (2014b). Mapa del sistema ferroviario de México. Web. (imagen)
- 326.** Wikimedia (2016). California hourly electric load vs. load less solar and wind (Duck Curve) for October 22, 2016. Web. (imagen)
- 327.** Wikimedia (2017). Esquema de fosa séptica. Web. (imagen)
- 328.** Wildi, Walter (2010). Environmental hazards of dams and reservoirs. Terre et environment, 88.
- 329.** Wilson, Edward O. (1984). Biophilia. Harvard University Press
- 330.** Wilson, Thomas (2015). The Oglethorpe Plan: Enlightenment Design in Savannah and Beyond. University of Virginia Press
- 331.** WRI (World Resources Institute) (2014). Better Growth, Better Climate: The New Climate Economy Report.
- 332.** Young, Hugh (2008). Heron's Fountain. Wikimedia. Web. (imagen)
- 333.** Yujia, Wu y Zhaofeng, Xu y Zheng, Li (2014). Lifecycle Analysis of Coal-fired Power Plants with CCS in China. Energy Procedia, 63.
- 334.** Zamora, Guillermo (fotografías) (2014). Mario Pani. La Construcción de la Modernidad. (imagen)
- 335.** Zhang, Xin *et al.* (2018). The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. PNAS, 115 (37).
- 336.** Zhou, Yiyi y Lu, Sophie (2017). China's Renewables Curtailment and Coal Assets Risk Map: Research Findings and Map User Guide.
- 337.** Zommers, Z., Wrathall, D. and van der Geest, K. (2014). Loss and Damage to Ecosystem Services. UNU-EHS Working Paper Series, No.2.