



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“EFECTOS EN LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN
POR EL PROCESO DEL CRECIMIENTO URBANO
EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(HIDRÁULICA)**

PRESENTA:

RAFAEL LUARTE GARCÍA.

DIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL



Ciudad Universitaria, D.F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

- A Dios por darme salud y paciencia para lograr mis objetivos, estando conmigo en todo momento. Y a mis santos que han estado conmigo siempre.
- A mi madre, por su cariño, confianza, apoyo y comprensión para seguir adelante, y por ayudarme a cumplir esta meta.
- A Belén por su confianza, estímulo y apoyo, y en especial a mi hijo Rafita, quien me motiva día con día a superarme.
- A mi padre y mis hermanos que depositan su apoyo en mi persona. Gracias por creer en mí.
- A mi director de tesis Dr. Carlos A. Escalante Sandoval por su atención, apoyo, tiempo y gran interés, mostrado durante el desarrollo de este trabajo, así como sus valiosos e importantes comentarios para la culminación de esta tesis.
- A los integrantes del jurado, M.I. Víctor Franco, Dra. Lilia Reyes Chávez, Dr. Rodolfo Silva Casarín y Dr. Paulo Salles Afonso de Almeida, por su revisión, comentarios, y sugerencias que enriquecieron el presente trabajo.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada, para poder realizar mis estudios de maestría.
- A mis profesores por su interés mostrado durante sus clases, por transmitirme sus conocimientos y experiencias.
- A la Universidad Nacional Autónoma de México, en su División de Estudios de Posgrado, de la Facultad de Ingeniería, por la oportunidad que me brindó para una mejor formación profesional.
- A mis amigos Guillermo, Felipe, Fernando, Francisco, Alicia, Angélica, Víctor, Arturo, Sandra, por su amistad y ayuda para seguir adelante.
- A mis compañeros de la Universidad Alberto, Carlos Echeverrú, Carlos Aquino, José, Miguel, Ricardo, Roberto, Ruth, Víctor Ortiz, Víctor Velázquez. Gracias por su apoyo incondicional.
- A todas las personas que representan las diferentes instituciones que me proporcionaron la información útil para la elaboración de este trabajo.
- A todas las personas que olvide mencionar y que me apoyaron de alguna u otra manera para la realización de este trabajo.

INDICE

INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 1. SURGIMIENTO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY.	4
1.1 El agua elemento de gran valor en el establecimiento de las ciudades.	4
1.2 El Área Metropolitana de Monterrey en el contexto urbano nacional.	4
1.3 El proceso de metropolización del Área Metropolitana de Monterrey.	5
CAPÍTULO 2. EL CICLO HIDROLÓGICO Y SUS COMPONENTES.	10
2.1 EL Ciclo Hidrológico.	10
2.1.1 Precipitación.	14
2.1.1.1 <i>Precipitación promedio sobre un área</i>	14
2.1.2 Evaporación y transpiración.	16
2.1.3 Evapotranspiración.	19
2.1.3.1 <i>Zonas de humedad en un suelo</i>	21
2.1.3.2 <i>Evapotranspiración potencial y Evapotranspiración real.</i>	22
2.1.3.3 <i>Cálculo de la Evapotranspiración.</i>	23
2.1.3.4 <i>Cálculo de la ETR anual: Fórmulas de Turc y Coutagne.</i>	24
2.1.4 Agua subsuperficial.	24
2.1.4.1 <i>Flujo no saturado.</i>	25
2.1.5 Infiltración.	26
2.1.5.1 <i>Descripción del proceso de infiltración.</i>	28
2.1.5.2 <i>Métodos empíricos.</i>	30
2.1.5.3 <i>Criterio de la capacidad de infiltración media.</i>	30
2.1.5.4 <i>Criterio del coeficiente de escurrimiento.</i>	31
2.1.6 Agua superficial.	31
2.1.6.1 <i>Fuentes de flujo superficial.</i>	32
2.1.6.2 <i>Flujo superficial hortoniano.</i>	33
2.1.6.3 <i>Flujo subsuperficial.</i>	34
2.1.6.4 <i>Flujo superficial de saturación.</i>	34
2.1.6.5 <i>Exceso de precipitación y escurrimiento directo.</i>	35

2.1.6.6 <i>Efectos de la urbanización.</i>	36
2.1.6.7 <i>Coeficiente de escurrimiento.</i>	37
2.1.6.8 <i>Escurrimiento y flujo superficial.</i>	37
2.1.7 Flujo de agua subterránea.	38
CAPÍTULO 3. MEDIO FISICO NATURAL	39
3.1 Ubicación Geográfica.	40
3.2 Variables relacionadas con la Atmósfera.	43
3.2.1 Climatología.	43
3.2.1.1 <i>Temperatura.</i>	46
3.2.1.2 <i>Precipitación.</i>	50
3.3 Variables relacionadas con la Tierra.	52
3.3.1 Topografía.	52
3.3.2 Fisiografía.	52
3.3.3 Orografía.	62
3.3.4 Geología.	64
3.3.4.1 <i>Geohidrología</i>	65
3.3.5 Edafología.	67
3.3.5.1 <i>Tipos de Suelos.</i>	69
3.4 Variables relacionadas con el agua.	74
3.4.1 Hidrología.	74
3.4.1.1 <i>Hidrología Superficial.</i>	74
3.4.1.2 <i>Hidrología Subterránea.</i>	79
CAPÍTULO 4. FUENTES DE ABASTECIMIENTO E INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA.	89
4.1 Antecedentes.	89
4.2 Infraestructura hidráulica actual.	91
4.2.1 Presas.	93
4.2.2 Acueductos.	98
4.2.3 Anillo de Distribución.	100
4.2.4 Plantas de bombeo.	102

4.2.5 Red de distribución y plantas potabilizadoras.	102
4.3 Consumo por Sectores.	105
CAPÍTULO 5. CRECIMIENTO URBANO DEL AMM Y SUS IMPACTOS	107
5.1 Variables climáticas que se ven afectadas por el crecimiento urbano.	109
5.2 Desarrollo para la obtención del incremento de la mancha urbana.	111
5.3 Infiltración y escurrimiento.	124
5.3.1 Cálculo de la Precipitación Promedio Anual por municipio.	138
5.3.2 Cálculo de la Evapotranspiración Real Promedio Anual por municipio.	138
5.3.3 Cálculo de la Lámina de Lluvia Promedio Anual por municipio.	143
5.3.4 Cálculo del escurrimiento y la infiltración.	145
5.4 Temperaturas máximas y mínimas.	162
5.4.1 Estaciones Climatológicas.	162
5.4.2 Cambio Climático.	162
5.4.3 Incremento de Temperatura Media.	164
5.4.4 Análisis del Incremento de Temperaturas Máxima y Mínima.	166
CONCLUSIONES	174
RECOMENDACIONES	179
BIBLIOGRAFIA	181
FUENTES DE INFORMACIÓN	185

INTRODUCCIÓN

El tema esencial del presente trabajo es analizar como se afecta la capacidad de infiltración por el proceso del crecimiento urbano en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM).

En las últimas décadas, el agua se ha convertido en un recurso estratégico para el desarrollo económico de países, regiones y ciudades, su disponibilidad es de vital importancia para el progreso de la agricultura, la ganadería, la industria y fundamentalmente en los servicios básicos de la población, como el agua potable y alcantarillado. El crecimiento urbano y económico provoca un aumento en la demanda del recurso. Sin embargo, la distribución natural de este vital líquido es variable de una región a otra, su oferta depende de la dinámica del ciclo hidrológico, en el cual la precipitación, la evaporación, la transpiración y la infiltración están en función de la temperatura, las características del suelo y la ubicación geográfica.

El agua es demandada durante todo el año, pero no en todos los meses se tiene el mismo volumen, existen periodos de abundancia y de escasez, los cuales están definidos por las características propias de la cuenca, donde la precipitación pluvial define en gran escala el agua disponible. La oferta de agua renovable depende de las fuentes superficiales y subterráneas que abastecen a los manantiales, ríos y lagos para ser retornada como precipitación y cumplir su ciclo.

La situación del agua en una región es el reflejo del bienestar social de la población. El desarrollo y el medio ambiente son los ejes de un futuro sustentable de las ciudades, el cual podrá alcanzarse si se logra un equilibrio en las variables del ciclo hidrológico, de modo que la población obtenga una buena calidad de vida.

La presente tesis aborda de manera particular el comportamiento histórico de la precipitación, las temperaturas y el crecimiento urbano en el Área Metropolitana de Monterrey, reflejando las láminas de agua de lluvia, de infiltración, de escurrimiento, de evapotranspiración y los incrementos de temperatura.

El desarrollo de éste trabajo, se ha dividido en cinco capítulos:

El primer capítulo hace referencia al valor del agua como elemento vital para el establecimiento de ciudades. Se ubica dentro del contexto urbano nacional al Área Metropolitana de Monterrey y se describe su proceso de metropolización.

En el segundo capítulo se describe el ciclo hidrológico, las variables que forman sus diversos procesos (precipitación, evaporación, evapotranspiración, transpiración, infiltración, escurrimiento, flujo superficial, subsuperficial y subterráneo). También se menciona brevemente las cantidades totales estimadas de agua en la Tierra, algunos métodos para la obtención de la lluvia y algunas fórmulas para el cálculo de la evapotranspiración.

El tercer capítulo trata sobre el medio físico natural, donde se da una visión de las características geográficas del AMM para referenciar espacialmente algunos de sus fenómenos y procesos ambientales, a través de la localización y delimitación geográfica, de la topografía y fisiografía del terreno (que mediante la topografía, la geología y otras características muestra la regionalización de los diversos paisajes metropolitanos), la orografía que muestran las principales cumbres y su participación con los tipos de roca de la región, útil en la localización de aguas subterráneas. También se trata el tema de la hidrología, proporcionando la información del agua superficial (corrientes de agua y ámbitos territoriales de las cuencas y subcuencas hidrológicas) y subterránea (pozos, norias y manantiales), que junto con la descripción de los tipos y subtipos de climas, así como los datos disponibles en las estaciones meteorológicas (temperatura y precipitación), completan el marco geográfico del Área Metropolitana de Monterrey.

El capítulo cuarto aborda la Infraestructura Hidráulica actual del AMM, la necesidad de traer agua de zonas externas, sus principales fuentes de abastecimiento, mencionando los acueductos, el anillo de distribución, las plantas de bombeo, la red de distribución y plantas potabilizadoras.

En el capítulo quinto, se hace mención de las variables climáticas del Área Metropolitana de Monterrey que se ven afectadas por el crecimiento urbano, para analizarlas es importante saber que el AMM esta ubicada en medio de montañas que afectan los patrones del clima (temperaturas, lluvias, evapotranspiración, vientos), mismos que influyen en la cubierta vegetal, el tipo de vegetación y de

suelo, que se manifiestan en escurrimientos torrenciales que inundan el área urbana. Se obtienen valores estimados de precipitación, evapotranspiración real, lluvia, mancha urbana, escurrimiento e infiltración. También se analizan las temperaturas máximas y mínimas para determinar la presencia de cada vez más días con temperaturas mayores, fijando una temperatura de 22°C durante la noche como el umbral máximo de confort, donde el ser humano puede descansar, tener un ambiente adecuado para la recuperación de las actividades físicas, laborales y demás realizadas durante el día. Se muestran gráficas de los incrementos.

Es importante comprobar el potencial de la urbanización como agente de cambios climáticos a gran escala sobre ciudades completas, originados por el crecimiento urbano, por ahora los datos con los que se cuenta son lo suficientemente importantes para demostrar que el desarrollo urbano es la causa de tales cambios.

Por último se plantean las conclusiones de este trabajo, en donde se confirma la influencia del crecimiento urbano como factor determinante en la modificación de las variables climáticas, que se reflejan en diferencias de temperatura, humedad, precipitación, radiación solar y velocidad del viento en la metrópoli y sus alrededores, además el desarrollo de algunos municipios a un ritmo más acelerado modifica el uso del suelo y con la deforestación se propicia que los suelos pierdan la cobertura vegetal y la capacidad de infiltración, alterando cada una de las variables del ciclo hidrológico.

Finalmente, se hacen propuestas para cambiar los actuales patrones de desarrollo urbano-metropolitano de México, enfrentar los desafíos de la urbanización futura, adoptar medidas que conduzcan al equilibrio del ciclo hidrológico indispensable para lograr el uso sustentable del agua en el país, así como reconocer la necesidad del crecimiento social y económico que contribuyan al uso sustentable de los recursos naturales, a la conservación y protección efectiva del medio ambiente.

CAPÍTULO 1.

SURGIMIENTO DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY.

1.1 El agua elemento de gran valor en el establecimiento de las ciudades.

Históricamente, la fundación y desarrollo de muchas ciudades ha estado ligado a la disponibilidad de agua. Las ciudades orientales, europeas y americanas más importantes se establecieron en los márgenes de ríos, lagos o zonas costeras para asegurar el abastecimiento de agua necesario en la producción de alimentos, o bien como medio de transporte, comunicación y comercio con otras regiones, además de ser un elemento vital para los ecosistemas. De igual forma, en nuestro país las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey, que actualmente constituyen los tres centros urbanos más grandes, también se asentaron en los márgenes de lagos y manantiales. La Gran Tenochtitlán fue fundada prácticamente sobre cinco lagos (Laguna de Zumpango, Lago de Chalco, Lago de Texcoco, Lago de Xochimilco y Lago de Xaltocan), Guadalajara en los linderos de la Laguna de Chapala, mientras que la capital regiomontana se estableció en las cercanías de los manantiales denominados Ojos de Agua de Santa Lucía[13].

En décadas recientes, el agua se ha convertido en un recurso estratégico para el desarrollo económico de los países y de las regiones. La nueva política hidráulica de México considera al agua como un recurso estratégico de seguridad nacional [7]. La distribución natural del agua regionalmente es desigual, la oferta del líquido depende de la dinámica del ciclo hidrológico, en el cual la evaporación, la precipitación y la infiltración están en función de la temperatura, las características del suelo y la ubicación geográfica. La oferta de agua renovable depende del agua superficial retornada como precipitación, así como de los flujos provenientes de otras regiones [25].

En el país, 70% del volumen agua que se suministra a las ciudades proviene del subsuelo [8], abasteciendo alrededor de 75 millones de personas (55 millones en los centros urbanos y 20 millones en el medio rural, de manera aproximada). De esta manera, el agua subterránea se ha convertido en una fuente indispensable para los diferentes usuarios, ya sea en las zonas áridas, como el Valle de Monterrey, o bien donde constituye la fuente de abastecimiento más importante y

frecuentemente única. Su extracción excesiva agota los mantos freáticos, provoca fracturas y hundimientos del subsuelo, debido a que se realiza a mayor profundidad, incrementando los costos por el consumo de energía para el bombeo y poniendo en riesgo la salud de la población al obtener agua de menor calidad por su alto contenido en sales. La extracción de agua subterránea no ha sido la única fuente para satisfacer la sed de las grandes ciudades. Metrópolis como la ciudad de México y Monterrey han recurrido a fuentes de abastecimiento externas, mucho mas lejanas, aumentándose los costos de producción, conducción y apropiándose de los activos naturales de otras regiones [25].

El crecimiento acelerado urbano-industrial se ha dado sin considerar sus repercusiones ecológicas y físico-espaciales en el medio urbano regional. Los problemas de contaminación del aire, agua y suelo son el costo del crecimiento económico-industrial sostenido [33]. El uso sustentable del agua en la ciudad implica mantener un equilibrio en sus reservas, de forma que satisfagan las funciones biológicas, económicas y sociales, a la par que se contrarresten las presiones que alteran su calidad y se protegen los procesos que intervienen en su disponibilidad, clima y bosques. Dentro de la concepción de sustentabilidad, el abastecimiento seguro de agua limpia para la población y las actividades en general, así como la disposición de un adecuado sistema sanitario son imprescindibles para la salud y dignidad del ser humano. Además, una oferta adecuada de agua ayuda a reducir la inseguridad alimentaria y la pobreza. En la Conferencia Internacional sobre Agua Dulce, se menciona que el acceso al agua potable y al saneamiento constituye un derecho humano.

1.2 El Área Metropolitana de Monterrey en el contexto urbano nacional.

México es un país predominantemente urbano, 60.9% de la población reside en localidades de más de 15 mil habitantes, su sistema urbano está integrado por 362 ciudades, de las cuales 241 son ciudades pequeñas (de 15 mil a menos de 50 mil habitantes); 95 se consideran ciudades medias o medianas (de 50 mil a menos de 500 mil habitantes), 26 son grandes ciudades (17 de éstas tienen de 500 mil a menos de un millón de habitantes y 9 cuentan con más de un millón de personas).

En las nueve grandes ciudades reside 51.1% de la población urbana nacional, seis de ellas corresponden a las zonas metropolitanas de: la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Puebla, León y Toluca, donde radica aproximadamente la tercera parte de la población total del país.

El proceso de transformación urbana por el que actualmente atraviesa México explica las condiciones y el lugar del AMM dentro del sistema urbano nacional. Sus principales características son: predominio de la población en áreas urbanas y disminución de las rurales; aumento en el número de ciudades (en sólo diez años se agregaron 53 nuevos centros urbanos a los 309 existentes en 1990) y diversificación del tamaño de ciudades; reorientación de los flujos migratorios (que tradicionalmente se dirigían a la Ciudad de México y ahora lo hacen hacia ciudades de menor tamaño); surgimiento de migraciones de origen urbano y destino rural o bien de origen metropolitano hacia destinos urbanos y rurales.

Con una población que asciende a 3,243,466 habitantes y una extensión que abarca nueve municipios de la misma entidad, el AMM se coloca en tercer lugar dentro del sistema urbano nacional, precedida por las zonas metropolitanas de la Ciudad de México (ZMCM) y Guadalajara (ZMG) que cuentan con 17.8 y 3.8 millones de habitantes, respectivamente, para el año 2000.

En la última década la población de la AMM observó un crecimiento de 2.2% en promedio anual, mientras que la ZMCM creció a una ritmo menor (1.7%) y la ZMG lo hizo a una tasa ligeramente mayor (2.4%). De las otras cinco metrópolis que le siguen en población, cuatro crecieron a un ritmo más alto: en primer lugar Toluca, por su cercanía con la ZMCM, creció a 3.3% anual; León y San Luís Potosí (que no ha alcanzado el millón de habitantes) lo hicieron en 2.6% y la zona metropolitana de Puebla en 2.2 %. Además, la Zona Metropolitana de Torreón-Gómez Palacio, Durango aumento sólo en 1.4%, mientras que las ciudades fronterizas de Ciudad Juárez y Tijuana crecieron casi al doble que la capital regiomontana; la primera con 4.3% en promedio anual y la segunda 5.0 %.

El AMM, como tercera ciudad en importancia a nivel nacional y segunda en cuanto a su desarrollo económico, basada tradicionalmente en el sector industrial y un sector terciario en constante auge, consolida su posición como capital regional

del noreste de México, se perfila como un importante centro cultural, financiero y de servicios; está llamada a desempeñar un importante papel en la articulación regional y mundial del sistema de ciudades. No obstante, el AMM enfrenta desafíos importantes de carácter socioeconómico, urbanístico, de infraestructura y de abastecimiento hidráulico que deberá resolver para fortalecer su posición competitiva [25].

1.3 El proceso de metropolización del Área Metropolitana de Monterrey.

Describir las variables espaciales del Área Metropolitana de Monterrey en el contexto de la dinámica urbanística experimentada en las últimas décadas: infraestructura, servicios, suelo, vivienda y planeación. Esto plantea la naturaleza de la metrópoli y las responsabilidades de cada uno de los tres ámbitos de gobierno (federal, estatal y municipal), dentro de las cuales se especifican las correspondientes a las administraciones municipales. Con esto se tendrá un inventario de qué *debe* hacer un gobierno municipal en su ámbito de competencia, haciendo posible evaluar las acciones que se realizan para enfrentar la problemática de la urbe, así como su relevancia como instancia de gobierno [14].

La Sierra Madre Oriental y el Cerro de la Silla constituyen monumentales telones del escenario natural de Monterrey, ciudad fundada por Diego de Montemayor en 1596. Después de ser prácticamente arrasada por dos grandes inundaciones en 1611 y 1636, la localidad experimentó cierto auge en el último tercio del siglo XVII por el descubrimiento de minas en el norte, pero decayó en el XVIII por el desplazamiento de la población hacia Tamaulipas. Al iniciarse el México independiente en 1821, Monterrey tenía 11,044 habitantes que se elevan a 35,356 en 1880. En 1900 la “Sultana del Norte” cuenta con 62,000 personas y hacia la primera mitad del siglo XX, Monterrey inicia su proceso de metropolización en los años cincuenta, en la misma época que la Ciudad de México, sólo que con menor ritmo e intensidad y se empieza a expandir hacia los municipios de Guadalupe y San Nicolás. El municipio de Monterrey, unidad central de la urbe, tenía 339,282 habitantes en 1950, lo que representaba 93.6 % de su población total. Lo incipiente del proceso se refleja que en ese año Guadalupe y San Nicolás sólo tenían 12,600

y 10,543 personas, esto es, 3.5% y 2.9 % de la población de la naciente metrópoli. En 1950 el AMM la forman el municipio de Monterrey con un crecimiento del 5.9% anual, mientras que Guadalupe lo hace al 11.7%, y San Nicolás de los Garza, que en conjunto tenían una población de 362,435 personas. Entre 1950-1960 se le agrega el municipio de San Pedro Garza García que crece al 11.1%, quedando integrada por cuatro municipios que sumaban 695,504 habitantes en 1960. Es evidente que las elevadas tasas de crecimiento de estos tres últimos se deben a su reducida base poblacional y a la circunstancia obvia de que a medida que se satura la unidad central, el crecimiento de la urbe prosigue naturalmente hacia los municipios contiguos. En 1960, sin embargo, el municipio de Monterrey es con mucho el principal ya que representa 86.4 % de la población del AMM [14].

En la década de los sesenta se le incorporan otros tres municipios: Santa Catarina, Apodaca y General Escobedo. En 1970 los siete municipios metropolitanos tuvieron una población de 1'242,558 habitantes, Monterrey redujo su participación de la población metropolitana al 68.3 % del total, mientras que Guadalupe con 159,930 habitantes absorbe 12.9 %. La tasa de crecimiento anual de Monterrey es 3.8%, que queda muy por debajo del resto de los municipios metropolitanos, pero la mantiene positiva. De 1970 a 1980 el AMM redujo su tasa de crecimiento al 4.6% anual y sólo se le integro Juárez, quedando conformada por ocho municipios aumentando a 2'001,502 de habitantes en 1980. Después el crecimiento de Monterrey disminuyó al 2.2%, mientras que el de los municipios metropolitanos fue notablemente superior.

En la década posterior y ligado a una severa disminución de su actividad industrial patentizada por el cierre definitivo de Fundidora Monterrey en 1986, el AMM redujo su tasa de crecimiento demográfico, con una tasa porcentual promedio de 2.5% anual, la más baja experimentada desde 1910-1921 cuando creció al 1.1% anual, el proceso de expansión del AMM sufrió una considerable desaceleración entre 1980-1990, cuando el municipio central de Monterrey decreció al -0.2%, significando la práctica culminación de su primera etapa de metropolización. En 1990 el AMM alcanzaba una población total de 2'573,527 habitantes y se mantenía constituida por ocho municipios, con la incorporación del Municipio de García que

se encontraba en transición de ser metropolitano tenía 13,100 habitantes en 1990. La agregación de este último municipio se constata en el lustro 1990-1995, al casi duplicar su población y alcanzar una tasa anual de 11.2%. En el primer lustro de los años noventa se conformaba de nueve municipios y en conjunto, elevaron la tasa de crecimiento de la población del 2.5% anual experimentado entre 1980-1990, al 3.0% anual entre 1990-1995. Así, en 1995 el AMM contaba con una población cercana a los 3 millones de habitantes, lo que la hacía ser una de las 100 principales ciudades del mundo, ordenadas según su población total [14]. Con el práctico estancamiento demográfico de su municipio central que crece al 0.3% entre 1990-1995, el AMM inicia una segunda etapa de metropolización en la última década del siglo XX, pero fue en los albores del tercer milenio cuando cristalizó la desconcentración de las actividades económicas hacia los municipios periféricos y se estructuró como una metrópoli “polinuclear”, esto es, con distritos comerciales de primer orden fuera del central. En la última década, la tasa de crecimiento poblacional se mantiene casi igual (2.3%) con lo que la población del AMM en el año 2000 era de 3’243,466 habitantes, incluyendo al municipio de García [12] y [27]. En el 2005 la población del AMM era de 3’598,597 habitantes [24]. Se estima que para el año 2010 el Área Metropolitana de Monterrey albergará 3’931,657 personas y 4’437,945 millones en el 2020 [10]. Para absorber ese crecimiento la superficie metropolitana se expandirá alrededor de 16,000 hectáreas en el primer decenio del siglo XXI, para alcanzar una superficie total de 66,500ha en el 2010 y 82,904ha en el 2020 (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. POBLACIÓN TOTAL DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY SEGÚN MUNICIPIOS 1940-2005^a

MUNICIPIO	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2005
POBLACIÓN	190 100	362 435	695 504	1 242 558	2 001 502	2 573 527	2 988 081	3 243 466	3 598 597
Número de municipios	1	3	4	7	8	9	9	9	9
Monterrey	190 100	339 282	601 085	858 107	1 090 009	1 069 238	1 088 143	1 110 997	1 133 814
Guadalupe		12 610	38 233	159 930	370 908	535 560	618 933	670 162	691 931
San Nicolás de los Garza		10 543	41 243	113 074	280 696	436 603	487 924	496 878	476 761
San Pedro Garza García		5 228	14 943	45 983	81 974	113 040	120 913	125 978	122 009
Santa Catarina		7 377	12 895	36 385	89 488	163 848	202 156	227 026	259 896
Apodaca		4 915	6 259	18 564	37 181	115 913	219 153	283 497	418 784
General Escobedo		2 066	1 824	10 515	37 756	98 147	176 869	233 457	299 364
Juárez		2 839	3 166	5 656	13 490	28 014	50 009	66 497	144 380
García		4 769	4 091	6 477	10 434	13 164	23 981	28 974	51 658

^a La línea escalonada señala los municipios que a partir de 1950 constituyen el Área Metropolitana de Monterrey, conformada por ocho municipios en 1980 y con la incorporación de García en 1990.

FUENTE: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Nuevo León, VII, VIII, IX, X, XI y XII. Censos Generales de Población y Vivienda 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 y 2000; INEGI, *Conteo de Población y Vivienda 1995 y 2005, Resultados Definitivos Tabulados Básicos*. Garza Villarreal, G., (Coord.), *Atlas de Monterrey*, Gobierno del Estado de Nuevo León/Universidad Autónoma de Nuevo León/Instituto de Estudios Urbanos de Nuevo León/El Colegio de México, México, 1995; SEDESOL, CONAPO, INEGI, *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. Primera edición: noviembre de 2004; Níkel, Ruiz y Garza, *El desarrollo urbano de México*, El Colegio de México, México, 1980: cuadro IV-2.

CAPÍTULO 2. EL CICLO HIDROLÓGICO Y SUS COMPONENTES.

2.1 El ciclo hidrológico.

En la Tierra, el agua existe en un espacio llamado hidrosfera, que se extiende desde unos 15Km arriba en la atmósfera hasta un kilómetro por debajo de la litosfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrosfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico [11].

El ciclo hidrológico, se considera el concepto fundamental de la hidrología. De las muchas representaciones que se pueden hacer de él, la más ilustrativa es quizás la descriptiva (Figura 2.1). El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua, su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra sobre la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento, el vapor de agua formado, se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra o el océano en forma de precipitación. Durante su trayecto hacia la superficie de la tierra, el agua precipitada puede volver a evaporarse o ser interceptada por la vegetación o las construcciones, convertirse en flujo superficial sobre el suelo, infiltrarse en él, correr a través del suelo como flujo subsuperficial y descargar en los ríos como escurrimiento superficial. El agua interceptada, una porción de la infiltrada y otra de la que corre por la superficie se evapora nuevamente. De la precipitación que llega a las corrientes, una porción se infiltra, otra llega hasta los océanos u otros grandes cuerpos de agua, como presas y lagos. Del agua infiltrada, una ración es absorbida por las plantas, posteriormente es transpirada casi en su totalidad hacia la atmósfera y otra parte fluye bajo la superficie de la tierra hacia las corrientes, el mar, otros cuerpos de agua, o bien hacia zonas profundas del suelo para ser almacenada como agua subterránea y después brotar en manantiales, ríos o el mar.

El cálculo de la cantidad total de agua en la Tierra y en los numerosos procesos del ciclo hidrológico, ha sido tema de exploración científica desde la segunda mitad del siglo XIX. Sin embargo, la información cuantitativa es escasa, lo cual significa que las cantidades de agua en varios componentes del ciclo hidrológico global todavía no se conocen en forma precisa [11].

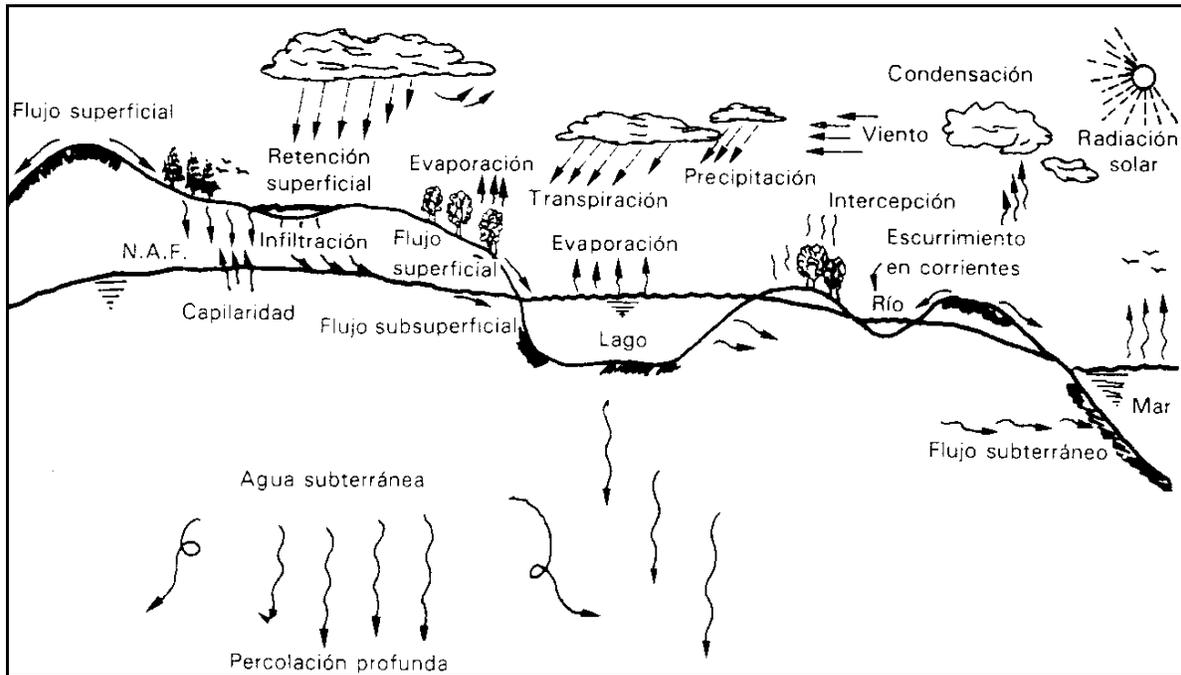


Figura 2.1 Ciclo hidrológico.



Figura 2.2 Cantidades estimadas de agua en el mundo.

Se estima que de las diferentes cantidades de agua que existe en la Tierra (Figura 2.2), cerca del 97% del agua del planeta se encuentra en los océanos. Si la Tierra fuera una esfera uniforme, esta cantidad sería suficiente para cubrirla hasta una profundidad cercana a 2.6Km [11].

Cerca de tres cuartas partes del agua dulce de la Tierra son hielo polar que equivale a 2.33%, el 0.65% es agua subterránea y solo el 0.02% se encuentra en

los sistemas de agua superficial atmosférica. El agua subterránea va desde 200m hasta 600m de profundidad, la mayor parte del agua subterránea por debajo de esta profundidad es salina. El agua dulce es el sistema de agua atmosférica, fuerza motriz de la hidrología del agua superficial, el 0.342% se encuentra en los ríos, 0.198% esta en la humedad del suelo, 0.042% es atmosférica y solo el 0.018% es el agua biológica fijada en los tejidos de los seres vivos.

Si bien el contenido de agua en los sistemas superficiales y atmosféricos es relativamente pequeño, inmensas cantidades de agua pasan a través de ellos. A pesar de que el concepto de ciclo hidrológico es simple, el fenómeno es complejo y difícil. Éste no es solamente un ciclo grande, sino que está compuesto de muchos ciclos interrelacionados de extensión continental, regional y local. Aunque el volumen total de agua en el ciclo hidrológico global permanece esencialmente constante, la distribución de esta agua está cambiando continuamente en continentes, regiones y cuencas locales de drenaje.

En menos de 1.3% de la superficie del planeta, México tiene representados casi todos los climas y tipos de ecosistemas del mundo. El uso inadecuado del agua y la transformación de los ecosistemas naturales, amenaza la existencia de las especies biológicas, el desarrollo económico y social del país. Como se muestra en la Figura 2.3, de los 1511 Km³ de agua de precipitación total en el país, la disponibilidad natural media total es 476 Km³; sin embargo, el agua que se precipita, escurre y almacena no está distribuida físicamente de manera homogénea en el territorio nacional, ni en las distintas épocas del año. En el norte y en algunas áreas del centro del país (40% del territorio nacional), donde la precipitación es escasa y sujeta a sequías recurrentes, se encuentran las zonas árida y semiárida, en las planicies costeras y sierras del Pacífico, centro del golfo de México y noroeste de Yucatán, donde la precipitación es mediana, se presentan los climas subhúmedos, que comprenden 17% del territorio; el 11% del territorio es representado por las zonas húmedas que se encuentran en las partes bajas donde se inicia el ascenso a las sierras hasta los 900m de altitud y se deposita la humedad del golfo de México, así como en una pequeña porción en la vertiente del Pacífico en Chiapas, al extremo sur del país (Soconusco); el 22% del territorio lo

representan las partes más altas de las sierras, con humedades considerables y temperaturas bajas; el resto lo ocupan la vegetación acuática y subacuática y otras asociaciones vegetales. El agua que se precipita, desde su contacto con la superficie terrestre hasta su llegada al mar, su acumulación en acuíferos o su almacenamiento en lagos y presas, va formando los diferentes ecosistemas cuya composición y estructura dependerán de las características propias del cuerpo de agua de que se trate y de la región ecogeográfica en la que se encuentre. México cuenta con 11122Km de litoral, 15000 Km² de lagunas costeras y 29000 Km² de cuerpos de agua interiores que forman una gran variedad de ecosistemas acuáticos [5] y [3].

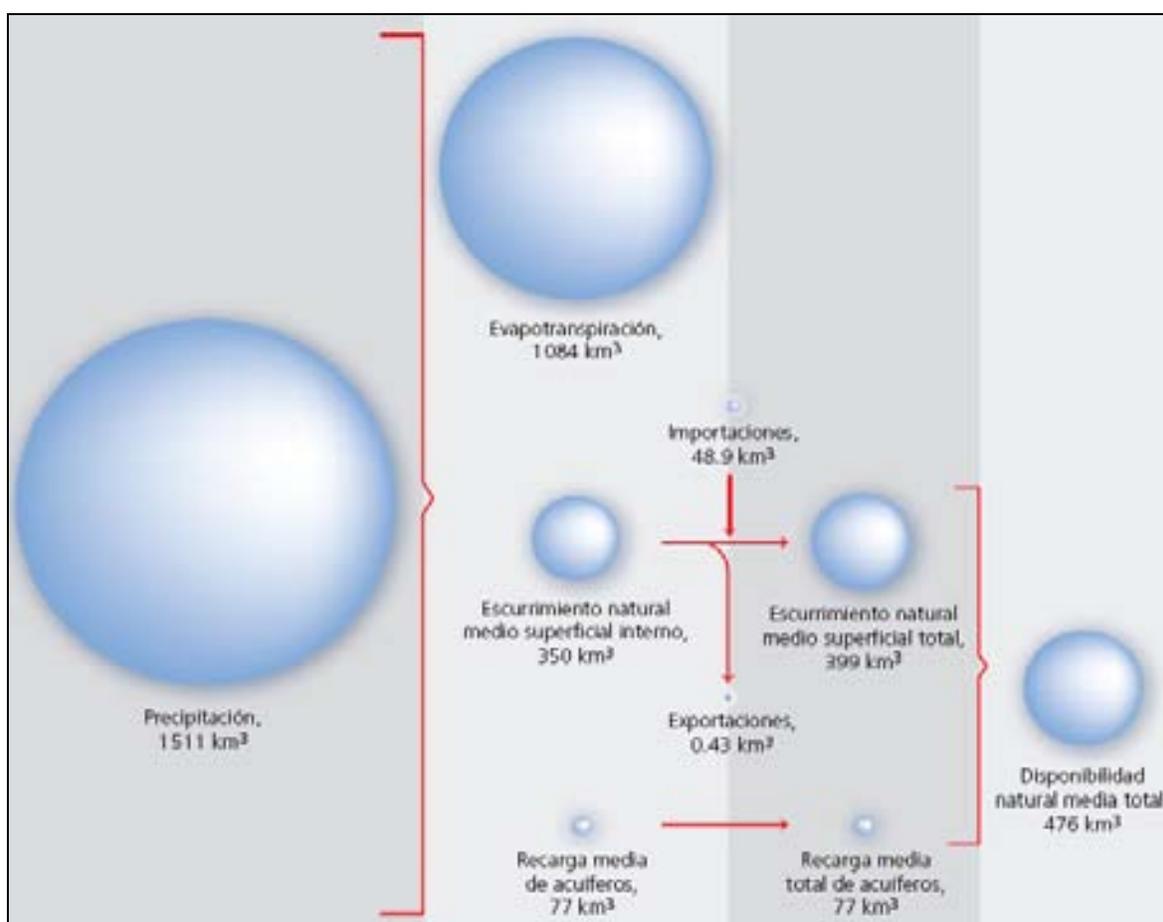


Figura 2.3 Componentes del ciclo hidrológico mexicano (valores medios anuales).

Fuente: Carabias, J. Agua, medio ambiente y sociedad hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. 2005

La hidrología de una región está determinada por sus patrones de clima tales como la topografía, geología y vegetación. Además, a medida que la civilización progresa, las actividades humanas invaden gradualmente el medio ambiente

natural del agua, alterando el equilibrio dinámico del ciclo hidrológico e iniciando nuevos procesos y eventos. Por ejemplo, hay teorías que afirman que debido a la quema de combustibles fósiles, la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se está incrementando. Esto puede llevar al calentamiento de la Tierra y tener efectos de largo alcance sobre la hidrología global [11].

2.1.1 Precipitación.

La formación de precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera. Los tres mecanismos principales para la elevación de masas de aire son la *elevación frontal*, donde el aire caliente es elevado sobre aire frío por un pasaje frontal; la *elevación orográfica*, mediante la cual una masa de aire se eleva para pasar por encima de una cadena montañosa; y la *elevación convectiva*, donde el aire se arrastra hacia arriba por una acción convectiva, como ocurre en el centro de una celda de una tormenta eléctrica. Las celdas convectivas se originan por el calor superficial, el cual causa una inestabilidad vertical de aire húmedo, y se sostienen por el calor latente de vaporización liberado a medida que el vapor del agua sube y se condensa [11]. El agua que se evapora de la tierra es temporalmente almacenada como vapor de agua en la atmósfera, este vapor y pequeñas gotas de agua forman las nubes.

Cuando la masa de agua en la atmósfera se satura, de tal manera que se enfría y parte de su humedad se condensa, el agua regresa a la tierra en forma de precipitación (lluvia, nieve, aguanieve o granizo). Una parte de la lluvia podría evaporarse antes de llegar al suelo. La precipitación que llega al suelo puede evaporarse en algún lugar, por ejemplo superficies con o sin cubierta vegetal, estanques, lagos, arroyos, ríos, etc.

2.1.1.1 Precipitación promedio sobre un área.

El *método de la media aritmética* es el más simple para determinar la precipitación promedio sobre un área. Se promedian las alturas de precipitación que se registran en un número dado de pluviómetros [11].

En muchos tipos de problemas hidrológicos es necesario determinar la precipitación promedio sobre un área específica, para una precipitación específica o

para un período de tiempo dado (por ejemplo anualmente). El método más simple de obtener la precipitación promedio es hacer un promedio aritmético de las cantidades medidas en el área. Éste método es satisfactorio en áreas planas si los pluviómetros se distribuyen uniformemente sobre el área y sus mediciones individuales no varían de manera considerable de la media.

Si se tiene en cuenta que algunos de los pluviómetros son más representativos del área en cuestión que otros, pueden asignárseles pesos relativos para el cálculo del promedio del área. El *método de Thiessen* establece que en cualquier punto de la cuenca la precipitación es igual a la que se registra en el pluviómetro más cercano; luego la altura de la precipitación registrada en un pluviómetro dado se aplica hasta la mitad de la distancia a la siguiente estación pluviométrica en cualquier dirección. Los pesos relativos de cada pluviómetro se determinan de las correspondientes áreas de aplicación en una red de *polígonos de Thiessen*, cuyas fronteras están formadas por los bisectores perpendiculares a las líneas que unen pluviómetros adyacentes (Figura 2.4) [11].

El *método de Thiessen* trata de tener en cuenta la no uniformidad en la distribución de los pluviómetros mediante un factor de ponderación para cada uno de ellos. Las estaciones se colocan en un mapa y se dibujan líneas que las conecten unas con otras. Las mediatrices, o perpendiculares bisectrices de estas líneas, forman polígonos alrededor de cada estación. Los lados de cada polígono son los límites del área efectiva que se considera para cada estación. El área de cada polígono se expresa como un porcentaje del área total. El promedio ponderado de precipitaciones para el área total se calcula multiplicando la precipitación en cada estación por su porcentaje de áreas asignado y sumando estos valores parciales. Los resultados son comúnmente más exactos que aquellos obtenidos por un simple promedio aritmético. La mayor limitación del método de Thiessen es su poca flexibilidad, puesto que se requiere un nuevo diagrama cada vez que hay un cambio en la red. El método de Thiessen no considera directamente las influencias de la orografía en la precipitación [29].

El método más exacto para promediar la precipitación sobre un área es el *método de las isoyetas*. La localización de las estaciones y las cantidades de

precipitación se grafican en un mapa (Figura 2.4) adecuado y sobre éste se dibujan las líneas de igual precipitación (*isoyetas*). La precipitación promedio para el área se calcula ponderando la precipitación entre isoyetas sucesivas (por lo general tomando el promedio de dos valores de las isoyetas) por el área de las isoyetas, totalizando estos productos y dividiendo por el área total. El método de las isoyetas permite el uso y la interpretación de toda la información disponible y se adapta muy bien para discusión. En la construcción de un mapa de isoyetas, el analista puede utilizar todo su conocimiento sobre los posibles efectos orográficos y la morfología de la tormenta; en este caso el mapa final debe representar un patrón mucho más real de la precipitación que aquel que se puede obtener utilizando únicamente las cantidades medidas. La exactitud del método de las isoyetas depende en gran parte de la habilidad del analista. Si se utiliza una interpolación lineal entre estaciones, el resultado será esencialmente el mismo que se obtiene utilizando el método de Thiessen. Además, un análisis inadecuado puede conducir a errores considerables [29].

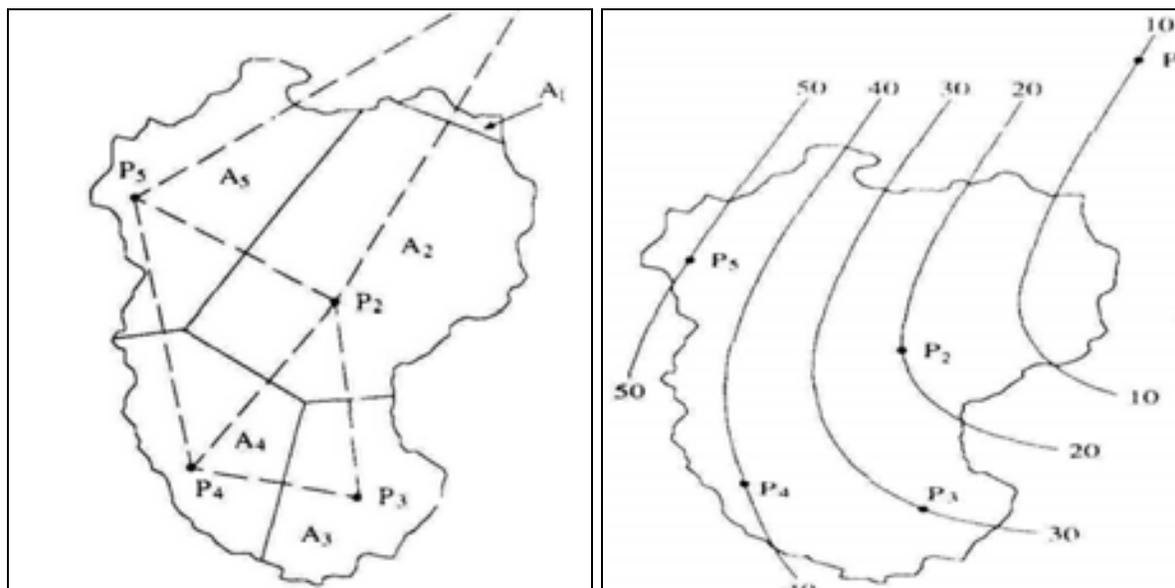


Figura 2.4 Cálculo de la lluvia promedio sobre un área por el método de Thiessen y por el método de las isoyetas.

2.1.2 Evaporación y Transpiración.

La evaporación se produce básicamente por el aumento de energía cinética que experimentan las moléculas de agua, cercanas a la superficie de un suelo

húmedo o a una masa de agua. Los dos factores principales que influyen en la evaporación desde una superficie abierta de agua son el suministro de energía para proveer el calor latente de vaporización, y la habilidad para transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación. La radiación solar es la principal fuente de energía, el aumento de ésta energía provoca el desprendimiento de moléculas de agua de la superficie libre de un almacenamiento, debido a la excitación que les produce la energía solar, algunas moléculas de agua “saltan” de manera continua a la atmósfera, al mismo tiempo, algunas de las moléculas que ya se encuentran en la atmósfera se condensan y regresan al cuerpo de agua. La habilidad del transporte de vapor fuera de la superficie de evaporación depende de la velocidad del viento sobre la superficie y las diferencias en presión de vapor [11]. Indubitablemente, lo que interesa en la ingeniería hidrológica es la cantidad de agua que se pierde por evaporación, la cual puede calcularse con las ecuaciones siguientes:

a) Método del Balance de Energía (2.1)

$$E_r = 0.0353R_n \text{ (mm/día)} \quad (2.1)$$

Donde:

$$R_n = \text{radiación neta (W/m}^2\text{)}$$

b) Método aerodinámico (2.2).

$$E_a = B(e_{as} - e_a)(\text{mm/día}) \quad (2.2)$$

Donde:

$$B = \frac{0.102u_2}{\left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) \right]^2} \text{ (mm/día)(Pa)}$$

u_2 = velocidad del viento (m/s) medida a una altura z_2 (cm)

z_0 = tabla 2.8.2 (Chow et al, 1988).

$$e_{as} = 611 \exp\left(\frac{17.27T}{237.3 + T}\right) \text{ (Pa)}$$

T = temperatura de aire (°C)

$$e_a = R_h e_{as} \text{ (Pa)}$$

En donde: R_h es la humedad relativa ($0 \leq R_h \leq 1$)

c) Método de combinación (2.3).

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad \left(\frac{\text{mm}}{\text{día}} \right) \quad (2.3)$$

Donde:

$$\gamma = 66.8 \left(\frac{\text{Pa}}{^\circ\text{C}} \right)$$

$$\Delta = \frac{4.098 e_{as}}{(237.3 + T)^2} \left(\frac{\text{Pa}}{^\circ\text{C}} \right)$$

d) Método de Priestley-Taylor (2.4).

$$E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r \quad (2.4)$$

$$\alpha = 1.3$$

* Los valores mostrados son validos para presión atmosférica estándar y temperatura del aire de 20°C.

El método de combinación es el más preciso para el cálculo de la evaporación, utilizando información meteorológica cuando toda la información requerida se encuentra disponible y todas las suposiciones se satisfacen. Las principales suposiciones del balance de energía son que prevalezca un flujo de energía de estado permanente y que los cambios en el almacenamiento de calor en el tiempo en el cuerpo de agua no sean significativos. Estas suposiciones limitan la aplicación del método a intervalos de tiempo diarios o mayores, y a situaciones que no involucren grandes capacidades de almacenamiento de calor, como las que posee un lago grande. La principal suposición del método aerodinámico está asociada con la forma del coeficiente de transferencia de vapor B en la ecuación (2.2). Se han propuesto muchas formas empíricas de B, ajustadas localmente con información de viento y otras observaciones meteorológicas [11].

El método de combinación es apropiado para aplicarse a áreas pequeñas con información climatológica detallada. La información requerida incluye la radiación neta, la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del viento y la presión del aire. Cuando parte de esta información no está disponible, deben utilizarse las ecuaciones de evaporación más simples que requieren menos variables. En el caso de la evaporación sobre áreas grandes, las consideraciones de balance de energía dominan la tasa de evaporación, y puede calcularse con la ecuación de evaporación de Priestley-Taylor [11].

La evaporación desde la superficie terrestre comprende la *evaporación directa* desde la superficie del suelo y desde la superficie de la vegetación, y la *transpiración* a través de las hojas de las plantas, mediante la cual el agua es extraída por las raíces de éstas, transportada hacia arriba a lo largo de sus tallos que toman una pequeña parte para su crecimiento y difundida a la atmósfera a través de pequeñas aberturas en las hojas llamadas estomas [11].

Se produce evaporación desde:

- La superficie del suelo y la vegetación inmediatamente después de la precipitación.
- Desde las superficies de agua (ríos, lagos, embalses).
- Desde el suelo, agua infiltrada que se evapora desde la parte más superficial del suelo.

Puede tratarse de agua recién infiltrada o, en áreas de descarga, de agua que se acerca de nuevo a la superficie después de un largo recorrido en el subsuelo.

2.1.3 Evapotranspiración.

Las plantas requieren del agua como elemento fundamental para realizar sus funciones básicas, la mayor parte del agua que absorben las plantas es transpirada a la atmósfera como vapor. No obstante en la práctica, es difícil realizar su cuantificación sin tomar en cuenta la evaporación del suelo, por ello los métodos desarrollados generalmente cuantifican la “evapotranspiración”.

Los procesos de evaporación desde la superficie terrestre y de transpiración de la vegetación se conocen con el nombre de evapotranspiración (ET). La

evapotranspiración es influida por los dos factores descritos anteriormente, para la evaporación desde una superficie abierta de agua, y también por un tercer factor, el suministro de humedad hacia la superficie de evaporación. A medida que el suelo se seca, la tasa de evapotranspiración cae por debajo del nivel que generalmente mantiene en un suelo bien humedecido.

Los cálculos de las tasas de evapotranspiración se efectúan utilizando los mismos métodos descritos para la evaporación en superficies de agua abierta, con ajustes que tienen en cuenta las condiciones de vegetación y de suelo. Para unas condiciones climáticas dadas, la tasa básica es el *cultivo referencia para la evapotranspiración*, que es “la tasa de evapotranspiración desde una superficie extensa cubierta por pasto verde de altura uniforme entre 8cm y 15cm que crece en forma normal, cubre completamente el suelo con su sombra y no carece de agua” [11].

Para el hidrólogo el interés de la ET se centra en la cuantificación de los recursos hídricos de una zona: Lo que llueve menos lo que se evapotranspira será el volumen de agua disponible. La ET se estudia principalmente en el campo de las ciencias agronómicas, la cual se considera pensando en las necesidades hídricas de los cultivos para su correcto desarrollo. Fórmulas y métodos que se utilizan en Hidrología provienen de ese campo de investigación.

Al realizar el balance hídrico de una cuenca, es frecuente disponer de datos de precipitaciones y de escurrimientos, a la diferencia de ambos se le denomina “déficit de escurrimiento”.

$$D_{esc} = Prec - Esc_{total} \quad (2.5)$$

Donde:

D_{esc} = Déficit de escurrimiento en mm.

Prec = Precipitación en mm.

Esc_{total} = Escurrimiento Total en mm.

El uso consuntivo es la cantidad de agua que un cultivo pierde por los efectos de evaporación de agua del suelo, de transpiración de las plantas y el agua que las plantas retienen para su nutrición o para su desarrollo normal, esta última

cantidad es pequeña (cerca del 1%) en comparación con la evapotranspiración; su unidad de medida es el mm, equivalente a $1\text{mm} = 10\text{ m}^3/\text{ha}$.

2.1.3.1 Zonas de humedad en un suelo

Lo que se encuentra por encima de la superficie freática se denomina zona de aireación o zona vadosa. La humedad en ella puede estar distribuida de un modo irregular, pero esquemáticamente se pueden distinguir tres subzonas (Figura 2.5).

1. *Subzona de Evapotranspiración*. Es la afectada por este fenómeno. Puede tener desde unos pocos centímetros, si no existe vegetación, hasta varios metros.
2. *Subzona capilar*, sobre la superficie freática. El agua ha ascendido por capilaridad, su espesor es muy variable, depende de la granulometría de los materiales.
3. *Subzona intermedia*, se encuentra entre las dos anteriores. A veces inexistente, en ocasiones de muchos metros de espesor.

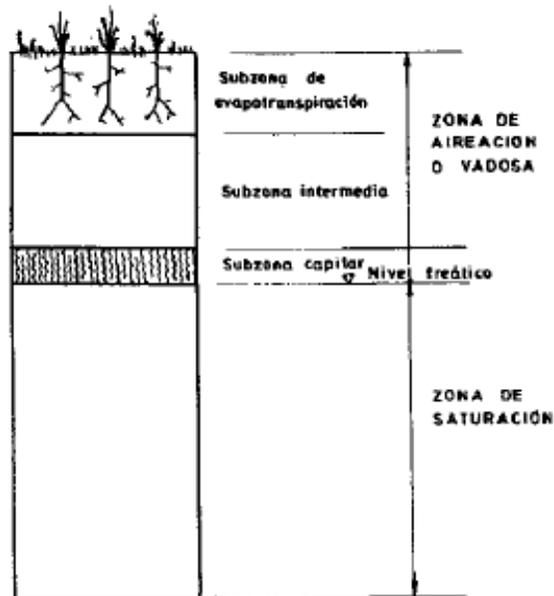


Figura 2.5 Zonas de humedad en el suelo.

En toda la zona vadosa puede haber agua que aún no ha descendido o contener agua por capilaridad. En la subzona capilar, la humedad forma una banda continua, mientras que en el resto estará irregularmente repartida.

2.1.3.2 Evapotranspiración potencial y Evapotranspiración real.

La evapotranspiración potencial (ETP) es el límite superior de la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera, de manera que para estimar la evapotranspiración real (ETR) debe tomarse en cuenta la cantidad de agua que efectivamente existe en la zona para evapotranspirarse. Para una cuenca cualquiera la ecuación de balance hídrico para un intervalo determinado, será igual a:

$$P = ETR + Q + \Delta R \quad (2.6)$$

Donde:

P = Precipitación en mm.

ETR = Evapotranspiración real, en mm. (ETR < ETP.)

Q = Excedentes de agua, escurrimientos e infiltraciones, en mm.

ΔR = Incremento o decremento en la reserva de agua utilizable por la vegetación, en mm.

Si se considera que las reservas de agua al comienzo y al final del periodo considerado es igual o despreciable en comparación con los valores de P y Q (intervalo de gran duración, por ejemplo, un año), se tiene que:

$$ETR = P - Q \quad (2.7)$$

Al realizar el balance hídrico de una cuenca, es frecuente disponer de datos de precipitaciones y de escurrimientos, la diferencia de ambos es la ETR también se le conoce como Déficit de escurrimiento (D) y su interés práctico reside en que su valor medio anual varía relativamente poco, si se consideran cuencas extensas fuera de las zonas montañosas [2].

Es evidente que $ETR \leq ETP$. En un lugar desértico la ETP puede ser de 6 mm/día y la ETR de 0, puesto que no hay agua para evapotranspirar. Serán iguales siempre que la humedad del suelo sea óptima y que exista un buen desarrollo vegetal. Esto sucede en un campo de cultivo bien regado o en un área con vegetación natural en un periodo de suficientes precipitaciones [32].

2.1.3.3 Cálculo de la Evapotranspiración

Numerosas fórmulas permiten evaluar la ETP con una aproximación adecuada para muchos estudios hidrológicos. Normalmente con estas fórmulas se calcula la ETP mes a mes para datos medios de una serie de años [32].

La escasez de datos meteorológicos y de las medidas necesarias para aplicar métodos racionales, han conducido al empleo de criterios que intentan cuantificar la evapotranspiración (generalmente potencial) apoyándose en información climatológica fácilmente obtenible [2].

Los diversos métodos empíricos pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos:

1. Métodos basados únicamente en la temperatura media del aire, entre ellos se tienen los siguientes:
 - a) Método de Lowry-Johnson.
 - b) Método de Thornthwaite.
 - c) Método de Blaney-Criddle.
2. Métodos basados en combinaciones de temperatura y radiación incidente, entre los cuales se encuentran:
 - a) Método de Jensen-Haise.
 - b) Método de Makkink.
 - c) Método de Turc.
 - d) Grassi.
3. Métodos basados en combinaciones de temperatura y presión de vapor (humedad relativa), entre los cuales se pueden englobar los siguientes:
 - a) Método de Hamon.
 - b) Método de Papadakis.
 - c) Método de Blaney-Morin.
 - d) Método de Hargreaves.

4. Método basado en los datos o mediciones del evaporímetro clase A.

Para una estimación de la ETR anual cuando solamente se dispone de datos de precipitación y temperatura, se utilizan las fórmulas de Turc (distinta de la citada arriba) obtenidas correlacionando datos de numerosas cuencas de todo el mundo.

2.1.3.4 Cálculo de la ETR anual: Fórmulas de Turc y Coutagne.

Se trata de fórmulas establecidas empíricamente comparando las precipitaciones y el escurrimiento total de numerosas cuencas [2] y [32].

Fórmula de Turc:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (2.8)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año

P = Precipitación en mm/año

$L = 300 + 25 t + 0.05t^3$

t = Temperatura media anual en °C

Fórmula de Coutagne:

$$ETR = P - X P^2 \quad (2.9)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en metros/año

P = Precipitación en metros/año

$$X = \frac{1}{0.8 + 0.14 t}$$

t = Temperatura media anual en °C

La fórmula solo es válida para valores de P (en metros/año) comprendidos entre

$$\frac{1}{8X} \text{ y } \frac{1}{2X}$$

2.1.4 Agua subsuperficial.

El agua subsuperficial fluye por debajo de la superficie terrestre. A continuación se describen los procesos de flujo subsuperficial pertinentes para la hidrología de agua superficial.

2.1.4.1 Flujo no saturado.

En la Figura 2.6 se muestran en forma esquemática los procesos de flujo subsuperficial y las zonas en donde ocurren. Tres procesos importantes son *la infiltración* de agua superficial en el suelo para convertirse en *humedad del suelo*, el *flujo subsuperficial* o *flujo no saturado* a través del suelo, y el *flujo de agua subterránea* o *flujo saturado* a través de los estratos de suelo o roca. Los estratos de suelo o roca que permiten el flujo de agua se denominan *medios porosos*.

El flujo es no saturado cuando el medio poroso todavía tiene algunos de sus vacíos ocupados por aire y es saturado cuando los vacíos están llenos de agua. El *nivel freático* es la superficie donde el agua se encuentra a presión atmosférica en un medio saturado. Por debajo del nivel freático, el medio poroso se encuentra saturado y a presiones superiores a la atmosférica. Por encima del nivel freático, las fuerzas capilares pueden saturar el medio poroso a lo largo de una corta distancia en la franja capilar, por encima de la cual el medio poroso se encuentra usualmente no saturado excepto después de una lluvia, cuando la infiltración desde la superficie del terreno puede producir temporalmente condiciones de saturación. Las salidas de agua subsuperficial y agua subterránea ocurren cuando el agua subsuperficial emerge para convertirse en flujo superficial en una corriente o manantial. La humedad del suelo se extrae por evapotranspiración a medida que el suelo se seca [11].

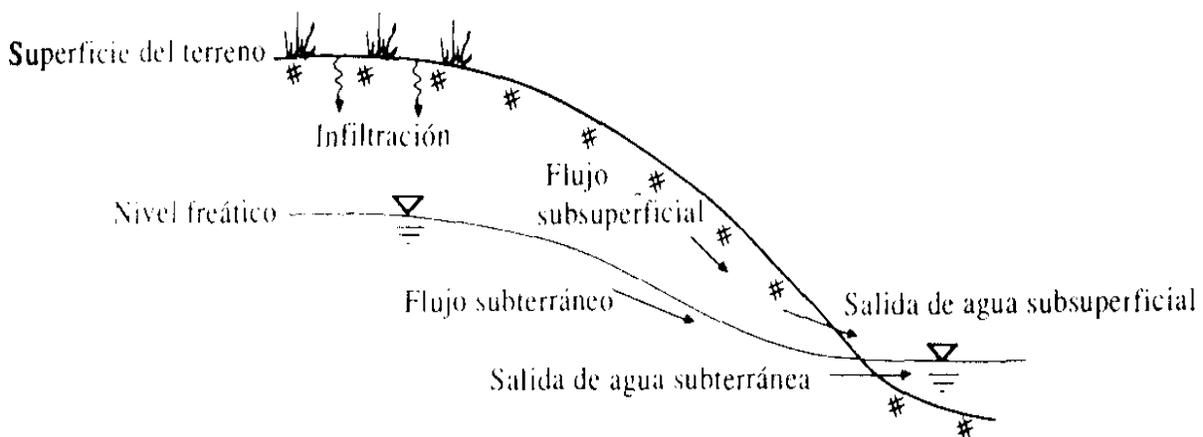


FIGURA 2.6 Zonas y procesos del agua subsuperficial.

2.1.5 Infiltración.

La infiltración se define como el movimiento del agua que penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares [11]. Existen muchos factores que influyen en la capacidad de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo, textura del suelo, cubierta vegetal, lavado de material fino, las propiedades del suelo, tales como la porosidad, compactación, temperatura, sus cambios, diferencias, la conductividad hidráulica, el contenido de humedad inicial, el contenido de humedad de saturación, el aire atrapado. Estratos de suelos con propiedades físicas diferentes pueden superponerse unos sobre otros formando *horizontes*; por ejemplo, un suelo limoso con una conductividad hidráulica relativamente alta puede estar superpuesto sobre una zona de arcilla de baja conductividad. Los suelos también presentan una gran variabilidad espacial aun dentro de pequeñas áreas, como en un sembrado. Como resultado de estas grandes variaciones espaciales y de las variaciones temporales de las propiedades del suelo que ocurren a medida que cambia el contenido de humedad de éste, la infiltración es un proceso muy complejo que puede describirse mediante ecuaciones matemáticas solamente en forma aproximada.

La distribución de humedad dentro del perfil de suelo durante el movimiento hacia abajo del agua se ilustra en la Figura 2.7. Existen cuatro zonas de humedad:

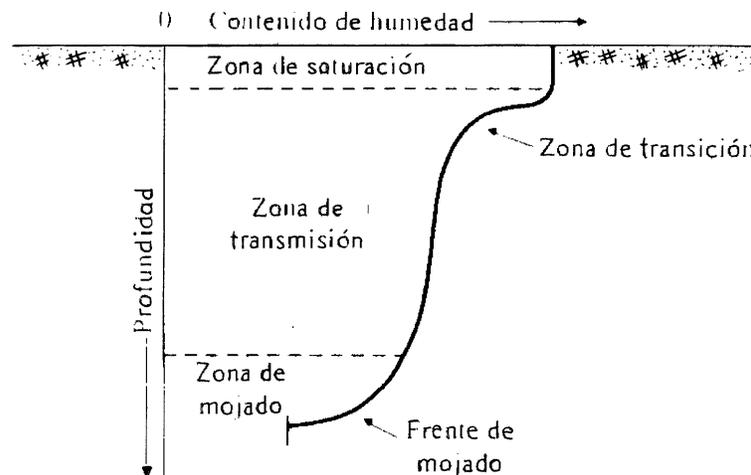


FIGURA 2.7 Zonas de humedad durante la infiltración.

- Zona saturada cerca de la superficie.
- Zona de transmisión de flujo no saturado y contenido de humedad aproximadamente uniforme.
- Zona de mojado en la cual la humedad decrece con la profundidad.
- Frente de mojado en el cual el cambio de contenido de la humedad con la profundidad es tan grande que da la apariencia de una discontinuidad aguda entre el suelo mojado arriba y el suelo seco debajo. Dependiendo de la cantidad de infiltración y de las propiedades físicas del suelo, el frente de mojado puede penetrar en el suelo desde unos pocos centímetros hasta varios metros [11].

La *tasa infiltración*, se expresa en centímetros por hora, es la tasa a la cual el agua entra al suelo en la superficie. Si el agua se encharca en la superficie, la infiltración ocurre a la *tasa de infiltración potencial*. Si la tasa de suministro de agua en la superficie, por ejemplo por lluvia, es menor que la tasa de infiltración potencial, entonces la tasa de infiltración real también será menor que la tasa potencial. La mayor parte de las ecuaciones de infiltración describen la tasa potencial.

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre genérico de *pérdidas*. En general, las pérdidas están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración. Además de que en la práctica es difícil separar estos cuatro componentes, la porción más considerable de las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas conjuntamente bajo este nombre.

La infiltración juega un papel de primer orden en la relación lluvia-escorrimento, por consiguiente, en los problemas de diseño y predicción asociados a la dimensión y operación de obras hidráulicas. El volumen de infiltración es varias veces mayor que el de escurrimento durante una tormenta dada, especialmente en cuencas con un grado de urbanización relativamente bajo. No obstante, la

infiltración recibe poca atención por parte de los ingenieros proyectistas, quizá por la falta de herramientas adecuadas para su tratamiento.

2.1.5.1 Descripción del proceso de infiltración.

El proceso de infiltración puede describirse de la siguiente manera:

Si se considera un área de suelo suficientemente pequeña, de modo que sus características (tipo de suelo, cobertura vegetal, condición de la superficie del suelo, textura del suelo, lavado de material fino, propiedades del suelo tales como: la porosidad, compactación, temperatura, sus cambios, diferencias, la conductividad hidráulica, el contenido de humedad inicial, el contenido de humedad de saturación, el aire atrapado, etc.), así como la intensidad de la lluvia en el espacio puedan considerarse uniformes, aunque la última cambie en el tiempo.

Suponiendo que al inicio de una tormenta, el suelo está de tal manera seco que la cantidad de agua que puede absorber en la unidad de tiempo (su *capacidad de infiltración*) es mayor que la intensidad de la lluvia en esos primeros instantes de la tormenta. Bajo estas condiciones, se infiltraría toda la lluvia, es decir:

$$\text{Si} \quad i < f_p \quad \Rightarrow \quad f = i \quad (2.10)$$

donde:

f = infiltración, expresada como lámina/unidad de tiempo, por ejemplo, mm/h.

f_p = capacidad de infiltración, mm/h.

i = intensidad de la lluvia.

En esta parte del proceso las fuerzas producidas por la capilaridad predominan sobre las gravitatorias. Conforme pasa el tiempo, si la lluvia es *suficientemente intensa*, el contenido humedad del suelo aumenta hasta que su superficie alcanza la saturación, en ese momento se empiezan a llenar las depresiones del terreno, se forman *charcos* y se comienza a producir flujo sobre la superficie. A este instante se le llama *tiempo de encharcamiento* y se denota como t_p . Después del tiempo de encharcamiento, si la lluvia sigue siendo intensa, las fuerzas capilares pierden importancia frente a las gravitatorias, pues el contenido de humedad del suelo crece y la capacidad de infiltración disminuye con el tiempo.

Además, bajo estas condiciones, la infiltración se hace independiente de la variación en el tiempo de la intensidad de la lluvia, en tanto que ésta sea mayor que la capacidad de transmisión del suelo, de manera que:

$$\text{Si } i > f_p \quad t > t_p, \quad \Rightarrow \quad f = f_p \quad (2.11)$$

Donde f_p decrece con el tiempo. Nótese que las dos primeras desigualdades anteriores son interdependientes.

Bajo las condiciones anteriores, la capa saturada (que en el tiempo de encharcamiento era muy delgada y estaba situada en la superficie del suelo) se ensancha a medida que su límite inferior, denominado *frente húmedo*, baja. Entonces, dado que cada vez una mayor parte del suelo está saturada, las fuerzas capilares pierden importancia gradualmente hasta que llega un momento, teóricamente en $t = \infty$, donde al estar todo el medio saturado, el movimiento del agua se produce sólo por la acción de la gravedad y la capacidad de infiltración se hace constante.

La descripción anterior es, de rigor, válida solamente para una columna de suelo homogénea donde el nivel freático esté muy profundo; sin embargo, se verifica con una precisión aceptable en la mayoría de los casos prácticos. Si después del tiempo de encharcamiento la tormenta entra en un periodo de calma, es decir, su intensidad disminuye hasta hacerse menor que la capacidad de infiltración, el tirante de agua existente sobre la superficie del suelo, de haberlo, disminuye hasta desaparecer y el agua contenida en los charcos también se infiltra y en menor grado se evapora. Cuando ya no existe agua sobre la superficie del terreno, el contenido de humedad de las capas de suelo cercanas al frente húmedo se difunde, haciendo que dicho frente avance hacia arriba hasta que la superficie deja de estar saturada. Después, la lluvia puede volver a intensificarse y alcanzar otro tiempo de encharcamiento repitiéndose todo el ciclo descrito [1].

2.1.5.2 Métodos empíricos.

Cuando se tienen mediciones simultáneas de lluvia y volumen de escurrimiento en una cuenca, las pérdidas se pueden calcular, de acuerdo con su definición, como:

$$V_p = V_{ll} - V_{ed} \quad (2.12)$$

Donde:

V_p = volumen de pérdidas.

V_{ll} = volumen de lluvia.

V_{ed} = volumen de escurrimiento directo.

Si ambos miembros de la ecuación se dividen entre el área de la cuenca se obtiene:

$$F = I - R \quad (2.13)$$

Donde:

F = infiltración o lámina de pérdidas acumulada.

I = altura de lluvia acumulada.

R = escurrimiento directo acumulado.

y si a su vez la ecuación anterior se deriva con respecto al tiempo se tiene:

$$f = i - r \quad (2.14)$$

Donde: r es la lámina de escurrimiento directo por unidad de tiempo.

Para la aplicación de los métodos que simulan la relación lluvia-escurrimiento es necesario conocer la variación en el tiempo de r . Para ello se usan comúnmente dos tipos de criterios en cuencas aforadas: el de la capacidad de infiltración media y el del coeficiente de escurrimiento [1].

2.1.5.3 Criterio de la capacidad de infiltración media.

Este criterio supone que la capacidad de infiltración es constante durante toda la tormenta. A esta capacidad de infiltración se le llama índice de infiltración media Φ . Cuando se tiene un registro simultáneo de precipitación y escurrimiento de una tormenta, el índice de infiltración media se calcula de la siguiente manera:

a) Del hidrograma de la avenida se separa el gasto base y se calcula el volumen de escurrimiento directo.

b) Se calcula la altura de lluvia en exceso o efectiva hp_e como el volumen de escurrimiento directo dividido entre el área de la cuenca:

$$hp_e = \frac{V_{ed}}{A_c} \quad (2.15)$$

c) Se calcula el índice de infiltración media Φ trazando una línea horizontal en el hietograma de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de precipitación que queden arriba de esa línea sea igual a hp_e . El índice de infiltración media Φ será entonces igual a la altura de precipitación correspondiente a la línea horizontal dividida entre el intervalo de tiempo Δt que dure cada barra del hietograma [1].

2.1.5.4 Criterio del coeficiente de escurrimiento.

Con este criterio se supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de la lluvia, esto es:

$$f = (1 - C_e) i, \quad \text{es decir,} \quad r = C_e i \quad (2.16)$$

Donde: la constante de proporcionalidad C_e , sin unidades, se denomina *coeficiente de escurrimiento*. Otra manera de escribir la ecuación anterior es:

$$V_{ed} = C_e V_{ll} \quad (2.17)$$

2.1.6 Agua superficial.

El agua superficial es la que se almacena o se encuentra fluyendo sobre la superficie de la tierra. El sistema de agua superficial interactúa continuamente con los sistemas de agua atmosférica y subsuperficial descritos en los capítulos anteriores. Este capítulo describe las leyes que gobiernan el flujo de agua superficial y muestra como la información hidrológica se analiza para suministrar datos de entrada a los modelos de lujo superficial [11].

2.1.6.1 Fuentes de flujo superficial.

Una cuenca es el área de terreno que drena hacia una corriente en un lugar dado. Para describir cómo varían los diferentes procesos de agua superficial dentro de una tormenta a través del tiempo, se supone que una precipitación de intensidad constante empieza y continúa indefinidamente en la cuenca. La precipitación contribuye a varios procesos de almacenamiento y flujo tal como se ilustra en la (Figura 2.9).

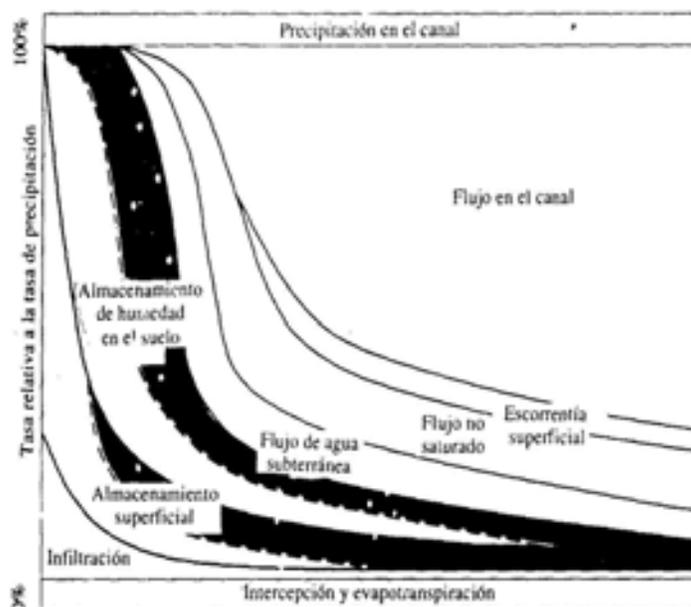


FIGURA 2.9 Ilustración esquemática de la distribución de la precipitación en una cuenca durante una tormenta.

El eje vertical de este diagrama representa, en relación con la tasa de precipitación, la tasa a la cual el agua, en cada uno de los procesos mostrados y en cada instante fluye o se adiciona al almacenamiento [11].

Inicialmente, una porción grande de la precipitación contribuye al *almacenamiento superficial*; a medida que el agua se infiltra en el suelo, también hay *almacenamiento del agua en el suelo*. Existen dos tipos de almacenamiento: *retención* y *detención*. La retención es un almacenamiento que se sostiene por un largo periodo y después se agota por la evaporación, y la detención es un almacenamiento de corto plazo que se agota por el flujo hacia afuera del lugar de almacenamiento [11].

A medida que los almacenamientos de detención se empiezan a llenar, se presenta flujo hacia fuera de ellos: *flujo no saturado* a través del suelo no saturado cerca de la superficie terrestre, *flujo de aguas subterráneas* a través de los acuíferos saturados más profundos y *escurrimiento superficial* a través de la superficie terrestre. El *flujo en canales* es la forma principal de flujo de agua superficial y todos los otros procesos de flujo superficial contribuyen a él. Una de las tareas centrales de la hidrología de agua superficial es determinar las tasas de flujo en canales. La precipitación que se convierte en caudal puede llegar al canal mediante la escurrimiento superficial, el flujo subsuperficial o ambos [11].

2.1.6.2 Flujo superficial hortoniano

Horton describió el flujo superficial de la siguiente manera: “Despreciando la interceptación por vegetación, el escurrimiento superficial es aquella parte de la lluvia que no es absorbida por el suelo mediante infiltración. Si el suelo tiene una capacidad de infiltración f que se expresa en pulgadas absorbidas por hora, entonces cuando la intensidad de la lluvia i es menor que f , la lluvia es absorbida completamente y no existe escurrimiento superficial. Se puede decir como una primera aproximación que si i es mayor que f , la escurrimiento superficial ocurrirá a una tasa de $(i - f)$ ”. A esta diferencia $(i - f)$ Horton le dio el nombre de “exceso de lluvia”. Horton consideró que el escurrimiento superficial tomaba la forma de un flujo en láminas cuya profundidad podía medirse en fracciones de pulgadas. A medida que el flujo se acumulaba moviéndose a lo largo de la pendiente, su profundidad aumentaba hasta que descargaba en un canal (Figura 2.10).

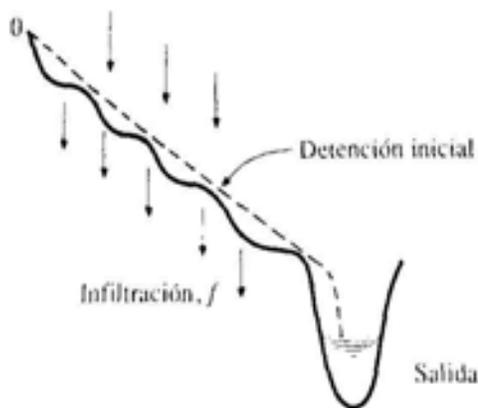


Figura 2.10 Flujo superficial en una pendiente producido por un exceso de lluvia sobre infiltración.

Con el flujo superficial existe un *almacenamiento en depresiones* en los hundimientos de la superficie y un *almacenamiento por detención superficial* proporcional a la profundidad del mismo flujo superficial. El suelo almacena el agua infiltrada y luego la libera lentamente como flujo subsuperficial para entrar en la corriente como flujo base durante los periodos secos.

El flujo superficial hortoniano es aplicable a superficies impermeables en áreas urbanas y a superficies naturales con capas delgadas de suelo y con baja capacidad de infiltración como ocurre en tierras semiáridas y áridas [11].

2.1.6.3 Flujo subsuperficial.

El flujo superficial hortoniano raramente ocurre en superficies con vegetación en regiones húmedas. Bajo estas condiciones, la capacidad de infiltración del suelo excede las intensidades de lluvia observadas para todos los casos con excepción de las lluvias extremas. En tal caso el flujo subsuperficial se convierte en el mecanismo primordial del transporte de agua lluvia hacia las corrientes [11].

Cuando el agua se filtra o penetra, una parte puede alcanzar una capa de suelo o material rocoso que restringe el movimiento de la filtración del agua. Las capas restrictivas pueden estar formadas naturalmente (contenedor de arcilla o fragmentos de roca sólida) a causa de las actividades humanas. Una parte del agua alcanza las capas restrictivas, esta puede moverse lateralmente entre las capas y eventualmente descargar a una superficie de un cuerpo de agua como un arroyo o un lago, el movimiento lateral de agua es llamado interflujo [42].

2.1.6.4 Flujo superficial de saturación.

El flujo *superficial de saturación* se produce cuando el flujo subsuperficial satura el suelo cerca a la parte inferior de la pendiente y entonces se presenta flujo superficial a medida que la lluvia cae en un suelo saturado. El flujo superficial de saturación difiere del flujo superficial hortoniano en que en este último el suelo se satura desde arriba mediante infiltración, mientras que en el flujo superficial de saturación el suelo se satura desde abajo por el flujo subsuperficial. El flujo superficial de saturación ocurre con más frecuencia en la parte inferior de las pendientes de colinas cerca a las bancas de la corriente [11].

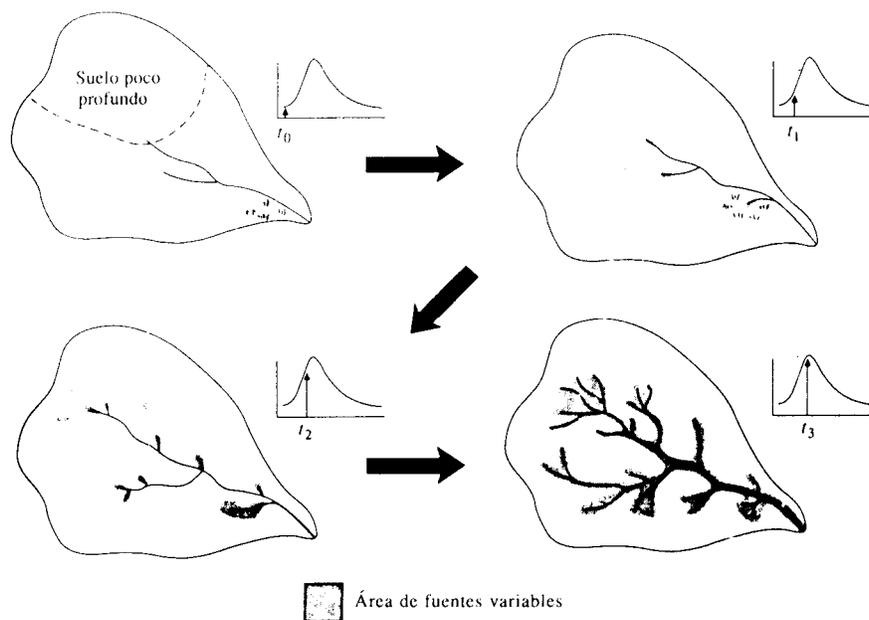


FIGURA 2.11 Las pequeñas flechas en los hidrogramas muestran cómo se incrementa el caudal a medida que la fuente variable se extiende a pantanos, suelos poco profundos y canales efímeros. El proceso se invierte a medida que el caudal declina.

La velocidad del flujo subsuperficial es tan baja que no todo el flujo subsuperficial o el flujo superficial de saturación de una cuenca contribuye a incrementar la corriente durante una tormenta. Como se muestra en la Figura 2.11, el área de fuente variable se expande durante una tormenta y se contrae después. El área fuente para una corriente puede constituirse sólo por el 10% de la cuenca durante una tormenta en una región húmeda y bien cubierta por vegetación [11].

2.1.6.5 Exceso de precipitación y escurrimiento directo.

El exceso de precipitación, o precipitación efectiva, es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en *escurrimiento directo* a la salida de la cuenca bajo la suposición de flujo superficial hortoniano. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en *escurrimiento directo* a la salida de la cuenca bajo la suposición de flujo superficial hortoniano. Las graficas de exceso de precipitación contra el tiempo o *hietograma de exceso de precipitación*, es un componente clave para el estudio de las relaciones lluvia-escurrimiento. La

diferencia entre el hietograma de lluvia total que se observa y el hietograma de exceso de precipitación se conoce como *abstracciones* o *pérdidas*. Las pérdidas son primordialmente agua absorbida por infiltración con algo de intercepción y almacenamiento superficial.

El hietograma de exceso de precipitación puede calcularse a partir del hietograma de precipitación en una o dos formas, dependiendo de si existe o no información de caudales disponible para la tormenta [11].

2.1.6.6 Efectos de la urbanización

En las últimas décadas los hidrólogos se han interesado por los efectos de la urbanización. Los primeros trabajos en hidrología urbana se relacionaban con los efectos de la urbanización en el potencial de inundaciones en pequeñas cuencas urbanas [11]. Los efectos de la urbanización en los hidrogramas de crecientes incluyen incrementos en los volúmenes totales de escurrimiento y en los caudales picos, tal como se muestra en la Figura 2.12. En general, los mayores cambios en los caudales en las cuencas urbanas se deben a lo siguiente:

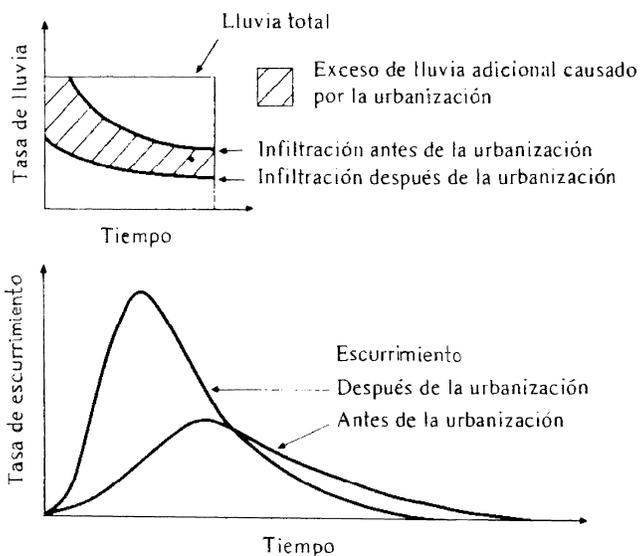


FIGURA 2.12 Efectos de la urbanización en el escurrimiento de tormentas.

1. El volumen de agua generada para el escurrimiento crece debido al aumento de las zonas impermeables, producto de las construcciones, unidades habitacionales, vialidades, industria, techos, etc., que reducen la cantidad de infiltración.

2. Los cambios en la eficiencia hidráulica asociados con canales artificiales, cunetas y sistemas de recolección de drenaje de tormentas, aumentan la velocidad del flujo y la magnitud de los picos de creciente.

2.1.6.7 Coeficiente de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento C es la variable menos precisa del método racional. Su uso en la fórmula implica una relación fija entre la tasa de escurrimiento pico y la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje, lo cual no es cierto en la realidad. Una selección apropiada del coeficiente de escurrimiento requiere del conocimiento y la experiencia por parte del hidrólogo. La proporción de la lluvia total que alcanzarán los drenajes de tormenta depende del porcentaje de permeabilidad, de la pendiente y de las características de encharcamiento de la superficie. Superficies impermeables, tales como los pavimentos de asfalto o los techos de edificios, producirán un escurrimiento de casi el cien por ciento después de que la superficie haya sido completamente mojada, independientemente de la pendiente.

Inspecciones de campo y fotografías aéreas son muy útiles en la estimación de la naturaleza de la superficie dentro del área de drenaje. El coeficiente de escurrimiento también depende de las características y las condiciones del suelo. La tasa de infiltración disminuye a medida que la lluvia continúa y también es influida por las condiciones de humedad antecedentes en el suelo. Otros factores que influyen en el coeficiente de escurrimiento son la intensidad de lluvia, la proximidad del nivel freático, el grado de compactación del suelo, la porosidad del subsuelo, la vegetación, la pendiente del suelo y el almacenamiento por depresión. Debe escogerse un coeficiente razonable para representar los efectos integrados de todos estos factores.

2.1.6.8 Escurrimiento y flujo superficial.

El flujo superficial es la lámina delgada que ocurre en la parte superior de las pendientes antes de que el flujo se concentre en canales reconocibles. El escurrimiento es una parte de la precipitación, nieve derretida o agua irrigada que fluye a través del suelo, eventualmente a través de sistemas de agua superficial.

Las contribuciones al escurrimiento deberán incluir el flujo superficial, flujo subsuperficial y flujo subterráneo. Al tiempo que la velocidad de precipitación excede la velocidad de infiltración en el suelo, se acumula en los lugares donde existen depresiones que son llamadas *superficies de almacenamiento*. Si las superficies de almacenamiento son llenadas y la precipitación continua para exceder la infiltración, el agua comienza a moverse cuesta abajo como flujo superficial o en cauces definidos. El flujo superficial puede también ocurrir cuando el suelo esta saturado, en este caso, todas las fisuras y grietas del perfil del suelo son saturadas con agua, y el exceso comienza a fluir sobre la superficie del suelo. Un gran porcentaje del escurrimiento superficial llega a los arroyos y finalmente descarga en los ríos.

2.1.7 Flujo de agua subterránea.

El agua subterránea comprende aproximadamente el 4% del agua contenida en el ciclo hidrológico y puede fluir a la superficie de los cuerpos de agua como por ejemplo océanos, lagos y ríos. Este proceso crea un flujo base para un cuerpo de agua que es una contribución importante al agua subterránea y agua superficial. Más del 50% de la población depende del agua subterránea como la fuente primaria de agua potable. Aproximadamente el 75% de las ciudades americanas deriva sus requerimientos totales o parciales de las aguas subterráneas. En 1980, os Estados Unidos utilizaban 88 billones de gal / día de aguas subterráneas y 68% de este total para riego [42]. El agua subterránea constituye la fuente de abastecimiento más importante en las zonas áridas y en diferentes ciudades del territorio. La recarga media de los acuíferos es del orden de 77 Km³ al año, de los cuales se estiman aprovechamientos por 27.4 Km³/año. En el balance nacional de agua subterránea, la extracción equivale apenas a 37% de la recarga o volumen renovable [3].

CAPÍTULO 3. MEDIO FISICO NATURAL

La dinámica ambiental en las grandes aglomeraciones urbano-industriales como el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) involucra la interacción de diversos factores territoriales, económicos y sociodemográficos. Para tener una visión estructural de estos elementos es muy útil conocer sus características geográficas, que describen y dimensionan, las condiciones físicas del territorio, la infraestructura y equipamiento urbano, donde se desarrollan las actividades económicas, los procesos sociales y demográficos, así como las tendencias de los recursos naturales (suelo, agua, bosques, fauna, etc.) y los servicios ambientales.

El conocimiento geográfico del AMM para referenciar espacialmente algunos de sus fenómenos y procesos ambientales es posible realizar a través de datos básicos como: localización y delimitación geográfica, topografía del terreno (que provee el marco físico y una imagen o acercamiento a la realidad de esta zona de estudio); caracterización geográfica del terreno por medio de la fisiografía (que mediante la topografía, la geología y otras características muestra la regionalización de los diversos paisajes metropolitanos). Estos elementos adquieren dimensión, forma, ubicación y es posible relacionar sus características espacialmente como en el caso de las principales cumbres y su participación con los tipos de roca de la región. Asimismo, esta información es útil en la exploración de recursos minerales o de localización de cuerpos de agua subterráneos.

En el tema de la hidrología se incluyen los mapas y los cuadros estadísticos de la información de agua superficial (corrientes de agua, cuencas y subcuencas hidrológicas) y subterránea (aprovechamientos como pozos, norias y manantiales) que, junto con la descripción de los tipos y subtipos de climas, así como los datos disponibles en las estaciones meteorológicas (temperatura y precipitación), completan el marco geográfico de esta metrópoli del país.

El AMM está ubicada en medio de montañas y como resultado, los escurrimientos torrenciales que en ellas se generan inundan anualmente las tierras bajas y planas de la zona urbana. Las montañas afectan también el patrón de los vientos, y las áreas de asoleamiento y sombreado, lo que a su vez influye sobre el tipo de vegetación.

3.1 Ubicación Geográfica

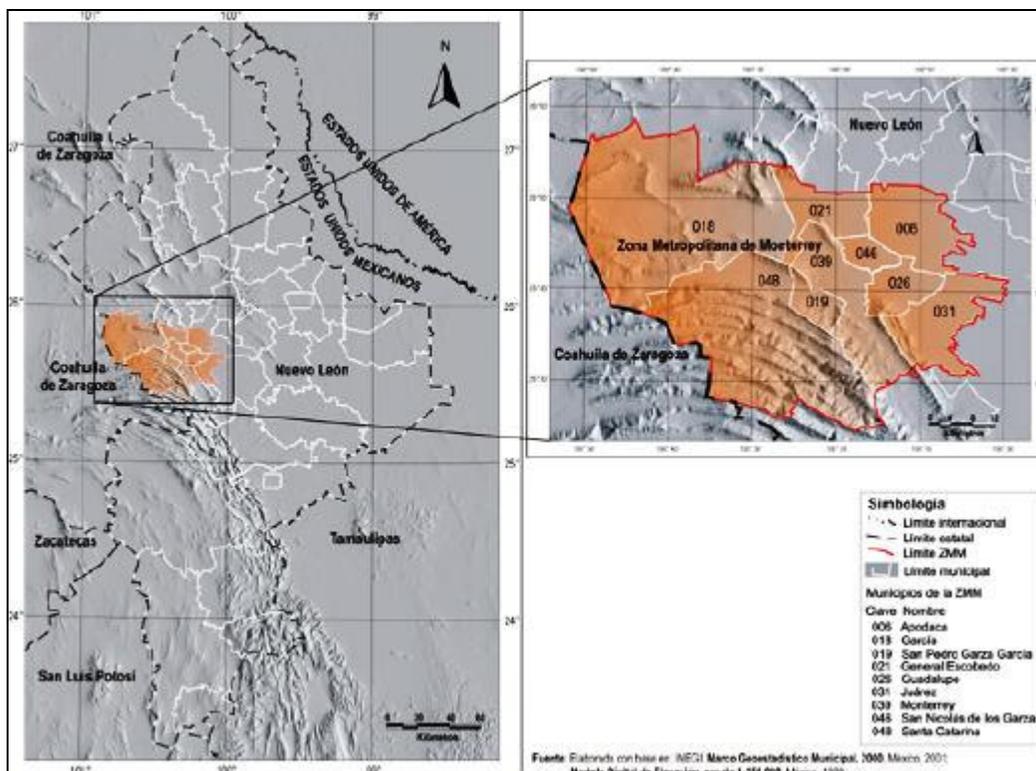
El Área Metropolitana de Monterrey abarca el 5.65% de la superficie total del Estado de Nuevo León, que es de 64,555 Km² [36] y se encuentra situada entre los 25° 15' y 26° 30' de latitud Norte y los 99°40' y 101° 10' de longitud Oeste (Cuadro 3.1), en los límites de la Llanura Costera del Golfo y la Sierra Madre Oriental. Está integrada por nueve municipios: Monterrey, San Nicolás de los Garza, Apodaca, Guadalupe, San Pedro Garza García, Santa Catarina, General Escobedo, García y Juárez, el decreto publicado en el Periódico Oficial del Estado del 30 de noviembre de 1988 lo denomina Zona Conurbada (Mapa 3.1)[25]

Cuadro 3.1 Ubicación geográfica del Área Metropolitana de Monterrey.

Coordenadas geográficas extremas	Norte:	25°58'	Latitud norte
	Este:	99°59'	Longitud oeste
	Sur:	25°24'	Latitud norte
	Oeste:	100°51'	Longitud oeste
Colindancias	Al norte:	Con los municipios de Mina, Hidalgo, Abasco, Camen, Salinas Victoria y General Zuazua	
	Al este:	Con los municipios de Pesquería y Cadereyta Jiménez	
	Al sur:	Con los municipios de Santiago, Cadereyta Jiménez y el edo. de Coahuila (municipio de Arteaga)	
	Al oeste:	Con el estado de Coahuila de Zaragoza (municipios de Arteaga y Ramos Arizpe)	
Superficie	3 293.1km ²	5.12% de la superficie de Nuevo León	

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Recuadro 2.1.1)

Mapa 3.1 Ubicación Geográfica del AMM.



Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Mapa 2.1.1)

El AMM se localiza en la parte centro-oeste de la entidad y colinda con el estado de Coahuila de Zaragoza en los municipios de Ramos Arizpe y Arteaga; las demás colindancias son: al norte, con los municipios de Mina, Hidalgo, Abasolo, Carmen, Salinas Victoria y General Zuazua; al sur, con Santiago y Cadereyta Jiménez; y al este, con Pesquería y Cadereyta Jiménez. El extremo norte se ubica en la latitud norte de 25°58' y máxima latitud del municipio de García, y el extremo sur a 25°24' latitud norte, latitud mínima del municipio de Santa Catarina. En la longitud oeste de 99°59' se tiene el límite oriente del AMM y menor longitud del municipio de Juárez y en la meridiana 100°51' longitud oeste, el límite occidental del AMM y máxima longitud del municipio García. Esta particular ubicación, asociada con la topografía, determina la variabilidad en su régimen pluvial así como las ligeras diferencias climáticas que se observan en su área. La altura en el AMM va decreciendo gradualmente desde 680 (msnm) en Santa Catarina hasta los 380 (msnm) en Juárez en dirección Oeste-Este [15] (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Coordenadas y altitud de los municipios del AMM y su zona de influencia, 2000.

Municipios	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (msnm)	Extensión (km ²)
Apodaca	25°47'	100°11'	460	183.500
Escobedo	25°47'	100°09'	428	166.000
San Pedro	25°40'	100°24'	540	91.340
Guadalupe	25°40'	100°14'	500	118.737
Monterrey	25°40'	100°18'	534	781.438
San Nicolás	25°45'	100°17'	512	86.800
Santa Catarina	25°41'	100°27'	680	984.500
Abasolo	25°56'	100°23'	507	44.603
Cadereyta	25°35'	100°00'	360	1,153.690
El Carmen	25°56'	100°21'	464	101.346
Ciénega de Flores	25°57'	100°09'	440	171.958
Dr. González	25°56'	99°56'	404	628.163
García	25°49'	103°35'	697	913.810
General Zuazua	25°53'	100°06'	400	194.348
Higuera	25°57'	100°00'	250	669.889
Juárez	26°10'	99°32'	403	275.245
Marín	25°43'	100°02'	393	157.297
Mina	26°01'	100°32'	568	3,676.600
Pesquería	25°48'	100°04'	381	346.410
Salinas Victoria	25°58'	100°18'	454	1,609.370
Hidalgo	25°59'	100°27'	549	109.093
Santiago	25°25'	100°09'	445	732.204

Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia *Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo*. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002. (Tabla 2-2)

Conforme al censo del año 2000, el AMM concentra el 84.59% de la población total del estado con 3'243,466 habitantes [27]. El Municipio de Monterrey concentra el 28.98 % de la población de todo el estado, seguido por Guadalupe con 17.48% (Figura 3.1).

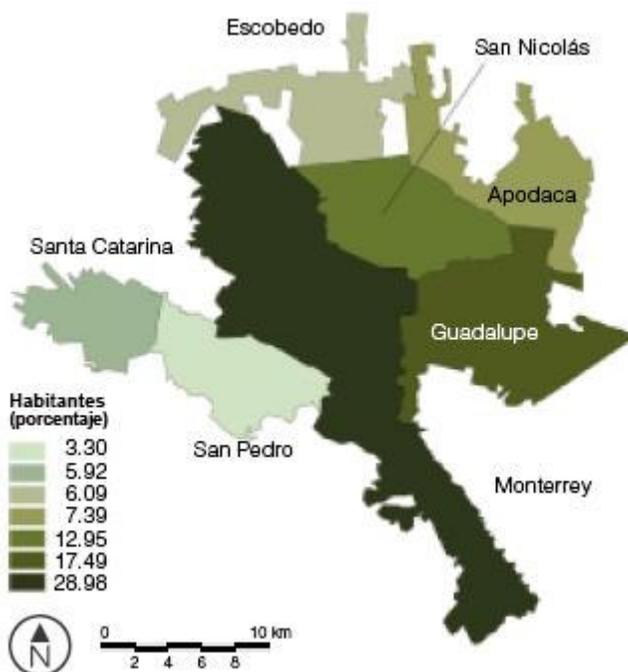


Figura 3.1 Proporción de la población de Nuevo León que habita en el AMM.
Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia *Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo*. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002.

Comparando la superficie municipal total con el área ocupada con uso de suelo urbano (calculada a partir de los datos catastrales) se obtuvo que prácticamente toda el área del Municipio de San Nicolás está ya cubierta por uso de suelo urbano, que Monterrey ocupa el 62% de su superficie, Guadalupe el 78%, San Pedro el 82%, Apodaca el 55%, Escobedo el 40% y Santa Catarina el 3%.

El AMM se ha desarrollado sobre dos zonas muy distintas: la Planicie Costera del Golfo y la Sierra Madre Oriental. Esta ubicación particular genera una influencia directa sobre su clima, en especial sobre la temperatura y las precipitaciones pluviales, cuya intensidad anual es muy diferente al pasar de la planicie costera del Golfo, hacia la Sierra Madre Oriental.

Las precipitaciones mayores de 550mm por año se registran hacia la Zona Suroriente del área de estudio y las menores de ese valor promedio anual (350

mm/año), hacia el Poniente y Norte. Los límites entre ambas zonas varían ligeramente, por lo que hay años en que las precipitaciones pueden ser menores o mayores, pero la diferencia entre ambas zonas es persistente.

Las diferencias entre ambas regiones van desde su origen geológico, hasta la fauna y vegetación que en ellas se encuentran. Por ejemplo, la Sierra Madre y las montañas de la zona urbana, pertenecen al periodo Mesozoico, mientras que la Planicie Costera proviene del Cenozoico. Las diferencias geológicas definen la existencia de áreas riesgosas, donde las altas pendientes, combinadas con lutitas intemperizadas de la Sierra Madre, dan lugar a derrumbes al presentarse las lluvias anuales. La ubicación del AMM en medio de estas dos zonas afecta también la forma en que los contaminantes atmosféricos se dispersan, debido a la dirección de los vientos dominantes (Poniente o Norponiente). Los contaminantes son transportados desde el Oriente de la ciudad, donde las zonas industriales o las de tráfico intenso los generan, hacia el Poniente, en las faldas de la Sierra Madre, que funciona a manera de dique, conteniéndolos.

En suma, aunque el hombre ha alterado las condiciones ecológicas, perturbado corrientes fluviales, suministrado agua de otras cuencas, canalizado ríos y cubierto pastizales con capas de cemento y asfalto, el AMM sigue dependiendo del comportamiento de la naturaleza con sus lluvias, vientos, altas temperaturas y suelos inestables [15].

3.2 Variables relacionadas con la Atmósfera.

3.2.1 Climatología

El AMM se encuentra dentro de la zona subtropical de alta presión y, junto con la conformación orográfica regional, condicionan el comportamiento climático influido por masas de aire marítimo continental, modificado por la circulación superior de la atmósfera. Al chocar los vientos alisios con la Sierra Madre Oriental, ocasionan abundante precipitación que alcanza al Valle de Monterrey durante el mes de junio. En septiembre, las lluvias son más intensas, de mayor precipitación y de penetración más profunda. En invierno, los vientos del oeste, que son menos

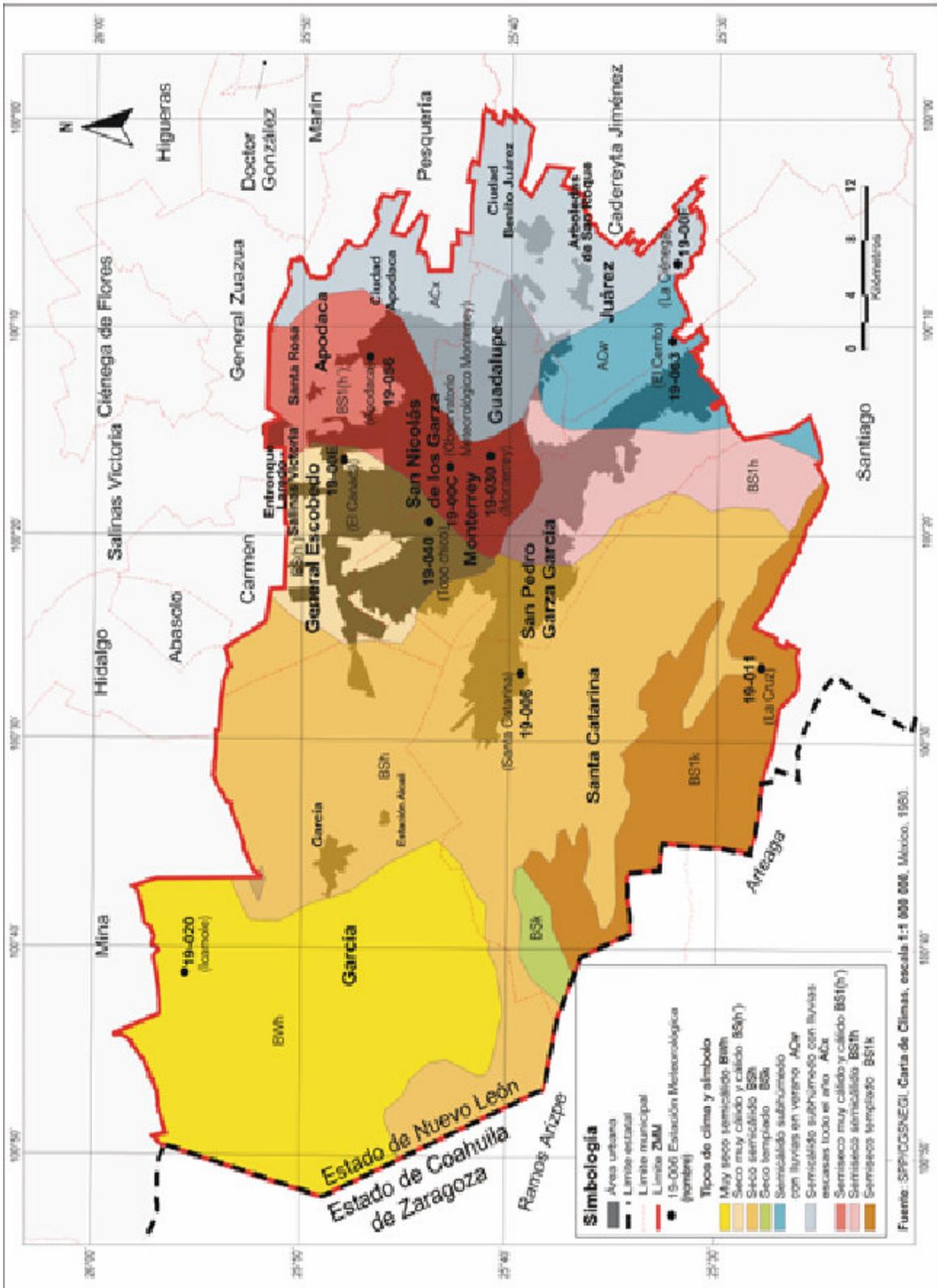
húmedos que los alisios, provocan una sequedad que dura hasta la primavera, presentándose también masas de aire frío que hacen descender la temperatura.

En el área urbana de Monterrey se ha detectado la denominada “isla de calor”, que presenta elevadas temperaturas en la zona centro con diferencias para el sur de la ciudad de hasta 4 °C.

El AMM se caracteriza principalmente por la influencia de climas extremos, con oscilaciones térmicas durante los años mayores a los 40 °C, entre la temperatura más gélida del invierno y la temperatura más cálida del verano. Estos climas registran un patrón de este a oeste que consiste en un cambio gradual de temperatura y precipitación en el siguiente orden: semicálidos, semisecos, secos y muy secos y obedece al alejamiento paulatino de la línea costera, lo que provoca de la misma forma, una disminución de la humedad (Mapa 3.2).

En la región oriental se presentan climas de los denominados semicálidos subhúmedos con dos variantes: una de ellas, caracterizada por lluvias escasas todo el año, con una precipitación que va de 650 a 700 mm anuales y una temperatura media anual mayor a 22 °C, distribuyéndose en la mayor parte de los municipios de Juárez, Guadalupe y parte de Apodaca; la otra variante presenta lluvias en verano, incidiendo sobre la zona suroeste de Juárez y una porción del sureste de Monterrey en terrenos pertenecientes al Cerro de la Silla, con temperatura media anual de 22 °C y precipitaciones entre 700 y 750mm anuales. También aparecen en esta región, en forma de franja que corre de norte a sur, climas semisecos, que inciden de dos formas: por un lado, los climas semisecos muy cálidos y cálidos, que afectan una gran parte de los municipios de San Nicolás de los Garza y Apodaca, así como el norte de Monterrey, con precipitaciones anuales que oscilan entre los 600mm y 650mm y temperatura media anual mayor a 22 °C. La otra franja, localizada al sur de la anterior, presenta climas semisecos semicálidos con temperatura media anual de 21 °C y precipitación anual entre 550 y 600 mm e incide en el centro del municipio de Monterrey y en pequeñas porciones de Guadalupe y Santa Catarina.

Mapa 3.2 Climas del AMM.



Fuente: INEGI, *Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001*. México, 2002 (Mapa 2.1.9)

Cuadro 3.2 Climas del AMM.

Tipo o Subtipo	Símbolo	Porcentaje de la superficie metropolitana
Semicálido subhúmedo con lluvias en verano	ACw	4,30
Semicálido subhúmedo con lluvias escasas todo el año	ACx	10,40
Semiseco muy cálido y cálido	BS ₁ (h')	7,41
Semiseco semicálido	BS ₁ h	5,78
Semiseco templado	BS ₁ k	10,05
Seco muy cálido y cálido	BS(h')	6,23
Seco semicálido	BSh	34,09
Seco templado	BSk	1,22
Muy seco semicálido	Bwh	20,52

Fuente: SPP/CGSNEGI, Carta de Climas, escala 1:1 000000, México, 1980.

Hacia el oeste aparecen los climas secos muy cálidos y cálidos y los secos semicálidos. Los primeros afectan a la mayor parte del municipio General Escobedo, así como el norte del municipio de Monterrey, y presentan precipitaciones que van de 400mm a 500mm anuales y temperatura media anual de 23°C. Los segundos inciden en gran parte del AMM, representando 34% de la superficie de ésta. Se disponen en forma de una franja irregular de norte a sur, con penetración al oeste y cuya área de influencia abarca casi la mitad de García, la mayor parte de San Pedro Garza García y Santa Catarina, así como una pequeña porción de Monterrey. Se caracterizan por presentar precipitaciones que oscilan entre 350mm y 400mm anuales y una temperatura media anual de 21°C (Cuadro 3.2).

Finalmente, en terrenos de la Sierra Madre Oriental, en el municipio de Santa Catarina aparecen, debido al factor altitud, los climas semisecos templados y los secos templados. La altitud promedio a la que se encuentra este municipio provoca, respecto a los otros municipios del AMM, una disminución en el promedio anual de temperatura que va de 12 a 18°C y precipitaciones anuales entre 400mm y 500mm (Cuadros 3.3 al 3.6) [25].

3.2.1.1 Temperatura

En el análisis de la temperatura media anual de varios años, durante los periodos de observación disponibles (Figura 3.2), se observa que la Estación La Cruz, del Municipio de Santa Catarina, es la que registra menores temperaturas, debido a que se encuentra situada a una mayor altura sobre el nivel del mar, propiciando que la temperatura promedio sea más fresca. La Estación El Cerrito,

Cuadro 3.3 Temperatura media mensual (Grados centígrados).

Estación	Periodo	Mes											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio Meteorológico de Monterrey	1977-1996	13.8	16.5	20.7	23.4	25.6	27.8	28.3	28.2	25.7	22.2	18.5	14.9
El Cerro	1978-1998	12.0	14.3	17.8	20.5	24.1	26.5	27.1	26.6	23.8	20.7	17.1	13.0
Monterrey	1921-1999	14.4	16.5	20.1	23.4	26.1	27.7	28.1	28.3	25.9	22.4	18.2	15.1
Topo Chico	1959-1996	14.1	16.1	20.9	24.3	26.6	28.3	28.9	28.5	26.5	23.6	19.1	15.2
La Ciénega	1987-1997	13.4	16.5	19.6	22.2	25.9	27.4	28.3	27.9	25.2	22.2	18.1	17.4
Icamole	1985-1997	12.7	13.7	17.7	21.0	22.5	26.4	26.3	26.6	24.4	20.9	16.8	13.5
La Cruz	1981-1996	12.2	12.3	14.4	19.4	20.8	20.9	20.8	20.1	20.3	19.5	17.8	14.1
Santa Catarina	1954-1996	13.9	16.2	18.8	22.3	25.4	27.5	27.5	27.0	24.3	21.9	17.6	14.0
El Canadá	1987-1996	14.6	16.4	19.8	23.3	24.9	28.8	29.3	28.8	27.1	23.2	19.0	14.9
Apodaca	1964-1989	13.0	14.6	18.9	22.7	25.1	26.8	27.2	27.5	25.1	21.0	17.2	14.0

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.1.13)

Cuadro 3.4 Temperatura media anual (Grados centígrados).

Estación	Periodo	Temperatura promedio	Temperatura año más frío	Temperatura año más cálido
Observatorio Meteorológico de Monterrey	1977-1996	22.1	20.8	24.4
El Cerro	1978-1998	20.3	19.1	22.1
Monterrey	1921-1999	22.2	20.5	24.0
Topo Chico	1959-1996	22.7	20.9	24.7
La Ciénega	1987-1997	22.0	20.5	23.0
Icamole	1985-1997	20.2	19.1	21.8
La Cruz	1981-1996	17.7	16.7	21.1
Santa Catarina	1954-1996	21.4	17.2	22.4
El Canadá	1987-1999	22.6	21.8	23.5
Apodaca	1964-1989	21.1	19.7	22.6

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.1.14)

Cuadro 3.5 Precipitación pluvial total mensual (Milímetros).

Estación	Periodo	Mes											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Observatorio Meteorológico Monterrey	1966-1996	22.7	16.7	17.3	34.3	56.0	70.2	52.2	102.0	150.8	67.0	20.1	22.0
El Cerro	1960-1998	27.1	21.0	20.9	48.0	87.0	128.1	106.0	161.8	277.2	85.7	26.1	18.1
Monterrey	1885-1999	15.4	16.0	19.1	30.8	44.7	67.2	53.3	79.5	144.2	71.3	27.1	16.7
Topo Chico	1941-1996	16.8	15.3	13.2	30.0	46.7	58.1	41.3	74.7	133.5	58.0	16.0	20.1
La Ciénega	1987-1997	30.4	22.4	36.5	58.6	69.3	89.7	36.9	127.2	123.2	66.5	22.6	16.8
Icamole	1985-1997	11.4	5.30	8.90	14.8	21.0	15.5	12.2	17.5	51.5	12.5	6.70	15.4
La Cruz	1955-1996	59.9	21.6	17.1	38.0	85.9	102.2	108.9	110.0	193.1	59.4	28.4	36.8
Santa Catarina	1939-1996	18.8	10.8	9.10	19.9	41.3	47.3	25.7	59.9	129.6	58.6	14.8	16.7
El Canadá	1985-1999	15.3	14.7	26.2	34.0	58.0	47.6	20.5	58.1	94.9	44.1	18.0	10.2
Apodaca	1964-1989	16.6	20.4	15.2	32.8	58.2	70.4	50.6	70.9	122.8	52.2	19.2	22.6

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.1.15)

Cuadro 3.6 Precipitación pluvial total anual (Milímetros).

Estación	Periodo	Precipitación promedio	Precipitación año más seco	Precipitación año más lluvioso
Observatorio Meteorológico de Monterrey	1966-1996	631.3	315.5	1 305.00
El Cerro	1960-1998	1 007.00	673.8	1 561.30
Monterrey	1885-1999	585.3	147.4	1 311.30
Topo Chico	1941-1996	523.7	120.1	1 196.50
La Ciénega	1987-1997	700.1	445.0	1 015.70
Icamole	1985-1997	192.7	140.5	309.00
La Cruz	1955-1996	861.3	312.0	1 531.60
Santa Catarina	1939-1996	432.5	118.1	951.50
El Canadá	1985-1999	448.5	340.1	650.70
Apodaca	1964-1989	551.9	319.3	993.00

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.1.16)

ubicada en los límites de Monterrey y Santiago, tiene una primavera más fresca, como lo muestran sus niveles de temperatura y en verano su promedio también es un poco menor que el observado en el resto de las estaciones. Esto se puede explicar porque las montañas del Cañón del Huajuco contribuyen a proteger del asoleamiento diurno y forman una corriente natural de vientos a lo largo de todas sus laderas.

En la Estación El Canadá del Municipio de Escobedo, se observan durante el verano las temperaturas más altas del AMM. El resto de las estaciones tienen un comportamiento muy similar a lo largo del año y todas ellas muestran la misma tendencia hacia altas temperaturas veraniegas.

En general, la temperatura es extrema en el AMM, ya que el promedio de temperaturas en verano rebasa los 30°C y en invierno desciende hasta un promedio de 8°C. Estos contrastes influyen en aspectos, tales como el intemperismo de los materiales pétreos y en la dispersión de contaminantes.

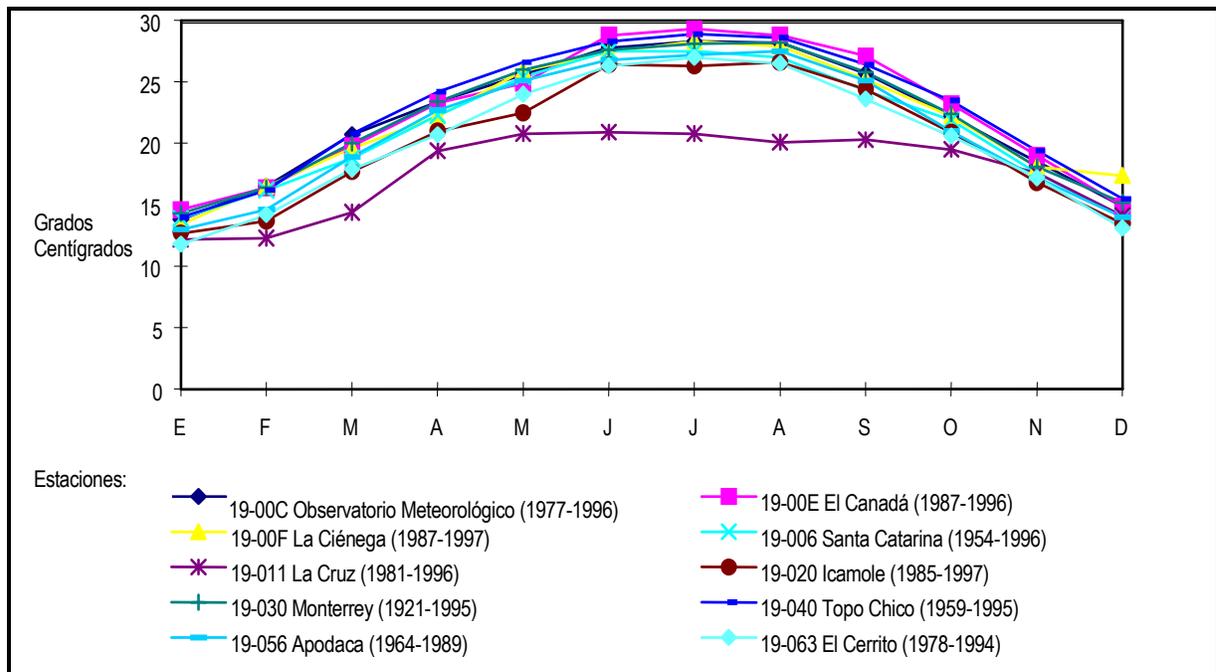


Figura 3.2 Temperatura mensual promedio por estación meteorológica del AMM, varios años.
Fuente: Comisión Nacional del Agua, «Registros de Temperatura por Estación», varios años.

Al comparar las temperaturas promedio para los años más fríos y calurosos por estación climatológica, se encontró que la Estación El Canadá en Escobedo (1964 - 1989), muestra una diferencia de sólo 1.3°C entre la temperatura media del

año más cálido (1994) y la del más frío (1987). En la Estación La Cruz (1985-1996), la temperatura promedio se mantiene cercana al nivel de la temperatura más fría y existe una diferencia de 4.4°C entre el promedio del año más frío (1993) y el más cálido (1992). La Estación Santa Catarina (1985-1996), es la que muestra mayor diferencia entre sus promedios del año más frío (1959) y el más cálido (1965), pues alcanza los 5.2°C. Además, las temperaturas promedio se mantienen más cercanas a los valores de las temperaturas del año más cálido. Es interesante notar que no existe similitud de fechas de los años más fríos y más cálidos para los diferentes municipios que forman el AMM, lo cual quiere decir que existe una diferencia climática dentro de ésta. En las otras estaciones, el periodo de observación es el siguiente: Monterrey 1921-1996; Apodaca 1964-1989 (Figura 3.3).

Como ya se mencionó, no hay coincidencia entre los periodos de registro, ya que algunas estaciones son de instalación reciente y sus registros abarcan sólo unos pocos años; además, existe una variación real en los niveles de temperatura entre las localidades del AMM por cuestiones como el aspecto (orientación de las pendientes hacia el poniente), la cobertura vegetal y la altura sobre el nivel del mar.

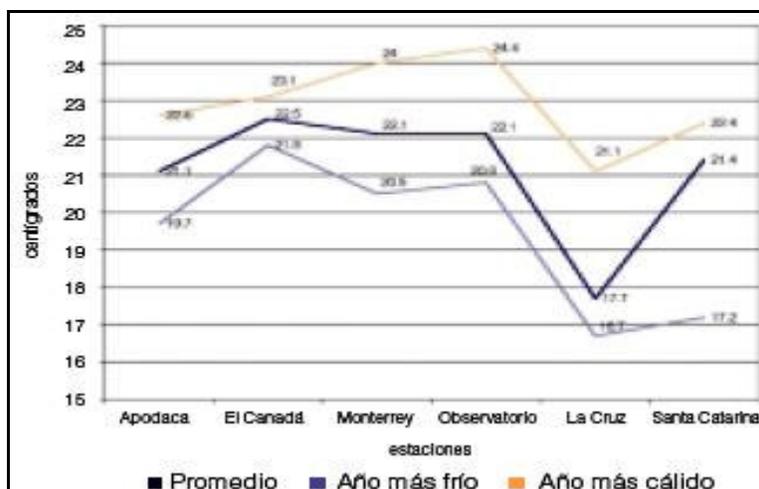


Figura 3.3 Temperatura media, máxima y mínima medida en las estaciones del AMM.

Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia, Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002.

En las zonas urbanas se da el fenómeno denominado "isla de calor" debido al predominio de superficies asfaltadas y recubiertas de concreto. Estas superficies pueden tener temperaturas más altas hasta en 3°C en comparación con superficies

recubiertas con vegetación. La vegetación ayuda a mantener un clima más templado tanto en verano como en el invierno [15]

3.2.1.2 Precipitación.

El análisis de la precipitación pluvial es de gran relevancia, ya que la lluvia es la fuente que alimenta los escurrimientos superficiales y los acuíferos de los cuales dependen los suministros de agua para todas las actividades humanas.

La precipitación en la Región VI (Cuadro 3.7) es escasa e irregular con un valor medio anual de 480mm. Las subregiones localizadas cerca del Golfo de México tienen lluvias de mayor magnitud respecto de las zonas más alejadas, donde la precipitación disminuye en forma significativa. El AMM se ubica en la subregión San Juan con una lámina media anual de lluvia de 659mm, el estado de Nuevo León con 589mm; debe notarse que esos valores son menores a los de la media nacional que es de 772mm anuales [7].

Cuadro 3.7 Precipitación y temperatura en la Región VI.

Subregión de planeación	Precipitación media anual (mm)	Temperatura media anual (° c)
Cuencas Cerradas del Norte	387	17.2
Conchos-Mapimi	421	17.7
Alto Bravo	331	18.4
Medio Bravo	486	20.5
San Juan	659	20.8
Bajo Bravo	596	23.4
Promedio	480	19.7

Fuente: Comisión Nacional del Agua. Programa Hidráulico Regional 2002-2006, Región VI Río Bravo. 2003.

El territorio mexicano se ubica en su mayor parte en la franja mundial de los desiertos, por lo que dos terceras partes de su área presentan precipitaciones anuales con valores muy bajos, especialmente en la Zona Norte del país. La clasificación nacional establece que la precipitación del área de estudio se encuentra en el rango de 500mm a 700mm anuales. Sin embargo, debido a su posición en medio de 2 zonas: una con precipitaciones muy escasas (de 100mm a 250mm) y otra con precipitaciones mucho mayores (de 750mm a 1,000mm), se

pueden presentar variaciones en la precipitación, cuyo valor tiende hacia los valores promedio de las zonas contiguas [15].

En la Estación Monterrey se observó que las precipitaciones promedio (1886-1996), son más abundantes en los meses de junio y septiembre. Según los datos disponibles, el año más seco fue 1888 y el más lluvioso 1933 (Figura 3.4).

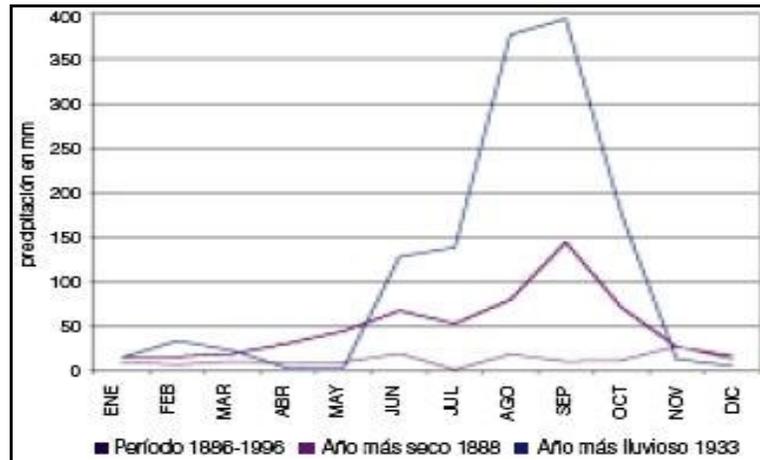


Figura 3.4 Precipitación mensual en Monterrey.
Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia, Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002.

Se analizaron también los datos de precipitación total anual obtenidos en las siguientes estaciones del AMM: Observatorio (1958-1999), Santa Catarina (1939-1999), Monterrey (1886-1999), El Canadá (1984-1999), Apodaca, (1964-1989) y Topo Chico (1947-1997). Se indica entre paréntesis el periodo de registro.

La Estación El Cerrito registra los valores anuales más altos de precipitación. Durante el periodo de 1950-1999 presentó lluvias mayores a 1,100 mm/año en nueve ocasiones, a diferencia de las Estaciones Observatorio, Topo Chico y Monterrey, donde solamente ocurrió un registro similar. El 75% de los valores de precipitación mayores a 1,100mm se observaron en el periodo de 1964 a 1975.

Es interesante hacer notar que en la Estación Monterrey, se observa una ligera tendencia al aumento en la cantidad de precipitación total anual y una disminución en los valores de precipitaciones extraordinarias. Entre 1908 y 1967, estos eventos extraordinarios alcanzaron valores de 1,100 a 1,300 mm/año. A partir de entonces y aun con el efecto del Huracán Gilberto (1988), se han mantenido en niveles menores a 1,000 mm/año.

3.3 Variables relacionadas con la Tierra.

3.3.1 Topografía.

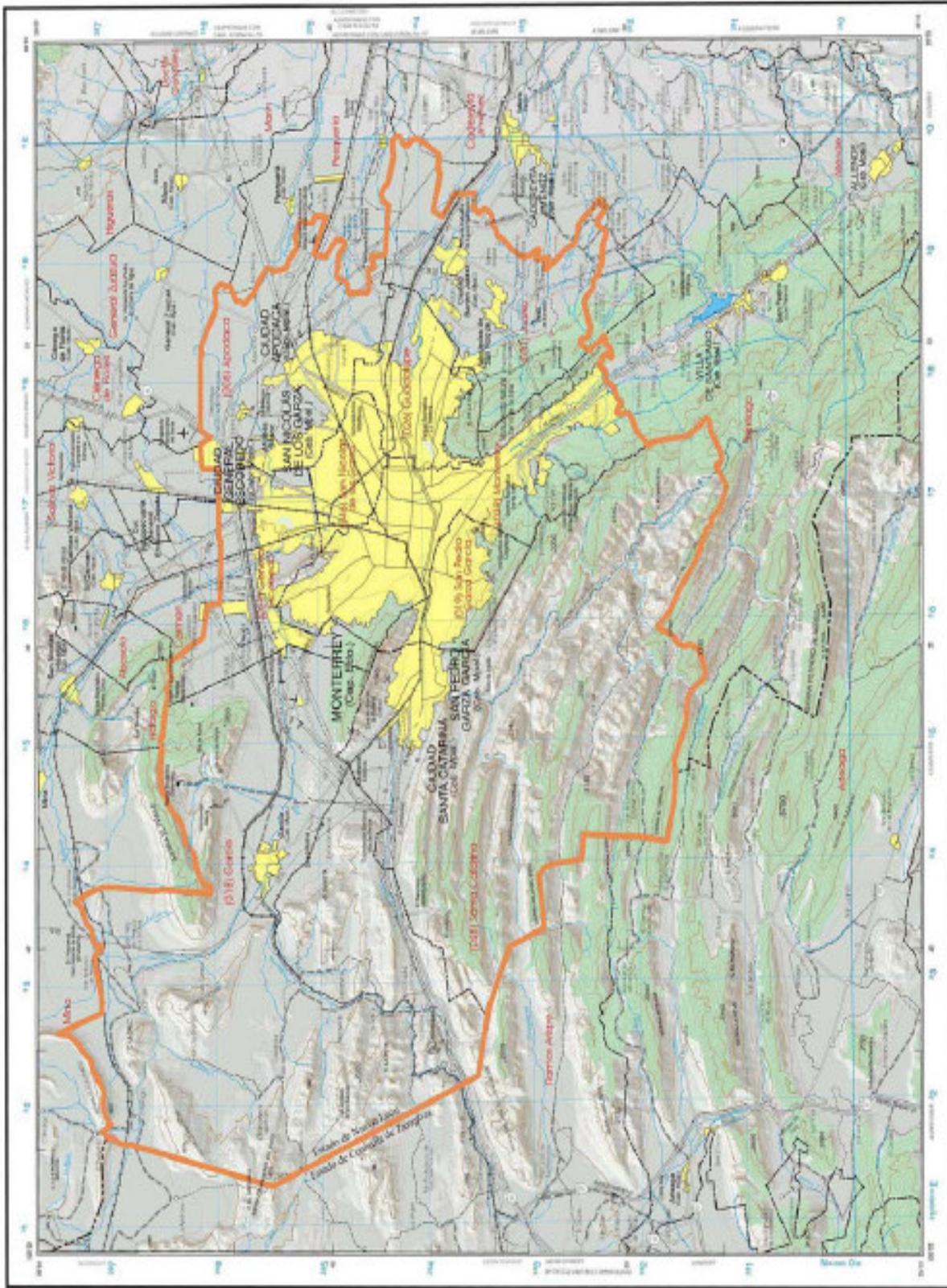
La topografía, configuración de la superficie del terreno del AMM, es de los elementos más importantes en el análisis de problemas ambientales ya que considera en su conjunto el relieve, la posición de sus ríos y arroyos, caminos, ciudades, etc., y es determinante en el comportamiento de los vientos, del agua, la formación de los suelos y la presencia de la vegetación.

En el AMM, la topografía se manifiesta para casi todo el municipio de Santa Catarina con terreno muy accidentado por la presencia de la Sierra Madre Oriental, pocas vías de comunicación y algunas corrientes intermitentes; en la parte norte del mismo municipio se ubica el área urbana, donde el terreno no presenta cerros elevados sino hasta la sierra Las Mitras que en sus partes más altas y en toda su longitud marca el límite de cinco de los nueve municipios. En García se aprecian formas accidentadas en menor proporción que en Santa Catarina y un mayor número de áreas de terreno regular, permitiendo que existan varias vías de comunicación, además del río Pesquería, que tiene sus orígenes en Arteaga (Coahuila) como corriente permanente y que continúa por los municipios de General Escobedo y Apodaca (Mapa 3.3).

3.3.2 Fisiografía

La fisiografía expresa la síntesis de varias disciplinas y es útil para estudios regionales, planeación de la infraestructura o estudios ecológicos, en virtud de que las formas del terreno y su constitución definen la vegetación, la infiltración del agua o su escurrimiento, el crecimiento urbano y son determinantes también en el comportamiento del impacto ambiental, los fenómenos naturales y las actividades humanas. El Área Metropolitana de Monterrey y sus alrededores, se encuentran ubicados en dos provincias fisiográficas de las 15 en las que se divide el territorio nacional: la Provincia de la Sierra Madre Oriental (V) y la Provincia de la Llanura Costera del Golfo Norte (VIII) [19].

Mapa 3.3 Carta Topográfica del Área Metropolitana de Monterrey



Fuente: INEGI, *Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001*. México. 2002 (Mapa 2.1.2)

Provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental

Aproximadamente 70% del territorio del AMM corresponde a esta provincia, la cual se conforma por tres subprovincias que conjugan un paisaje de montañas con valles intermontanos, lomeríos y llanuras (Cuadro 3.8). De las cinco subprovincias que forman la Provincia de la Sierra Madre Oriental, el área de estudio ocupa porciones de las subprovincias denominadas: Sierras y Llanuras Coahuilenses, Gran Sierra Plegada y Pliegues Saltillo-Parras;

Cuadro 3.8 Fisiografía del AMM.

Provincia		Subprovincia		Sistema de Topoformas		Porcentaje de la superficie metropolitana		
Clave	Nombre	Clave	Nombre	Clave	Nombre			
V	Sierra Madre Oriental	23	Sierras y Llanuras Coahuilenses	400	Bajada	1.15		
				402	Bajada con lomeríos	15.76		
				100	Sierra plegada	5.97		
				600	Valle intermontano	1.09		
				26	Pliegues Saltillo-Parras	402	Bajada con lomeríos	6.89
						500	Llanura desértica salina	0.06
		25	Gran Sierra Plegada	200	Lomerío	0.23		
					100	Sierra plegada	0.20	
				102	Sierra plegada con lomeríos	8.29		
				600	Valle de laderas tendidas	1.54		
				600	Valle intermontano	2.49		
					Sierra plegada flexionada	27.22		
VIII	Llanura Costera del Golfo Norte	36	Llanuras y Lomeríos	205	Lomerío con llanuras	25.56		
				100	Sierra baja	0.56		

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.1.4)

La primera subprovincia Sierras y Llanuras Coahuilenses (V23), en su penetración a el AMM y ubicada en la región centro norte, está constituida por los sistemas de topoformas Bajada (al norte de la sierra El Cedral) y Bajada con Lomeríos distribuidos en los alrededores de las sierras Las Mitras y El Fraile, parte oeste de la sierra El Cedral y se prolonga al oeste, en dirección a la ciudad de Saltillo, dividiendo las subprovincias Gran Sierra Plegada y Pliegues Saltillo-Parras. En este sistema de topoformas se asientan las poblaciones de García, Santa Catarina y parte de San Pedro Garza García. También se presentan pliegues de dos o varios anticlinales, así como pliegues secundarios en forma de zigzag o pliegues múltiples en un solo anticlinal. Estos alcanzan alturas de 2,000 msnm a 2,500 msnm y están profundamente surcados de fallas y fracturas. También forman parte del complejo de la SMO, el Cerro El Fraile, la Sierra Papagayos y la Sierra Picachos, ubicados al Noroeste y Noreste de la Ciudad de Monterrey.

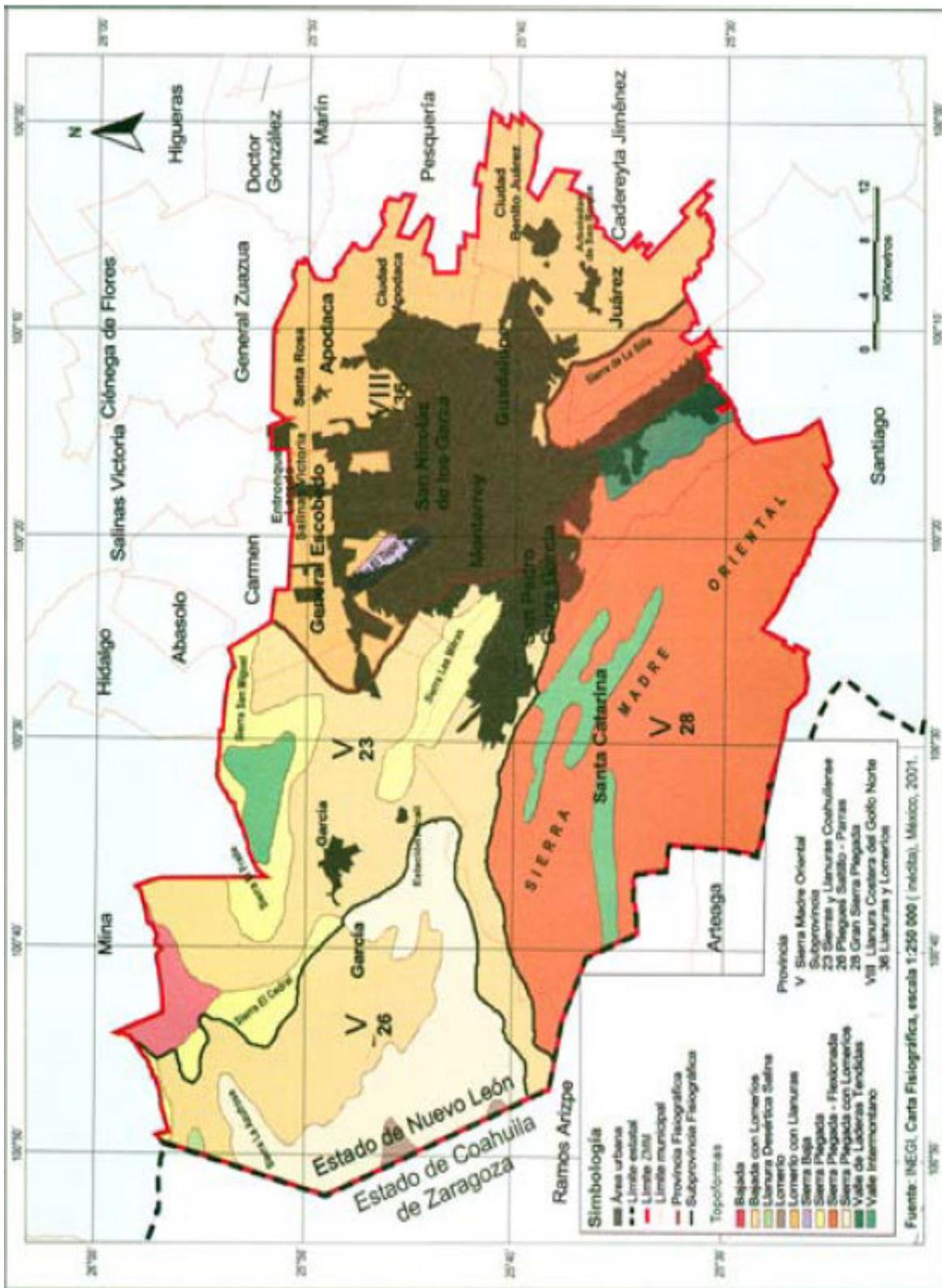
La Sierra Plegada está representada por las sierras Las Mitras, El Fraile y El Cedral. Finalmente, el valle intermontano se localiza en terrenos internos de la sierra El Fraile (Mapa 3.4).

La subprovincia Pliegues Saltillo-Parras (V26) ubicada al oeste en el AMM, está integrada por las siguientes topoformas: Bajada con Lomeríos, Llanura Desértica Salina, Lomerío, Sierra Plegada y Sierra Plegada con Lomeríos, esta última formada principalmente por la sierra Corral de los Bandidos y el cerro La Mota.

Por último, la subprovincia Gran Sierra Plegada (V28) ubicada al sur, está constituida por: Valle de Laderas Tendidas, Valle Intermontano y Sierra Plegada-Flexionada; todos éstos forman parte del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, así como del Monumento Natural Cerro de la Silla. En esta subprovincia, la Sierra Madre Oriental (formada por estructuras montañosas de plegamiento) tiende a limitar el área urbana hacia el sur y, a través de un estrecho corredor, da lugar al cañón de El Huajuco, entre la vertiente oriental de la Sierra Madre y el frente occidental de la Sierra de La Silla. En la actualidad, el crecimiento urbano ha ocupado las faldas y taludes de estas grandes montañas, desafiando a la naturaleza debido a la inestabilidad de los escarpes en varias zonas pobladas. En varias ocasiones, se han presentado derrumbes de construcciones que posiblemente sean resultado de los deslizamientos y movimientos en masa, que en las sierras pueden ser considerables.

En el paisaje del AMM contrastan la forma abierta de las llanuras al norte y las montañas al sur y suroeste, la textura y color de las rocas, así como las variadas formas de la vegetación que cubren el terreno y lucen sus propiedades según las épocas del año. La región flexionada de la SMO denominada Anticlinorio de Arteaga se encuentra al Este y Sur de Saltillo y Monterrey, respectivamente. El paisaje dominante tiene sierras plegadas paralelas a los ejes anticlinales y sinclinales, creando un patrón de drenaje conocido como trellis (en forma de enrejado), característico de este tipo de paisajes. Por el contrario, en la Provincia de la Llanura Costera del Golfo, hay un patrón de drenaje de tipo dendrítico (ramificado en forma arborescente) (Figura 3.5) [15].

Mapa 3.4 Fisiografía del AMM.



Fuente: INEGI, *Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001*. México. 2002 (Mapa 2.1.4)

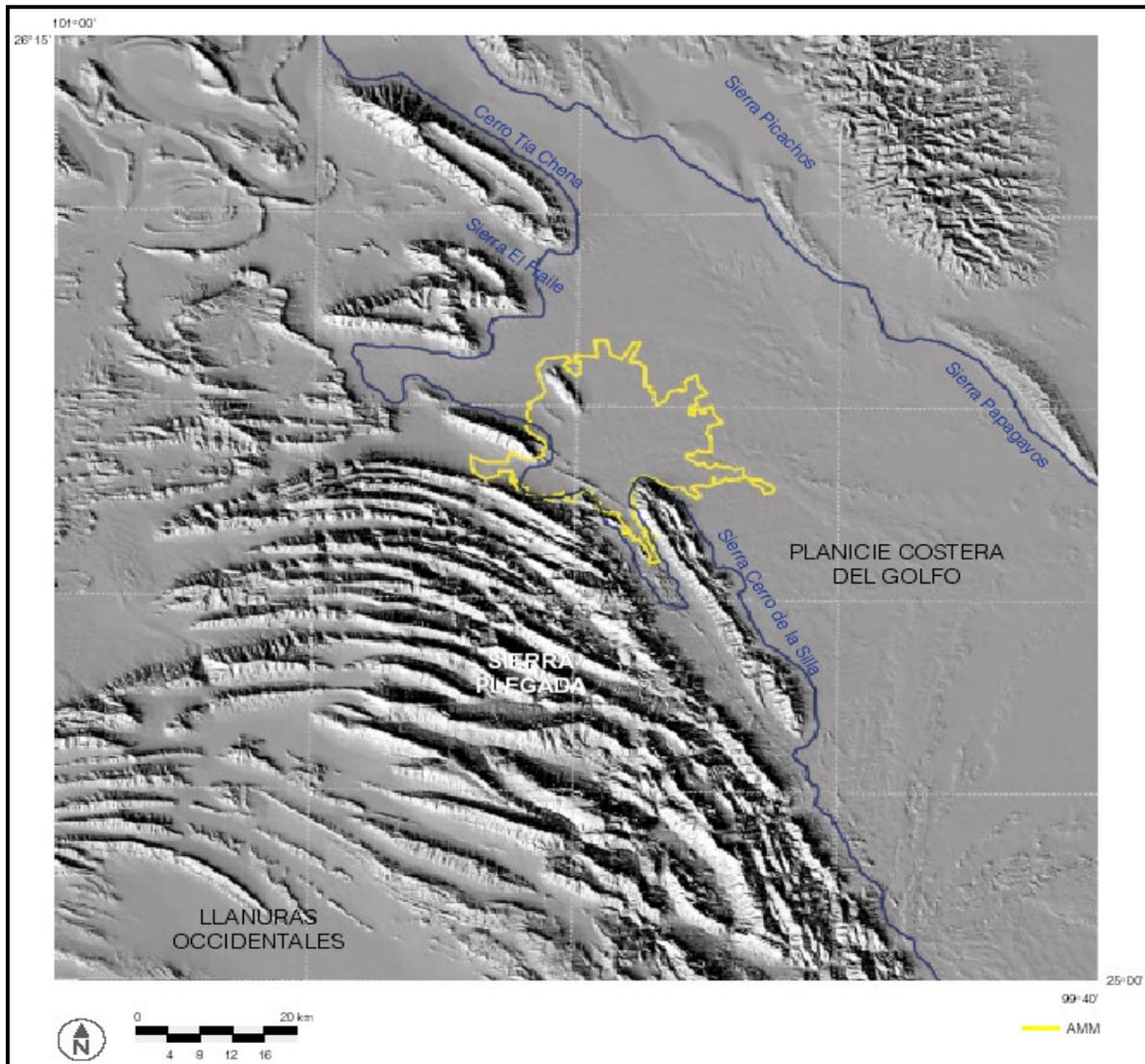


Figura 3.5 Relieve del área de estudio.

Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002.

La compleja orogenia de la sierra y el prolongado periodo de erosión han creado una gran variedad de condiciones de orientación de laderas, las cuales reciben diferentes intensidades de iluminación solar a lo largo del día.

En la zona del área de estudio que corresponde a la SMO, las condiciones de elevación, pendientes y orientación, originan un efecto de sombra de lluvia. Este efecto produce una precipitación mayor en las pendientes de sotavento; mientras que en las pendientes que apuntan a barlovento, la precipitación es mucho menor. A su vez y debido al patrón general de vientos en la región, los vientos tienden a extraer la humedad presente en la atmósfera al pasar de una vertiente a otra,

incrementando así el efecto de aridez. La combinación de estos factores da origen al establecimiento de masas forestales en las laderas Norte y Noreste de la Sierra Madre Oriental y del Cerro Las Mitras, así como en la Sierra Cerro de La Silla y en la Sierra Picachos.

Provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Norte

En la Provincia de la Llanura Costera del Golfo Norte, el área de estudio ocupa partes de la subprovincias Llanuras y Lomeríos (Tabla 3.2), y se localiza en la región noreste de la zona metropolitana, abarcando cerca del 30% de su superficie. En esta subprovincia se asienta, casi en su totalidad, el área urbana de Monterrey, los municipios de San Nicolás de los Garza y Apodaca, así como gran parte de los municipios de Guadalupe, Juárez y General Escobedo, parte de San Pedro Garza García y también García.

Tabla 3.2 Unidades de las provincias fisiográficas en el área de estudio, 1986.

Provincias	Topoformas	Asociaciones	Origen	Litología	Orientación	Pendientes
Sierra	Sierra plegue		Sedimentario-Marino	Caliza	Noroeste a Sureste	Converjas abruptas
Madre	Sierra compleja	Sierra compleja y lomeríos	Sedimentario-Marino	Caliza	Noroeste a Sureste	Abruptas
Oriental	Sierra plegue flexionada		Sedimentario-Marino	Caliza	Semicircular Oeste-Este	Abruptas
	Bajada		Aluvial	Conglomerado	Variada	Muy suaves
	Valle de laderas tendidas		Erosivo fluvial	Lutita	Noroeste a Sureste	Cóncavas
	Valle intermontano	Valle intermontano y lomeríos	Erosión y Plegues		Plegamiento circular	Suaves
Llanura Costera	Sierra baja		Sedimentario Marino	Caliza	Noroeste a Sureste	Rectas
del Golfo Norte	Lomerío suave	Lomeríos, bajadas y llanuras	Sedimentario Marino	Conglomerado	Noroeste a Sureste	Suaves

Figura 3.3 Temperatura media, máxima y mínima medida en las estaciones del AMM.

Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia, Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002 (Tabla 2.6)

Está constituida por dos sistemas de topoformas: Lomerío con Llanuras y Sierra Baja, esta última representada por el cerro El Topo. Geológicamente, a esta provincia corresponde el Valle de Monterrey así como algunas montañas de altura mediana distribuidas irregularmente como la Loma Larga, los cerros El Obispado, El Topo y la Loma Linda, que han sido objeto de intensa urbanización.

Las regiones Norte y Noreste del área de estudio, forman parte de la Provincia de la Llanura Costera del Golfo Norte, en la subprovincia de Llanuras y Lomeríos. Esta subprovincia está constituida por suelos formados a partir de rocas sedimentarias (principalmente del tipo conglomerado), con alturas que varían de los 500 msnm a los 800 msnm y cuyos rasgos geológicos tienen una orientación general de Noroeste a Sureste. Son principalmente sierras bajas (tales como la

Sierra Las Mitras), lomeríos con pendientes suaves y llanuras con una extensión considerable.

El relieve de la zona es contrastante (Figura 3.5), ya que en la región que corresponde a la Provincia de la SMO, hay paisajes muy abruptos, como las topeformas de sierras, mientras que a nivel local, existen imponentes valles intermontanos, cañones y abanicos aluviales, los cuales dan al paisaje un singular atractivo.

Las pendientes del área de estudio son sumamente variables, ya que el rango de valores de dichas pendientes va desde 0% a 1% en el AMM y zonas ubicadas hacia el Este y Norte de la misma, hasta más de 170% en ciertas partes de la sierra donde los sedimentos marinos se encuentran en posición vertical. En el área de estudio, dominan los suelos planos (con pendientes de 0% a 2% y de 3% a 5%), sin embargo, una porción importante del área (28%, que equivale a 591,777 hectáreas) tiene pendientes de más de 30% (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Tipos de pendiente en área de estudio y su extensión, 2000.

Pendiente (%)	Área (ha)	Área (%)
De 0 - 2	908,773	44.0
De 3 - 5	210,344	10.2
De 6 - 10	198,493	9.6
De 11 - 15	76,287	3.7
De 16 - 20	42,957	2.1
De 21 - 25	32,588	1.6
De 26 - 30	5,185	0.3
De 30 y más	591,777	28.6

Fuente: Guajardo, A., Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002. (Tabla 2.7)

La Sierra de La Silla y el cerro El Topo interrumpen la continuidad del área urbana y se marcan sobre éstos parte de los límites de los municipios de Monterrey y Juárez, en el primer caso, y entre Monterrey y General Escobedo, en el segundo, notándose que por no existir otras irregularidades mayores en el terreno, la mayor parte de la superficie de los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García y Guadalupe es área urbana, existiendo también un número importante de vías de comunicación en los municipios de General Escobedo, Juárez y Apodaca.

Las cabeceras municipales de Juárez y García están físicamente separadas de la continuidad urbana de Monterrey, pero funcionalmente vinculadas a ésta, mientras que las demás aparecen como parte del área urbana de mayor superficie.

En cuanto a altitud de las cabeceras municipales, García se encuentra a 710 metros sobre el nivel del mar (msnm) y Ciudad Benito Juárez a 370 msnm, lo cual indica que la altitud del AMM se incrementa de este a oeste.

El área urbana muestra su continuidad territorial en los nueve municipios del AMM y los municipios Carmen y Salinas Victoria, vecinos en la parte norte, y Santiago en la parte sur, aparecen como los más próximos a conurbarse con el perímetro metropolitano. Las 14 localidades urbanas (por su número de habitantes mayor a 2,500) ocupan una superficie de 560.7 Km² lo que implica 17% del territorio total metropolitano (Cuadro 3.9 y Mapa 3.5).

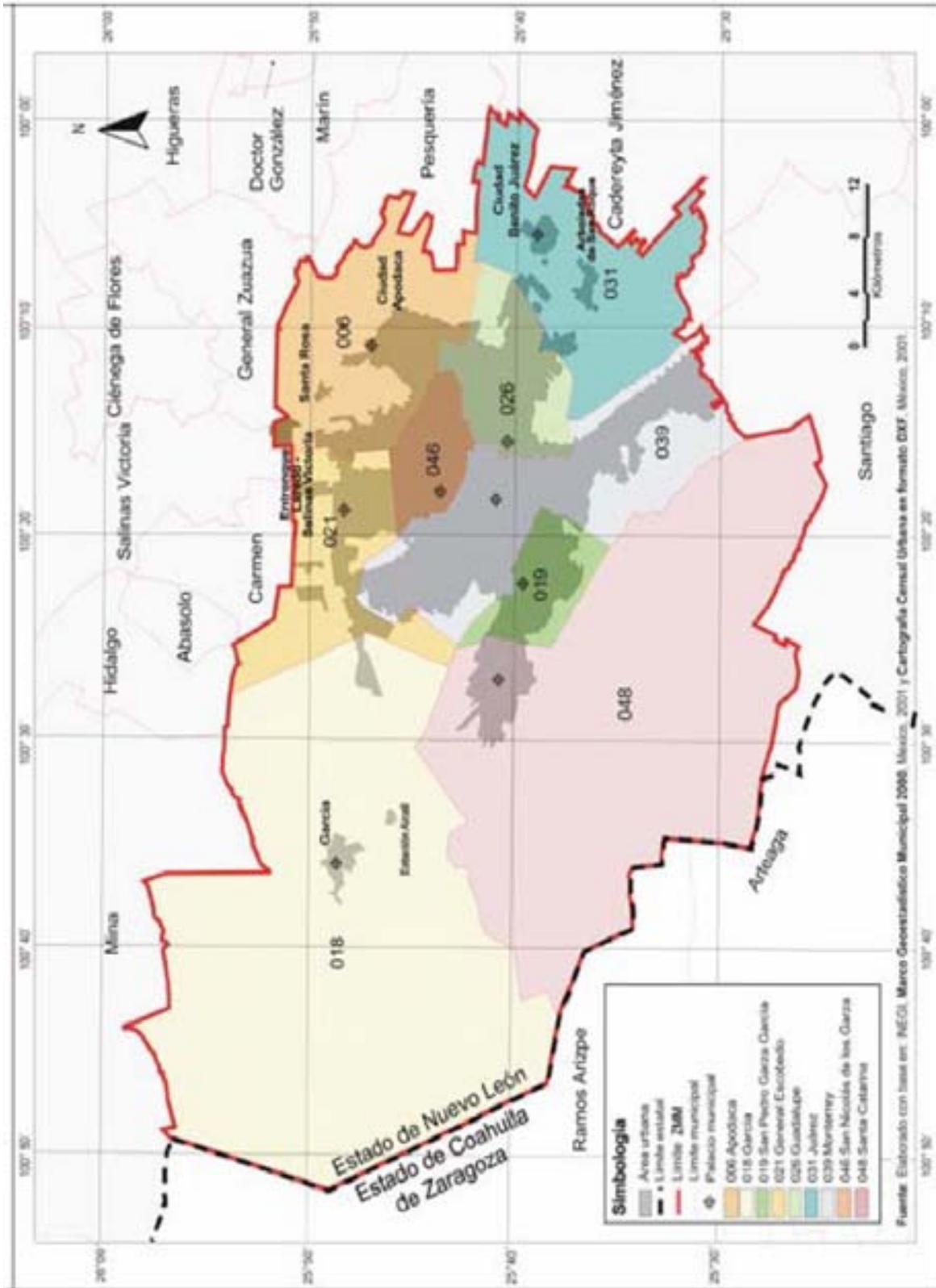
Cuadro 3.9 Superficie urbana por municipio en el 2000, AMM.

Clave	Municipio	Superficie total	Superficie urbana	
		(km ²)	(km ²)	(%)
	AMM	3293.1	560.7	17.03
006	Apodaca	236.5	56.6	23.93
018	García	1098.6	13.8	1.26
021	General Escobedo	178.6	52.8	29.56
026	Guadalupe	123.2	84.7	68.75
031	Juárez	268.1	18.3	6.83
039	Monterrey	291.2	193.3	66.38
046	San Nicolás de los Garza	59.7	59.7	100.00
019	San Pedro Garza García	82.5	47.4	57.45
048	Santa Catarina	954.7	34.1	3.57

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.1.2)

De los municipios que integran el AMM, García sobresale por su extensión 1,098 Km², que representa 33.36% de la superficie metropolitana, en tanto que el municipio de San Nicolás de los Garza es el más pequeño con 59.7 Km² y 1.81% de superficie del AMM.

Mapa 3.5 División Geoestadística Municipal del AMM



Fuente: INEGI, *Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001*. México, 2002 (Mapa 2.1.3)

3.3.3 Orografía.

El paisaje del AMM es fundamentalmente montañoso y desde cualquier punto del área conurbada se puede observar alguna de sus elevaciones. Al sur, se distingue primeramente una pequeña loma alargada con alineación este-oeste, llamada precisamente Loma Larga. Detrás de ella, en segundo plano, con aproximadamente la misma alineación, aparece el macizo de la Sierra Madre Oriental que toma diferentes nombres en ciertas secciones, por ejemplo, Cerro El Mirador, Chipinque, La Huasteca, entre otros. Este macizo se extiende hacia el sur en una serie de sierras que se alinean paralelamente en el sentido antes señalados. Entre estas sierras existe una gran cantidad de valles y cañadas. Es aquí donde se encuentran los sitios de mayor altitud; por ejemplo, en la sierra El Tarillal, la altitud máxima es de 3,200 msnm, el cerro El Escorpión, de 3,140 msnm y la Sierra Urbano que presenta una altitud de 2,980 msnm (Mapa 3.6).

Al este se observa el Cerro de la Silla, que forma parte de la sierra del mismo nombre. Su alineación es nortesureste y su mayor altitud alcanza los 1,800 msnm. Entre éste y la Sierra Madre Oriental avanza el cañón El Huajuco con una longitud de casi 30Km, desde Monterrey hasta Allende. La orientación de las dos sierras es semejante a la dirección del flujo de los vientos húmedos que provienen del Golfo de México, originando un excelente microclima y bastante vegetación en esta zona.

Al oeste se encuentra el cerro de Las Mitras que, al igual que el Cerro de la Silla, forma parte de un macizo cuyo nombre es Sierra Las Mitras; su altitud máxima es de 2,040 msnm con una alineación este-noroeste; al noroeste se localiza el cerro El Topo con una elevación menor que los dos anteriores y con una altitud máxima de 1,140 msnm (Cuadro 3.10).

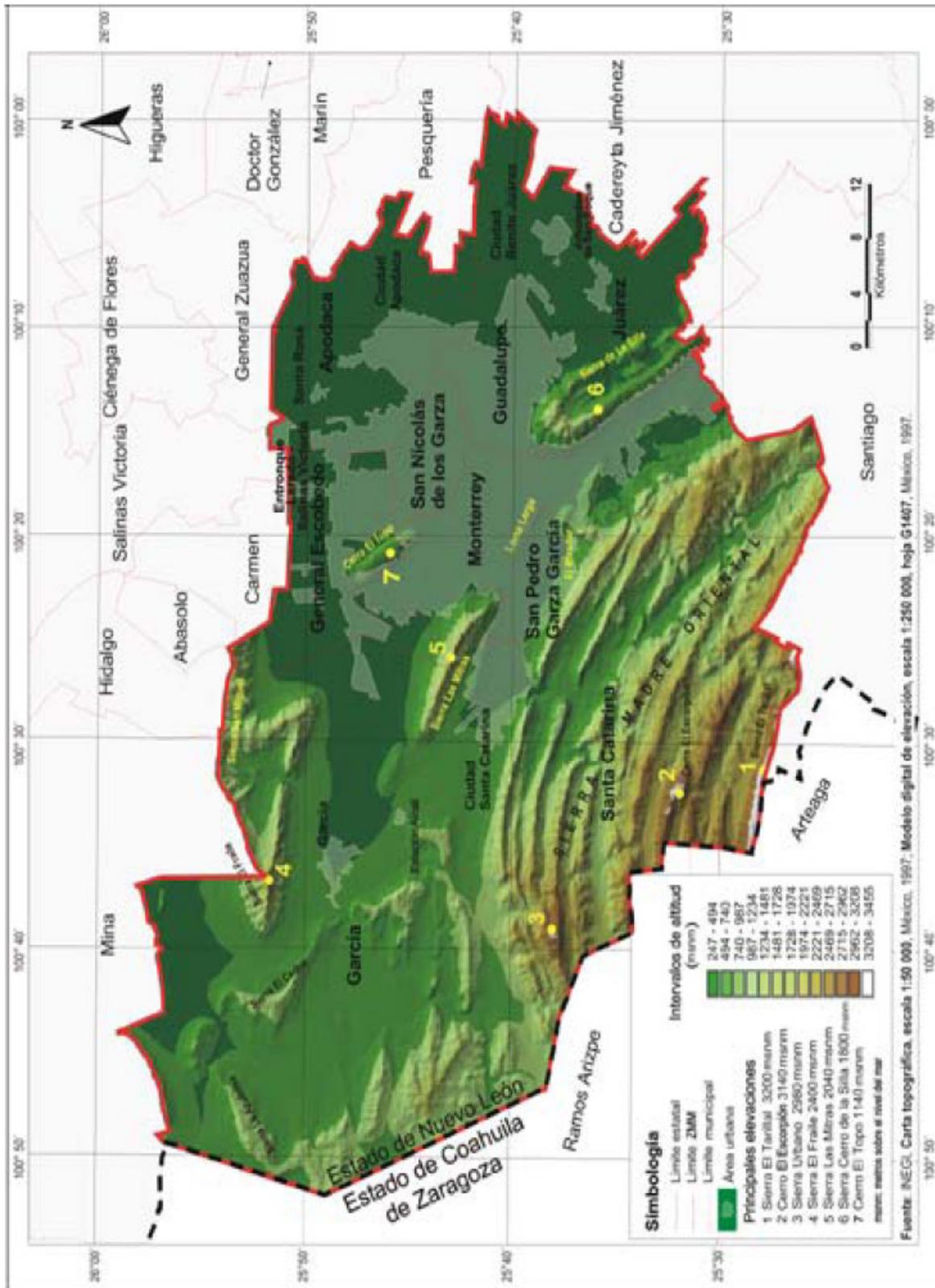
Cuadro 3.10 Elevaciones principales del AMM.

Nombre	Latitud norte		Longitud oeste		Altitud (msnm)
	Grados	Minutos	Grados	Minutos	
Sierra El Tarillal	25	27	100	31	3 200
Cerro El Escorpión	25	32	100	32	3 140
Sierra Urbano	25	38	100	39	2 980
Sierra Potreritos	25	28	100	24	2 760
Cerro El Maguayal	25	28	100	16	2 440
Sierra El Fraile	25	51	100	36	2 400
Sierra Las Mitras	25	43	100	26	2 040
Sierra Cerro de la Silla	25	36	100	14	1 800
Sierra La Azufrosa	25	56	100	39	1 570
Sierra El Central	25	49	100	39	1 570
Cerro El Topo	25	46	100	21	1 140

msnm: metros sobre el nivel del mar.

Fuente: INEGI, Carta Topográfica Escala 1:250 000, Monterrey G14-7. 2ª edición, México, 1997.

Mapa 3.6 Orografía del AMM.



Fuente: INEGI, *Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001*. México, 2002 (Mapa 2.1.5)

Más distante se encuentra la sierra denominada El Fraile, que se ubica al noroeste de la zona conurbada. Aquí se alcanzan hasta los 2,400 msnm, su aspecto es triangular y se distingue porque en ella se encuentran las Grutas de García. Finalmente, existen cerros aislados que están más retirados del continuo urbano, entre los que se citan: Cerro La Mota, Corral de los Bandidos y Sierra El Cedral.

3.3.4 Geología

La geología y la estratigrafía, estudian el origen y desarrollo del suelo y las rocas que lo forman. Dicho conocimiento permite identificar zonas con posibilidad de extracción de minerales o agua, así como áreas que tienen riesgo potencial por encontrarse en zonas de fallas activas.

Las rocas más antiguas de el AMM provienen de los mares que antiguamente cubrieron amplias porciones del noreste de México y que se vieron desplazados por los movimientos ascendentes de la masa continental, además del hundimiento gradual del Golfo de México que continúa hasta hoy; así también se provocó, en algunas partes, la formación de lagunas, donde la evaporación originó depósitos salinos (sulfatos de calcio). En el proceso geológico de formación del terreno más reciente, el Cuaternario, lo más importante ha sido la erosión de las partes elevadas de las sierras, que ocasiona el depósito de materiales en los valles.

El área incluye geoformas con valles, montañas plegadas y planicies; las dos primeras corresponden principalmente a la Sierra Madre Oriental y la última a la Llanura Costera del Golfo Norte, donde dominan las rocas de origen sedimentario. Se trata de depósitos cuyo origen estructural está constituido en gran parte por sedimentos de la Era Mesozoica, los cuales evolucionaron sobre un basamento de la Era Precámbrica.

Los procesos de formación del paisaje a lo largo de miles de años interactúan los factores climáticos y biológicos sobre el basamento rocoso, dan origen a las unidades de terreno (también llamadas “landforms”). Dichas unidades son la expresión superficial de las estructuras subterráneas y proveen información

concerniente a éstas. Tal expresión se refleja en una combinación característica de tipos de suelos, vegetación y fisiografía, en cada unidad del paisaje.

Las rocas representan, además, el sustrato sobre el cual se desarrollan las actividades humanas. El aprovechamiento del potencial económico de ciertos tipos de rocas en la región depende de poseer un conocimiento más profundo de las características mineralógicas de dichas rocas, así como de otros factores de tipos ecológico, económico y social.

Las sierras se encuentran generalmente erosionadas y con profundos cañones en donde se pueden constatar los pliegues sinclinales y anticlinales. Destacan las formas conocidas localmente como “potreros”, como los de García y Chico, pertenecientes a la sierras El Fraile y San Miguel y los de San Roque y la Boquilla, localizados en la Sierra de la Silla; también es característico el rasgo geológico-morfológico llamado “Curvatura de Monterrey” debido al cambio de dirección de la Sierra Madre Oriental de una dirección nor-noreste a otra este-oeste.

El relieve original de esta región consiste en pliegues y rupturas originados por procesos como la erosión fluvial y el intemperismo. El intemperismo químico ha dado lugar a formas como dolinas o cenotes y grutas que han favorecido las corrientes subterráneas. Entre estas formaciones destacan las grutas de García, localizadas en la sierra El Fraile [4], [15], [25] y [35].

3.3.4.1 Geohidrología.

De acuerdo al ordenamiento ecológico del Estado de Nuevo León realizado en 1985 por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), existen cinco grandes unidades geohidrológicas en la zona de estudio, mismas que se describen a continuación:

La primera unidad se localiza en la SMO, la Sierra Las Mitras, el Cerro El Fraile, la Sierra Papagayos y al Sur de la Sierra Picachos. Esta unidad está formada por depósitos estratificados de rocas del tipo de las calizas, lutitas y areniscas. Dado que están fuertemente plegadas y tienen una gran cantidad de fallas y fracturas, presentan niveles variables de permeabilidad. Los niveles de

permeabilidad alta se asocian a las calizas que, dada su posición estratigráfica y de altitud, funcionan como áreas de recarga de acuíferos. En los contactos entre rocas del tipo caliza y lutitas, brotan manantiales de aguas, cuya calidad va de tolerable a dulce. La recarga ocurre principalmente a través de las fallas y las fracturas.

La segunda unidad se ubica en los Valles de Allende, Cadereyta, y también hacia el Noroeste, Norte y Noreste de Monterrey. Está constituida por depósitos aluviales resultantes de los procesos erosivos de las sierras. Su composición es areno-arcillosa, con lentes de arcillas, arena y grava. Dado que los depósitos son el resultado del acarreo de materiales, poseen una compactación débil, sin cementación. Esto produce una permeabilidad cuyo nivel oscila entre moderado y alto. La recarga de los acuíferos ocurre por la superficie de absorción disponible.

La tercera unidad, ocurre en los estrechos valles intermontanos y las planicies. Posee depósitos areno-arcillosos y conglomerados. Estos tienen grados variables de compactación y cementación, por lo que su nivel de permeabilidad es moderado. La recarga de agua en esta zona también se realiza por superficie de absorción.

La cuarta unidad, se localiza al Sureste del AMM, en los Valles de Cadereyta y Montemorelos. Está constituida por rocas cretácicas (lutitas), compactadas, con fracturamiento moderado; así como por la asociación de lutitas areniscas con fracturamiento intenso. La permeabilidad de las primeras es moderada, mientras que la de las segundas es baja, debido a su alto contenido de arcillas. Dada su porosidad, pueden almacenar grandes cantidades de agua, pero su capacidad de transmisión es muy lenta.

La última se encuentra en áreas aisladas y estrechas de la SMO, así como en zonas más amplias en la planicie. Está constituida por depósitos de aluvión y conglomerado, cuya composición es arcillo-arenosa y gravosa. Estos depósitos rellenan las depresiones topográficas aluviales. Carecen de cementación o compactación y tienen un nivel bajo de permeabilidad. La recarga ocurre a través de contactos y planos de estratificación. El conocimiento de las propiedades y ubicación de estas unidades es útil para comprender el mecanismo de captación y

transporte de agua subterránea, así como para entender la capacidad de carga del terreno [15].

3.3.5 Edafología.

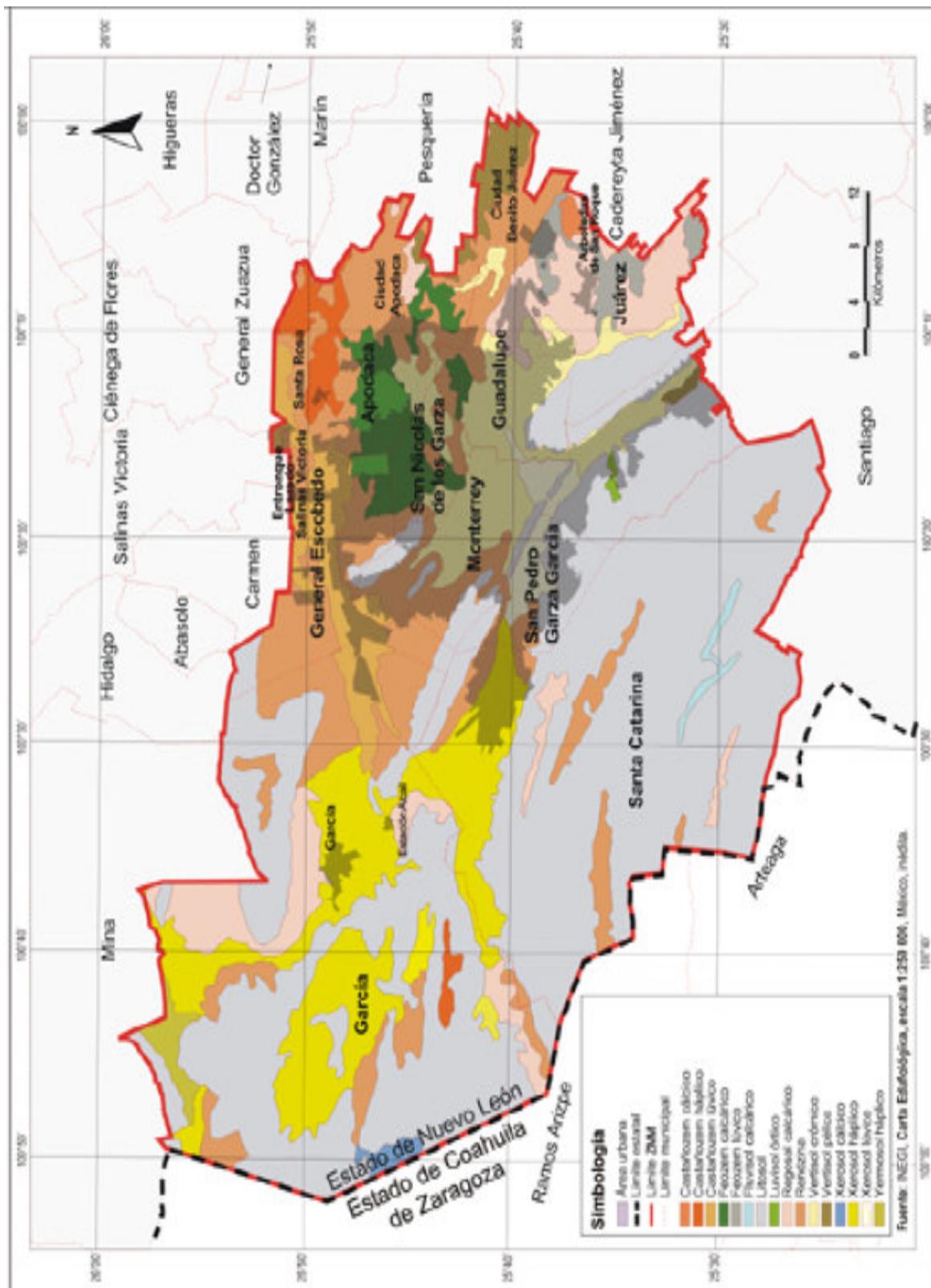
La edafología evalúa las características morfológicas, químicas y físicas del suelo, haciendo énfasis en su capacidad agronómica. Además, clasifica al suelo en tipos o unidades considerando dichas características. Los suelos del AMM son típicos de zonas semiáridas, asociados con vegetación desértica. El régimen climático donde se han formado se caracteriza por una intensa evapotranspiración, superior a la precipitación pluvial que cae durante la mayor parte del año. Debido a este fenómeno, el agua no alcanza a percolar a través de todo el perfil del suelo, así que el agua aprovechable para las plantas es mínima y está disponible por periodos cortos (a excepción de los sitios que se encuentran bajo riego). Los procesos erosivos intensos han adelgazado la capa superficial, resultando una limitada profundidad enraizable para la vegetación y con escasa disponibilidad de agua, además de que se adolece de capacidad de almacenamiento, por la variada litología con materiales gravosos y/o calizos muy gruesos y permeables al descender en el perfil. En el AMM se hacen presentes diez tipos de suelo, siendo cinco los principales (Mapa 3.7) [15] y [25].

Tabla 3.4 Tipos de suelo en el área de estudio y su extensión, 1978.

Nombre	Símbolo	Área (ha)
Acrisol	A	874
Cambisol	B	16,930
Chernozem	C	4,242
Rendzina	E	262,315
Feozem	H	119,114
Litosol	I	702,203
Fluvisol	J	36,257
Castañozem	K	139,744
Luvisol	L	16,102
Regosol	R	213,211
Vertisol	V	147,020
Xerosol	X	279,954
Yermosol	Y	84,405
Solonchak	Z	15,332
Agua	-	848

Fuente: Guajardo, A., Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002. (Tabla 2.9)

Mapa 3.7 Tipos de Suelos de suelos del AMM



Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Mapa 2.2.1)

Las condiciones naturales y el uso que se han dado a los suelos de la planicie propician una concentración excesiva de sales que culmina en la formación de horizontes salinos, pero además estos suelos presentan un perfil de carbonatos de calcio, formándose en algunos de ellos horizontes cálcicos y petrocálcicos. Los tipos de suelos de la Sierra Madre Oriental (SMO), se muestran en la Tabla 3.4.

3.3.5.1 Tipos de Suelos

Los suelos predominantes en la Provincia de la Sierra Madre Oriental (Figura 3.6) son:

Litsoles (I). Predominan en el AMM formando parte del relieve accidentado de sierras, lomeríos y laderas de los valles intermontanos. Estos suelos son de origen muy diverso en cuanto al clima y vegetación. Están caracterizados por presentar un perfil muy poco desarrollado, con profundidades que rara vez llegan a más de 10cm y con afloramientos importantes de la roca madre, en la región se asocian a suelos denominados Rendzinas. En el área de estudio, estos suelos ocupan 702,203ha (equivalentes al 34% de la superficie). Dependiendo de su posición topográfica, pendientes y cobertura vegetal pueden ser muy susceptibles a la erosión. Por ello, no son aptos para ningún tipo de cultivo y sólo pueden ser dedicados al pastoreo. No son aptos tampoco para el desarrollo urbano por su profundidad y posición fisiográfica [15], [18] y [25].

Xerosoles (X) segundo tipo de suelo en importancia, son suelos típicos de zonas áridas, como su nombre lo indica, con un horizonte pálido y contenido de materia orgánica de pobre a moderado. Las reacciones químicas y físicas que determinan la formación del horizonte de los Xerosoles son esencialmente las mismas que ocurren en suelos de climas más húmedos. Sin embargo, debido a la limitada disponibilidad de agua en el perfil de estos suelos, estas reacciones son menos intensas. Como resultado de esto, los Xerosoles “heredan” muchas de las características de la roca de donde se originan. Estos suelos presentan formación de capas de arcillas o cal. En el AMM existen cuatro subunidades en este tipo de suelo: X. Lúvico (XI), con subsuelo con acumulación de arcillas; X. Gypsico (Xg), con un horizonte de acumulación de yeso; X. Cálcico (Xk), con un horizonte de

acumulación de calcio; y X. Háplico (Xh), sin ninguna propiedad especial en el subsuelo.

Estos suelos ocupan 279,954ha (13%) del AMM. Bajo condiciones de disponibilidad de agua, estos suelos pueden tener una elevada productividad agrícola, y en algunos casos pueden presentar una excesiva salinidad o sodicidad, sobre todo en áreas destinadas a la agricultura de riego. Dependiendo de la subunidad del suelo pueden ser aptos para el desarrollo urbano (Xerosol Háplico) o no serlo por tener propiedades expansivas (Xerosol Lúvico) o corrosivas (Xerosol Gypsico o Xerosol Cálculo) [18] y [25].

El tercero en importancia son las **Rendzinas** (E). Se encuentran por encima de rocas duras de origen calcáreo; la capa superficial es algo gruesa, oscura y rica en materia orgánica y nutrientes. Este tipo de suelos, al igual que los litosoles, se encuentra en sierras, lomeríos y bajadas de la región. Son suelos inmaduros, someros, con profundidades que van de 15cm a 60cm. Poseen una capa abundante de materia orgánica derivada de la vegetación de tipo matorral y pastizal, no tienen subunidades y ocupan 262,315ha (equivalentes a 12% del área de estudio). Son suelos con alta fertilidad, aptos para actividades agropecuarias con cultivos de raíces someras, pero no aptos para el desarrollo urbano [18] y [25].

En cuarto lugar en superficie ocupada encontramos a los **Regosoles** (R), estos son suelos jóvenes o muy poco desarrollados en su estructura, formados a partir de material suelto, sin ningún horizonte de diagnóstico y dado su origen reciente son similares a la roca subyacente. Desde el punto de vista edafológico, se asocian a Litosoles y Rendzinas, y también son propios de zonas con relieve accidentado; generalmente ocurren en las laderas de todas las sierras mexicanas, presentando afloramientos de la roca madre, presentan diferentes profundidades, pero en lo general son someros. Su textura al tacto es variable y son muy parecidos a la roca que les dio origen. En el AMM ocurren dos de las tres subunidades de estos suelos: Regosol Calcárico (Rc), formado por materiales calcáricos con acumulaciones considerables de calcio a menos de 50cm. de profundidad y Regosol Eútrico (Re), sin ninguna propiedad especial, salvo las señaladas para el grupo. Estos suelos ocupan un total de 213,211ha, lo que representa el 10% de la

superficie del AMM. Su uso agrícola está condicionado a su profundidad y a la presencia de un horizonte pedregoso superficial [15], [18] y [25].

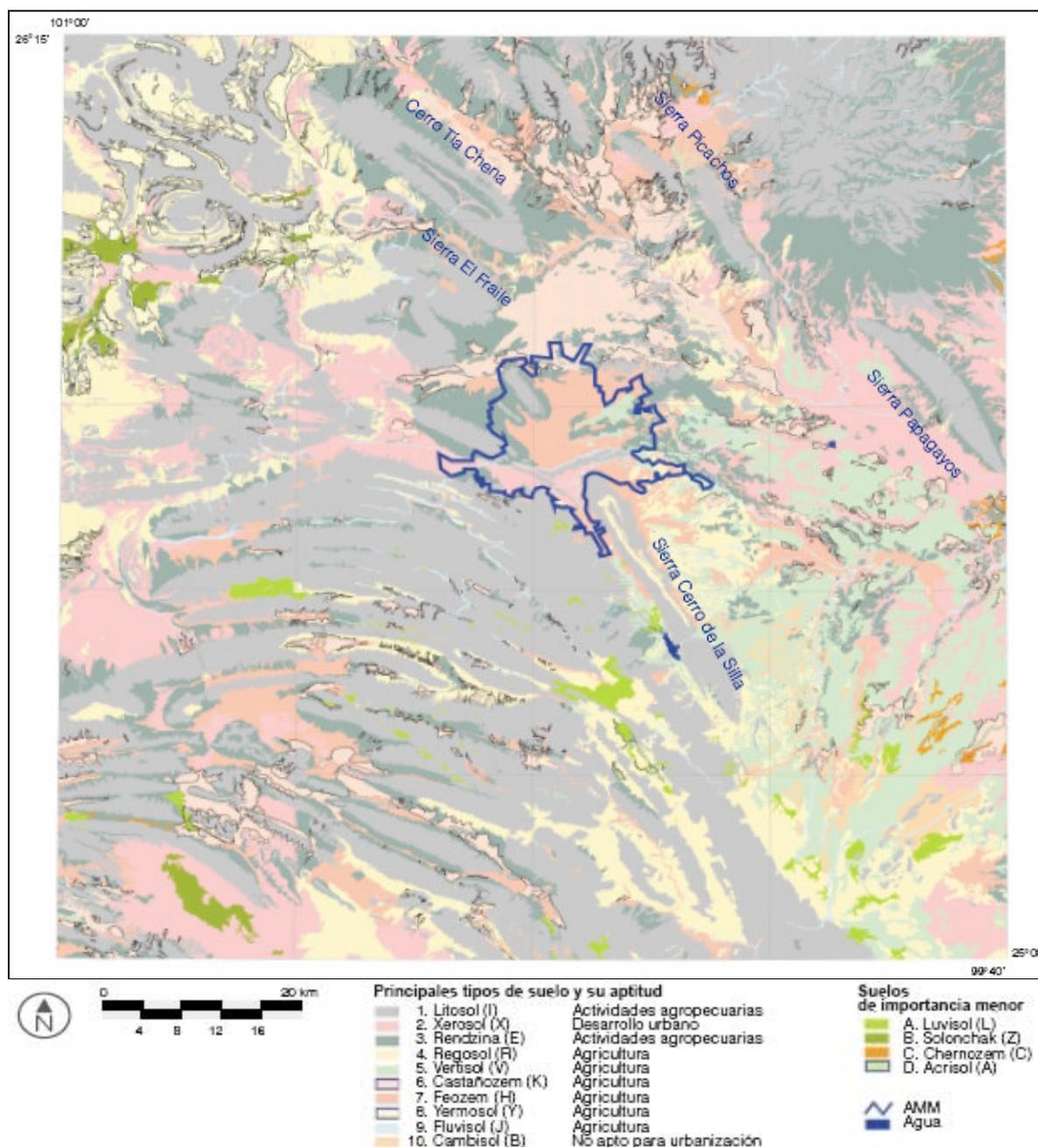


Figura 3.6 Edafología de la zona de estudio.
 Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1978.
 Elaborado por LABSIG.

El siguiente tipo de suelo son los **Vertisoles** (V), Se hacen presentes en los valles del sureste de el AMM. Son suelos de colores oscuros (negros o grises), con textura muy arcillosa al menos en las primeras capas, que se agrietan

notablemente cuando se secan (por la falta de agua durante la temporada de secas). Los subtipos presentes son el Vertisol Pélico y el Vertisol Crómico. En el área se encuentran las dos subtipos de este suelo: Vertisol Crómico (Vc), formado a partir de rocas calizas, y con un color pardo o rojizo y Vertisol Pélico (Vp), que son los vertisoles negros o grises cercanos a las costas. Ocupan 147,023ha (un 7% del área estudiada). Generalmente, son suelos profundos pero en algunos sitios se ve limitada dicha profundidad, por capas de roca o presencia de grava. Sometidos a un buen régimen de manejo del agua, son adecuados para una gran variedad de cultivos, mientras que bajo su estado natural son aptos para pastos. No son aptos para la construcción urbana, por sus características expansivas [15] y [18].

El resto de los suelos representa alrededor del 24% de la superficie metropolitana y son en orden de importancia los suelos tipo **Castañozem** (K), localizados al norte de la región. Son suelos con horizonte A melánico de color castaño o pardo oscuro (de donde proviene su nombre) y acumulación calcárea u horizontes cálcicos o gypsicos. La presencia del horizonte A rica en materia orgánica, y nutriente que puede presentar cal o yeso, refleja la extensión del sistema radical de pastos y pequeños arbustos dentro de este horizonte y la descomposición parcial de la materia orgánica en el horizonte. En el área de estudio ocurren las tres subunidades de este suelo: K. *Lúvico* (Kl), con un horizonte B susceptible a la salinización o a saturación de sodio si se riega con agua de mala calidad; K. *Cálcico* (Kk), caracterizado por la presencia de caliche en una capa de color claro de más de 15cm de espesor; y K. *Háplico* (Kh), con acumulación calcárea moderada debajo de horizonte A. Ocupan un total de 139,744ha (6% del área). Son de alta productividad agrícola sobre todo si son sometidos a riego.

El séptimo lugar de tipo de suelo **Feozem** (H), se distribuyen al este con características algo similares a los anteriores su extensión es de 119,114ha (5% de la superficie). Estos son suelos minerales con una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes; así como un horizonte A, de tipo melánico. En el área de estudio, ocurren las cuatro subunidades de este tipo de suelo, siendo éstas: H. *Gléyico* (Hg), con un horizonte gléyico (formación de una capa con hierro reducido bajo condiciones anaerobias, produciendo una matriz de colores azulados

a verde grisáceos); estos son suelos que periódicamente son inundados por encontrarse en depresiones topográficas; H. *Lúvico* (Hl), con acumulación de arcilla en el subsuelo; H. *Calcárico* (Hc), que tiene material calcáreo en todo el suelo; y H. *Háplico* (Hh), un suelo con las características descritas para los Feozem únicamente. Su productividad agrícola depende de la subunidad presente en el suelo; el Feozem Gléyico es apto para el cultivo de especies tolerantes a exceso de agua; el Feozem Lúvico es de fertilidad moderada y el Feozem Calcárico es de fertilidad alta y fácil manejo agrícola.

Los **Yermosoles** (Y) son el siguiente tipo de suelo de acuerdo a su importancia, se encuentran en el noroeste de la región, cubriendo 4% del área, abarcando 84,405 ha. Los Yermosoles son suelos de zonas áridas con un horizonte A pálido, se caracterizan por presentar una capa superficial delgada débilmente desarrollada, muy pobre en materia orgánica. Se diferencian de los Xerosoles por el pobre contenido de humus en la capa superficial. En la zona de estudio, ocurren cinco subunidades en este tipo de suelo: Y. *Gypsico* (Yg), con un horizonte de acumulación de yeso, en forma de cristales y un color generalmente rosado claro; Y. *Cálcico* (Yk), presentando acumulación de calcio en el subsuelo; Y. *Lúvico* (Yl), con un horizonte B argilúvico (con concentraciones de arcilla translocada, no muy definidas) y el Y. *Háplico* (Yh), que no posee ninguna propiedad especial, salvo las mencionadas para este tipo de suelos. Bajo condiciones de buena disponibilidad de agua y fertilización adecuada, son capaces de una productividad alta.

El siguiente tipo de suelo en importancia, son los **Fluvisoles** (J), ubicados en valles de las sierras del sur de la región, caracterizados por ser suelos jóvenes de origen aluvial, que los hace muy inestables. No presentan estructura de terrones, y debido a su origen sus suelos son muy poco desarrollados, y pueden tener un horizonte pálido. Ocupan un total de 36,257ha (1.7% del área), presentándose en las dos subunidades de este suelo: J. *Gléyico* (Jg), con un horizonte gléyico a más de 50cm de profundidad; y J. *Calcárico* (Jc), con alto contenido de cal en la superficie o por lo menos en alguna de las capas más superficiales del perfil. Son suelos relativamente fértiles (dependiendo de las condiciones climáticas). No son aptos para el desarrollo urbano debido a su posición fisiográfica, asociada a las

planicies de inundación de los ríos. Siguen en importancia los **Cambisoles** (B), éstos son suelos relativamente jóvenes, que en el subsuelo presentan una capa semejante a la roca madre, con horizonte A pálido (capa superficial de color claro y/o pobre en materia orgánica) o sómbrico (capa superficial blanda de color oscuro, rica en materia orgánica y pobre en nutrientes) y un horizonte B cámbico (capa ubicada bajo el horizonte A, con características incipientes de los otros horizontes B). Ocurren tres subunidades: C. Vértico (Bv), que presenta agrietamiento notable cuando se seca; C. Calcárico (Bk), con horizonte cálcico o uniformemente calcáreo; y C. Crómico (Bc), de color rojizo o pardo oscuro y alta capacidad de retención de nutrientes. Los cambisoles ocupan 16,930ha (0.8% del área). Su productividad depende de la subunidad del suelo; siendo el Cambisol Vértico de productividad media a buena, con problemas de manejo por sus características arcillosas-expansivas, no aptos para la construcción [15] y [18].

3.4 Variables relacionadas con el agua.

3.4.1 Hidrología.

La problemática ambiental del agua está relacionada con todas las funciones del medio natural y con el uso de este recurso por los seres humanos, incluye el agua de superficie como la del subsuelo, para su mejor aprovechamiento y manejo, es necesario saber de qué forma se utiliza y cómo se comporta naturalmente [25].

3.4.1.1 Hidrología Superficial.

El AMM pertenece a la Región VI Río Bravo (Mapa 3.8) con una precipitación media anual de 480mm [6], a su vez es parte de la Región Hidrológica No. 24 Bravo-Conchos de la cuenca Río Bravo-San Juan (RH24B) y una de las 37 regiones hidrológicas en que está dividido el país (Mapa 3.9 y Cuadro 3.11). Es la más importante del estado de Nuevo León y tiene una extensión aproximada de 20,212 Km². En esta cuenca el AMM encontró los recursos hídricos suficientes para satisfacer sus necesidades de suministro de agua hasta el año de 1984, en el que empezó a extraer agua de la Región 25, con la construcción de la Presa Cerro Prieto [15]. Asimismo, en el AMM, ésta fracción de la cuenca incluye parte de cinco

subcuencas: Río Salinas, Río San Juan, Río Pesquería, Río San Miguel y Río Monterrey (Mapa 3.10 y Cuadro 3.12) [25].

El AMM se caracteriza principalmente por una red de corrientes intermitentes constituida por la Topo Chico, Las Tinajas, Elizondo y El Sabinal, entre otras y sólo se puede considerar a algunos tramos de los ríos Pesquería, Santa Catarina y La Silla de carácter permanente. En la época de lluvias, regularmente durante los meses de septiembre y octubre (temporada de ciclones y huracanes), esta red toma vida llevando en los cauces de sus arroyos y ríos un considerable volumen de agua que alimenta a algunas presas del estado, como el Cuchillo y la presa Cerro Prieto localizadas fuera del AMM, y en tierras más bajas de los municipios de China y Linares Nuevo León, respectivamente. Estas presas junto con la Rodrigo Gómez (La Boca), revierten la condición natural de flujo por medio del bombeo y acueductos que suministran agua al AMM.

El río San Juan segundo afluente de importancia del Bravo nace al sureste del municipio de Monterrey, tiene como subcuencas intermedias a los ríos Pesquería, Salinas, San Miguel, Ramos, Pilón y Monterrey, así como la presa Rodrigo Gómez La Boca, algunos tramos de estos ríos conforman la hidrología superficial más importante de la región metropolitana.

Cuadro 3.11 Regiones Hidrológicas.

1 Baja California Noreste	14 Costa de Jalisco	27 Presidio San Pedro
2 Baja California Noroeste	15 Costa de Michoacán	28 Río Huicicila
3 Baja California Sureste	16 Costa de Oaxaca	29 Río Ameca
4 Baja California Suroeste	17 Costa grande Guerrero	30 Río Colorado
5 Balsas	18 El Salado	31 Sinaloa
6 BC Centro - Este	19 Grijalva-Usumacinta	32 Sn. Fdo.-Soto La Marina
7 BC Centro - Oeste	20 Huicicila	33 Sonora Norte
8 Centrales del Norte	21 Lerma Santiago	34 Sonora Sur
9 Coatzacoalcos	22 Mapimí	35 Unión Bravo-Conchos
10 Colima	23 Nazas-Aguanaval	36 Tehuantepec
11 Costa chica Guerrero	24 Norte de Veracruz	37 Yucatán Norte
12 Costa de Colima	25 Oaxaca	38 Yucatán Norte
13 Costa de Chiapas	26 Pánuco	39 Yucatán Oeste

Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia, Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002.

Cuadro 3.12 Regiones, cuencas y subcuencas hidrológicas del AMM.

Clave	Región	Clave	Cuenca	Clave	Subcuenca	Porcentaje de la superficie
RH24	Bravo-Conchos	B	Río Bravo-San Juan	b	Río San Juan	3,70
				c	Río Pesquería	38,88
				d	Río Salinas	15,74
				e	Río San Miguel	1,12
				f	Río Monterrey	40,56

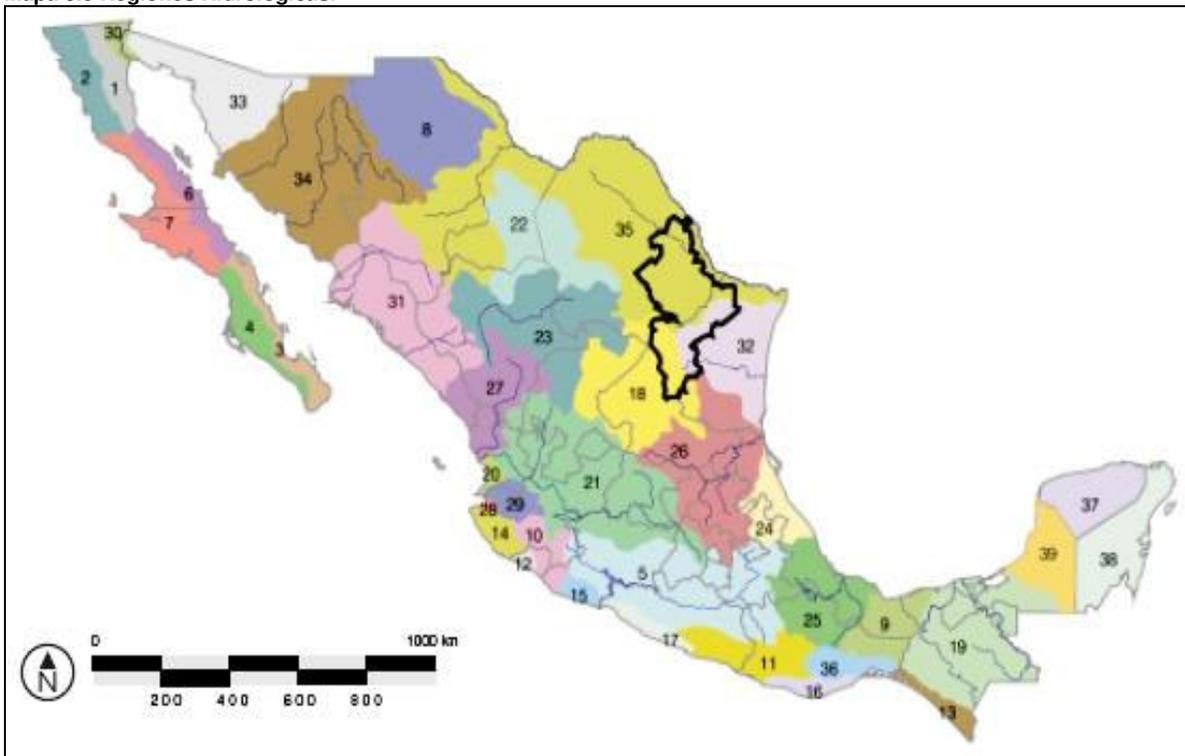
Fuente: INEGI, Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, escala 1: 250 000, México, 2003.

Mapa 3.8 Región Hidrológico-administrativas de la CNA.



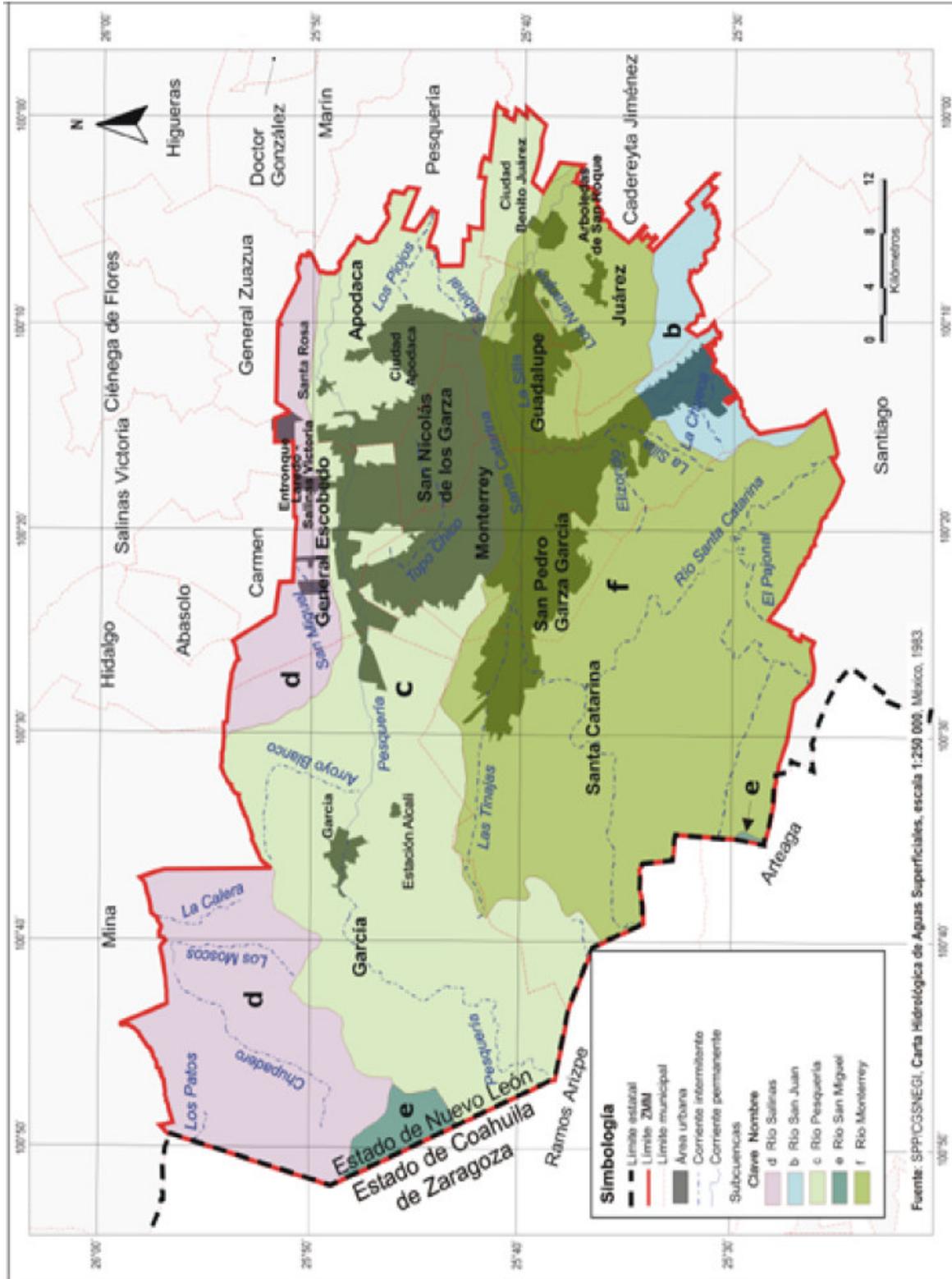
Fuente: Programa Hidráulico de Gran Visión, 2001-2025 de la Región VI Río Bravo.

Mapa 3.9 Regiones Hidrológicas.



Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA). *Estadísticas del Agua en México, 2005*. Primera edición, 2005. México; Guajardo, Alatorre Alicia. *Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo*. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002. Los nombres correspondientes a las Regiones Hidrológicas se localizan en el Cuadro 3.11

Mapa 3.10 Subcuencas hidrológicas del AMM.



Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Mapa 2.1.7)

El río San Juan tiene su origen en el arroyo La Chueca que recibe aportaciones de varios pequeños arroyos perennes que bajan de la Sierra Madre Oriental, desde altitudes del orden de 2000 a 2300 msnm. El arroyo La Chueca corre con dirección sureste hasta la presa La Boca y de aquí continúa con el nombre de río San Juan, cambiando su dirección hacia el noreste y recibiendo por la izquierda las aportaciones del río Santa Catarina y, por la derecha, las del río Ramos. Un poco más adelante pasa por el poblado de San Juan Vado para continuar hacia el oriente, confluyendo por la margen derecha con el arroyo Garrapatas, el río Pílon y el arroyo Mohinos. La confluencia de este último modifica su dirección hacia el nor-noreste, después de que recibe la aportación del mayor de sus afluentes, el río Pesquería, por la margen izquierda y sigue hacia el norte hasta Los Aldamas. En este punto cambia su rumbo hacia el oriente y después hacia el noreste, hasta la presa Marte R. Gómez, descarga en el Río Bravo un poco adelante de Ciudad Camargo [38].

Por su magnitud e importancia, el río San Juan ha sido objeto de estudios para determinar el grado de contaminación de sus aguas y algunos resultados de la investigación indican que el problema es de primer orden y requiere de control inmediato, esto es un reflejo del papel de ésta corriente como colector público de aguas residuales, causando contaminación visual, emitiendo malos olores y alterando la salud de los ecosistemas de la zona. Los principales focos contaminantes en orden de importancia son: productos químicos, población, industria papelera, de bebidas alcohólicas, de productos lácteos, alimentaria y petrolera. Estos núcleos industriales se localizan en las principales ciudades de Nuevo León y estados vecinos [38].

En la zona donde se ubica la ciudad de Monterrey, centro histórico de la conurbación que hoy conocemos como AMM, atraviesa el río Santa Catarina que es su corriente principal, nace en la sierra de San José de Boquillas, ramificación de la Sierra Madre Oriental, la cual cruza mediante cortes profundos siguiendo una dirección oeste-este hasta la Ciénega (municipio de Santiago), donde cambia su curso hacia el noroeste constituyendo el Cañón de Santa Catarina o Cañón de la Huasteca, continúa su cauce formando su propia planicie fluvial entre la Sierra

I. Acuíferos

El agua almacenada en los acuíferos del subsuelo metropolitano representa sólo el 38% del suministro de agua potable del AMM pero en los municipios del resto del estado alcanza hasta el 64%, equivalente a 890 litros por segundo [15] y ha sido una de sus principales fuentes de abastecimiento, no obstante la escasa disponibilidad de este recurso y su irregular distribución en la temporada de lluvias, influyen en una reducida recarga de los acuíferos [25].

En la zona de Monterrey se efectúa la explotación de agua subterránea más importante de la región hidrológica Río Bravo (Tabla 3.5), según la CNA en el Estado de Nuevo León se han identificado 21 acuíferos, de los cuales 7 se encuentran sobre-explotados, los campos Mina, Monterrey y Galeana extrajeron la misma cantidad de agua que la que recibieron; Sandía-Tanquecillos mostró una sobreexplotación del 5%; Buenos Aires es uno de los que aportan el mayor caudal que abastece al AMM, mostró una sobre-explotación del 67% y Durazno con el más alto nivel de sobre-explotación de dos veces y media la recarga (Figura 3.7), y Topo Chico son los que aportan el mayor caudal.

Tabla 3.5 Extracción y recarga de acuíferos en (millones de metros cúbicos/año)

Número	Nombre	Extracción Mm ³ /año	Recarga Mm ³ /año
1	AMM	60,0	60,0
2	Agua-Lagunas-Ramones	15,0	40,0
3	Buenos Aires	68,0	40,8
4	Bustamante	0,5	19,0
5	Cerritos	0,0	1,0
6	Citrícola N-S	224,0	440,0
7	Durazno	8,6	3,1
8	Dr. Arroyo-Mier y Noriega	1,5	69,0
9	Estacas y Gomas	0,0	16,8
10	Higueras	0,0	4,0
11	Huajuco	1,8	2,6
12	Jardín	0,0	4,0
13	Jaritas	0,0	2,1
14	Lampazos-Anáhuac	4,0	10,0
15	Mina	15,7	15,7
16	Natividad-Potosí-Raíces	64,0	73,0
17	Papagayos	0,5	1,2
18	Picachos	0,0	4,0
19	Sabinas-Parás	52,0	60,7
20	Sandía-Tanquecillos	54,0	51,0
21	Galeana	6,0	6,0
	Total	575,6	924,0

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA)

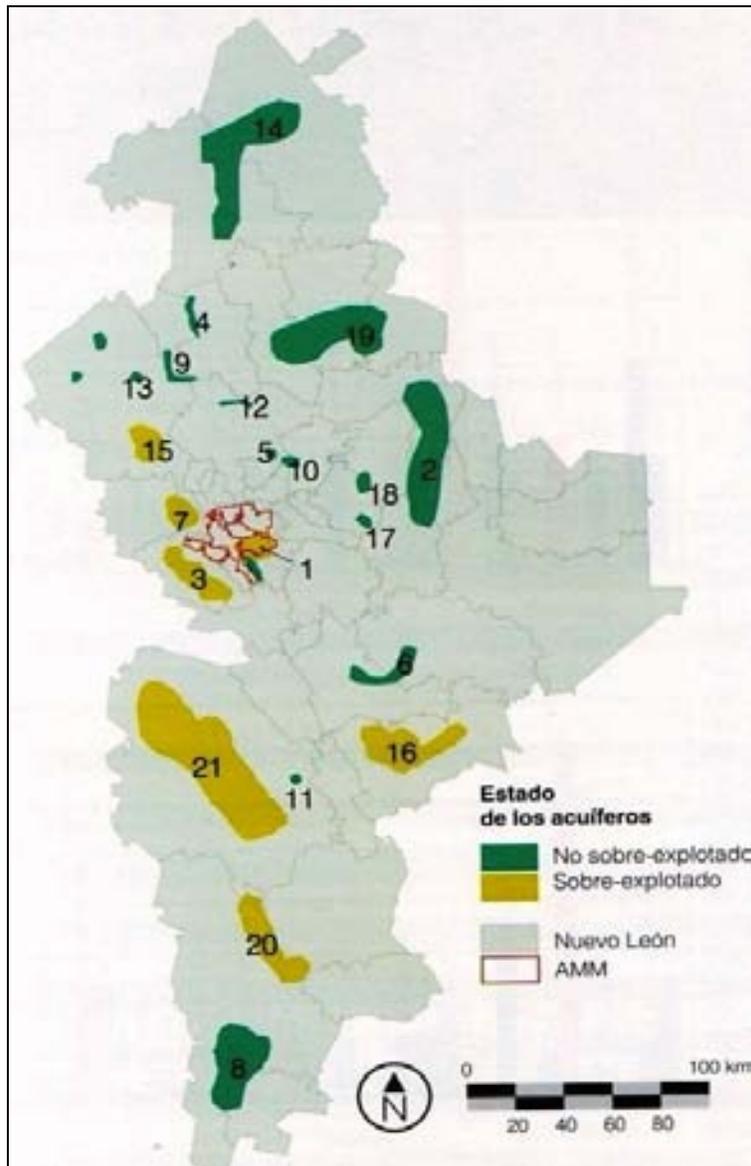
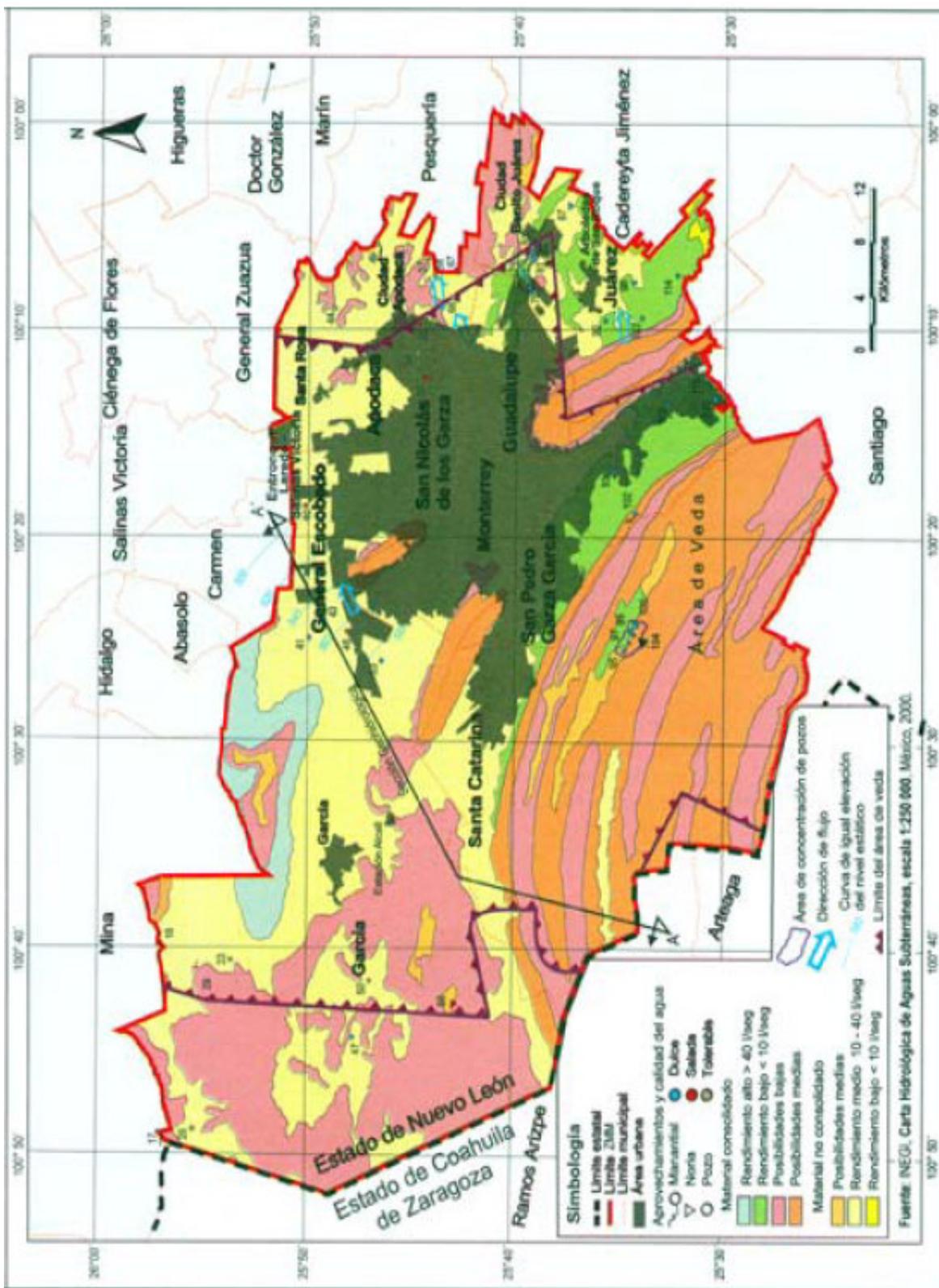


Figura 3.7 Ubicación de Acuíferos sobre-explotados
Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia, Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002.

El acuífero de la zona citrícola es el único que podría aumentar su nivel de extracción, ya que se utiliza el 50% de los 440 Mm³/año de recarga. Los demás acuíferos o tienen un rendimiento mínimo o se encuentran ya en el nivel óptimo de extracción (Tabla 3.5) [15].

En 1997 el INEGI realizó el muestreo de 44 puntos o aprovechamientos dentro de el AMM, de los cuales, 31 fueron pozos, 10 norias y tres manantiales. Un número importante de los pozos tienen una profundidad total entre 40m y 60m. En cambio, en el municipio Santa Catarina dos pozos tienen más de 1,300m.

Mapa 3.11 Hidrología Subterránea del AMM.



Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Mapa 2.1.8)

Casi el 70% de los pozos extraen menos de 5 lps, dos aportan más de 100 lps y sólo uno poco más de 200 lps; los tres manantiales estudiados rinden un total de 210 lps. El 45% de los sitios destina el agua a dos actividades diferentes, una de ellas es el uso doméstico y la otra varía entre abrevadero, riego y recreación; 12 aprovechamientos emplean alguna forma para potabilizar el agua [25].

La permeabilidad de las calizas de la zona metropolitana se debe a la presencia de una franja arrecifal que se desarrolló en las formaciones del Cretácico Inferior y que se ha encontrado al perforar los pozos de la parte occidental del área. En Monterrey la veda ha operado desde junio de 1951, esto quiere decir que a partir de ese año la superficie involucrada está limitada o restringida para la perforación de pozos, a fin de proteger las reservas de agua del subsuelo (Mapa 3.11) [20].

Los acuíferos del área se dividen en dos tipos: libres y confinados [20]. Los acuíferos en movimiento reciben la mayor parte de la recarga total de 6,600 Mm³ al año, puesto que captan más del 86% del total, quedando solamente 924 Mm³, que son los que se contabilizan en la Tabla 3.5 [15].

La información recabada de los niveles estáticos para los diversos aprovechamientos del agua subterránea y sus fluctuaciones, sirven para determinar la dirección de escurrimiento en el subsuelo del AMM, el volumen de extracción del agua subterránea es aproximadamente igual a la cantidad estimada que recarga los acuíferos del área, según la Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas (2000), escala 1:250,000, que identifica las zonas de explotación Topo Chico (19-22), Área Metropolitana (19-23), El Durazno (19-24) y Buenos Aires (19-25) como en equilibrio [20].

II. Extracción y Veda

Para tratar de mantener la extracción en niveles razonables, la CONAGUA ha dividido al estado en cuatro áreas de acuerdo a su grado de factibilidad para perforación de pozos. En los municipios del área I no hay problema para perforar; en los del área II solamente se puede perforar con autorización de la CNA; en los del área III se puede perforar para uso doméstico del agua y los correspondientes al área IV del AMM (Monterrey, Escobedo, San Nicolás, San Pedro, Guadalupe,

Santa Catarina, García) y parte de Galeana sólo es posible perforar si se cuenta con un permiso especial de la CNA.

La cartografía de aguas subterráneas [20], identificó materiales no consolidados y consolidados y sus diversos tipos de rendimiento para la región Monterrey-Salttillo, incluyendo además los polígonos correspondientes a las zonas de veda de perforación. Dentro del polígono de veda correspondiente al AMM se pueden identificar tres grandes zonas; la que se encuentra al Sureste de la ciudad ubicada entre el Cañón del Huajuco y la Sierra Madre y que continúa fuera de la zona de veda hasta Cadereyta y Allende, ésta corresponde a material consolidado de rendimiento medio (de 10 lps a 40 lps). Se encuentra después el material consolidado con posibilidades bajas y medias, que corresponde a la Sierra Madre y a la Sierra del Cerro de la Silla. La tercera zona se encuentra desde el Norponiente hasta el Nororiente y pertenece al grupo de materiales no consolidados con rendimientos medios (de 10 lps a 40 lps). Dispersas dentro del polígono de veda se encuentran pequeñas áreas que corresponden a material consolidado con rendimiento alto (superior a 40 lps). Una de ellas se sitúa en los alrededores de Villa Santiago con prolongaciones sobre el Cañón del Huajuco, correspondiente al cauce del Río La Chueca, desde Los Cristales hasta la Presa La Boca, la de mayor extensión se encuentra en todo el perímetro de la Sierra del Fraile y una última en el campo de pozos de Mina.

La principal dirección de flujo del acuífero en lo que corresponde al Valle del AMM es hacia el Este-Noreste. A un promedio de 20Km de distancia del límite del área de veda de Monterrey, al Suroeste se localiza el área de veda correspondiente a la Ciudad de Saltillo. La franja que se encuentra entre estas dos zonas la conforman la Sierra Madre, que se compone de materiales consolidados de posibilidades medias y bajas en la sierra y en la parte de los valles intermontanos de material no consolidado de rendimiento medio. Dentro de esa franja se encuentra la Sierra de Rancho Nuevo, con una superficie de 40Km² que se identificó como una unidad diferente del resto de la sierra debido a su alto rendimiento en material consolidado. Las calizas son el material más productivo en cuanto a extracción de agua, ya que tienen una alta permeabilidad, especialmente

en la parte Oeste, donde se encuentran los campos de perforación de Mina, Monterrey, Buenos Aires o La Huasteca, todos ellos usados para el suministro de agua potable del AMM.

En otros campos como Higueras, Papagayos y Picachos, las calizas no son tan permeables y por lo tanto, tan productivas. Actualmente la CNA, en conjunto con la Dirección de Agua Potable y Drenaje, se encuentran estudiando las calizas de la región para buscar nuevas fuentes de abastecimiento [15].

a) Acuífero Somero del Área Metropolitana de Monterrey (AMM)

El Valle de Monterrey se encuentra sobre dos acuíferos distintos: uno somero y otro profundo o de calizas. Ambos se encuentran separados entre sí por formaciones calcáreo-arcillosas.

El acuífero somero se encuentra constituido por paquetes de grava y la parte superior de la Familia Méndez. El espesor de las gravas va desde 8m hasta 30m. Actúa como confinado o semiconfinado, dependiendo de la existencia de lutitas o de lentes de arcilla (que estén recubriendo las gravas por donde circula el agua). Puede actuar como acuífero libre cuando no exista ninguna capa confinante que lo cubra, por lo que algunos autores lo clasifican como acuífero libre. Su permeabilidad es alta, aunque las gravas reducen su permeabilidad al estar asociadas con limos, como sucede con frecuencia en las cercanías de paleocauces.

El acuífero somero se encuentra sobre-explotado desde hace mucho tiempo. Una evidencia de ello es que en la época de la fundación de la ciudad y hasta el periodo de 1791 a 1865 los Manantiales de Santa Lucía corrían superficialmente actualmente se han convertido en manantiales subterráneos cuyas profundidades estáticas varían entre 13m y 14m. Otro indicio de sobre-explotación es la existencia de pequeñas grutas, de distribución irregular, especialmente debajo del Centro de Monterrey, que fueron detectadas durante la construcción de la Línea II del Metro y cuyo origen fue el abatimiento del nivel freático.

El acuífero somero es directamente dependiente de la cantidad de precipitaciones en las áreas de recarga. Por ejemplo en 1988, año de lluvias abundantes en Topo Chico, (758 mm/año) el nivel dinámico más somero de los

pozos de la zona se encontró a 8.7m bajo la superficie, mientras que en 1990, cuando la lluvia fue más cercana al promedio típico anual (411mm/año), el nivel dinámico más profundo fue de 25.3m bajo la superficie. Además la sobre-explotación, la deforestación y el incremento de zonas pavimentadas también han alterado la recarga de los acuíferos. La remoción de árboles y matorrales impide que el agua sea captada por la vegetación e infiltrada posteriormente. Se estima que el 90% de la precipitación pluvial escurre torrencialmente sobre superficies impermeables como el asfalto y el concreto, en contraste con las zonas cubiertas con vegetación en las que los escurrimientos alcanzan 30% a 40%. Cuando se favorece un rápido escurrimiento del agua hacia los cauces naturales se originan inundaciones por desbordamiento, se produce un aumento en la erosión, debido a la mayor velocidad del agua escurrida y se pierde el agua que anteriormente se infiltraba. Como consecuencia, el agua que antes recargaba a los acuíferos escurre superficialmente y se evapora con rapidez o se filtra parcialmente en sitios más alejados.

La mayoría de los pozos de la batería Monterrey-Topo Chico corresponden al acuífero somero, y la cantidad de agua que proporcionan es muy abundante, puesto que están asociados a los antiguos meandros del Santa Catarina (de alta permeabilidad). Es interesante señalar que el mismo tipo de unidad geológica que posee el acuífero del Valle de Monterrey se continúa hasta el Cerro del Fraile, por lo que es posible que se pudiese encontrar un acuífero similar en dicha área. Una ventaja adicional de las aguas del acuífero somero es que por su composición química son aguas poco agresivas al concreto [15].

b) Acuífero Profundo del AMM

El acuífero profundo del AMM, se encuentra localizado en las formaciones calcáreas Cupido y Aurora del Cretácico, por lo que presenta alta conductividad hidráulica y transmisividad. El agua que circula por las calizas de este acuífero lo hace por oquedades kársticas y por zonas de fracturamiento y fallamiento. Se encuentra confinado por las formaciones Cuesta del Cura, Agua Nueva, San Felipe y roca sana de la formación Méndez. Su separación del acuífero somero se debe a que entre ellos existen capas de suelo impermeables por su contenido de limo

arcilla. No se conoce con claridad cuál es la capacidad total de extracción que se puede obtener de este acuífero. En febrero de 2000, la extracción en los pozos del Sistema Monterrey IV, fue de 840,000 m³/mes, mientras que la del acuífero somero alcanzó 723,000 m³/mes [15].

c) Otros Acuíferos que Suministran al AMM

Debido a la creciente demanda, el AMM ha recurrido a lo largo de los años a importar agua de otros acuíferos además de los que se encuentran bajo la zona urbana.

Acuífero de Mina. Acuífero de tipo confinado, con espesores promedios que van de 150 m a 235 m. Se encuentra en las calizas Cupido y Aurora, con confinamiento de la formación de La Peña. Se le estima un área de recarga de 150 Km². Los volúmenes de recarga varían significativamente de acuerdo a la precipitación y pueden ser desde 2.61 Mm³ (en 1962) hasta 48.57 Mm³ (en 1958). La gran variabilidad de la recarga afecta directamente el caudal promedio que puede proporcionar cada fuente. El acuífero de Mina inició con volúmenes de extracción de 6.5 Mm³ en 1958, hasta un máximo de 34.7 Mm³ en 1974. En la actualidad se le extraen 22.89 Mm³ al año. Entre 1985 y 1988 se abatió tanto que se dejó de explotar a toda su capacidad para permitir su recuperación. De acuerdo a los expertos, la capacidad potencial de estos acuíferos es de 2,200 lps. Su explotación en 1988 era de 430 lps y para 1999, su extracción media mensual fue de 644 lps. Este acuífero consta de 28 pozos profundos que van desde los 200m hasta los 1.600m de profundidad.

Acuífero Huasteca. Alimenta el Sistema Santa Catarina o Campo de Pozos Buenos Aires y se le conoce indistintamente con todos los nombres anteriores, debido a los distintos puntos de extracción. Consta de tres acuíferos interconectados por sus formaciones, que son:

Acuífero Cretácico. Formado por las calizas Cupido hasta la Cuesta del Cura. Es de tipo confinado con una zona de recarga de aproximadamente 450Km². El cálculo de recarga anual (fórmula de Knissel) es de 49 Mm³ (1956-1989). Se explota a través de pozos profundos (de 750 msnm a 980 msnm), ubicados en el Cañón de La Huasteca.

Acuífero de Aluvión. Formado con las gravas y arenas del cauce del Río Santa Catarina. El volumen de recarga (con un coeficiente de infiltración del 8%), se calcula en 14.8 Mm³ (1956-1989) y su área tributaria es de 622.4Km². Se aprovecha a través de la Galería Huasteca.

Acuífero Jurásico. Ubicado en el Anticlinal de los Muertos. Manifiesta una influencia directa del acuífero de aluvión. Se explota mediante 4 pozos de menor profundidad (721msnm a 747msnm).

El sistema de extracción está constituido en total por dos galerías: Buenos Aires 4 y la Huasteca, además de 44 pozos (en calizas). Las profundidades de éstos varían desde 150m hasta 1300m. Las galerías que inicialmente suministraban por gravedad hasta 2500 lps, se abatieron totalmente en 1981. Los pozos, a los que se les calculó una producción potencial de 2500 lps, en 1988 producían solamente la mitad. En febrero de 2000, operaban en este sistema sólo 14 pozos y la galería Huasteca, con una aportación mensual de casi 2 m³/seg.

Acuífero Santiago. Cuenta con dos túneles: el de San Francisco (con una capacidad estacional variable de 450 hasta 1800 lps) y el de Cola de Caballo (cuya capacidad varía de 250 a 1,500 lps). En esta captación descargan los excedentes de los acuíferos de la Sierra Madre, en la zona de contacto entre las calizas del Cretácico Inferior y los sedimentos poco permeables del Cretácico Superior. Un efecto negativo sobre la zona de extracción fue el agotamiento de los manantiales de San Francisco, al captar las aguas subterráneas, mediante el Socavón del mismo nombre. La aportación de este acuífero en el 2000 es de 0.5 m³/seg [15].

CAPÍTULO 4 FUENTES DE ABASTECIMIENTO E INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA.

4.1 Antecedentes.

El Valle de Monterrey se caracteriza por ser una región semiárida, que en la parte norte registra precipitaciones entre 300mm y 500mm en promedio anual, mientras que el promedio nacional oscila entre los 700mm y 750mm anuales, lo que explica la escasez de agua en la región y su dependencia de fuentes externas.

El primer sistema moderno de agua potable y alcantarillado de Monterrey sirvió con relativa eficiencia hasta 1940, con el crecimiento demográfico la capacidad de las instalaciones fue insuficiente para abastecer la demanda de la ciudad, además la compañía concesionaria no previó ampliaciones o nuevas obras [25].

El abastecimiento de agua potable al área metropolitana de Monterrey es el mayor problema que ha enfrentado en los últimos años; debido al clima extremo, el crecimiento de la población, el abatimiento de las fuentes de abasto cercanas, el índice de escurrimiento bajo y por tanto el escaso número de almacenamientos, el alto porcentaje de fugas en las redes, y el desperdicio de las aguas usadas no utilizadas para fines industriales, en esta área son escasos los recursos hídricos [36].

Para satisfacer las demandas de consumo de este recurso se ha llevado a cabo la explotación de agua subterránea más importante en los campos de Mina, Monterrey, Buenos Aires, Topo Chico y La Huasteca.

La búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento de agua para el AMM continuó. En el decenio de los noventa se implementó el Sistema Integral Monterrey IV, denominado el Reto de Fin de Siglo por la magnitud de la obra que se requería para cubrir la demanda de la urbe. En esa década, se registraba un déficit de 2,500 lps. Para cubrir ese faltante se requerían 5,000 lps adicionales. Enfrentar ese nuevo reto exigía la construcción de obras de captación, almacenamiento, conducción y distribución para aprovechar el agua de nuevas fuentes de abastecimiento, cada vez más lejanas. En ese contexto fueron analizadas varias opciones, algunas localizadas hasta 250Km de distancia de Monterrey [25].

4.2 Infraestructura hidráulica actual.

El Suministro de agua potable para el área metropolitana de Monterrey (AMM) depende de acuíferos subterráneos (aprovechado por medio de pozos, túneles de captación, galería y manantiales), así como de dos presas: La Boca y Cerro Prieto (Cuadro 4.1). A una distancia aproximada de 20Km hacia el suroeste del área metropolitana, en el municipio de Santa Catarina, se encuentra un campo de 27 pozos profundos denominado Buenos Aires, al pie de la Sierra Madre Oriental. En ese mismo sitio se localizan las galerías Morteros y Huasteca. El agua que se obtiene de esta zona es conducida a través de dos acueductos de acero y concreto preesforzado de 30 y 48 pulgadas de diámetro.

Hacia el noroeste, a una distancia de 40Km, existe un campo de 25 pozos profundos en el municipio de Mina, cuya agua se envía a través de dos líneas de conducción de acero y concreto preesforzado de 36 y 48 pulgadas de diámetro, respectivamente. Cabe señalar que parte del agua de estos acueductos abastece a las poblaciones de Mina, Hidalgo, Abasolo, El Carmen y Salinas Victoria [13].

Las fuentes de abastecimiento de agua potable para el AMM proviene tanto de fuentes subterráneas (aprovechado por pozos, túneles de captación, galerías y manantiales) como de fuentes superficiales (con tres presas de almacenamiento: La Boca, Cerro Prieto y El Cuchillo) [13]. En el año 2000, 44% del agua suministrada provino del subsuelo y el resto de fuentes superficiales (Cuadro 4.1).

Las fuentes que aportan el mayor volumen de agua subterránea a la ciudad son los acuíferos confinados o cautivos que se caracterizan por una permeabilidad notoriamente baja. Los acuíferos y pozos más importantes se localizan en el cañón de la Huasteca y en los municipios de Mina y Monterrey (Mapa 4.1).

En el municipio de Santa Catarina a 20Km hacia el suroeste, se encuentran 27 pozos en el campo denominado Buenos Aires o Huasteca, al pie de la Sierra Madre Oriental. En ese mismo sitio se localizan las galerías Morteros y Huasteca. El agua que se obtiene de esa zona es conducida a través de dos acueductos de acero y concreto preesforzado de 30 pulgadas y 48 pulgadas de diámetro [13].

Cuadro 4.1 Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable del AMM, 1995 y 2000

Fuentes de abastecimiento de agua potable	1995		2000		2005	
	Aportación		Aportación		Aportación	
	m ³ /seg.	%	m ³ /seg.	%	m ³ /seg.	%
ZMM	8,86	100,00	10,07	100,00	10,92	100,00
Subterráneas	3,67	41,42	4,44	44,09	5,60	51,28
Pozos	2,50	28,22	3,41	33,86	2,92	26,74
Huasteca	1,31	14,79	1,62	16,09	1,60	14,65
Mina	0,64	7,22	0,94	9,33	1,00	9,16
Monterrey	0,55	6,21	0,85	8,44	0,32	2,93
Galerías	1,08	12,19	0,89	8,84	2,52	23,08
Huasteca	0,15	1,69	0,19	1,89	1,03	9,43
Cola de Caballo	0,28	3,16	0,17	1,69	0,54	4,95
San Francisco	0,65	7,34	0,53	5,26	0,95	8,70
Manantiales	0,09	1,02	0,14	1,39	0,16	1,47
Estanzuela	0,09	1,02	0,11	1,09	0,16	1,47
Elizondo	0,00	0,00	0,03	0,30	0,00	0,00
Superficiales	5,19	58,58	5,63	55,91	5,32	48,72
Presas	5,19	58,58	5,63	55,91	5,32	48,72
Rodrigo Gómez (La Boca)	1,72	19,41	0,50	4,97	0,24	2,20
Jose L. Portillo (Cerro Prieto)	1,29	14,56	2,25	22,34	2,83	25,92
El Cuchillo-Solidaridad	2,18	24,60	2,88	28,60	2,25	20,60

Fuente: Gobierno del Estado de Nuevo León, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADEM), Institución Pública Descentralizada, 2007.

Hacia el noroeste, a una distancia de 40Km de Monterrey, en el municipio Mina (no metropolitano) existe un campo con 25 pozos profundos desde donde el agua es enviada a la ciudad a través de dos líneas de conducción de acero y concreto reforzado de 36 y 48 pulgadas de diámetro, respectivamente. Cabe señalar que parte del agua de estos acueductos abastece a las poblaciones de Mina, Hidalgo, Abasolo, El Carmen y Salinas Victoria [13]. En 1998 existían 85 pozos y para el año 2000 se incrementó a 90; sin embargo, el volumen extraído se mantiene más o menos constante (240 mil m³ anuales) (Cuadro 4.2). Por otra parte, el agua superficial que abastece a la metrópoli proviene de tres presas localizadas fuera del AMM, por lo que son consideradas como fuentes externas (Mapa 4.1).

Cuadro 4.2 Fuentes de Abastecimiento y volúmenes promedio diarios de extracción de Agua según tipo del AMM, 1998 y 2000.

	Fuentes de abastecimiento ¹				Volumen promedio diario de extracción (Miles de m ³ /día)			
	Total	Pozo profundo	Manantial	Otras ²	Total	Pozo profundo	Manantial	Otras ²
	1998 ³	118	85	2	31	810.900	241.400	12.000
1999 ³	117	84	2	31	821.600	240.300	12.400	568.900
2000 ³	123	90	2	31	777.335	240.950	14.080	522.305

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.2.8)

El sistema Huasteca se encuentra al pie de la Sierra Madre Oriental, en el municipio de García. Rumbo al sureste a 38Km en el municipio de Santiago se

localizan tres túneles de captación (Mapa 4.1), uno conocido como el Socavón de San Francisco, puesto en operación en 1959 y otros dos denominados Cola de Caballo I y II, que se concluyeron en 1961 (uno de ellos se amplió en 1970) [13].

4.2.1 Presas.

Las presas proporcionan el mayor porcentaje de agua potable a la red. La **Presa José López Portillo o Cerro Prieto** localizada en el municipio de Linares, se encuentra en la región hidrológica No. 25 a 133Km al sureste del Área Metropolitana de Monterrey sobre el Río Pablillo. Se puso en operación en 1984, posee un área máxima de inundación de 3,300ha y con una capacidad total de almacenamiento de 393 millones de metros cúbicos (Mm^3). Drena un área de 1,610 Km^2 , cuenta con una capacidad útil de 122 Mm^3 que representan casi la mitad de su capacidad máxima y de los cuales, casi la mitad (57.3 Mm^3) se destina al uso doméstico. Durante el periodo de 1985 a 1989, su producción inicial fue de 100 lps y su producción media anual fue de 2,225 lps. Se encuentra conectada al tanque San Roque (de la planta potabilizadora), el agua se envía a Monterrey a través de un acueducto de concreto preesforzado de 84 pulgadas (2.13m) de diámetro, utilizando seis grandes estaciones de bombeo con una potencia de 36000 hp., que elevan el agua desde la presa a casi 600 msnm en que se encuentra la ciudad

La **Presa Rodrigo Gómez o La Boca**, construida en 1956, situada en la población El Cercado del municipio de Santiago es la más cercana y la de menor capacidad, posee un área de inundación de 90ha. Su primera etapa fue construida en 1957 y le permitía almacenar hasta 2 Mm^3 de agua de lluvia y del Arroyo La Chueca, un año después se construyó otra porción de la presa que le permitió almacenar 41 Mm^3 y en el periodo de 1983 a 1984, se aumentó su capacidad de almacenamiento hasta 43.4 Mm^3 de agua con una capacidad útil de 32.3 Mm^3 . Esta presa originalmente estaba destinada para fines industriales. Debido a su cercanía con el AMM se destina casi en su totalidad al uso doméstico de la metrópoli. El agua se bombea de la planta potabilizadora al acueducto Santiago-Monterrey, para interconectarse con el agua de los túneles y conducirse por gravedad a Monterrey.

La más grande de ellas es la **Presa El Cuchillo - Solidaridad**, ubicada en el municipio de China, Nuevo León a 102Km. del AMM, drena una cuenca de 8,924 Km², almacena las aguas provenientes del Río San Juan, que anteriormente fluían hacia la Presa Marte R. Gómez o El Azúcar del Estado de Tamaulipas. Es la presa más grande del país para suministro de agua potable, aunque también se planeó para control de avenidas, tales como las ocasionadas por los Huracanes Beulah y Gilberto y para el desarrollo regional, ya que se le visualizó como un lugar con atractivo turístico y ecológico a mediano plazo. Su área de embalse es de 18,092ha, su capacidad máxima de almacenamiento es de 1,784 Mm³ de agua con una capacidad útil de 328.9 Mm³, de los cuales poco más de la cuarta parte es destinada a uso doméstico y el resto a irrigación (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3 Capacidad de almacenamiento y volumen anual de Agua utilizado según presa y municipio de localización del AMM, 2000.

Presa	Municipio de localización	Distancia al AMM (km)	Capacidad total de almacenamiento ¹ (Mm ³)	Capacidad útil de almacenamiento (Mm ³)	Volumen anual para uso doméstico (Mm ³)
Total			2 220.4	483.8	180.9
El Cuchillo - Solidaridad	China	102	1 784.0	328.9	93.0
José López Portillo (Cerro Prieto)	Linares	133	393.0	122.6	57.3
Rodrigo Gómez (La Boca)	Santiago	38	43.4	32.3	30.6

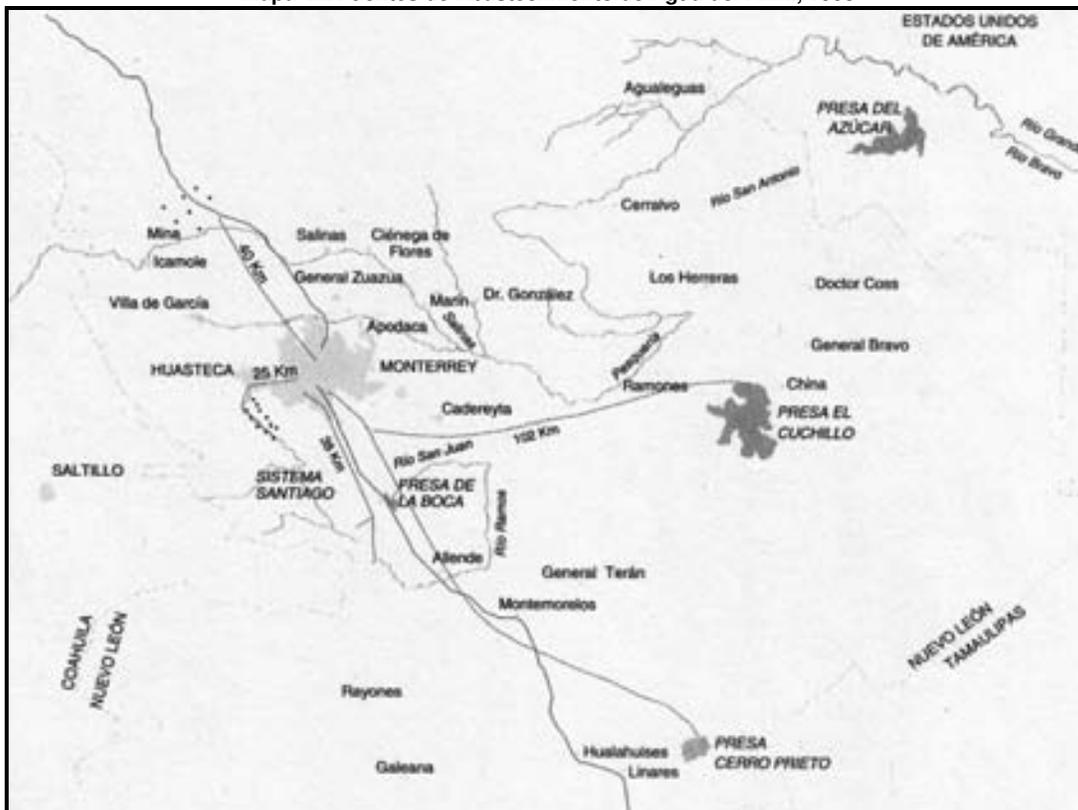
¹ Volumen que puede almacenar una presa al nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME).
Fuente: Anuario Estadístico del Estado de Nuevo León, México, 2001.

Su construcción planteó una serie de negociaciones complicadas con los agricultores del distrito de riego 026 de Tamaulipas, que era uno de los más fértiles de dicho estado, con rendimientos anuales entre 4.5 ton/ha y 7.0 ton/ha de maíz. El problema de esta presa es que la demanda para los diversos usos ha excedido la capacidad mensual captada, principalmente en los meses con altas temperaturas. Originalmente fue construida para aprovechar hasta 10 m³/s de agua (en dos etapas) para abastecimiento del AMM y para mejorar los distritos de riego No. 26 en Tamaulipas y No. 31 en Nuevo León, además de regular las avenidas extraordinarias que afectaban a 50,000 habitantes y a 60,000ha de cultivos.

Para la primera etapa de El Cuchillo se fijó el nivel de trasvase en 315 Mm³ y en 516 Mm³ para la segunda etapa. El trasvase se hará cuando se excedan estos

niveles de almacenamiento y La Presa El Azúcar tenga un almacenamiento inferior a 700 Mm³. Cuando no se requiera operar El Cuchillo a 5 m³/s, se considerarán trasvases no mayores a 315 Mm³.

Mapa 4.2 Fuentes de Abastecimiento de Agua del AMM, 1993



Fuente: Garza, Villarreal Gustavo, *Atlas de Monterrey*, Gobierno del Estado de Nuevo León/Universidad Autónoma de Nuevo León/Instituto de Estudios Urbanos de Nuevo León/El Colegio de México, México, 1995.

La capacidad conjunta de almacenamiento de las presas destinadas a abastecer de agua potable al AMM es de aproximadamente 2,200 Mm³, pero históricamente su almacenamiento real ha sido mucho menor [15].

La Presa Cerro Prieto, por ejemplo, solamente a finales de 1988 y principios de 1989 estuvo al 90% de su capacidad, y desde 1984 que empezó a operar, se ha mantenido entre el 25% y el 60% de su capacidad. Con la Presa El Cuchillo sucede algo similar, ya que su almacenamiento máximo ha sido aproximadamente del 28% de su capacidad, llegando a mediados del 2000 a ser de sólo el 11%.

Además de su baja captación, las presas enfrentan un inconveniente adicional, el clima que prevalece en la Zona Noreste del país, ocasiona una pérdida importante del agua que almacenan debido a que los niveles de evaporación son

muy altos. Como ejemplo, La Presa El Azúcar, en Tamaulipas, cuya capacidad es de 1,081 Mm³, obtuvo en el periodo de 1944 a 1974 una entrada total de 1,106 Mm³; una evaporación de 440 Mm³ y derrames por 370 Mm³. La evaporación supera a los derrames con 70 Mm³ y representa el 40% del total recibido en el periodo (aun restando los derrames de la entrada total).

La diferencia entre el almacenamiento de La Presa El Cuchillo y su evaporación, indica que en el 43% de los meses observados (1994-1999), el balance entre almacenamiento y evaporación ha sido negativo (Tabla 4.1). Es decir, que en los meses secos se evapora una buena parte del agua que se almacenó durante la época de lluvias. La evaporación se mantiene entre el 30% y el 50% del valor de los escurrimientos. En el caso de La Presa El Cuchillo, los meses más críticos por su alta evaporación son febrero, marzo, abril y julio. Las lluvias de septiembre son las que realmente permiten una captación suficiente para el suministro del año siguiente [15].

Tabla 4.1 Diferencia entre escurrimientos y evaporación en La Presa El Cuchillo. Variación mensual (millones de metros cúbicos).

Año	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre
1994	14.61	7.86	5.07	-2.91	1.61	0.12	-8.50	-4.24	62.57	6.17	1.05	3.18
1995	0.67	-1.16	-5.27	-7.80	9.65	22.82	-6.02	248.12	106.23	9.38	1.56	12.91
1996	1.07	-1.89	-7.33	-8.98	-11.43	-10.68	-11.20	88.45	61.99	119.82	10.58	3.60
1997	2.33	-2.65	4.48	14.43	14.66	0.13	-13.33	-12.95	-5.29	83.98	9.70	3.92
1998	-0.51	-3.44	-2.09	-7.65	-9.07	-5.94	-8.31	-4.03	108.42	54.40	31.48	4.73
1999	0.14	-4.59	-5.96	-7.72	-7.94	13.67	29.93	27.27	13.72	17.94	-0.89	-1.96

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA), 2001. Elaborado por CEDEM.

Existe una gran fluctuación anual de los escurrimientos que van hacia El Cuchillo. Por ejemplo, en 1994 fueron de 86.57 Mm³/año y al año siguiente, en 1995, fueron 391.08 Mm³/año (casi cuatro veces más) (Tabla 4.2). El Cuchillo se proyectó para cubrir dos etapas, la primera para suministrar agua al AMM con un volumen de 5 m³/seg y la segunda etapa para 10 m³/seg. Esto quiere decir un envío de 131 Mm³/año al AMM en su primera etapa y el doble de ello para la segunda etapa (estimando un suministro de 20 horas/día). Sin embargo, el balance anual entre escurrimientos y evaporación (Tabla 4.2) muestra que aunque la cantidad anual disponible hasta ahora ha sido mayor a 131 Mm³, no siempre será suficiente para cubrir los volúmenes esperados para la segunda etapa.

Tabla 4.2 Diferencia anual de evaporación y escurrimientos para El Cuchillo (millones de metros cúbicos).

Año	Evaporación	Escurrimiento	Diferencia
1994	74.907	161.475	86.569
1995	92.201	483.285	391.084
1996	102.446	336.438	233.992
1997	92.130	191.533	99.403
1998	74.224	232.212	157.988
1999	90.808	164.415	73.607

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA), 2001. Elaborado por CEDEM.

Esta presa, además, conforme al Acuerdo de Coordinación de 1993, firmado por autoridades federales, estatales y regantes del Distrito de Riego No. 26 de Tamaulipas, debía sujetarse a ciertos criterios para trasvasar sus excedentes hacia La Presa Marte R. Gómez. En el caso de la primera etapa el trasvaso se dará cuando su llenado sea de 315 Mm³ y para la segunda etapa cuando sea mayor a 516 Mm³. En ambos casos, La Presa Marte R. Gómez tiene que estar por debajo de los 700 Mm³. Los trasvasos han estado sujetos a polémica y negociación cuando se han realizado, como a principios de 1996 en que se trasvasaron 208 Mm³ y durante 1997 en que se enviaron 137 Mm³ hacia La Presa Marte R. Gómez.

En el caso de La Presa Cerro Prieto, la información disponible abarca un periodo reducido (1997-1999). De acuerdo con proyecciones de Agua y Drenaje, para mantener un suministro de 24 horas, Cerro Prieto necesita contribuir con 102 Mm³/año. Para 1998, el bajo nivel de la presa originó que en noviembre y diciembre no se enviara agua de esta presa hacia el AMM. La evaporación es también muy importante, fluctuando entre el 18% y 42% del valor de almacenamiento (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Presa Cerro Prieto (millones de metros cúbicos).

Año	Almacenamiento	Evaporación
1997	145.00	32.10
1998	60.00	25.63
1999	178.00	33.47

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA), 2001. Elaborado por CEDEM.

En 1992, antes del inicio de operaciones de La Presa El Cuchillo-Solidaridad, el volumen total de abastecimiento era de 8350 lps, mientras que la demanda alcanzó los 14124 lps, existiendo un déficit del 40% (Cuadro 4.4), la situación anterior, provocada por la insuficiencia de lluvias para la recarga de las fuentes de

abastecimiento, obligó a establecer un racionamiento en la distribución de agua. La distribución por usuarios de los 8350 lps en 1992 fue de 55.9% de consumo doméstico, 8.3% comercial, 3.7% industrial, 6.5% de servicio público (escuelas, universidades, oficinas públicas, etcétera) y 25.6% fue “no contabilizada” (hidrantes, conexiones clandestinas y, principalmente, pérdidas de agua en la red de distribución).

Cuadro 4.4 Fuentes de Abastecimiento de Agua Potable del AMM, 1992.

Fuentes de abastecimiento de agua potable	1992	
	Aportación	
	lps	%
ZMM	8350	100
Subterráneas	4880	58
Pozos	3250	39
Huasteca	1560	18,7
Mina	980	11,7
Monterrey	710	8,5
Galerías	1490	17,8
Huasteca	410	4,9
Cola de Caballo	340	4,1
San Francisco	740	8,9
Manantiales	140	1,7
Estanzuela	80	1,0
Elizondo	60	0,7
Superficiales	3470	41,6
Presas	3470	41,6
Rodrigo Gómez (La Boca)	1150	13,8
Jose L. Portillo (Cerro Prieto)	2320	27,8
El Cuchillo-Solidaridad	0	0,0

Fuente: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, Institución Pública Descentralizada.

4.2.2 Acueductos.

En el caso de los acueductos regionales, cabe hacer notar que cada vez más agua superficial como subterránea se ha tenido que traer desde distancias mayores y si inicialmente el acueducto La Estanzuela (de 19Km) representó una “obra de ingeniería excepcional”, con las obras de captación y de conducción más alejadas, se han vuelto más costosas y complejas. Existen acueductos que transportan el agua de las presas hacia la ciudad, estos están integrados al sistema hidráulico. Las Presas Cerro Prieto y El Cuchillo, ambas usadas para el abastecimiento del AMM, se encuentran a más de 100Km de distancia y los acueductos que transportan el agua desde ellas tienen que vencer desniveles de

cientos de metros de altura mediante bombes múltiples a lo largo de la conducción, para poder suministrar agua a la ciudad. También los campos de perforación y extracción se encuentran cada vez más lejos; se inició con campos ubicados dentro del área urbana, mientras que los campos de Mina y La Huasteca, están ubicados a 40Km y 38Km del AMM, respectivamente (Figura 4.1). El sistema hidráulico que abastece el AMM está compuesto por los siguientes acueductos:

a) **Acueducto Cerro Prieto-Monterrey** con una longitud de 133Km y diámetro de 84 pulgadas (2.13m).

b) **Acueducto Cuchillo-Monterrey** con longitud de 102Km y un diámetro de 84 pulgadas (2.13m).

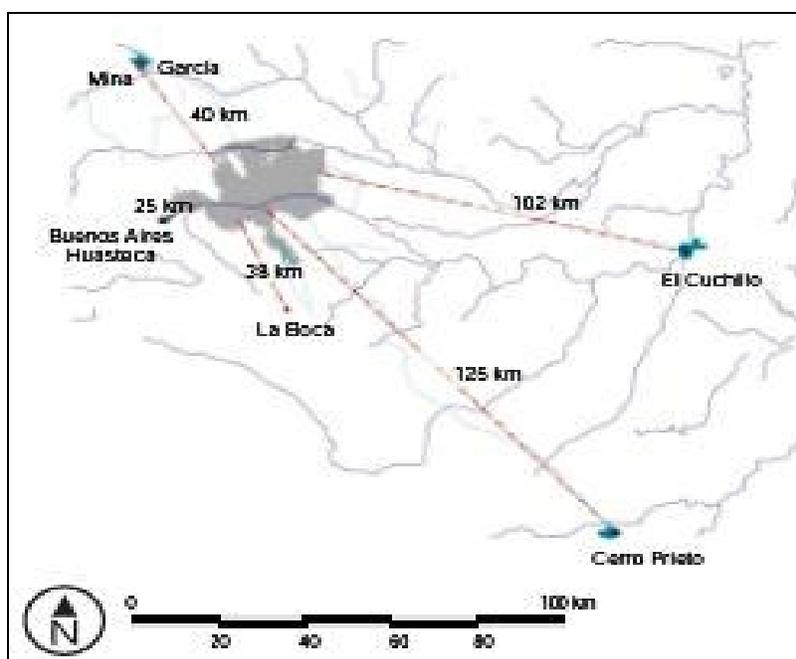


Figura 4.1 Acueductos regionales y distancias a fuentes de abastecimiento, 2000.
Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA), 1994; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000. Elaborado por CEDEM.

c) **Acueductos Sistema Santiago.** Además del acueducto desde Cerro Prieto, se tienen los acueductos Santiago I y II con gastos de 2,300 lps y 3,650 lps, respectivamente, el primero con longitud de 38Km y diámetro de 48" (1.22m), el segundo con longitud de 30.5Km y diámetro de 54". (1.37m); que en conjunto representan una capacidad de conducción de 5,950 lps. Existe también el acueducto Los Elizondo con diámetro de 16" y 150 lps; el acueducto La Estanzuela con 21" de diámetro y 80 lps de gasto y El Socavón de San Francisco.

d) Acueductos Mina-Monterrey. El primero se construyó en 1952, con tubería de acero de 916mm de diámetro (36") y una longitud de 40.6Km. En 1977 se instaló el segundo acueducto, hecho de concreto preesforzado de 137cm (54") de diámetro y una longitud de 43.5Km. Los gastos máximos de operación de estos acueductos son de 1,400 lps y 3,200 lps, respectivamente.

e) Acueducto Linares-Monterrey. Tiene una longitud de 131.86Km y un diámetro de 2.23m. Fue construido con tubería de concreto preesforzado en una longitud de 115.25Km y luego con tubería de acero a lo largo de 16.74Km. Tiene un desnivel topográfico máximo de 255.76m y un gasto de 6,000 lps. Cuenta con seis plantas de bombeo para vencer la carga dinámica desde Cerro Prieto hasta la planta potabilizadora San Roque.

f) Acueducto El Cuchillo - Planta Potabilizadora de San Roque. Está construido con tubería de acero; tiene una longitud de 91.0Km y un diámetro de 2.13m. Provee a poblaciones como El Carrizo, San Juan, El Porvenir, Cadereyta y Villa de Juárez. Tiene un desnivel de 490m con respecto al AMM y para vencerlo cuenta con 5 estaciones de bombeo. Su primera etapa fue para un gasto de 6 m³/s y la segunda etapa se calculó para un total de 12 m³/s.

La capacidad conjunta de los acueductos es de 27,410 lps y operan con alrededor de 10,000 lps. Todos ellos conducen el agua a la ciudad de Monterrey desde las diferentes fuentes hasta las cisternas potabilizadoras y redes de distribución [13] y [15].

4.2.3 Anillo de Distribución.

En 1984 se puso en operación el anillo de distribución que consiste en una línea de conducción de acero de 48pulgadas de diámetro, con una longitud de 51Km, que circunda la ciudad. Esta importante obra permite interconectar el agua que se recibe de las distintas fuentes de abastecimiento, logrando una distribución más uniforme y equitativa del vital líquido [13]. Ésta obra facilitó la distribución del agua que se transporta de las presas y de las zonas de perforación hasta el AMM, la cual permite mantener una presión y un flujo regular del agua que llega de las diferentes fuentes de abastecimiento (Figura 4.2).

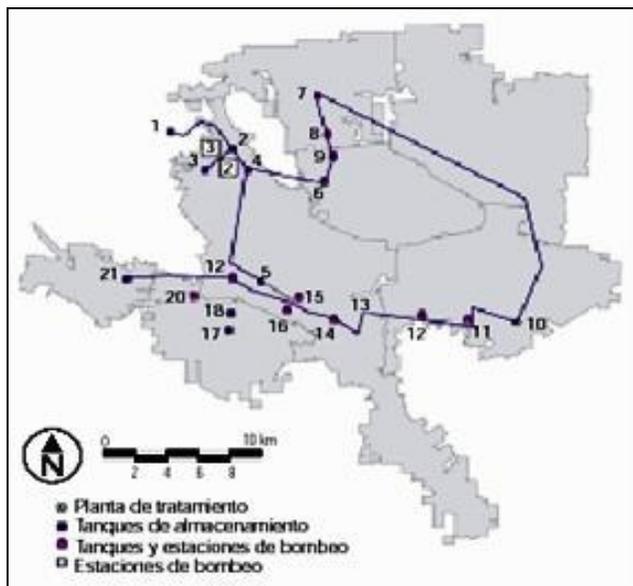


Figura 4.2 Anillo de distribución, 2000.
 Fuente: Servicios de Agua Potable y Drenaje de Monterrey, 2000.
 Elaborado por CEDEM.

El agua que recibe la ciudad de las fuentes externas de abastecimiento llega a grandes tanques de almacenamiento y regulación, que permiten disponer de agua suficiente para ser bombeada hacia la red a través de diferentes estaciones con una potencia instalada de 39,500 HP, manteniendo una presión adecuada.

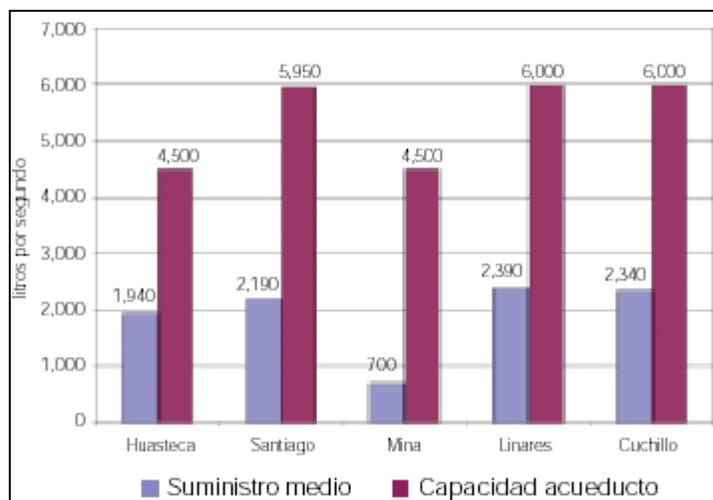


Figura 4.3 Capacidad de conducción de acueductos en comparación al suministro, 2000 (litros por segundo).
 Fuente: Servicios de Agua Potable y Drenaje de Monterrey.

El diseño del sistema permite el manejo de hasta 23 m³/s [15]. Mientras que los pozos ubicados en el área metropolitana están conectados directamente a la red. Las características topográficas de la zona metropolitana permiten la división

de estas fuentes en varias zonas de presión, cada una de las cuales dispone de dos tanques principales ubicados en los extremos de la misma para minimizar la variación de la presión. Los tanques de los extremos están unidos por líneas maestras alimentadoras que a su vez se ramifican en líneas secundarias. Para apoyar su operación se han localizado a lo largo de la ciudad 43 tanques principales y 110 tanques menores interconectados, con una capacidad de almacenamiento conjunto cercano a un Mm^3 de agua en los tanques mayores y de 1.2 Mm^3 en total [13] (Figura 4.3).

4.2.4 Plantas de bombeo.

Las plantas de bombeo forman parte del sistema de conducción. Con ellas y a través de los acueductos se logra vencer el desnivel y distancias entre fuentes primarias y cisternas potabilizadoras para hacer llegar el agua de la presa El Cuchillo a la planta potabilizadora San Roque, localizada al oriente de la ciudad de Monterrey. El agua es bombeada a una altura de 490m y a una distancia de 91Km, gracias a 5 estaciones de bombeo distribuidas estratégicamente a lo largo del acueducto. Cada estación de bombeo cuenta con 6 bombas de 640 HP para vencer una carga de 85m, con un caudal de diseño de $1.2 \text{ m}^3/\text{seg}$ cada una. Cuatro están destinadas a operar regularmente y dos son de reserva. Cada tramo de bombeo descarga en un tanque de regulación con capacidad de $10,000\text{m}^3$, el cual sirve a su vez, de tanque de sumergencia para la siguiente estación de bombeo.

Otro sistema de bombeo importante es el del acueducto Linares-Monterrey, formado por seis grandes estaciones de bombeo con una potencia de 36000 caballos de fuerza, que elevan el agua a 600metros sobre el nivel mar (altura media de la ciudad de Monterrey) e impulsan el agua a lo largo de 133Km.

4.2.5 Red de distribución y plantas potabilizadoras.

El abastecimiento de agua potable del AMM en el año 2000 estaba integrado por una red primaria de 1,310Km conectada directamente al sistema de distribución, y una red secundaria que se conecta a las tomas domiciliarias, de 4,883Km, es decir, 287Km más que los existentes en 1998 (Cuadro 4.5), por medio de la cual se daba abastecimiento a un promedio de $984\text{hab}/\text{km}^2$ en toda el área

para el mismo año 2000. La red más antigua se ubica en Monterrey, núcleo urbano que dio origen a la conurbación metropolitana; en el cual se observa una densidad de 3,814hab/km², así como en los municipios de San Nicolás de los Garza con una densidad de 8,300hab/km² y Guadalupe con 3,800 hab/km², los municipios mencionados registran las densidades más altas de toda el AMM durante el mismo año [25]. La red de distribución primaria está integrada por 4900Km de tubería en diámetros de 2 a 48pulgadas, construida con materiales tales como fierro fundido, fierro galvanizado, concreto preesforzado, acero y asbesto cemento [13].

Cuadro 4.5 Longitud de las redes de agua potable primaria y secundaria del AMM, 1998-2000

	Red primaria	Red secundaria
1998	1 265.5	4 596.4
1999	1 288.1	4 697.9
2000	1 310.4	4 883.3

Fuente: Gobierno del Estado de Nuevo León, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADEM), Institución Pública Descentralizada, 2000.

En 1998, se potabilizaban en el país 40,855 lps, siendo Nuevo León el estado con mayor volumen de agua procesada con 6,351 lps; seguido por Baja Norte con 3,982 lps y el Estado de México, con 3,172 lps.

El sistema hidráulico cuenta con dos plantas potabilizadoras con una capacidad conjunta de 14,400 lps. La primera de ellas denominada: **Planta La Boca**, localizada a la orilla de la presa del mismo nombre [13]. La primera etapa se terminó en 1964. La capacidad de tratamiento era de 1,100 lps. En 1981 se amplió junto con las obras del acueducto Santiago II, y su capacidad de tratamiento aumento hasta 2,800 lps. La segunda es la **Planta San Roque**, inició su operación en 1984, se ubica en el municipio de Juárez, poco antes de llegar al poblado de Villa Juárez, ésta recibe el agua de las presas Cerro Prieto y El Cuchillo, opera con una capacidad de 6,000 lps, pero está diseñada para tratar hasta 12,000 lps. La primera etapa de esta planta se construyó para el Sistema Linares - Monterrey y tenía como medio filtrante lechos de arena y retrolavado mediante agua y aire. Su capacidad era de 6 m³/s. Al construirse el Sistema El Cuchillo se duplicó su capacidad y se modificó el medio de filtración para usar arena y antracita.

En ambas plantas el sistema de tratamiento del agua consiste en filtración directa, utilizando filtros de arena y antracita, así como desinfección con cloro

(clarificación convencional) (Cuadro 4.6). Las plantas alcanzarán su capacidad plena de operación cerca del 2020, en condiciones de correcta operación [25].

Cuadro 4.6 Plantas potabilizadoras en operación por proceso del AMM, 2000.

Plantas por tipo de proceso	Fuente de abastecimiento	Gasto (l/seg)	
		Mínimo	Máximo
Clarificación convencional (una planta)	Presa La Boca	350	2 000
Filtración directa (una planta)	Presas Cerro Prieto y El Cuchillo	2 000	7 500

Fuente: Gobierno del Estado de Nuevo León, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADEM), Institución Pública Descentralizada, 2000.

Los requisitos de potabilidad que exigen las normas existentes para el consumo humano son cubiertos por las aguas subterráneas. Sólo se les aplica cloro para cubrir contingencias y cumplir con la reglamentación prevista por las autoridades sanitarias. El agua que se recibe de todas estas fuentes de abastecimiento llega a grandes tanques de almacenamiento y regulación, excepto el agua de los pozos ubicados en el área metropolitana ya que éstos están conectados directamente a la red [13].

Las plantas potabilizadoras son parte importante de los sistemas de abastecimiento, su adecuada operación garantiza que el agua que reciben los usuarios a través de las redes de distribución sea apta para su consumo [25].

La calidad del agua en cuanto a su potabilidad es otro elemento importante de la eficiencia. La Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA) en la NOM-127 SSA/97 fija los límites máximos permisibles que debe cumplir el agua destinada a consumo humano usando los parámetros de campo, análisis físico-químicos, microbiológicos, metales pesados y compuestos orgánicos. En Monterrey, todos los parámetros están por debajo del límite máximo establecido por la Secretaría de Salud (Tabla 4.5), lo que indica que el agua proporcionada a través de la red tiene muy buena calidad. Diariamente se toman más de 200 muestras de plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y tomas domiciliarias [15].

Agua y Drenaje de Monterrey cuenta con el laboratorio más avanzado y equipado de México para análisis de agua, incluyendo detección de metales pesados y plaguicidas. Tiene capacidad para manejar 25,000 muestras por año y detectar hasta 81 compuestos (Tabla 4.6).

Tabla 4.5 Calidad del agua en la red domiciliaria.
Parámetros físico - químicos y microbiológicos, 2000.

Físico químicos	NOM-127 SSA/97 Limite máximo permisible (mg/l)	Monterrey
Potencial hidrogeno	6.5-8.5 (pH)	8.49 (pH)
Conductividad eléctrica	ND* (microMhos/cm)	527
Color	20 (escala Pt-Co)	< 5 (escala Pt-Co)
Turbiedad (UN)	5	< 0.4
Sólidos disueltos totales	1,000	280
Alcalinidad (CaCO ₃)	(-)	179
Dureza total	500	270
Cloruros (Cl)	250	11.9
Fluoruros (F)	1.5	0.12
Sulfatos (SO ₄)	400	109
Nitritos (NO ₂ como N)	0.05	< 0.007
Nitratos (NO ₃ como N)	10	0.2
Nitrogeno amoniacal	0.5	< 0.2
SAAM detergentes	0.5	< 0.2
Cianuros (Cn)	0.07	< 0.03
Microbiológicos	NMP / 100ml	NMP / 100ml
Coliformes totales	< 2.2	< 2.2
Coliformes fecales	(-)	ND*

Fuente: Guajardo, A., Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnostico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002. (Tabla 5-111)

Tabla 4.6 Calidad del agua en la red domiciliaria.
Metales pesados y compuestos orgánicos, 2000.

	NOM-127 SSA/97 Limite máximo permisible (mg/l)	Monterrey
Metales pesados		
Aluminio	0.2	0.08
Arsénico	0.05	< 0.03
Bario	0.7	0.04
Cadmio	0.005	< 0.002
Cobre	2	< 0.05
Cromo total	0.05	< 0.01
Fierro	0.3	< 0.05
Manganeso	0.15	< 0.02
Mercurio	0.001	< 0.001
Niquel	NR *	< 0.05
Plomo	0.025	< 0.01
Sodio	200	8.10
Zinc	5	< 0.05
Selenio	NR *	< 0.01
Molibdeno	NR *	< 0.05
Orgánicos		
Fenoles y compuestos fenólicos	0.001	< 0.001
Plaguicidas		< Limite máximo permisible
Ácido 2,4-D	50 micro g/l	< 25 micro g/l
Trihalometanos totales	0.2	0.03
Hidrocarburos totales del petroleo	NR *	< 0.08

Fuente: Guajardo, A., Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnostico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002. (Tabla 5-112)

4.3 Consumo por Sectores

El sector doméstico es quien más agua de la red consume. En el año 2001 el 92.9% de los consumidores servidos por Agua y Drenaje de Monterrey son

domésticos (680,913 usuarios), seguido del sector comercial que abarca al 6.3% de los usuarios (46,206) como clínicas, hoteles y otros establecimientos de servicio, el 0.6% (4,066) son usuarios públicos y el 0.2% (1,400) son industriales, para un total de 732,605 usuarios (Guajardo, 2002) (Tabla 4.7).

Tabla 4.7 Tomas y número de usuarios.

Sector	Usuarios	Porcentaje	Consumo	Porcentaje
Doméstico	676,922	93.0	11,099	69.3
Comercial	45,802	6.2	2,164	13.5
Industrial	1,396	0.2	696	4.3
Público	4,068	0.6	2,070	12.9

Fuente: Guajardo, A., Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo. CEDEM. ITESM. Monterrey, 2002. (Tabla 5-109)

Nota: el consumo está expresado en miles de metros cúbicos al mes.

El sector industrial consume menos agua de la red que los demás sectores, pero en realidad, las principales empresas del AMM cuentan con sus propios pozos de abastecimiento, supervisados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), de los que se extraen alrededor de 3 m³/s para sus procesos industriales. Generalmente la industria sólo usa el agua de la red en los servicios sanitarios y para oficinas. Agua y Drenaje estima por año un incremento de 25 mil nuevos hogares que demandan el servicio de agua potable, lo que significa unas 100,000 personas más por año, equivalentes a un incremento en la demanda de 0.205 m³/segundo (considerando una dotación de 180 l/persona/día).

Para el año 2020, conforme a las proyecciones de población de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas (SEDUOP), que integran una política de desconcentración hacia otros municipios, se espera un incremento de 1,250,000 nuevos habitantes en el AMM, lo que supondría un aumento en la demanda del 30% con respecto al suministro actual que es del orden de 10 -11 m³/s, alcanzando hasta 15 -16 m³/s (manteniendo consumo per cápita en 180 l/día) [15]

CAPÍTULO 5. CRECIMIENTO URBANO DEL AMM Y SUS IMPACTOS

Existe una tendencia mundial de la población por ubicarse en centros urbanos como respuesta a importantes cambios económicos y tecnológicos de producción, que han propiciado la concentración en las ciudades, éstas se convierten ahora en modelos complejos como metrópoli, megalópolis, conurbación. El término metrópoli o área metropolitana, es en general toda área asentada de manera urbana que incluye espacios rurales no necesariamente agrícolas, esta determinado por la magnitud de la población, las elevadas tasas de crecimiento, los altos niveles de población económicamente activa, el equipamiento urbano, el enorme número de industrias, comercios y servicios, la generación de una conurbación física o funcional, la amplia accesibilidad en sus vías de comunicación, la concentración de servicios de educación, cultura, salud, la circulación de importantes medios masivos de comunicación y los altos grados de complejidad en la posible coordinación intergubernamental.

Desde la perspectiva del desarrollo sustentable (engloba tres grandes ejes: población, desarrollo y medio ambiente), una propuesta integral y multidisciplinaria de delimitación de las zonas metropolitanas en México requiere considerar, en mayor o menor profundidad y dependiendo de cada caso [30].

Esta urbanización permite entender la dinámica de la población y el crecimiento urbano. Los patrones de asentamiento están pasando de ser dispersos a concentrados, esto se observa con el incremento en la proporción de población urbana en relación con la población total. Las razones detrás de este proceso de concentración están relacionadas tanto con las tasas de crecimiento poblacional como con aspectos particulares de migración, de concentración del poder económico, de inserción de comunidades cercanas a las metrópolis y razones de la población hacia la búsqueda de oportunidades de empleo, acceso a bienes y servicios básicos como el agua, suelo, energía, educación, salud, vivienda, transporte y en general mejores niveles de vida.

La metropolización lleva al concepto de suburbanización, que no es más que el efecto inverso de los procesos de centralización que ejercen una presión al exterior del centro creando subcentros urbanos con funciones diversas que

consumen grandes cantidades de terreno a bajo costo económico en el corto plazo, pero a alto costo ecológico y de desplazamientos[15].

En el caso de México, el proceso de metropolización se acentuó a partir de 1970 a la fecha. En el año 2000, el 75% de la población del país habitaba en centros denominados urbanos, constituyendo más de 370 ciudades. En el año 2000, el 25% de la población urbana de México radicaba en tres áreas metropolitanas: Ciudad de México (17.8 millones), Guadalajara (3.7 millones) y Monterrey (3.24 millones). Se han identificado en el país cuatro categorías de zonas metropolitanas: saturadas, consolidadas, en crecimiento e iniciales. El proceso de urbanización es entonces no sólo un proceso de concentración demográfica sino una oportunidad social de extensión de estilos culturales, de modos de vida y de interacción que permiten el crecimiento y la tolerancia [15].

A principios de la década de los sesenta el AMM estaba conformada por los Municipios de Monterrey, Guadalupe, San Nicolás de los Garza y San Pedro Garza García sumándose a ésta otros tres municipios Santa Catarina, Apodaca y General Escobedo. El Área Metropolitana queda constituida en 1970 por siete municipios entre los cuales Guadalupe y San Nicolás presentaban tasas muy elevadas y considerables de volúmenes de población. Monterrey redujo su participación de la población metropolitana. De 1970 a 1980 el AMM redujo su tasa de crecimiento al 4.6 % anual y sólo se le integro Juárez, quedando conformada por ocho municipios. El crecimiento de Monterrey se redujo al 2.2 %, mientras que el de los municipios metropolitanos siguió aumentando. Continúo la elevada expansión metropolitana caracterizada por considerables diferencias en las tasas de crecimiento de los municipios, pues los periféricos mantuvieron una elevada dinámica, entre los que destaco General Escobedo con 13.7 % anual. Lo más notable de los años ochenta fue que el municipio de Monterrey observo una tasa de crecimiento negativa -0.2%, que pareció indicar la culminación de la primera etapa de metropolización de la "Sultana del Norte". Para 1990 con la incorporación de García, el AMM ya estaba constituida por nueve municipios, la cual se constato en el lustro 1990-1995, al casi duplicar su población. Se observo también cierta recuperación de la dinámica demográfica del AMM, pues elevo la tasa de crecimiento anual al 3.0 %,

alcanzando en 1995 una población cercana a los 3 millones de habitantes, consolidándose como la tercer ciudad más poblada del país.

5.1 Variables climáticas que se ven afectadas por el crecimiento urbano.

Las variables climáticas como la temperatura, la precipitación y la evapotranspiración se ven afectadas profundamente por las características físicas y las actividades humanas de una ciudad, que alteran el ciclo hidrológico y por ende los procesos naturales como el escurrimiento y la infiltración, el conocimiento de estos efectos puede hacer posible su predicción e incluso su control.

Es importante comprobar el potencial de la urbanización como agente de cambios climáticos a gran escala sobre ciudades completas, originados por el crecimiento urbano, por ahora los datos existentes son lo suficientemente significativos para demostrar que la causa de tales cambios se deben al desarrollo urbano, el cual es posible planificar de modo que fuese mínimo el efecto de las alteraciones atmosféricas, quizá podría lograrse que estas fuesen favorables. En los próximos años una mayor cantidad de conocimientos de la variabilidad del clima en las ciudades será trascendental para un desarrollo sustentable.

Se sabe que el clima de los centros urbanos tiende a ser más cálido que el de lugares no urbanos, sus edificios, construcciones y vialidades, constituyen evidentemente una vasta modificación al medio natural y las actividades de sus habitantes son una fuente considerable de calor, el crecimiento urbano origina que las variables climáticas interrelacionadas no varíen normalmente de la misma forma en la ciudad que en el campo, esto puede ser calibrado en diferencias de temperatura, de humedad, de precipitación, de niebla, de radiación solar y de velocidad del viento entre la ciudad y sus alrededores. Ésta diferencia es visible en fenómenos urbanos tales como: el smog persistente, la floración prematura de las plantas y los periodos más largos sin heladas. Estos factores explican cinco influencias básicas que diferencian el clima urbano del de su área circundante.

La primera influencia es la diferencia entre los materiales superficiales del área urbana y la no urbana. Esto significa que los materiales de la ciudad pueden absorber mayor cantidad de energía calorífica en menor tiempo. La temperatura del

suelo terroso en el momento más cálido del día puede ser mas alta que la de una pared de piedra, pero la temperatura a unos 8 ó 10 centímetros por debajo de la superficie será tal vez mayor en la pared, al final del día, el material pétreo habrá almacenado más calor que una cantidad igual de tierra.

Segunda influencia, las construcciones de la metrópoli tienen una gran variedad de formas y orientaciones que los rasgos característicos del paisaje natural, sus paredes, techos y calles funcionan como un laberinto de reflectores que absorben parte de la energía que reciben, y dirigen gran parte del resto hacia otras superficies absorbentes, al mismo tiempo proporcionan un sistema altamente eficiente de utilización de la luz solar para calentar grandes volúmenes de aire, además, los numerosos edificios tienen un efecto frenador sobre el viento reduciendo por tanto la cantidad de calor que arrastra.

Tercera influencia, los centros urbanos son un generador prodigioso de calor, particularmente en invierno por los sistemas de calefacción e incluso en verano tiene muchas fuentes de calor de las que carece el campo. Entre ellos se encuentran la industria, los vehículos, los acondicionadores de aire que tienen que bombear aire caliente hacia afuera para producir su efecto refrescante.

Cuarta influencia, la ciudad tiene formas características de deshacerse de las precipitaciones, la lluvia desaparece rápidamente de la superficie por medio de tuberías, cauces y alcantarillas. En el área no urbana, gran parte de las precipitaciones permanecen sobre la superficie o inmediatamente debajo de ella; de este modo el agua está preparada para el proceso de evaporación y transpiración que es un proceso refrescante potenciado por la energía calorífica. Debido a que en el área urbana hay menos oportunidades de que se produzca la evaporación, la energía calorífica que habría participado en el proceso se encuentra disponible para calentar el aire.

Finalmente, el aire de la metrópoli se diferencia porque transporta una pesada carga de contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos. Alrededor de un 80% de los contaminantes sólidos se encuentran en forma de partículas que son lo suficientemente pequeñas como para quedar suspendidas durante varios días en la atmósfera cuando no está en movimiento. Aunque colectivamente estas partículas

tienden a reflejar la luz solar, reduciendo la cantidad de calor que llega a las superficies, también retardan el flujo del calor hacia afuera. Los contaminantes gaseosos que suelen tener una masa total mayor que los sólidos, que provienen principalmente de la combustión incompleta de los combustibles. Uno de los principales gases que se encuentran en la atmósfera de muchas ciudades es el dióxido de azufre; cuando en condiciones meteorológicas apropiadas este gas se disuelve en las nubes o en la lluvia, se oxida dando lugar al ácido sulfúrico diluido.

Las diferencias en humedad y precipitación entre el área urbana y la no urbana son algo contradictorias. Durante periodos sin lluvia, la relativa escasez de agua en la ciudad en condiciones de sufrir el proceso de evaporación tiene como resultado una concentración reducida de vapor de agua en la atmósfera, a pesar de que la zona urbana es un poco más seca que sus alrededores, en los días en que llueve es probable que caiga mayor cantidad de precipitación que en el campo, esto se debe principalmente a una acumulación de pequeños incrementos en días lloviznosos, cuando no se produce demasiada precipitación en ningún lugar del área. En tales días, las corrientes ascendentes que se producen sobre la templada ciudad proporcionan un empuje extra suficiente para que las nubes produzcan allí una cantidad ligeramente mayor de precipitaciones. En una ciudad pequeña las diferencias pueden ser sólo ocasionales; en una gran ciudad todos los días son climáticamente diferentes [28].

5.2 Desarrollo para la obtención del incremento de la mancha urbana.

La información para el análisis y delimitación metropolitana engloba 3 vertientes:

- Información estadística. Vivienda, población y lugar de residencia, de trabajo por localidad y municipio, así como sectores de actividad económica, flujos de viajes, distancias trabajo, disponibilidad de servicios básicos y áreas naturales protegidas.
- Información geográfica y cartográfica. Básica, temática, superficie (lineal y construida), planos de línea urbanos (digitalizados), catálogos de AGEB y AGEM, carta topográfica de entidad en estudio, interpretación de fotografía aérea, imagen satelital y delimitación cartográfica del INEGI.

- Información documental. Normativa, contextual, histórica, definiciones conceptuales y operativas o programáticas, aspectos legales, metodologías, información de campo, opinión/testimonio de residentes, planes estatales de regulación y ordenamiento urbano y de medio ambiente [30].

Para el análisis del crecimiento de la mancha urbana y sus consecuencias en la modificación de la capacidad de infiltración e incrementos de temperatura se utilizó:

- Información estadística. Población, usos de suelo por municipio (vivienda, industria, equipamiento, vialidades, áreas verdes, comercios y servicios, así como áreas de cultivos, pastizales y bosques), disponibilidad de servicios básicos y áreas naturales protegidas.

- Información geográfica y cartográfica. Marco Geoestadístico Municipal 2005(INEGI), Planos urbanos (Ciudades Capitales Monterrey, digitalizado) editado por el INEGI, Carta Topográfica del Área Metropolitana de Monterrey (1:250,000) (INEGI), Carta Hidrológica de Monterrey (1:250,000) (INEGI), Plano del Crecimiento Urbano del AMM por AGEB'S escala 1:100,000 obtenido con datos del Plan Metropolitano 2000-2021, Desarrollo Urbano de la Zona Conurbada de Monterrey y del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Catálogos de AGEB'S.

- Información documental. Plan Director de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Monterrey 1988-2010, Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey, Plan Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey, 2020, Atlas de Monterrey, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001, Enciclopedia de los Municipios de México. Estado de Nuevo León y Desarrollo Urbano de Nuevo León.

La información obtenida (Cuadros 5.1 a 5.8 y Plano 5.1), se utilizó para establecer criterios de delimitación, que constituyen el marco apropiado para integrar un sistema de indicadores de desarrollo urbano que permitan vislumbrar la situación y tendencias de los fenómenos metropolitanos, evaluar el desempeño urbano con el propósito de adoptar medidas y estrategias de desarrollo en los ámbitos local y regional.

Cuadro 5.1. Superficie Total Urbana y No Urbana por Municipio del Área Metropolitana de Monterrey, 1986

MUNICIPIO	ÁREA URBANA 1986 (ha)	ÁREA NO URBANA (ha)		ÁREA MUNICIPAL TOTAL (ha)
		URBANIZABLE	NO URBANIZABLE	
APODACA	2576	8136	7638	18350
GARCIA ¹	667	3419	914	5000
GRAL. ESCOBEDO	1415	6305	11380	19100
GUADALUPE	6982	3527	4621	15130
JUAREZ	510	3106	19164	22780
MONTERREY	12563	1433	31134	45130
SAN NICOLAS DE LOS GARZA	5479	560	44	6083
SAN PEDRO GARZA GARCIA	3760	495	2685	6940
SANTA CATARINA	2145	5244	91061	98450
TOTAL AMM.	36097	32225	168641	236963

FUENTE: Plan Director de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Monterrey 1988-2010. (CUADRO NUM. 16); Atlas de Monterrey. (Cuadro 6.1.1 AMM)

¹ No se incluye el municipio completo, sólo la parte conurbada al AMM.

Cuadro 5.2. Usos del suelo urbano en el Área Metropolitana de Monterrey, 1986 (Superficies en Hectáreas)

MUNICIPIO	TOTAL AREA URBANA (ha)	VIVIENDA	USOS INDUSTRIALES	EQUIPAMIENTO	VIALIDAD
TOTAL A.M.M.	36097	23669	4934	3287	4207
	100%	100%	100%	100%	100%
APODACA	2576	1487	690	76	323
	7,14	6,28	13,98	2,31	7,68
GRAL. ESCOBEDO	1415	880	129	172	234
	3,92	3,72	2,61	5,23	5,56
GUADALUPE	6982	5500	328	429	725
	19,34	23,24	6,65	13,05	17,23
MONTERREY	12563	8592	1221	1420	1330
	34,80	36,30	24,75	43,20	31,61
SAN NICOLAS DE LOS GARZA	5479	3233	1320	424	520
	15,18	13,66	26,75	12,90	12,36
SAN PEDRO GARZA GARCIA	3760	1918	188	714	940
	10,42	8,10	3,81	21,72	22,34
SANTA CATARINA	2145	1549	391	52	153
	5,94	6,54	7,92	1,58	3,64
GARCIA	667		667		
	1,85		13,52		
JUAREZ	510	510			
	1,41	2,15			

FUENTE: Plan Director de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Monterrey 1988-2010. (CUADRO NUM. 17); Atlas de Monterrey. (Cuadro 6.1.2)

Cuadro 5.3. Área Metropolitana de Monterrey,
Superficie Total Urbana y No Urbana por Municipio del Área Metropolitana de Monterrey en 1993.

MUNICIPIO	SUPERFICIE EN HECTÁREAS		
	URBANA	NO URBANA	MUNICIPAL TOTAL
APODACA	4992	21080	26072
GARCIA ¹	667	4333	5000
GRAL. ESCOBEDO	2346	16754	19100
GUADALUPE	6050	9080	15130
MONTERREY	13528	31602	45130
JUAREZ	1235	21545	22780
SAN NICOLAS DE LOS GARZA	4530	1553	6083
SAN PEDRO GARZA GARCIA	3531	4335	7866
SANTA CATARINA	2145	96654	98450
TOTAL AMM.	38675	206933	245611

FUENTE: Plan Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey, 2020. CUADRO NUM. 1

¹ Considerando únicamente el Área correspondiente a la zona conurbada.

Cuadro 5.4. Superficie Urbana por Municipio del Área Metropolitana de Monterrey en 2000.

Clave	Municipio	Superficie total	Superficie urbana	
		(km ²)	(km ²)	(%)
	AMM	3293.1	560.7	17.03
006	Apodaca	236.5	56.6	23.93
018	García	1098.6	13.8	1.26
021	General Escobedo	178.6	52.8	29.56
026	Guadalupe	123.2	84.7	68.75
031	Juárez	268.1	18.3	6.83
039	Monterrey	291.2	193.3	66.38
046	San Nicolás de los Garza	59.7	59.7	100.00
019	San Pedro Garza García	82.5	47.4	57.45
048	Santa Catarina	954.7	34.1	3.57

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 (Cuadro 2.1.2)

Cuadro 5.5. Superficie por Municipio del Área Metropolitana de Monterrey en 2000

Municipio	Superficie	
	Total (km ²)	Metropolitana (%)
AMM	3293,1	100,00
Apodaca	236,5	7,18
García	1098,6	33,36
General Escobedo	178,6	5,42
Guadalupe	123,2	3,74
Juárez	268,1	8,14
Monterrey	291,2	8,84
San Nicolás de los Garza	59,7	1,81
San Pedro Garza García	82,5	2,51
Santa Catarina	954,7	28,99

Fuente: INEGI, Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001. México. 2002 Cuadro 2.1.3

Cuadro 5.6. Usos del suelo en los municipios del AMM, 2000 (ha).

Concepto	Apodaca	Escobedo	García	Guadalupe	Juárez	Monterrey	San Nicolás	San Pedro	Santa Catarina	AMM
Áreas Verdes Urbanas y Espacios Públicos	47	47	15	222	8	513	160	323	54	1,395
Baldíos	2,070	1,967	136	1,000	260	2,303	754	733	834	10,057
Vialidad	1,929	1,090	24	2,350	791	3,976	1,502	918	1,059	13,639
Comercio y Servicios	469	201	6	543	90	1,523	662	327	204	4,027
Equipamiento	1,115	317	412	277	134	924	290	143	124	3,734
Industria	826	309	815	290	51	796	712	187	892	4,868
Vivienda	1,452	2,054	478	2,415	1,216	5,478	1,738	1,479	732	17,044
No especificado	604	121	-	810	-	720	113	63	46	2,479
Total urbanizado	8,512	6,106	1,886	7,897	2,551	16,234	5,931	4,174	3,946	57,241

Fuente: Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey, ITESM. Tabla 5-65

Conjuntos de Datos Vectoriales de la Carta Topográfica, 1999; Dirección General de Catastro, 1993-1996; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1999a y 1999b. Elaborado por CEDEM.

Nota: la información se obtuvo con base en el Programa de Modernización Catastral realizado en 1993. Se actualizó la periferia del AMM de acuerdo a datos vectoriales escala 1:50,000 y considerando la cartografía censal urbana de los censos económicos de 1999 (INEGI). Además, para esa misma área, se digitalizaron fotografías aéreas escala 75,000, también de 1999 (INEGI). La base de datos de toda el AMM fue complementada con trabajo de campo (2000) realizado por el CEDEM. La categoría de áreas verdes urbanas y espacios públicos incluye explanadas, jardines, parques y plazas. Los baldíos corresponden a aquéllos con barda y sin barda. Comercio y servicios tiene 58 distintos tipos de áreas que van desde aquéllas que proveen alimentos y bebidas hasta aquéllas de venta o consumo. Las áreas de equipamientos incluyen las de administración pública, basureros, control ambiental, cultura, educación elemental, media privada y pública, educación superior, instituciones científicas, plantas, estaciones, subestaciones, torres y antenas, así como equipamiento de salud. La industria proviene de industria ligera, mediana, pesada y de extracción. Dentro de vivienda se considera el conjunto habitacional horizontal, conjunto habitacional vertical, en proceso de construcción, vivienda multifamiliar y unifamiliar.

Tabla 5.7. Evolución de la Mancha Urbana por Municipio del Área Metropolitana de Monterrey de 1910 a 2005
Crecimiento Urbano Municipal del Área Metropolitana de Monterrey por AGEB'S de 1910 a 2005

Año	Apodaca	Escobedo	García	Guadalupe	Juárez	Monterrey	San Nicolás	San Pedro	Santa Catarina	AMM
1910						868,5				868,5
1920						1136,8				1136,8
1930						1275,2				1275,2
1940						3029,0	51,6			3080,6
1950				175,6		3856,6	332,4	153,3	133,8	4651,8
1952				210,0		3962,9	507,4	153,3	133,8	4967,4
1960				421,6		4874,1	671,3	533,7	169,8	6670,4
1964				683,3		5742,7	769,0	644,7	169,8	8009,5
1970	438,9			1631,7		6819,7	1400,9	1024,5	349,9	11665,6
1980	1072,7	482,5	491,6	3421,5	83,0	10306,8	2982,2	2752,0	1264,3	22856,5
1986	1575,3	1654,9	638,5	4932,0	583,9	13423,1	4721,8	3532,4	2235,7	33297,6
1990	2445,4	1654,9	638,5	6936,1	583,9	13423,1	5035,8	4064,8	2235,7	37018,1
1993	2992,4	2095,3	638,5	7640,7	583,9	15227,42	5341,1	4085,5	2619,4	39692,2
1995	4732,9	3708,9	736,6	8095,4	949,8	17978,7	5341,1	4254,8	2964,5	48762,7
1998	5237,8	3708,9	736,6	8095,4	949,8	17978,7	5341,1	4254,8	2964,5	49267,6
2005	5790,5	5283,9	1375,1	8849,3	1533,6	19668,6	6030,9	4639,1	3405,8	56576,9

FUENTE: Dirección de Planeación Urbana. Desarrollo Urbano de Monterrey N.L.

Nota: La tabla se obtuvo con Arc View de los catálogos del Crecimiento Urbano del AMM por AGEB'S y con el Plano de Crecimiento Urbano del AMM por AGEB'S escala 1:100,000 realizado con datos del Plan Metropolitano 2000-2021 Desarrollo Urbano de la Zona Conurbada de Monterrey y del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)

Tabla 5.8. Resumen de los datos de la Evolución de la Mancha Urbana por Municipio del Área Metropolitana de Monterrey de 1910 a 2005. De las diferentes fuentes. (Unidades en Hectáreas)

Año	Apodaca	Escobedo	García	Guadalupe	Juárez	Monterrey	San Nicolás	San Pedro	Santa Catarina	AMM
1910						869			134	1002
1920						1137			134	1271
1930						1275			134	1409
1940						3029	52		134	3214
1950				176		3857	332	153	134	4652
1952				210		3963	507	153	134	4967
1960				422		4874	671	534	170	6670
1964				683		5743	769	645	170	8010
1970	439			1632		6820	1401	1024	350	11666
1980	649			3246		10149	2982	2562	1212	20800
1980	1073	482	492	3421	83	10307	2982	2752	1264	22857
1980	1159	1575	639	4000	584	11839	3672	2946	1653	28067
1986	1065	80		4178		11733	4032	3148	1794	26031
1986	1575	1655	639	4932	584	13423	4722	3532	2236	33298
1986	2576	1415	667	6982	510	12563	5479	3760	2145	36097
1990	2445	1431		6936		12496	5036	4065	2171	34580
1993	2992	2095		7641		15227	5341	4085	2619	40002
1993	4992	2346	667	6050	1235	13528	4530	3531	2145	39024
1995	4733	3709	737	8095	950	17979	5341	4255	2964	48763
1998	5238	3709	737	8095	950	17979	5341	4255	2964	49268
2000	8512	6106	1886	7897	2551	16234	5931	4174	3946	57237
2000	5660	5280	1380	8470	1830	19330	5970	4740	3410	56070
2005	5791	5284	1375	8849	1534	19669	6031	4639	3406	56577

Plano 5.1 Crecimiento Urbano del AMM por AGEB'S.



Fuente: Desarrollo Urbano del Estado de Nuevo León, DUNL. 2006.

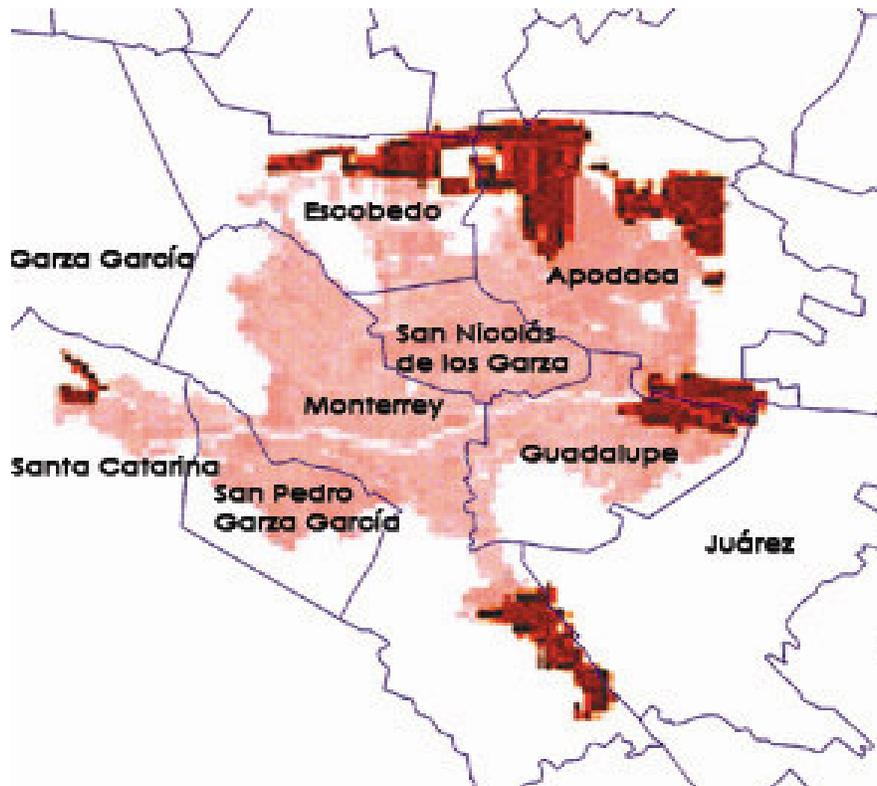


Figura 5.1 Crecimiento Urbano del AMM por AGEBS. Realizado con datos del Plan Metropolitano 2000-2021 Desarrollo Urbano de la Zona Conurbada de Monterrey y del INEGI. 2000.

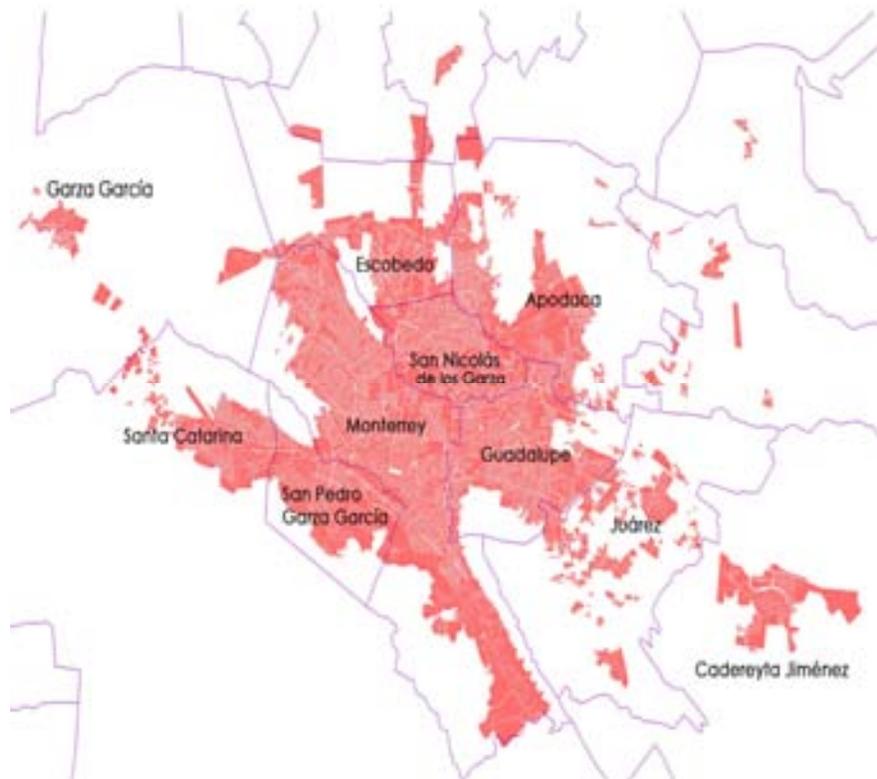


Figura 5.2 Crecimiento Urbano del AMM por AGEBS. Realizado con datos del Plan Metropolitano 2000-2021 Desarrollo Urbano de la Zona Conurbada de Monterrey y del INEGI. 2006.

Los datos de la Tabla 5.8 fueron comparados entre si en los mismos años, (por ejemplo el municipio de Apodaca en 1980 tiene tres valores se utilizo el de 1073) analizados y seleccionados de tal forma que fueran acordes al crecimiento urbano y finalmente utilizados en la Tabla 5.9

Tabla 5.9. Valores finales del Incremento de la Mancha Urbana por Municipio del Área Metropolitana de Monterrey de 1910 a 2005 utilizados para la obtención del crecimiento urbano.

Año	Apodaca	Escobedo	García	Guadalupe	Juárez	Monterrey	San Nicolás	San Pedro	Santa Catarina
1910						869			
1920						1137			
1930						1275			
1940						3029	52		
1950						3857	332		
1952						3963	507		
1960				422		4874	671	534	
1964				683		5743	769	645	170
1970	439			1632		6820	1401	1024	350
1980	1073	482	492	4000	83	10307	2982	2752	1264
1986	2576	1415	667	4932	584	12563		3760	2145
1993	4992	2346		7641	1235	15227	4530	4085	2619
1995			883		1450			4255	
1998	5238	3709		8095		17979	5341		2964
2000	5660	5280	1380	8470	1830	19330	5970	4740	3946
2005				8849					

Una vez que se selecciono una base de datos del crecimiento urbano municipal para diferentes años, se efectuaron diversos tipos de ajuste como son: el lineal, logarítmico, exponencial, potencial, Polinomial de 2°, 3°, 4° y 5° orden, se eligieron los mejores resultados, tomando en cuenta la superficie de cada municipio, la extensión urbanizable y el área no urbanizable, se observó que los mejores ajustes fueron: los Polinomiales de 2° orden para los Municipios de Apodaca, Escobedo, García, Juárez, San Pedro y Santa Catarina, de 4° orden para los municipios de Monterrey y San Nicolás de los Garza y polinomiales de 3^{er} grado para el Municipio de Guadalupe (Tabla 5.10).

Tabla 5.10. Mejores tipos de ajuste en sombreado del Incremento de la Mancha Urbana por Municipio del AMM.

Apodaca	Escobedo	García	Guadalupe	Juárez	Monterrey	San Nicolás	San Pedro	Santa Catarina
Poli 2°	Poli 2° Poli 3°	Poli 2°	Poli 2° Poli 3°	Poli 2° Poli 3°	Poli 2° Poli 3° Poli 4°	Poli 2° Poli 3° Poli 4°	Poli 2°	Poli 2°
	Expo			Poli 5° Potencial lineal	Expo			

Obtenidos los ajustes y las funciones por municipio, se evaluaron sus valores anuales del crecimiento urbano (Tabla 5.11).

Tabla 5.11 Valores anuales estimados del crecimiento urbano.

Año	García	Santa Catarina	Escobedo	San Pedro	Monterrey	Juárez	Guadalupe	San Nicolás	Apodaca	AMM
1960				244	4943		466	698		6351
1961				372	5106		488	755		6721
1962				500	5274		531	817		7122
1963				628	5447		594	882		7551
1964		104		754	5625		677	952		8112
1965		160		880	5808		779	1026		8654
1966		220		1005	5997		898	1105		9224
1967		281		1130	6193		1033	1187		9824
1968		345		1253	6394		1184	1274		10450
1969		411		1376	6601		1350	1366		11104
1970		480		1499	6814		1529	1462	232	12016
1971		551		1620	7035		1721	1562	344	12833
1972		624		1741	7262		1925	1667	461	13679
1973		700		1861	7496		2139	1775	584	14555
1974		777		1980	7737		2364	1888	712	15459
1975		858		2099	7986		2597	2005	845	16390
1976		940		2217	8242		2838	2126	984	17347
1977		1025		2334	8507		3085	2250	1128	18330
1978		1113		2450	8779		3339	2378	1278	19338
1979		1202		2566	9060		3598	2510	1433	20370
1980	525	1294	628	2681	9350	70	3861	2645	1593	22647
1981	525	1389	652	2796	9649	161	4126	2783	1758	23839
1982	529	1486	696	2909	9957	253	4394	2924	1929	25075
1983	537	1585	759	3022	10274	343	4663	3067	2106	26356
1984	549	1686	843	3134	10601	434	4932	3213	2287	27680
1985	566	1790	947	3246	10938	524	5200	3361	2475	29047
1986	588	1896	1071	3356	11285	614	5466	3511	2667	30455
1987	613	2004	1215	3466	11643	704	5730	3662	2865	31903
1988	643	2115	1379	3575	12011	794	5990	3815	3068	33390
1989	677	2228	1563	3684	12391	883	6245	3968	3277	34916
1990	716	2344	1767	3792	12782	972	6494	4122	3491	36479
1991	758	2462	1992	3899	13185	1061	6737	4276	3710	38079
1992	805	2582	2236	4005	13599	1149	6972	4430	3935	39714
1993	857	2705	2500	4111	14027	1237	7199	4583	4165	41382
1994	912	2829	2784	4216	14466	1325	7416	4735	4400	43085
1995	972	2957	3089	4320	14919	1413	7622	4885	4641	44819
1996	1037	3086	3413	4424	15385	1500	7817	5034	4887	46584
1997	1105	3218	3758	4526	15865	1587	8000	5180	5139	48379
1998	1178	3352	4122	4628	16359	1674	8169	5324	5395	50202
1999	1256	3489	4507	4730	16866	1761	8324	5463	5658	52054
2000	1337	3628	4911	4830	17389	1847	8464	5599	5925	53931
2001	1423	3769	5336	4930	17927	1933	8587	5731	6198	55834
2002	1513	3913	5781	5029	18480	2019	8693	5857	6477	57761
2003	1608	4059	6245	5128	19048	2104	8780	5978	6761	59711
2004	1706	4207	6730	5225	19633	2190	8849	6093	7050	61683
2005	1810	4358	7235	5322	20234	2275	8897	6200	7344	63675
2006	1917	4511	7760	5419	20852	2359	8924	6301	7644	65687
2007	2029	4667	8305	5514	21487	2444	8929	6393	7950	67717

Con los valores sombreados de la Tabla 5.11 se construyo la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Valores utilizados para correlacionar y mejorar los registros anteriores.

Año	García	Santa Catarina	Escobedo	San Pedro	Monterrey	Juárez	Guadalupe	San Nicolás	Apodaca	AMM
1960				244	4943		466	698		6351
1964		104		754	5625		677	952		8112
1970		480		1499	6814		1529	1462	232	12016
1980	525	1294	628	2681	9350	70	3861	2645	1593	22647
1986	588	1896	1071	3356	11285	614	5466	3511	2667	30455
1990	716	2344	1767	3792	12782	972	6494	4122	3491	36479
1993	857	2705	2500	4111	14027	1237	7199	4583	4165	41382
1998	1178	3352	4122	4628	16359	1674	8169	5324	5395	50202
2000	1337	3628	4911	4830	17389	1847	8464	5599	5925	53931

Los valores de la Tabla 5.12 se utilizaron para correlacionar entre si todos los municipios (Tabla 5.13), comparar la correlación entre éstos, mejorar algunos datos y completar los datos faltantes de la Tabla 5.11, se puede observar que las correlaciones son muy buenas (coeficientes de correlación > 0.92), el municipio que mejor se correlaciono con los otros fue Guadalupe.

Tabla 5.13. Valores de los coeficientes de correlación entre todas las estaciones.

	García	Santa Catarina	Escobedo	San Pedro	Monterrey	Juárez	Guadalupe	San Nicolás	Apodaca
García	1								
Santa Catarina	0,97023	1							
Escobedo	0,99944	0,97779	1						
San Pedro	0,94730	0,98853	0,95750	1					
Monterrey	0,97648	0,99947	0,98315	0,98232	1				
Juárez	0,95085	0,99754	0,96069	0,99994	0,99524	1			
Guadalupe	0,92397	0,99198	0,93625	0,99279	0,99047	0,99685	1		
San Nicolás	0,95379	0,99864	0,96331	0,99129	0,99721	0,99989	0,99787	1	
Apodaca	0,97354	0,99964	0,98065	0,98712	0,99995	0,99645	0,98452	0,99628	1

De la Tabla 5.12 los valores del municipio de: San Nicolás de los Garza y Guadalupe no se modificaron, los de Monterrey fueron utilizados para completar los registros de Escobedo y Santa Catarina por regla de tres e interpolación, del mismo modo con Guadalupe se obtuvieron los datos faltantes de Apodaca y Juárez, además por interpolación se mejoró el registro de Monterrey, con los nuevos resultados de Monterrey (Tabla 5.14) y por interpolación se afino el registro de San Pedro Garza García, finalmente con los valores obtenidos de Santa Catarina (Tabla 5.14) por regla de tres e interpolación se obtuvieron los valores de García.

La Tabla 5.14 muestra los valores finales estimados del crecimiento de la mancha urbana, que se utilizaron más adelante.

Tabla 5.14. Valores finales estimados del crecimiento de la mancha urbana (ha).

AÑO	García	Santa Catarina	Escobedo	San Pedro	Monterrey	Juárez	Guadalupe	San Nicolás	Apodaca	AMM
1960	37	91	332	244	4943	8	466	698	71	6890
1961	38	94	343	353	5013	9	488	755	74	7168
1962	39	97	354	472	5152	10	531	817	81	7553
1963	41	100	366	605	5357	11	594	882	90	8046
1964	42	104	378	754	5625	12	677	952	103	8647
1965	64	157	390	856	5766	14	779	1026	118	9170
1966	87	214	403	965	5932	16	898	1105	136	9757
1967	112	275	416	1084	6122	19	1033	1187	157	10404
1968	138	339	429	1211	6333	21	1184	1274	180	11110
1969	165	408	443	1350	6564	24	1350	1366	205	11875
1970	195	480	458	1499	6814	28	1529	1462	232	12696
1971	220	543	472	1591	7023	31	1721	1562	306	13471
1972	247	610	488	1690	7245	35	1925	1667	393	14299
1973	276	681	503	1794	7478	39	2139	1775	492	15179
1974	306	755	520	1905	7722	43	2364	1888	606	16108
1975	338	834	536	2020	7975	47	2597	2005	733	17086
1976	372	917	554	2142	8238	51	2838	2126	875	18111
1977	407	1004	571	2269	8507	56	3085	2250	1032	19182
1978	444	1096	590	2401	8783	61	3339	2378	1204	20296
1979	484	1193	609	2539	9064	65	3598	2510	1391	21452
1980	525	1294	628	2681	9350	70	3861	2645	1593	22647
1981	539	1383	693	2813	9748	140	4126	2783	1754	23979
1982	552	1477	761	2938	10119	218	4394	2924	1923	25304
1983	563	1574	833	3055	10460	304	4663	3067	2099	26619
1984	573	1677	908	3165	10769	399	4932	3213	2282	27919
1985	581	1784	988	3265	11045	503	5200	3361	2472	29199
1986	588	1896	1071	3356	11285	614	5466	3511	2667	30455
1987	618	2001	1231	3475	11691	697	5730	3662	2867	31972
1988	649	2110	1400	3587	12077	785	5990	3815	3071	33484
1989	682	2225	1579	3693	12441	876	6245	3968	3279	34988
1990	716	2344	1767	3792	12782	972	6494	4122	3491	36479
1991	760	2459	1999	3905	13215	1058	6737	4276	3713	38123
1992	807	2579	2243	4011	13631	1147	6972	4430	3938	39758
1993	857	2705	2500	4111	14027	1237	7199	4583	4165	41382
1994	914	2824	2792	4229	14530	1324	7416	4735	4412	43175
1995	975	2949	3099	4340	15017	1411	7622	4885	4659	44958
1996	1039	3078	3423	4444	15485	1499	7817	5034	4907	46727
1997	1107	3213	3764	4540	15933	1587	8000	5180	5153	48477
1998	1178	3352	4122	4628	16359	1674	8169	5324	5395	50202
1999	1256	3488	4507	4734	16886	1761	8324	5463	5663	52081
2000	1337	3628	4911	4830	17389	1847	8464	5599	5925	53931
2001	1378	3740	5063	4901	17642	1874	8587	5731	6012	54928
2002	1421	3856	5219	4961	17860	1897	8693	5857	6086	55849
2003	1465	3974	5380	5011	18040	1916	8780	5978	6147	56691
2004	1510	4096	5545	5050	18180	1931	8849	6093	6195	57449
2005	1556	4222	5715	5078	18279	1942	8897	6093	6229	58009
2006	1603	4351	5889	5093	18335	1948	8924	6093	6248	58484
2007	1652	4483	6069	5096	18345	1949	8929	6093	6251	58867

Es importante mencionar que para llegar a los valores de la Tabla 5.14 se considero la superficie de los municipios, el área urbanizable y no urbanizable, es decir, que aunque el área del municipio sea muy extensa, no significa que toda esa extensión sea urbanizable (como sucede con el Municipio de Santa Catarina), pues las características fisiográficas y topográficas del lugar juegan un papel importante, así como las áreas que por su vegetación son parte de la reserva ecológica y por su tipo de suelo son de gran importancia en el proceso de infiltración y recarga de los acuíferos.

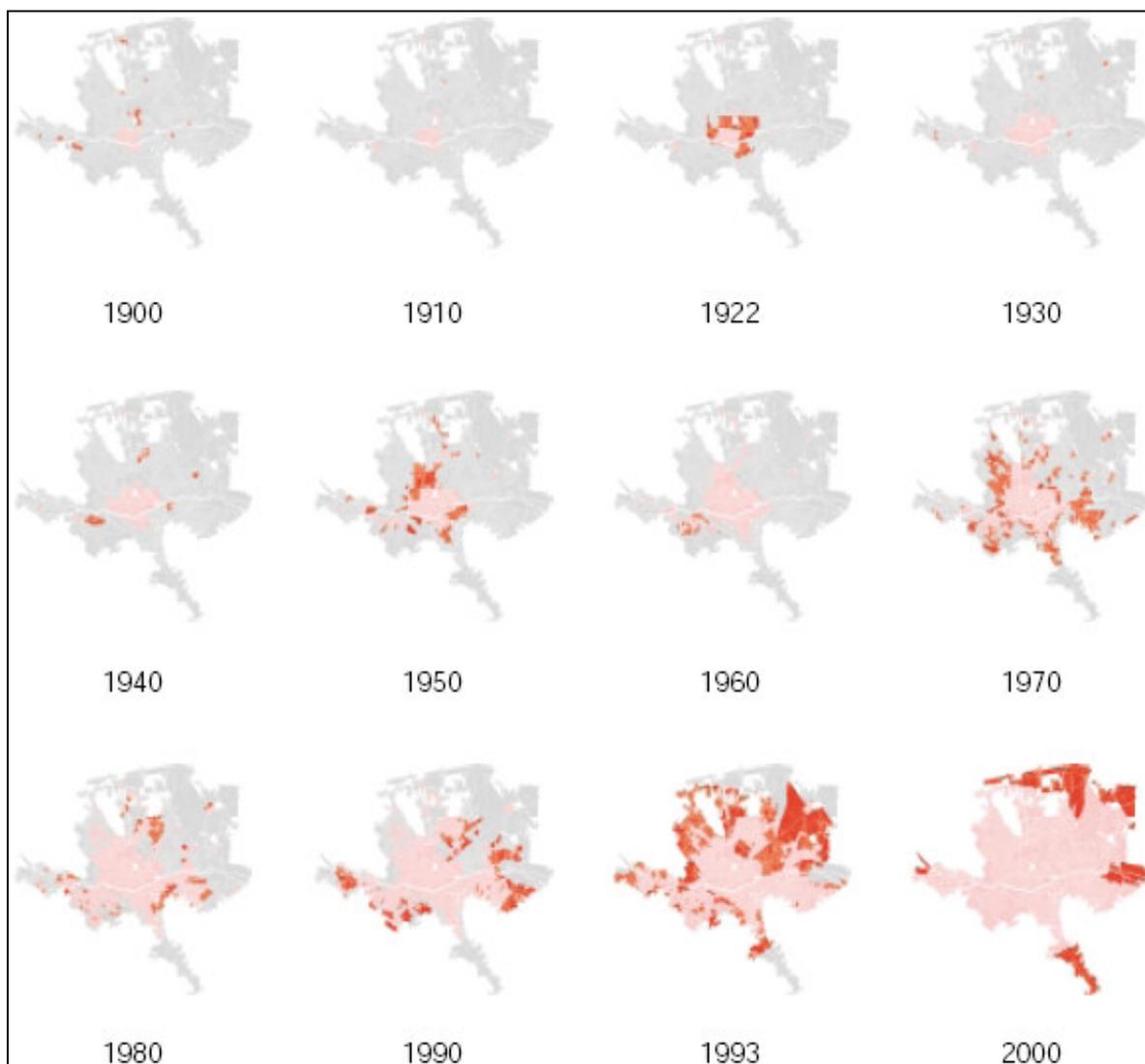


Figura 5.3 Crecimiento histórico territorial del Área Metropolitana de Monterrey. (Figura 5-294)

Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia A. *Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo*. 2002., Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), *Ciudades capitales*, 2000.

5.3 Infiltración y escurrimiento.

Una vez ubicada el área de estudio, con la base de datos del CLICOM y del ERIC II (IMTA, 2000) se obtuvieron las estaciones localizadas en el AMM y sus alrededores con coordenadas 25° 24´ y 25° 59´ de latitud Norte y 99°59´ y 100° 51´ de longitud Oeste, dentro de estas coordenadas se ubicaron inicialmente 32 estaciones (Tabla 5.15), se revisó que éstas tuvieran registros lo suficientemente largos con datos de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, descartando 11 estaciones (sombreadas) que tenían registros con pocos años de información, cabe mencionar que la estación 19052 tiene casi la misma ubicación de la 19049, cuenta con una longitud grande y sus datos son casi idénticos a la 19049, por lo que se optó por utilizar solo la 19049.

Tabla 5.15.

COMISION NACIONAL DEL AGUA
SUBDIRECCION GENERAL TECNICA
COORDINACION DEL SERVICIO METEOROLOGICO
ESTACIONES CLIMATOLOGICAS DEL SISTEMA CLICOM

ESTADO: NUEVO LEON

Numero	Nombre	Latitud		Longitud		Altura msnm	Fechas	
		Grados	Minutos	Grados	Minutos		Inicio	Fin
19002	AGUA BLANCA, STA. CATARINA	25	30	100	26	2690	1957-05	1998-12
19004	APODACA, APODACA	25	47	100	11	474	1964-02	1990-02
19008	CADEREYTA JIMENEZ,	25	36	100	0	349	1947-04	1998-11
19012	CIENEGA DE FLORES	25	57	100	10	382	1941-09	2001-12
19015	EL CERRITO, V. DE SANTIAGO	25	31	100	11	90	1957-07	1999-12
19017	EL MARRUBIAL,	25	30	100	22	1225	1971-01	1973-04
19018	EL PAJONAL, STA. CATARINA	25	30	100	22	1531	1954-06	2000-12
19025	HIGUERAS, HIGUERAS (SMN)	25	58	100	1	412	1944-10	1998-11
19026	ICAMOLE, GARCIA	25	55	100	44	580	1953-07	2000-12
19031	LA CRUZ, STA. CATARINA	25	28	100	27	445	1938-01	1999-12
19038	LAS COMITAS, STA. CATARINA	25	32	100	20	223	1942-04	1986-03
19049	MONTERREY, MONTERREY (DGE)	25	41	100	19	537	1925-12	2001-12
19052	MONTERREY, N.L.	25	40	100	18	538	1925-12	2001-04
19054	RINCONADA, GARCIA	25	42	100	43	989	1944-06	1998-12
19058	SANTA CATARINA	25	41	100	28	113	1944-12	2001-12
19061	TOPO CHICO, MONTERREY	25	48	100	25	523	1947-04	1997-08
19062	TUNEL SAN FRANCISCO	25	25	100	11	555	1962-01	1986-05
19065	SANTIAGO, SANTIAGO	25	56	100	10	484	1923-03	1972-11
19069	LA BOCA, SANTIAGO	25	25	100	9	445	1969-09	2001-11
19088	DOCTOR ARROYO 2, (DGE)	25	40	100	12	1706	1974-06	1982-12
19096	LA HUASTECA, STA. CATARINA	25	32	100	28	410	1975-11	2000-11
19102	COLA DE CABALLO	25	41	100	25	332	1978-01	1983-11
19131	PTO. EL EBANO, SABINAS H.	25	30	100	5	300	1981-08	1998-12
19134	SALINAS VICTORIA	25	55	100	18	300	1979-05	2001-11
19140	TEPEHUAJE, CEDEREYTA	25	32	100	15	339	1980-01	2001-11
19148	DIECIOCHO DE MARZO	25	53	100	11	332	1982-01	2000-11
19150	LOS LERMAS, GUADALUPE	25	21	100	17	1435	1981-09	1986-08
19165	CHUPADEROS DEL INDIJO	25	49	100	48	270	1982-02	2001-11
19173	LOS PALMITOS, CADEREYTA	25	36	100	0	349	1982-02	1999-12
19174	SAN BARTOLO, C. JIMENEZ	25	32	100	15	350	1982-04	1998-11
19179	CERRITO DEL AIRE	25	35	100	13		1999-01	2002-11
19185	EL CANADA, GRAL. BRAVO	25	48	100	16		1999-07	2001-07

Posteriormente con 21 estaciones elegidas (Tabla 5.16) se procedió a ordenar cada uno de los registros en años y meses consecutivos de 1953 al 2001 para cada una de las variables (precipitación, temperatura media, máxima y mínima).

Tabla 5.16 Estaciones climatológicas seleccionadas.

Numero	Nombre	Latitud		Longitud		Altura msnm	Fechas	
		Grados	Minutos	Grados	Minutos		Inicio	Fin
19002	AGUA BLANCA,STA.CATARINA	25	30	100	26	2690	1957-05	1998-12
19004	APODACA, APODACA	25	47	100	11	474	1964-02	1990-02
19008	CADEREYTA JIMENEZ,	25	36	100	0	349	1947-04	1998-11
19012	CIENEGA DE FLORES	25	57	100	10	382	1941-09	2001-12
19015	EL CERRITO,V.DE SANTIAGO	25	31	100	11	90	1957-07	1999-12
19018	EL PAJONAL, STA.CATARINA	25	30	100	22	1531	1954-06	2000-12
19025	HIGUERAS, HIGUERAS (SMN)	25	58	100	1	412	1944-10	1998-11
19026	ICAMOLE, GARCIA	25	55	100	44	580	1953-07	2000-12
19031	LA CRUZ, STA. CATARINA	25	28	100	27	445	1938-01	1999-12
19038	LAS COMITAS,STA.CATARINA	25	32	100	20	223	1942-04	1986-03
19049	MONTERREY,MONTERREY(DGE)	25	41	100	19	537	1925-12	2001-12
19054	RINCONADA, GARCIA	25	42	100	43	989	1944-06	1998-12
19058	SANTA CATARINA	25	41	100	28	113	1944-12	2001-12
19061	TOPO CHICO, MONTERREY	25	48	100	25	523	1947-04	1997-08
19062	TUNEL SAN FRANCISCO	25	25	100	11	555	1962-01	1986-05
19065	SANTIAGO, SANTIAGO	25	56	100	10	484	1923-03	1972-11
19069	LA BOCA, SANTIAGO	25	25	100	9	445	1969-09	2001-11
19131	PTO. EL EBANO,SABINAS H.	25	30	100	5	300	1981-08	1998-12
19134	SALINAS VICTORIA	25	55	100	18	300	1979-05	2001-11
19140	TEPEHUAJE, CEDEREYTA	25	32	100	15	339	1980-01	2001-11
19148	DIECIOCHO DE MARZO	25	53	100	11	332	1982-01	2000-11

Con las Fórmulas de Turc y Coutagne [2] y [32] se calculó la Evapotranspiración Real Anual de cada estación utilizando sus registros de precipitación anual y temperatura media diaria del periodo y año respectivo.

Fórmula de TURC:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (5.1)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en mm/año

P = Precipitación en mm/año

$$L = 300 + 25 t + 0.05t^3$$

t = Temperatura media anual en °C

Fórmula de COUTAGNE:

$$ETR = P - XP^2 \quad (5.2)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real en metros/año

P = Precipitación en metros/año

$$X = \frac{1}{0.8 + 0.14 t}$$

t = Temperatura media anual en °C

La fórmula solo es válida para valores de P (metros/año) comprendidos entre

$$\frac{1}{8X} \text{ y } \frac{1}{2X}$$

Al calcular la Evapotranspiración Real Anual en cada estación se percibió que aquellas obtenidas con la Fórmula de Turc dieron los mejores resultados, por lo que se adoptaron solo esos valores (Tablas 5.17a y 5.17b).

Tabla 5.17a. Resultados de los Cálculos de la Evapotranspiración Real Anual con la Fórmula de Turc por Estación del Área Metropolitana de Monterrey de 1953 a 2001.

ESTACION	19002	19004	19008	19012	19015	19018	19025	19026	19031	19038	19049
AÑO	TURC										
1953				647						373	
1954										354	
1955			510	448						425	547
1956										349	
1957			628	578						331	383
1958			687	765				439		567	845
1959			553	617						460	369
1960			577	718		498				412	401
1961				542		521				374	460
1962			478	617		523				397	475
1963			474	669		536				350	500
1964			779	516		524				439	482
1965		475	688	688		530				346	457
1966		558	661	678		663				344	629
1967		475	796	837		687		372		585	807
1968		529	800	690		479		344		296	656
1969		463	726	629						420	542
1970		444	505	553		436				309	517
1971		519	748	675		486				497	580
1972		431	704	705		373				273	610
1973		488	858	763		514		365		464	699
1974		391	459	540						296	507
1975		572	660	623						426	435
1976		664	728	770		690		340		516	685
1977		392	423	581		553				386	433
1978		556	609	653	928	595				422	702
1979		461	556	507	647	546				364	497
1980	441	400		471	613	664			429	293	580
1981		576		628	723	606		352	653	468	608
1982		314				660			536	395	
1983	221	487		547	657	543	534		541	312	516
1984	195	339		337	468		573		467		453
1985	232	437		479	676	536	455		676	324	614
1986	315	599	785	565	883	509	626		646		559
1987		481	548	514	669	448	468		715		489
1988		664	626	517	772	674	581	309	839		645
1989			543		639	428	479		483		455
1990	225		613		720	569	467		591		512
1991	243		436	432	702	479	446		671		576
1992	213		645	501	625	435			701		429
1993	305		695	528	763	476	524				608
1994	258		576	456	681	393	460				
1995	255		673	364	629		482				
1996			520	355	585		325		615		
1997			585	382	563	577		304	614		
1998	336		465	407	714	608	352		454		433
1999			538	581	259				395		487
2000											601
2001											552

Tabla 5.17b. Resultados de los Cálculos de la Evapotranspiración Real Anual con la Fórmula de Turc por Estación del Área Metropolitana de Monterrey de 1953 a 2001.

ESTACION	19054	19058	19061	19062	19065	19069	19131	19134	19140	19148
AÑO	TURC									
1953					488					
1954					633					
1955					624					
1956					550					
1957					705					
1958		700	662		902					
1959		414			670					
1960					659					
1961			428		648					
1962			409		651					
1963					799					
1964					650					
1965		407			751					
1966		482	520		881					
1967	494	715	737	831	879					
1968		472	554	661	768					
1969				726	387					
1970				625	667					
1971	431	467	440	559	780					
1972			581	807						
1973		408	695	806	788					
1974		411	419	712	587					
1975			524	600	686					
1976	366	576	572	767	747					
1977			491	679	636					
1978	344	506	639	790	808					
1979			453	676	685					
1980			518	547	646				475	
1981	389	509	622	748	736			557	677	
1982			432	675	607	488	351	420		
1983		401	643	770	715	371	463	645		
1984				543				342		
1985	299	360	526	646	602	433	402	552	407	
1986			630	283	502	667	481	685	611	
1987	311		490		609	587	442	559	493	
1988	457		650		688	681	472	626	480	
1989			396		514	477	351	326	372	
1990			497		678	423		391	431	
1991			455		650	473	441	477	452	
1992			439		617	570		525	542	
1993	328		627		710	536	566	594	385	
1994			605		695	380		424	463	
1995					902	401		647	471	
1996			513		659	456		359	245	
1997					686	526	517	557	444	
1998					704	388	418	456	290	
1999								536	295	
2000						609			384	
2001		476				793		570		

Los registros que no contaban con datos de uno o de algunos años de precipitación anual ó temperatura media, se completaron por el método de regresión, ésta técnica se realizó correlacionando entre si todos los datos de las Tablas 5.17a y 5.17b, se eligieron aquellos que aportaron mayores y notables correlaciones, una vez que se tenían las principales correlaciones, se obtuvo la correlación individual de la estación que se iba a completar con los valores de las otras estaciones. Por ejemplo para completar el registro de la estación 19004 se muestran las mejores correlaciones en la Tabla 5.18. Luego se utilizaron las estaciones que dieron las mas altas correlaciones con la estación 19004, se observo que se dieron con la 19038, 19049, 19061 y 19069, después se completaron los datos faltantes de la estación 19004 usando cada una de las estaciones seleccionadas (Tabla 5.18), para tener diferentes registros completados de una sola estación (19004) y se analizo cual de todos los registros se elegiría, cabe mencionar que uno de los puntos determinantes en ésta elección fue que la correlación del registro ya completado mejorara, es decir fuera mayor, asimismo se considero cual estación tenía un registro con mayor número de datos, las características fisiográficas y topográficas del lugar, la diferencia de alturas sobre el nivel de mar, la distancia entre las estaciones, además de las particularidades anteriores fue de suma importancia valorar el área urbanizable, la superficie no urbanizable, así como los lugares que por su vegetación y por su tipo de suelo son elementales en el ciclo hidrológico, factor determinante en el proceso de infiltración (Tabla 5.19).

Tabla 5.18. Datos de la precipitación de algunas estaciones que tienen la mejor correlación con la estación 19004 y registros con un número considerable de datos.

ESTACION	19004	19008	19012	19018	19038	19049	19061	19062	19069
AÑO	PRECIPITACION								
1965	523	833	895	552	359	479			
1966	692	838	945	749	365	783	540		
1967	527	1175	1391	806	803	1070	870	1279	
1968	623	1240	963	497	304	763	567	984	
1969	503	925	764		467	589		1058	
1970	486	541	655	456	321	566		879	
1971	583	917	873	506	565	643	455	697	
1972	459	888	949	376	274	694	659	1264	1091
1973	549	1329	1270	543	543	887	898	1783	1439
1974	410	484	627		303	545	428	1026	720
1975	668	810	777		476	452	566	723	979
1976	963	1088	1296	817	651	877	668	1758	1368
1977	407	441	683	592	425	446	523	1025	852
1978	641	720	834	722	467	887	755	1675	1547
1979	500	634	583	588	385	540	470	1058	985
1980	418		497	802	296	626	556	644	867
1981	692		731	889	530	689	719	1227	1117
1982	317			1141	423		450	897	771
1983	551		597		323	560	780	1280	1158
1984	345		338			476		640	
1985	466		502	653	326	692	572	845	750
1986	705	933	623	600		623	736	284	593
1987	536	636	562	478		525	528		870
1988	920	769	565	815		751	790		1037
CORRELACIÓN		0,34	0,36	0,13	0,44	0,43	0,42	0,35	0,42

Tabla 5.19. Complemento en los registros de la estación 19004 por el método de regresión utilizando las estaciones 19038, 19049, 19061 y 19069, que dieron la mejor correlación.

PRECIPITACION									
ESTACIÓN	19004	19004	19038	19004	19049	19004	19061	19004	19069
AÑO		19038		19049		19061		19069	
1953	557	543	393	557	646	552	592	564	989
1954	524	531	371	524	568	529	550	545	926
1955	537	582	466	537	598	538	566	553	950
1956	520	525	360	520	559	526	545	543	918
1957	446	511	333	446	387	476	451	501	780
1958	750	683	658	750	1099	616	710	675	1354
1959	441	609	517	441	373	472	444	498	769
1960	455	571	447	455	407	482	462	506	796
1961	488	544	394	488	485	469	440	525	859
1962	494	556	418	494	498	453	410	528	869
1963	511	526	361	511	538	520	533	538	902
1964	497	590	482	497	505	511	516	530	875
1965	523	523	359	523	479	523	501	523	854
1966	692	692	365	692	783	692	540	692	1099
1967	527	527	803	527	1070	527	870	527	1120
1968	623	623	304	623	763	623	567	623	944
1969	503	503	467	503	589	503	561	503	988
1970	486	486	321	486	566	486	549	486	881
1971	583	583	565	583	643	583	455	583	772
1972	459	459	274	459	694	459	659	459	1091
1973	549	549	543	549	887	549	898	549	1439
1974	410	410	303	410	545	410	428	410	720
1975	668	668	476	668	452	668	566	668	979
1976	963	963	651	963	877	963	668	963	1368
1977	407	407	425	407	446	407	523	407	852
1978	641	641	467	641	887	641	755	641	1547
1979	500	500	385	500	540	500	470	500	985
1980	418	418	296	418	626	418	556	418	867
1981	692	692	530	692	689	692	719	692	1117
1982	317	317	423	317	610	317	450	317	771
1983	551	551	323	551	560	551	780	551	1158
1984	345	345	377	345	476	345	500	345	738
1985	466	466	326	466	692	466	572	466	750
1986	705	705	430	705	623	705	736	705	593
1987	536	536	394	536	525	536	528	536	870
1988	920	920	477	920	751	920	790	920	1037
1989	483	534	375	483	473	450	404	451	614
1990	513	547	401	513	543	514	521	565	991
1991	548	563	430	548	624	484	466	523	854
1992	469	527	363	469	439	475	450	500	777
1993	573	574	452	573	684	625	727	614	1155
1994	494	539	385	494	498	593	668	545	926
1995	475	530	368	475	453	495	487	608	1133
1996	473	529	367	473	450	529	550	519	840
1997	479	532	372	479	463	498	493	558	967
1998	471	528	365	471	444	493	482	546	928
1999	500	541	389	500	512	513	519	531	880
2000	564	570	444	564	662	557	601	481	714
2001	541	560	425	541	610	541	572	638	1233
CORRELACIÓN		0,47		0,57		0,56		0,53	

En seguida, de la Tabla 5.19 se analizaron los valores obtenidos de las mejores correlaciones para la estación 19004, se observó que se dieron con la 19049, 19061 y 19069, la diferencia en cuanto al valor obtenido entre las tres es mínima, se prefirió la 19049, en éste caso para su determinación se tomaron en cuenta las siguientes características: la mayor correlación con **0.57**, la estación elegida tiene el registro más grande, por lo tanto, se correlacionaron la mayor parte de datos de la muestra, pues solo carecía de un dato para ser de la misma longitud que la estación por completar, a diferencia de la 19061 que tiene una correlación de **0.56** y le faltan cuatro datos, la 19069 tiene una correlación de **0.53** y carece de ocho valores, otra consideración substancial es la diferencia de altura sobre el nivel de mar, pues la altura de la estación 19049 es 63 metros mayor que la estación 19004, a diferencia de la estación 19061 que es 49 metros mayor con la estación 19004, otro factor importante es la distancia entre las estaciones (Tabla 5.20).

Tabla 5.20. Altura, mejor correlación, diferencia de altura y distancia con la estación 19004.

ESTACION	19004	19038	19049	19061	19069
ALTURA msnm	474	223	537	523	445
CORRELACIÓN		0,47	0,57	0,56	0,53
DIFERENCIA DE ALTURA m.		-251	63	49	-29
DISTANCIA EN Km.		31,3	18,7	25,1	40,6

Por último, se obtuvo el registro elegido de precipitación de la estación 19004, completado por la técnica arriba mencionada. De la misma forma se completaron los demás registros de precipitación, recalando que serán diferentes las consideraciones tomadas en cuenta para cada estación, dependiendo de las características señaladas líneas arriba.

Con el procedimiento descrito en los dos párrafos anteriores, se completaron los registros finales de precipitación y temperatura media de cada estación por el método de regresión.

Con los registros anteriores, finalmente se concluyó el registro de Evapotranspiración Real anual por estación con la Fórmula de Turc, en las Tablas 5.21a y 5.21b se muestran los resultados.

Tabla 5.21a. Resultados finales de los Cálculos de la Evapotranspiración Real Anual con la Fórmula de Turc por Estación del Área Metropolitana de Monterrey de 1953 a 2001.

ESTACION	19002	19004	19008	19012	19015	19018	19025	19026	19031	19038	19049
AÑO	TURC										
1953	273	497	639	647	677	562	502	333	616	373	578
1954	268	473	620	588	647	545	493	329	591	354	517
1955	258	484	510	448	668	550	498	343	678	425	547
1956	268	471	621	587	651	541	492	329	584	349	513
1957	263	421	628	578	623	492	477	337	561	331	383
1958	296	613	687	765	787	653	550	439	823	567	845
1959	260	415	553	617	610	490	474	350	717	460	369
1960	262	428	577	718	630	498	479	340	663	412	401
1961	265	450	608	542	637	521	485	333	616	374	460
1962	267	456	478	617	649	523	488	338	644	397	475
1963	268	466	474	669	648	536	491	329	586	350	500
1964	266	458	779	516	654	524	489	346	694	439	482
1965	270	475	688	688	659	530	494	328	581	346	457
1966	285	558	661	678	658	663	523	326	579	344	629
1967	269	475	796	837	647	687	493	372	840	585	807
1968	279	529	800	690	667	479	512	344	513	296	656
1969	267	463	726	629	659	546	491	342	673	420	542
1970	265	444	505	553	611	436	481	320	532	309	517
1971	280	519	748	675	713	486	512	359	756	497	580
1972	262	431	704	705	636	373	480	315	479	273	610
1973	273	488	858	763	654	514	498	365	723	464	699
1974	256	391	459	540	591	538	466	318	513	296	507
1975	284	572	660	623	767	505	533	343	681	426	435
1976	309	664	728	770	727	690	577	340	778	516	685
1977	254	392	423	581	605	553	468	334	633	386	433
1978	304	556	609	653	928	595	526	342	675	422	702
1979	260	461	556	507	647	546	490	330	604	364	497
1980	441	400	583	471	613	664	471	318	429	293	580
1981	278	576	691	628	723	606	533	352	653	468	608
1982	244	314	527	480	529	660	443	337	536	395	545
1983	221	487	625	547	657	543	534	320	541	312	516
1984	195	339	542	337	468	515	573	329	467	358	453
1985	232	437	604	479	676	536	455	340	676	324	614
1986	315	599	785	565	883	509	626	337	646	398	559
1987	271	481	548	514	669	448	468	332	715	371	489
1988	287	664	626	517	772	674	581	309	839	433	645
1989	269	448	543	573	639	428	479	330	483	359	455
1990	225	470	613	589	720	569	467	334	591	380	512
1991	243	495	436	432	702	479	446	339	671	404	576
1992	213	438	645	501	625	435	617	329	701	350	429
1993	305	509	695	528	763	476	524	341	669	417	608
1994	258	457	576	456	681	393	460	332	609	368	479
1995	255	442	673	364	629	516	482	329	591	354	440
1996	261	441	520	355	585	518	325	329	615	352	436
1997	253	445	585	382	563	577	534	304	614	356	448
1998	336	440	465	407	714	608	352	329	454	352	433
1999	211	460	538	581	259	540	408	332	395	371	487
2000	275	505	648	614	697	562	476	341	665	414	601
2001	271	487	631	599	666	554	498	337	643	395	552

Tabla 5.21b. Resultados finales de los Cálculos de la Evapotranspiración Real Anual con la Fórmula de Turc por Estación del Área Metropolitana de Monterrey de 1953 a 2001.

ESTACION	19054	19058	19061	19062	19065	19069	19131	19134	19140	19148
AÑO	TURC									
1953	370	480	546	709	488	695	516	483	592	431
1954	364	464	510	668	633	658	492	465	561	409
1955	366	359	527	694	624	683	505	474	497	426
1956	363	462	508	670	550	662	492	464	562	413
1957	349	423	439	601	705	620	452	430	566	402
1958	403	700	662	848	902	825	627	574	664	511
1959	349	414	430	586	670	606	445	426	567	391
1960	351	426	449	614	659	630	458	434	633	406
1961	358	416	428	642	648	643	474	449	528	406
1962	358	400	409	656	651	657	482	453	576	416
1963	362	457	500	664	799	658	488	460	599	412
1964	359	448	492	663	650	664	485	456	512	420
1965	359	407	477	641	751	644	497	448	615	420
1966	398	482	520	717	881	692	546	505	595	394
1967	494	715	737	831	879	785	493	522	714	408
1968	345	472	554	661	768	657	533	469	606	412
1969	365	467	525	726	387	708	489	485	583	423
1970	334	464	510	625	667	633	463	453	531	381
1971	431	467	440	559	780	598	541	425	606	460
1972	369	508	581	807	611	825	462	522	623	411
1973	355	408	695	806	763	788	503	585	650	411
1974	362	411	419	712	630	587	425	413	529	381
1975	353	470	524	600	735	686	593	480	573	498
1976	366	576	572	767	800	747	636	565	655	443
1977	365	453	491	679	703	636	429	447	556	395
1978	344	506	639	790	732	808	577	607	591	486
1979	364	429	453	676	687	685	488	481	506	425
1980	405	466	518	547	629	646	437	452	475	401
1981	389	509	622	748	766	736	586	557	677	470
1982	450	422	432	675	713	607	488	351	420	351
1983	364	401	643	770	643	715	371	463	645	398
1984	356	443	475	543	682	596	381	418	342	361
1985	299	360	526	646	660	602	433	402	552	407
1986	359	537	630	283	714	502	667	481	685	611
1987	311	456	490	627	693	609	587	442	559	493
1988	457	558	650	711	741	688	681	472	626	480
1989	332	401	396	471	685	514	477	351	326	372
1990	370	450	497	697	702	678	423	481	391	431
1991	346	426	455	651	721	650	473	441	477	452
1992	334	422	439	605	678	617	570	429	525	542
1993	328	533	627	739	730	710	536	566	594	385
1994	371	508	605	698	693	695	380	470	424	463
1995	356	440	469	883	681	902	401	540	647	471
1996	356	463	513	653	679	659	456	447	359	245
1997	374	442	473	699	683	686	526	517	557	444
1998	384	438	466	704	680	704	388	418	456	290
1999	362	450	494	665	694	665	486	457	536	295
2000	370	482	559	576	728	609	527	415	579	384
2001	367	476	530	806	712	793	506	546	570	423

Para determinar el área de influencia de las estaciones del Área Metropolitana de Monterrey, fue necesario conocer el peso de cada estación en los municipios, se utilizó el método de los polígonos de Thiessen (Mapas 5.1a y 5.1b), estos cálculos nos permitieron eliminar las estaciones que no ejercieron efecto alguno en la zona metropolitana de Monterrey; se calculó el porcentaje de área correspondiente de cada estación para cada municipio, por ejemplo para el municipio de Monterrey se tienen las estaciones que influyen y sus porcentajes (Tabla 5.22).

Tabla 5.22. Porcentajes de las estaciones que tienen influencia sobre la superficie del municipio de Monterrey.

ESTACIÓN	19015	19038	19049	19058	19061	19140	TOTAL
MONTERREY	1,86%	11,63%	41,26%	3,47%	10,91%	30,88%	100,0%

En la Tabla 5.23 se muestra el área de influencia de las diferentes estaciones con cada uno de los nueve municipios del AMM.

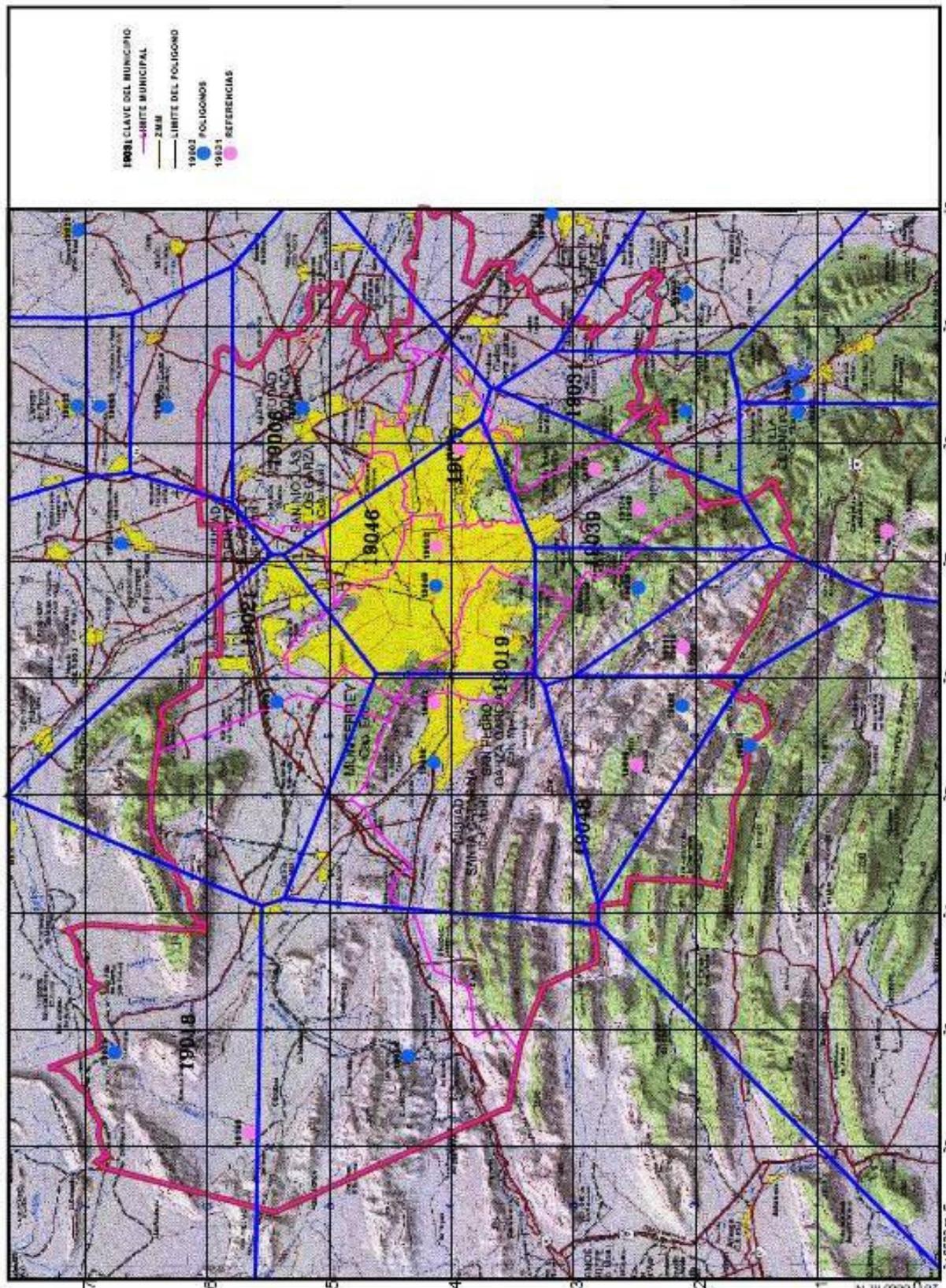
Tabla 5.23. Porcentajes de las estaciones que tienen influencia sobre cada uno de los municipios del Área Metropolitana de Monterrey.

ÁREA DE INFLUENCIA DE LAS ESTACIONES POR MUNICIPIO PARA EL AMM EN %									
ESTACIÓN	GARCIA	SANTA CATARINA	GENERAL ESCOBEDO	SAN PEDRO GARZA GARCIA	MTY	JUAREZ	GPE	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	APODACA
19002		18,3%							
19004			1,3%			10,9%	37,5%	10,0%	81,6%
19008						35,1%			
19015					1,9%	23,9%			
19018		10,3%							
19026	33,8%								
19031		12,2%							
19038		8,9%		9,8%	11,6%				
19049		0,0%	7,1%	53,7%	41,3%	0,4%	59,3%	89,9%	0,6%
19054	41,0%	13,6%							
19058	7,3%	33,4%	3,9%	36,4%	3,5%				
19061	17,9%		78,8%		10,9%			0,0%	
19062		0,9%							
19131						7,4%			
19134			8,9%						5,8%
19140		2,4%			30,9%	22,3%	3,2%		
19148									12,0%

Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Marco Geoestadístico Municipal 2005, (disco compacto), México.

Nota: Los porcentajes de área municipal se obtuvieron con base al Marco Geoestadístico Municipal 2005, (INEGI).

Mapa 5.1 b Polígonos de Thiessen en carta topográfica del Área Metropolitana de Monterrey.



Fuente: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Carta Topográfica*, escala 1:250,000, Monterrey G14-7. 2ª edición, México, 1997.

5.3.1 Cálculo de la Precipitación Promedio Anual por municipio.

Una vez obtenida la influencia de cada estación en los municipios, con la Precipitación anual por estación, se determinó la Precipitación promedio anual municipal ponderada con la ecuación (5.3).

$$\overline{\text{PREC}}_{\text{MUNICIPAL ANUAL}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Área}_i \times \text{Prec}_{i+1} + \text{Área}_{i+1} \times \text{Prec}_{i+1} + \dots + \text{Área}_n \times \text{Prec}_n)}{\text{Área total}_{\text{MUNICIPAL}}} \quad (5.3)$$

Donde:

$\overline{\text{PREC}}_{\text{MUNICIPAL ANUAL}}$ = Precipitación promedio anual por municipio en mm.

Prec_i = Precipitación anual de cada estación en mm.

Área_i = Área de influencia de cada estación por municipio en Km².

$\text{Área total}_{\text{MUNICIPAL}}$ = Área total por municipio en Km².

n = número de estaciones por municipio.

La Tabla 5.24 muestra los valores estimados de la Precipitación promedio anual ponderada por municipio en mm.

5.3.2 Cálculo de la Evapotranspiración Real Promedio Anual por municipio.

Con el peso de las estaciones en cada municipio, se utilizaron los valores obtenidos de la evapotranspiración real anual por estación, se estimó la evapotranspiración real promedio anual municipal ponderada con la ecuación (5.4).

$$\overline{\text{ETR}}_{\text{MUNICIPAL ANUAL}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{Área}_i \times \text{ETR}_i + \text{Área}_{i+1} \times \text{ETR}_{i+1} + \dots + \text{Área}_n \times \text{ETR}_n)}{\text{Área total}_{\text{MUNICIPAL}}} \quad (5.4)$$

Donde:

$\overline{\text{ETR}}_{\text{MUNICIPAL ANUAL}}$ = Evapotranspiración real promedio anual por municipio en mm.

ETR_i = Evapotranspiración real anual de cada estación en mm.

Área_i = Área de influencia de cada estación en un municipio en Km².

$\text{Área total}_{\text{MUNICIPAL}}$ = Área total por municipio en Km².

n = número de estaciones por municipio.

La Tabla 5.25 muestra los valores estimados de la Evapotranspiración real promedio anual por municipio en mm.

Tabla 5.24. Valores estimados de la Precipitación promedio anual por municipio en mm.

PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL MUNICIPAL DEL AMM EN mm.										
AÑO	GARCIA	SANTA CATARINA	GRAL ESCOBEDO	SAN PEDRO GARZA GARCIA	MTY	JUAREZ	GPE	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	APODACA	AMM
1953	411	491	585	571	637	755	615	637	551	533
1954	397	469	543	519	579	717	555	564	520	501
1955	398	457	554	500	566	668	574	592	532	494
1956	395	464	538	512	572	714	548	555	516	497
1957	372	426	445	399	479	666	418	393	448	440
1958	520	754	740	998	931	906	961	1064	731	752
1959	376	485	438	412	513	642	409	380	442	460
1960	377	468	456	423	551	684	438	412	456	469
1961	372	450	446	455	523	684	492	486	487	464
1962	367	454	423	459	545	627	503	498	492	462
1963	392	463	527	499	591	650	535	535	508	490
1964	394	491	509	490	545	819	506	505	495	504
1965	378	435	493	442	564	774	505	483	517	480
1966	413	509	559	646	711	864	750	774	672	576
1967	562	809	854	1000	998	955	866	1016	529	783
1968	399	449	573	626	699	974	712	749	609	556
1969	406	503	555	542	611	782	561	580	503	525
1970	381	432	540	513	565	627	539	558	486	473
1971	420	532	470	580	652	831	625	637	570	551
1972	418	440	644	598	672	770	609	670	467	526
1973	464	508	853	683	858	1005	763	853	553	635
1974	366	422	435	477	532	567	497	531	415	443
1975	403	501	552	470	562	822	541	473	647	523
1976	437	656	683	767	863	1123	913	886	917	704
1977	394	477	509	453	527	556	438	442	415	464
1978	435	543	749	717	776	854	790	862	637	615
1979	380	456	478	490	540	646	528	536	499	474
1980	415	507	549	544	540	603	544	605	426	499
1981	455	561	703	617	737	865	696	689	677	610
1982	431	502	450	528	510	524	495	581	330	476
1983	430	418	721	481	618	740	563	559	543	513
1984	383	403	488	461	428	477	423	463	358	414
1985	366	419	557	535	605	665	605	670	458	480
1986	442	529	701	590	706	988	662	631	694	600
1987	372	476	520	494	559	710	534	526	544	491
1988	494	647	757	674	750	896	817	768	867	673
1989	353	389	406	440	417	572	473	474	466	412
1990	395	451	520	503	488	657	527	540	512	474
1991	374	455	476	539	543	587	591	616	542	476
1992	361	446	448	430	477	683	454	442	510	452
1993	426	525	708	624	665	881	642	673	560	573
1994	426	465	634	506	491	614	495	498	500	486
1995	379	452	490	445	553	734	472	455	489	476
1996	393	476	531	455	432	552	456	453	446	454
1997	381	476	495	452	512	658	474	464	499	473
1998	392	459	473	438	481	614	457	446	448	457
1999	390	411	513	485	524	497	511	510	477	447
2000	416	505	585	587	639	751	626	652	545	540
2001	408	500	574	555	603	729	586	603	541	524

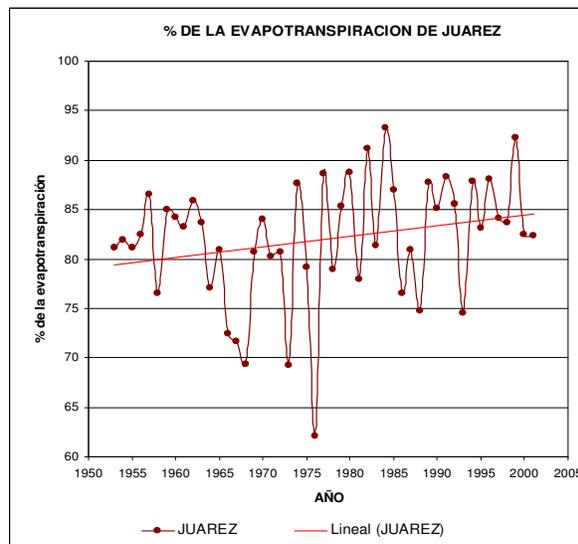
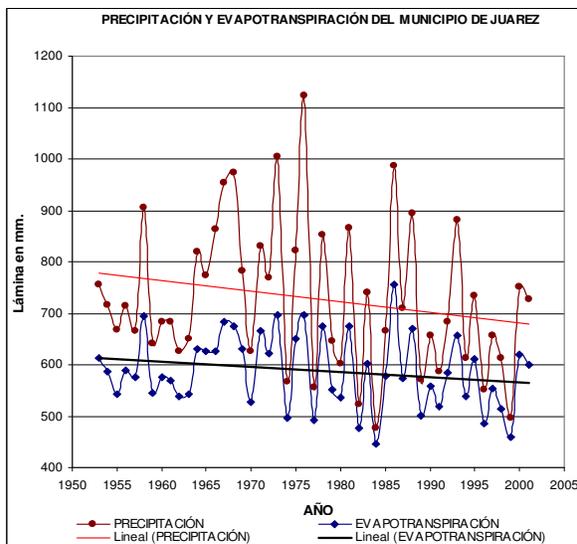
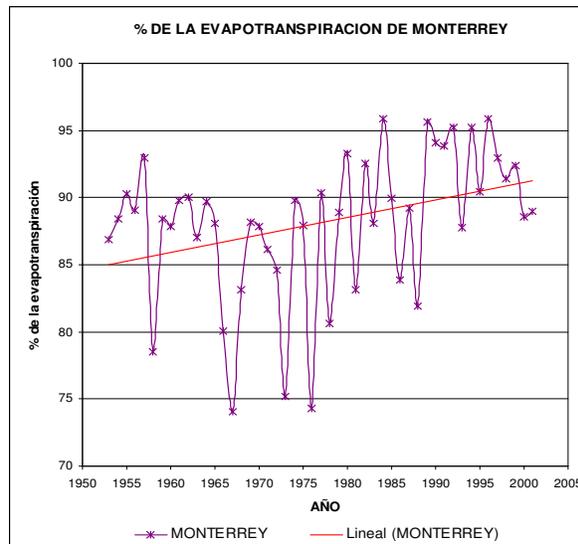
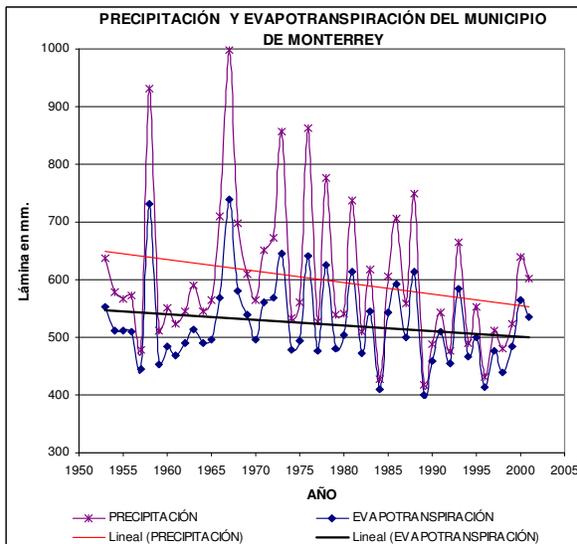
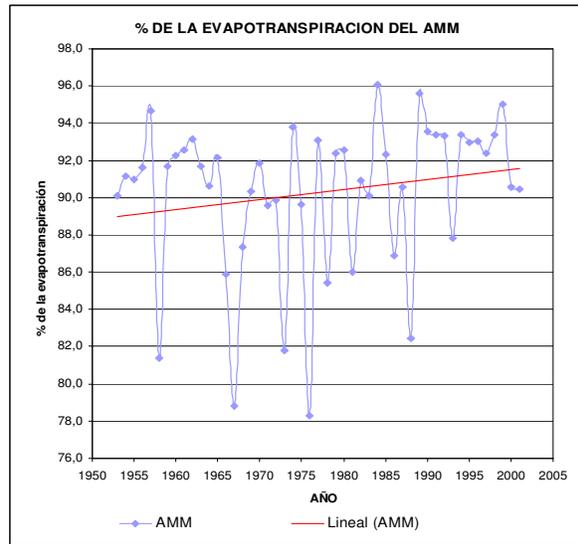
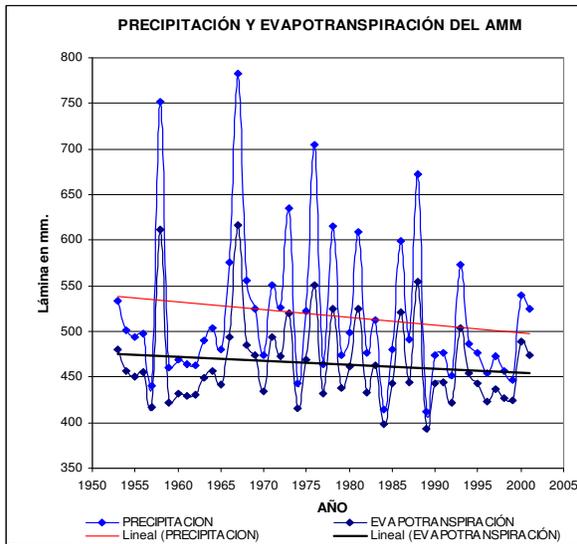
Tabla 5.25. Valores estimados de la Evapotranspiración real promedio anual por municipio en mm

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL PROMEDIO ANUAL MUNICIPAL DEL AMM EN mm.										
AÑO	GARCIA	SANTA CATARINA	GENERAL ESCOBEDO	SAN PEDRO GARZA GARCIA	MTY	JUAREZ	GPE	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	APODACA	AMM
1953	397	447	539	522	553	613	548	570	489	480
1954	386	433	504	482	511	588	502	512	465	457
1955	387	413	517	467	511	542	522	541	477	450
1956	385	430	502	478	509	588	499	509	464	455
1957	367	405	433	393	445	576	403	387	419	417
1958	483	584	668	765	731	694	752	822	600	612
1959	369	431	425	394	453	546	392	373	413	422
1960	370	428	443	411	484	576	419	404	425	432
1961	366	417	432	436	469	569	459	459	445	430
1962	363	419	418	440	490	538	471	473	451	431
1963	382	429	495	469	514	544	490	496	459	450
1964	385	443	486	466	489	632	474	480	454	456
1965	373	411	470	428	497	626	469	458	467	442
1966	402	458	525	548	569	626	601	622	536	494
1967	513	605	719	752	739	684	680	774	472	617
1968	392	414	550	554	581	675	607	643	513	486
1969	393	451	520	503	538	631	514	534	460	474
1970	370	404	503	477	496	526	490	510	438	435
1971	411	472	451	531	562	667	558	574	507	494
1972	399	411	573	540	568	621	543	592	435	473
1973	423	440	671	570	645	696	619	678	486	520
1974	361	397	424	451	478	497	464	495	392	415
1975	389	449	513	447	494	651	491	449	557	469
1976	410	533	581	628	641	698	676	683	632	551
1977	384	436	480	436	476	493	421	429	395	432
1978	408	474	634	603	626	674	644	688	552	525
1979	373	421	458	459	480	551	484	493	458	438
1980	400	454	513	510	504	535	509	562	405	461
1981	427	481	611	558	613	675	598	604	563	524
1982	406	431	431	486	472	478	455	522	322	433
1983	402	396	607	454	544	603	509	513	475	462
1984	375	387	465	440	410	445	407	441	347	398
1985	358	389	513	493	544	579	546	596	432	443
1986	413	471	608	535	592	756	578	563	594	521
1987	361	430	484	466	499	575	488	489	480	445
1988	449	533	630	592	614	669	651	646	631	555
1989	348	375	397	426	399	502	448	455	433	394
1990	387	422	494	477	460	559	493	508	466	443
1991	369	418	461	504	509	519	542	568	487	445
1992	357	405	437	419	454	585	436	430	450	422
1993	401	467	615	562	584	657	571	598	498	503
1994	410	431	579	478	468	539	469	477	459	454
1995	373	422	472	432	501	610	448	440	451	443
1996	383	425	498	438	414	486	435	436	418	423
1997	373	430	473	437	476	553	450	447	449	437
1998	384	426	458	427	440	514	437	434	421	427
1999	382	394	488	462	484	459	478	484	440	425
2000	402	457	545	539	566	620	564	591	486	489
2001	394	450	530	509	536	600	528	545	483	474

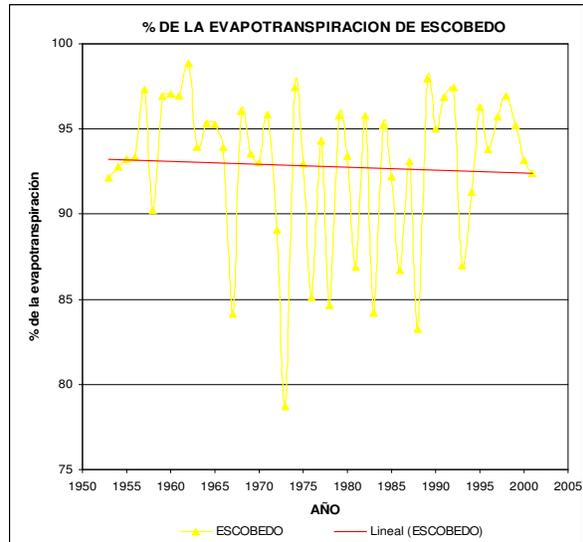
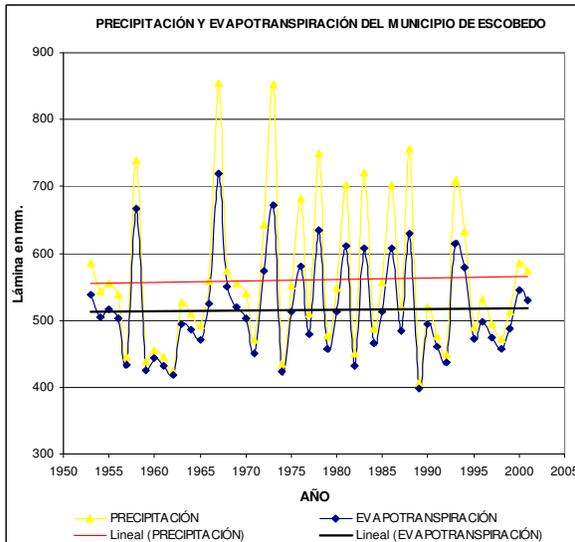
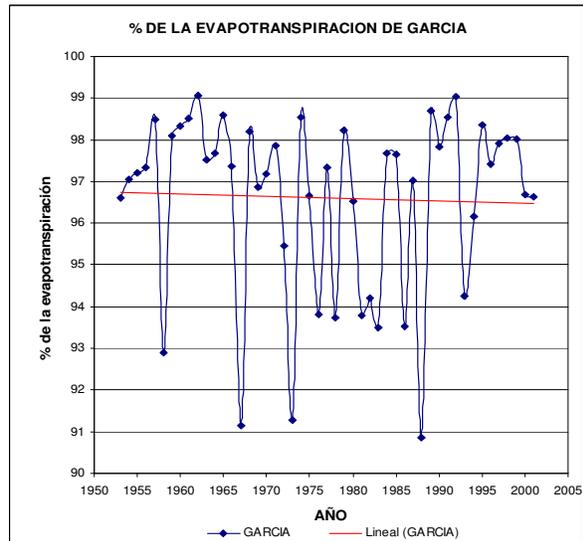
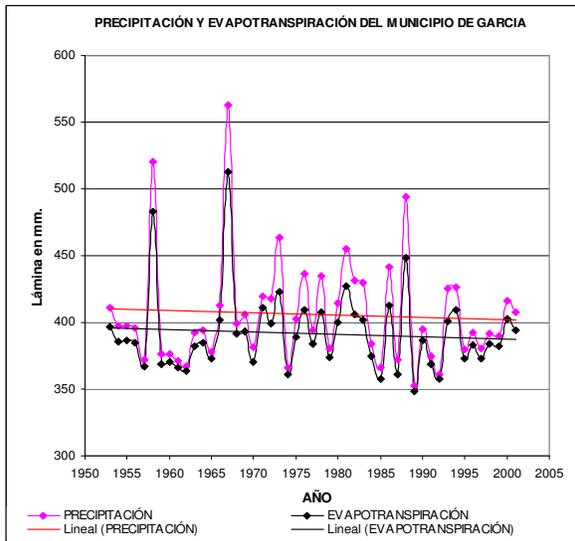
Tabla 5.26. Valores estimados de las tendencias de las Láminas de Precipitación y Evapotranspiración real promedio anual por municipio en el AMM.

MUNICIPIO	PRECIPITACION PROMEDIO (mm)	TENDENCIA PRECIPITACION (mm)	% EVAP PROM	% TENDENCIA EVAP PROM	EVAPOTRANS PROMEDIO (mm)	TENDENCIA EVAPOTRANS PROMEDIO (mm)
GARCIA	406	-9	96,6	-0,3	392	-9
SANTA CATARINA	490	-35	90,4	1,6	440	-20
GENERAL ESCOBEDO	560	11	92,8	-0,8	515	6
SAN PEDRO	543	-57	92,4	3,2	496	-24
MONTERREY	601	-97	88,1	6,3	523	-46
JUAREZ	728	-100	82,0	5,2	589	-47
GUADALUPE	577	-55	90,4	3,1	515	-26
SAN NICOLAS	592	-65	91,1	3,4	531	-31
APODACA	531	-13	89,6	0,9	470	-8
AMM	518	-40,5	90,3	2,6	465	-22

Al examinar los valores estimados de las tendencias de precipitación y evapotranspiración real promedio anual municipal del AMM (1952-2001), es evidente que las láminas de dichos valores tienen tendencias negativas; en el AMM la precipitación ha descendido 40.5mm y la evapotranspiración 22mm, ésta última se ha elevado 2.6% en porcentaje, los municipios de Monterrey y Juárez han sufrido las mayores pérdidas en la lámina de precipitación promedio anual estimada con 100mm y 97mm respectivamente, en la lámina de evapotranspiración real promedio anual estimada 46mm y 47mm, además de tener el más alto incremento en el porcentaje de evapotranspiración con 6.3% y 5.2% respectivamente (Tabla 5.25 y Gráficas 5.1a a 5.1f). El municipio de García por el tipo de clima de su región tiene el promedio estimado de precipitación anual más bajo con 406mm, la tendencia de su lámina de precipitación y de evapotranspiración real promedio anual ha disminuido en 9mm. Los municipios de García y General Escobedo muestran un decremento en los porcentajes de la tendencia de evapotranspiración de 0.3% y 0.8% respectivamente. El municipio de General Escobedo es el único que muestra un incremento en la tendencia de los valores de las láminas de precipitación y de evapotranspiración real promedio anual estimadas. Lo anterior se muestra en la Tabla 5.26 y en las Gráficas 5.1g a 5.1j.



Graficas 5.1a a 5.1f. Tendencias de las Láminas de Precipitación, Evapotranspiración y % de la Evapotranspiración real promedio anual del AMM y de los municipios de Monterrey y Juárez.



Graficas 5.1g a 5.1j. Tendencias de las Láminas de Precipitación, Evapotranspiración y % de la Evapotranspiración real promedio anual de los municipios de García y General Escobedo.

5.3.3 Cálculo de la Lámina de Lluvia Promedio Anual por municipio.

Obtenida la Precipitación y la Evapotranspiración real promedio anual por municipio, se estimó la Lámina de Lluvia promedio anual por municipio (5.5).

$$\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL}} = \overline{PREC}_{MUNICIPAL ANUAL} - \overline{ETR}_{MUNICIPAL ANUAL} \quad (5.5)$$

Donde:

$\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL}}$ = Lámina de lluvia promedio anual por municipio en mm.

$\overline{PREC}_{MUNICIPAL ANUAL}$ = Precipitación promedio anual por municipio en mm.

$\overline{ETR}_{MUNICIPAL ANUAL}$ = Evapotranspiración real promedio anual por municipio en mm.

La Tabla 5.27 muestra los valores de la Lámina de lluvia anual por municipio.

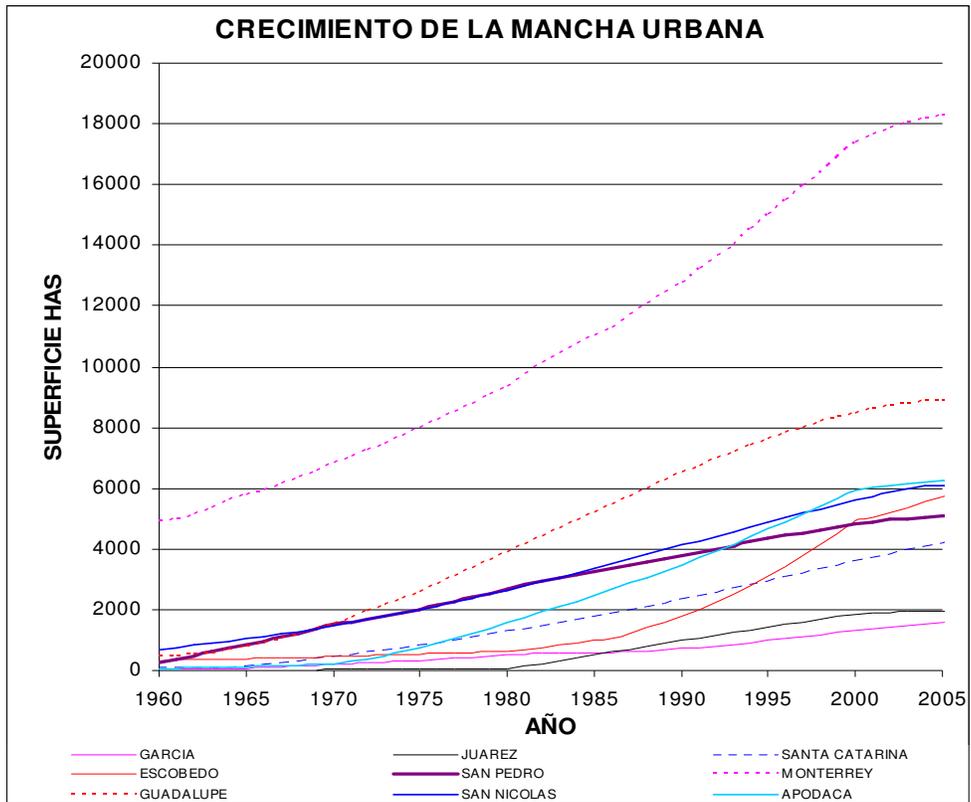
Tabla 5.27. Valores estimados de la Lámina de lluvia promedio anual por municipio en mm.

LAMINA DE LLUVIA PROMEDIO ANUAL MUNICIPAL DEL AMM EN mm										
MUNICIPIO	GARCIA	SANTA CATARINA	GENERAL ESCOBEDO	SAN PEDRO GARZA GARCIA	MTY	JUAREZ	GPE	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	APODACA	AMM
1953	14	43	46	49	84	142	67	67	61	53
1954	12	36	39	38	67	130	53	51	54	44
1955	11	44	37	33	55	126	52	52	55	44
1956	11	33	36	34	63	125	48	45	52	42
1957	6	21	12	6	34	90	15	6	29	24
1958	37	169	72	233	200	212	209	242	131	140
1959	7	54	14	17	59	96	17	7	29	38
1960	6	41	13	12	67	108	20	8	30	36
1961	6	33	14	20	54	115	33	26	42	34
1962	3	35	5	19	54	88	32	25	41	32
1963	10	34	32	29	77	106	45	39	48	41
1964	9	48	24	24	56	188	32	25	41	47
1965	5	24	23	14	67	148	36	25	50	38
1966	11	51	34	99	142	238	148	152	137	81
1967	50	204	135	248	259	270	186	242	58	166
1968	7	35	23	72	118	299	105	106	96	70
1969	13	52	36	39	72	151	47	46	43	51
1970	11	28	38	36	69	100	49	49	48	39
1971	9	60	20	49	90	164	67	63	63	58
1972	19	29	71	59	103	148	66	78	31	53
1973	40	69	181	113	212	309	144	175	67	116
1974	5	25	11	26	55	70	33	36	23	28
1975	13	52	39	23	68	171	50	24	89	54
1976	27	123	102	139	222	425	237	203	285	153
1977	10	42	29	18	51	63	17	13	19	32
1978	27	69	115	114	150	180	146	175	85	90
1979	7	35	20	31	60	95	44	43	41	36
1980	14	52	36	34	36	67	35	43	21	37
1981	28	80	92	59	124	190	98	85	114	85
1982	25	71	19	42	38	46	40	59	7	43
1983	28	22	114	27	74	138	54	47	68	51
1984	9	17	24	21	18	32	16	22	11	16
1985	9	30	43	42	61	87	60	73	26	37
1986	29	58	93	55	114	232	84	68	100	79
1987	11	47	36	28	60	135	45	37	64	46
1988	45	114	127	82	136	226	166	122	236	118
1989	5	14	8	14	18	70	24	20	33	18
1990	9	29	26	26	29	97	35	32	46	31
1991	5	37	15	35	34	69	49	49	55	31
1992	4	41	11	11	23	98	18	12	60	30
1993	24	58	93	62	81	224	72	75	62	70
1994	16	34	55	28	23	74	26	21	41	32
1995	6	29	18	13	53	124	24	15	38	33
1996	10	51	33	18	18	66	21	16	28	32
1997	8	46	21	15	36	105	24	17	49	36
1998	8	33	15	11	42	100	20	12	27	30
1999	8	17	25	23	40	38	32	26	37	22
2000	14	48	40	48	73	132	62	61	59	51
2001	14	50	44	47	67	128	58	58	58	50

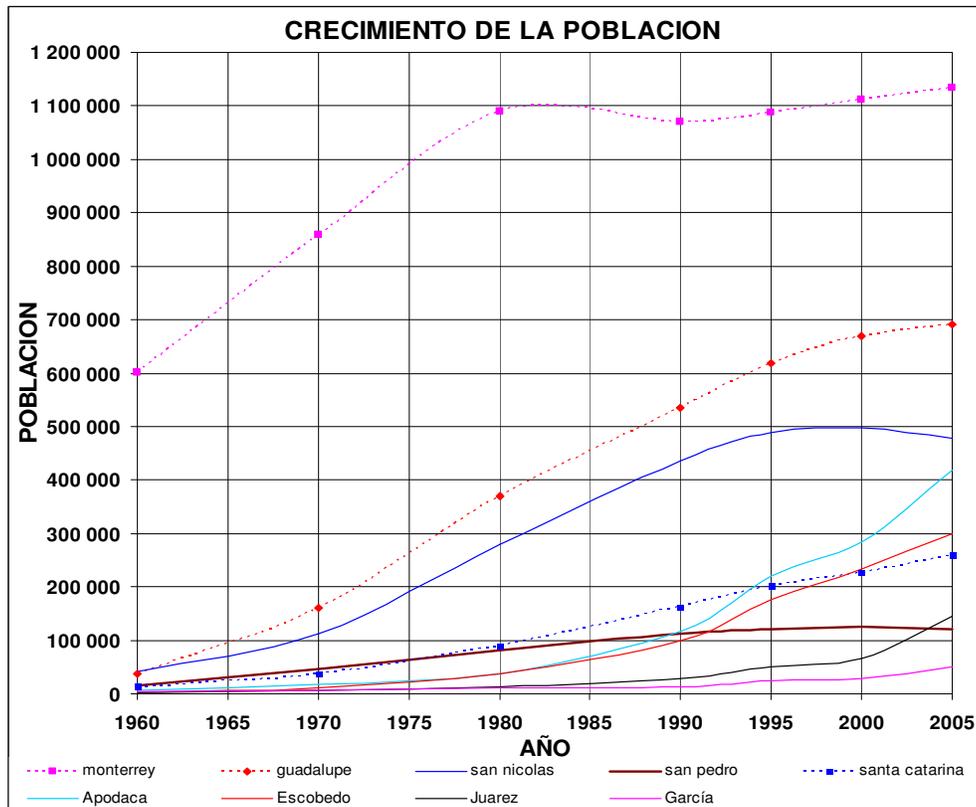
5.3.4 Cálculo del escurrimiento y la infiltración.

El escurrimiento superficial y la infiltración son dos procesos importantes en la recarga de los acuíferos, para estimarlos se calcularon los valores la precipitación promedio anual, la evapotranspiración real promedio anual y la lámina de lluvia anual por municipio, además fue indispensable contar con el crecimiento de la mancha urbana por municipio (Tabla 5.14 y Grafica 5.2), éste es un factor determinante en el proceso de la infiltración debido a que conforme cambia el uso del suelo por el incremento urbano, crece el coeficiente de escurrimiento, por tanto el escurrimiento superficial aumenta y la infiltración se reduce.

La dinámica poblacional analiza los factores que causan el crecimiento demográfico (la natalidad, la mortalidad y la migración), elemento determinante del incremento de la mancha urbana, esto no significa que crezcan al mismo ritmo, pues la población de un municipio puede disminuir con el paso del tiempo por los factores antes mencionados, como sucedió en el municipio de Monterrey en 1990 ó con los municipios de San Nicolás de los Garza y San Pedro Garza García en el 2005 (Gráfica 5.3), lo que indica que aunque la población disminuya la mancha urbana no puede decrecer, asimismo es importante mencionar que la población puede incrementarse sin que se modifique sustancialmente la mancha urbana, como sucedió con el municipio de Apodaca (1995-2000) donde el crecimiento urbano ascendió alrededor de 1266ha por 64344 habitantes (50,8hab/ha), en comparación del periodo 2000-2005 en el que creció 305ha por 135287 habitantes (443,6hab/ha), lo que represento un incremento del 873% de un periodo respecto del otro, elevando la demanda de agua.



Grafica 5.2. Crecimiento estimado de la mancha urbana.



Grafica 5.3. Crecimiento de la población.

Tabla 5.28. POBLACIÓN TOTAL DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY SEGÚN MUNICIPIOS 1940-2005^a

MUNICIPIO	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2005
POBLACIÓN	190 100	362 435	695 504	1 242 558	2 001 502	2 573 527	2 988 081	3 243 466	3 598 597
Número de municipios	1	3	4	7	8	9	9	9	9
Monterrey	190 100	339 282	601 085	858 107	1 090 009	1 069 238	1 088 143	1 110 997	1 133 814
Guadalupe		12 610	38 233	159 930	370 908	535 560	618 933	670 162	691 931
San Nicolás de los Garza		10 543	41 243	113 074	280 696	436 603	487 924	496 878	476 761
San Pedro Garza García		5 228	14 943	45 983	81 974	113 040	120 913	125 978	122 009
Santa Catarina		7 377	12 895	36 385	89 488	163 848	202 156	227 026	259 896
Apodaca		4 915	6 259	18 564	37 181	115 913	219 153	283 497	418 784
General Escobedo		2 066	1 824	10 515	37 756	98 147	176 869	233 457	299 364
Juárez		2 839	3 166	5 656	13 490	28 014	50 009	66 497	144 380
García		4 769	4 091	6 477	10 434	13 164	23 981	28 974	51 658

^a La línea escalonada señala los municipios que a partir de 1950 constituyen el Área Metropolitana de Monterrey, conformada por ocho municipios en 1980 y con la incorporación de García en 1990.

FUENTE: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Nuevo León, VII, VIII, IX, X, XI y XII. Censos Generales de Población y Vivienda 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 y 2000; INEGI, *Conteo de Población y Vivienda 1995 y 2005, Resultados Definitivos Tabulados Básicos*. Garza Villarreal, G., (Coord.), *Atlas de Monterrey*, Gobierno del Estado de Nuevo León/Universidad Autónoma de Nuevo León/Instituto de Estudios Urbanos de Nuevo León/El Colegio de México, México, 1995; SEDESOL, CONAPO, INEGI, *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. Primera edición: noviembre de 2004; Unikel, Ruiz y Garza, *El desarrollo urbano de México*, El Colegio de México, México, 1980: cuadro IV-2.

Tabla 5.29. Coeficientes de escurrimiento utilizados para determinar la infiltración y el escurrimiento.

Descripción de la superficie	Coeficientes de escurrimiento
Áreas desarrolladas	
Baldíos	0,21
Asfáltico	0,77
Concreto / techo (vivienda)	0,75
Comercio y Servicios	0,75
Equipamiento	0,70
Industria	0,80
No especificado	0,50
Áreas Verdes Urbanas y Espacios Públicos	
<i>Condición promedio</i> (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)	0,33
<i>Condición buena</i> (cubierta de pasto mayor del 75% del área)	0,21
Área Urbanizable	
Área de cultivos	
Promedio. 2-7%	0,35
Pastizales	
Promedio. 2-7%	0,33
Bosques	
Pendiente. superior a 7%	0,35
Áreas no desarrolladas	
Pastizales	
Pendiente. superior a 7%	0,37
Bosques	
Pendiente. superior a 7%	0,35

FUENTE: Chow, V. T., Maidment, David R., Mays, Larry W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 1988. Table 15.1.1
Viessman, Lewis, Knapp. *Introduction to Hydrology*, Harper & Row, Publishers New York 3rd ed. 1989. Table 15.1

El uso del suelo para el AMM se clasifico en tres Áreas: Urbana (Áreas verdes urbanas y espacios públicos, baldíos, vialidad, comercio y servicios, equipamiento, industria, vivienda, no especificado), Urbanizable (Áreas de cultivos y pastizales) y No Urbanizable (pastizales y bosques) (Figura 5.4).

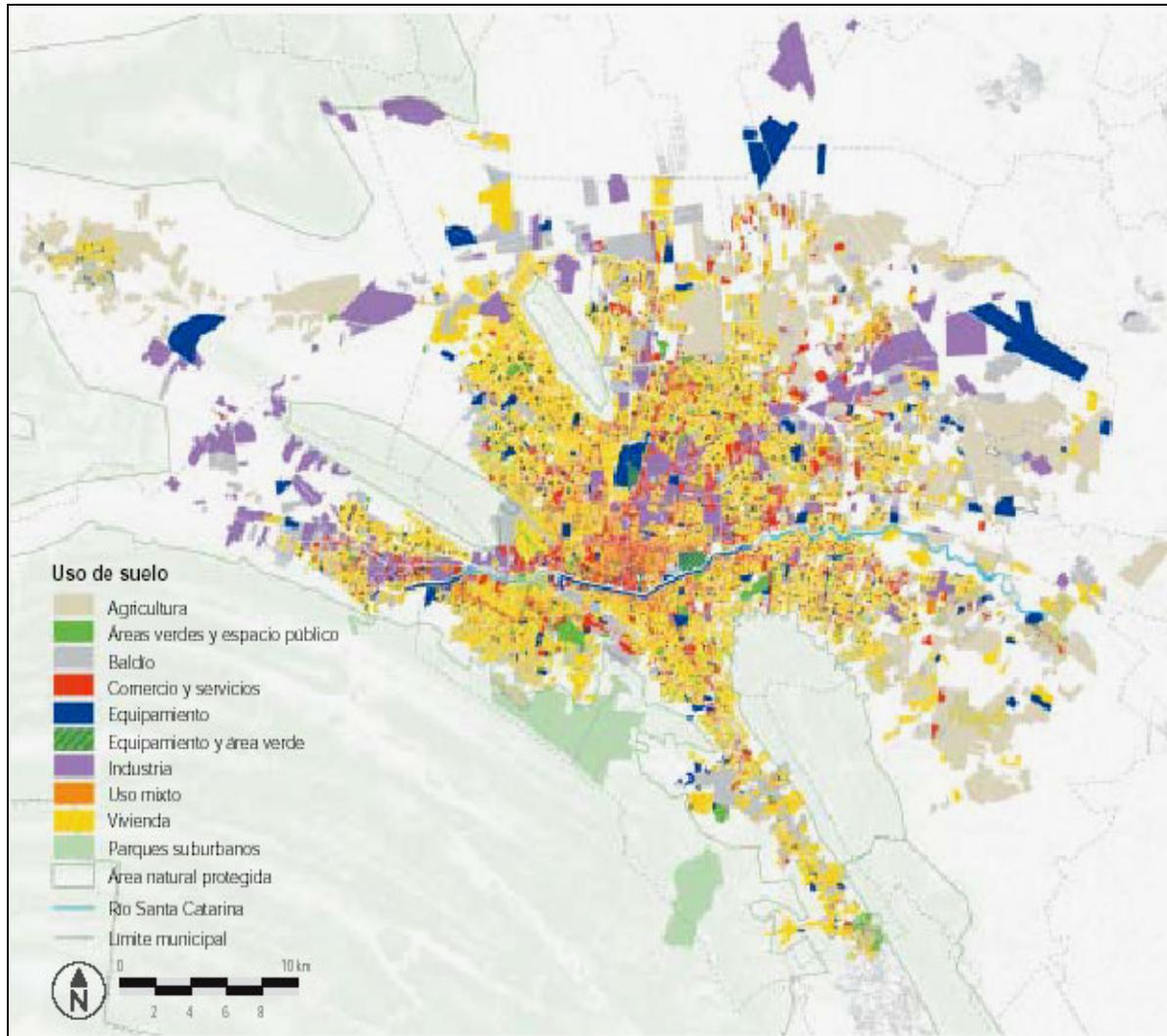


Figura 5.4 Uso del suelo del AMM, 2000.

Fuente: Guajardo, Alatorre Alicia A. *Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo*. 2002. (Figura 5-162) Elaborado por CEDEM.

Conjuntos de Datos Vectoriales de la Carta Topográfica, 1999; Dirección General de Catastro, 1993-1996; Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1999a y 1999b. Nota: la información se obtuvo con base en el Programa de Modernización Catastral realizado en 1993. Se actualizó la periferia del AMM de acuerdo a datos vectoriales escala 1:50,000 y considerando la cartografía censal urbana de los censos económicos de 1999 (INEGI). Además, para esa misma área, se digitalizaron fotografías aéreas escala 75,000, también de 1999 (INEGI). La base de datos de toda el AMM fue complementada con trabajo de campo (2000) realizado por el CEDEM. La categoría de áreas verdes urbanas y espacios públicos incluye explanadas, jardines, parques y plazas. Los baldíos corresponden a aquellos con barda y sin barda. Comercio y servicios tiene 58 distintos tipos de áreas que van desde aquéllas que proveen alimentos y bebidas hasta aquéllas de venta o consumo. Las áreas de equipamientos incluyen las de administración pública, basureros, control ambiental, cultura, educación elemental, media privada y pública, educación superior, instituciones científicas, plantas, estaciones, subestaciones, torres y antenas, así como equipamiento de salud. La industria proviene de industria ligera, mediana, pesada y de extracción. Dentro de vivienda se considera el conjunto habitacional horizontal, conjunto habitacional vertical, en proceso de construcción, vivienda multifamiliar y unifamiliar.

Fue indispensable conocer la modificación del uso del suelo (Cuadro 5.1 al 5.6 y Tabla 5.14) de los municipios, se debe enfatizar que terrenos usados para la agricultura o pastizales han cambiado de uso y ahora son áreas urbanas, por ende se ha incrementado el coeficiente de escurrimiento (Tabla 5.29), ha disminuido la capacidad de infiltración y afectado la recarga de los acuíferos.

Con los valores estimados de la lámina de lluvia promedio anual municipal (Tabla 5.27), el crecimiento urbano (Tabla 5.14), los coeficientes de escurrimiento (Tabla 5.29) y con la ecuación 5.6, se determinó el volumen de escurrimiento anual municipal del Área urbana en m³.

$$VEAM_{URBANA} = \sum_{i=1}^n (\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i} \times \text{Área US}_{MUNICIPAL ANUAL i} \times Ce_i + \dots \dots + \overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i} \times \text{Área US}_{MUNICIPAL ANUAL i} \times Ce_i) \quad (5.6)$$

Donde:

$VEAM_{URBANA}$ = Volumen de escurrimiento anual municipal del Área urbana en m³

$\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i}$ = Lámina de lluvia promedio anual por municipio en mm.

$\text{Área US}_{MUNICIPAL ANUAL i}$ = Área para un uso de suelo por municipio en ha.

Ce_i = Coeficiente de escurrimiento para cada uso de suelo.

n = número de áreas de uso de suelo urbano por municipio.

Similarmente con (5.7) se estimó el volumen de escurrimiento para el Área Urbanizable.

$$VEAM_{URBANIZABLE} = \sum_{i=1}^n (\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i} \times \text{Área US}_{MUNICIPAL ANUAL i} \times Ce_i + \dots \dots + \overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i} \times \text{Área US}_{MUNICIPAL ANUAL i} \times Ce_i) \quad (5.7)$$

Donde:

$VEAM_{URBANIZABLE}$ = Volumen de escurrimiento anual municipal del Área urbanizable en m³

$\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i}$ = Lámina de lluvia promedio anual por municipio en mm.

$\text{Área US}_{MUNICIPAL ANUAL i}$ = Área para un uso de suelo por municipio en ha.

Ce_i = Coeficiente de escurrimiento para cierto uso de suelo.

n = número de áreas de uso de suelo urbanizable por municipio.

De igual forma con (5.8) se determino el volumen de escurrimiento anual del área no urbanizable por municipio.

$$VEAM_{NOURBANIZABLE} = \sum_{i=1}^n (\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i} \times \text{Área}_{US_{MUNICIPAL ANUAL } i} \times Ce_i + \dots + \overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i_n} \times \text{Área}_{US_{MUNICIPAL ANUAL } i_n} \times Ce_i) \quad (5.8)$$

Donde:

$VEAM_{NOURBANIZABLE}$ = Volumen de escurrimiento anual municipal del Área no urbanizable en m^3

$\overline{LAMINA}_{LL \text{ MUNICIPAL ANUAL } i}$ = Lámina de lluvia promedio anual por municipio en mm.

$\text{Área}_{US_{MUNICIPAL ANUAL } i}$ = Área para un uso de suelo por municipio en ha.

Ce_i = Coeficiente de escurrimiento para cierto uso de suelo.

n = número de áreas de uso de suelo no urbanizable por municipio.

Para obtener el volumen de escurrimiento anual total municipal (5.9) se sumaron los volúmenes anteriores.

$$VEA_{TOTAL \text{ MUNICIPAL}} = VEAM_{URBANA} + VEAM_{URBANIZABLE} + VEAM_{NOURBANIZABLE} \quad (5.9)$$

Donde:

$VEA_{TOTAL \text{ MUNICIPAL}}$ = Volumen de escurrimiento anual total municipal en m^3

$VEAM_{URBANA}$ = Volumen de escurrimiento anual municipal del Área urbana en m^3

$VEAM_{URBANIZABLE}$ = Volumen de escurrimiento anual municipal del Área urbanizable en m^3

$VEAM_{NOURBANIZABLE}$ = Volumen de escurrimiento anual municipal del Área no urbanizable en m^3

En las Tablas 5.30a y 5.30b se muestra como se calcularon los valores de los Volúmenes de Escurrimiento Directo, Lámina de escurrimiento e infiltración según usos del suelo en los municipios del AMM, en el 2000.

Tabla 5.30a. Volumen de Escurrimiento Directo, lámina de infiltración y de escurrimiento promedio anual según usos del suelo en los municipios del AMM, 2000.

Concepto	García	Santa Catarina	Escobedo	San Pedro	Monterrey
Lámina de Lluvia promedio anual mm.	13,84	48,02	40,23	47,57	72,91
Áreas Verdes y Espacios Públicos	10,63	50	38	374	550
0,33	486	7867	5019	58674	132207
Baldíos	96	767	1582	848	2467
0,21	2802	77320	133661	84734	377691
Vialidad	17	974	877	1062	4259
0,77	1813	359990	271579	389104	2390897
Comercio y Servicios	4	188	162	378	1631
0,75	441	67545	48779	135002	892041
Equipamiento	292	114	255	165	990
0,7	28292	38320	71802	55102	505119
Industria	578	820	249	216	853
0,8	63960	315035	79989	82350	497310
Vivienda	339	673	1652	1712	5868
0,75	35168	242369	498473	610607	3208537
No especificado	0	43	97	74	772
0,5		10375	19577	17615	281533
Área urbana ha	1337	3628	4911	4830	17389
Vesc urbana en m³	132962	1118820	1128878	1433189	8285335
Área Urbanizable ha	2749	3761	2809	351	0
Áreas de cultivos	231	65	652	0	0
0,35	11179	10956	91823	18	0
Pastizales	2518	3696	2157	0	0
0,33	114976	585603	286294	0	0
Vesc urbanizable en m³	126155	596558	378117	18	0
Área No Urbanizable ha	81234	91061	11380	2685	27741
Pastizales	80192	55556	10605	786	20231
0,37	4105486	9869982	1578480	138291	5457412
Bosques	1042	35505	775	1899	7510
0,35	50471	5966901	109165	316201	1916447
Vesc no urb en m³	4155957	15836882	1687645	454492	7373859
Vesc tot mun en m³	4415075	17552261	3194640	1887699	15659194
Área Municipal ha	85320	98450	19100	7866	45130
hesc municipal en mm	5,17	17,83	16,73	24,00	34,70
hinfil municipal en mm	8,66	30,19	23,50	23,57	38,21

Nota: Las áreas municipales utilizadas fueron obtenidas de la Enciclopedia de los Municipios de México". Monterrey, N.L. 1988. Los coeficientes de escurrimiento utilizados son los de la tabla 5.29. Los valores utilizados de la Lámina de Lluvia promedio anual por municipio son los obtenidos en la tabla 5.27.

Tabla 5.30b. Volumen de Escurrimiento Directo, lámina de infiltración y de escurrimiento promedio anual según usos del suelo en los municipios del AMM, 2000.

Concepto	Juárez	Guadalupe	San Nicolás	Apodaca
Lámina de Lluvia promedio anual mm.	131,66	61,79	60,80	58,80
Áreas Verdes y Espacios Públicos	6	238	151	33
0,33	2517	48517	30306	6348
Baldíos	188	1072	712	1441
0,21	52049	139075	90884	177929
Vialidad	573	2519	1418	1343
0,77	580614	1198365	663829	607968
Comercio y Servicios	65	582	625	326
0,75	64346	269707	284980	143977
Equipamiento	97	297	274	776
0,7	89418	128413	116518	319470
Industria	37	300	672	575
0,8	38894	148347	326938	270475
Vivienda	880	2588	1641	1011
0,75	869391	1199524	748181	445744
No especificado	1	868	107	420
0,5	268217	268217	32430	123613
Área urbana ha	1847	8464	5599	5925
Vesc urbana en m³	1697228	3400165	2294065	2095525
Área Urbanizable ha	2563	2045	3018	4787
Áreas de cultivos	388	607	3018	1452
0,35	178927	131328	642205	298892
Pastizales	2174	1438	0	3334
0,33	944658	293278	0	646954
Vesc urbanizable en m³	1123585	424606	642205	945846
Área No Urbanizable ha	23370	4621	63	7638
Pastizales	20737	4030	63	7638
0,37	10101794	921311	14124	1661691
Bosques	2633	591	0	0
0,35	1213252	127900	0	0
Vesc no urb en m³	11315046	1049211	14124	1661691
Vesc tot mun en m³	14135858	4873982	2950394	4703062
Área Municipal ha	27780	15130	8680	18350
hesc municipal en mm	50,89	32,21	33,99	25,63
hinfil municipal en mm	80,77	29,58	26,81	33,17

Nota: Las áreas municipales utilizadas fueron obtenidas de la Enciclopedia de los Municipios de México". Monterrey, N.L. 1988. Los coeficientes de escurrimiento utilizados son los de la tabla 5.29. Los valores utilizados de la Lámina de Lluvia promedio anual por municipio son los obtenidos en la tabla 5.27.

Una vez obtenido el Volumen de escurrimiento anual total municipal en m³ se estimó la Lámina de escurrimiento promedio anual por municipio en mm.

$$\bar{h}_{\text{ESC ANUAL MUNICIPAL}} = \frac{\text{VEA}_{\text{TOTAL MUNICIPAL}}}{A_{\text{MUNICIPAL}}} \quad (5.10)$$

Donde:

$\bar{h}_{\text{ESC ANUAL MUNICIPAL}}$ = Lámina de escurrimiento promedio anual por municipio en mm.

$\text{VEA}_{\text{TOTAL MUNICIPAL}}$ = Volumen de escurrimiento anual total municipal en m³

$A_{\text{MUNICIPAL}}$ = Área total municipal en ha.

Los resultados de la Lámina de escurrimiento promedio anual según usos del suelo en los municipios del AMM, se muestran en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31. Láminas estimadas de escurrimiento promedio anual en los municipios del AMM.

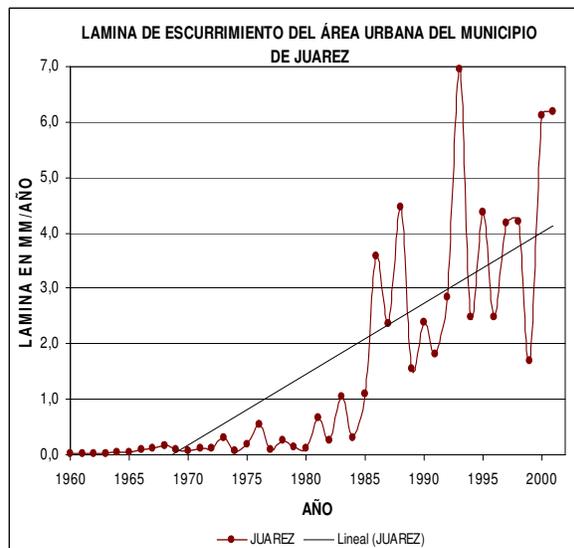
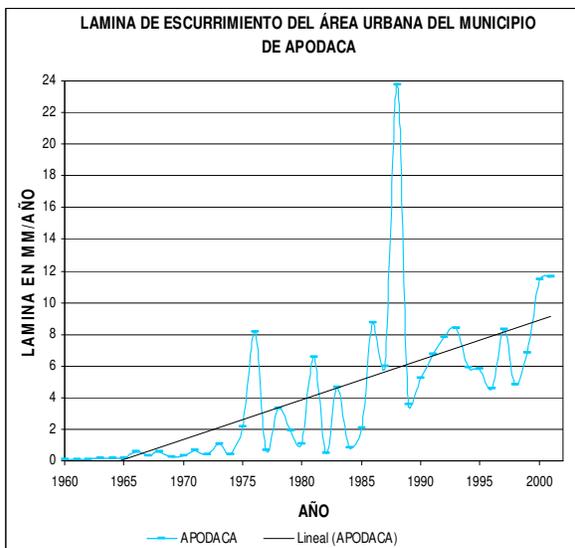
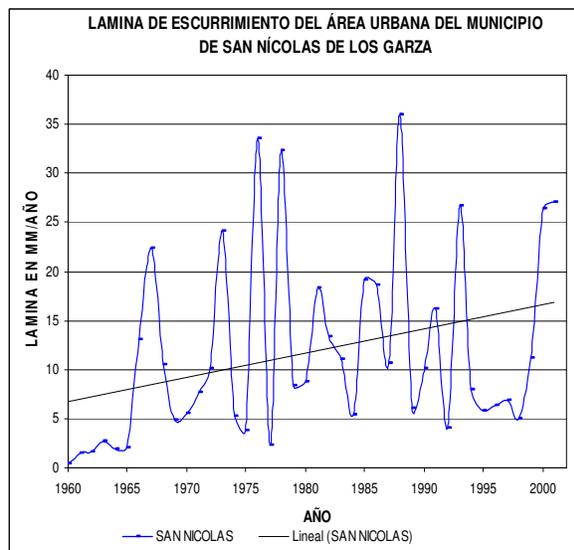
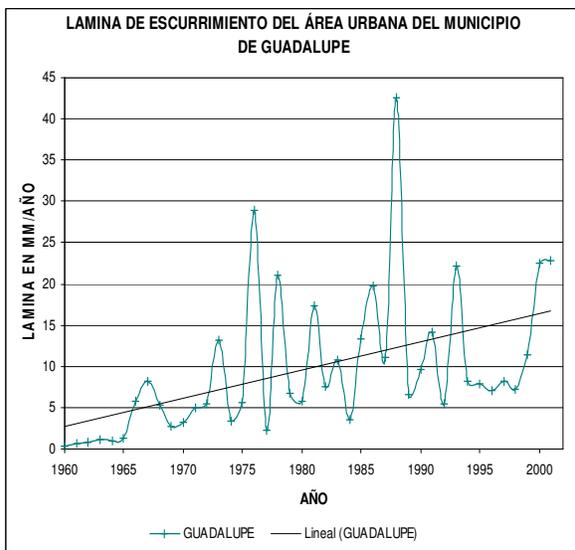
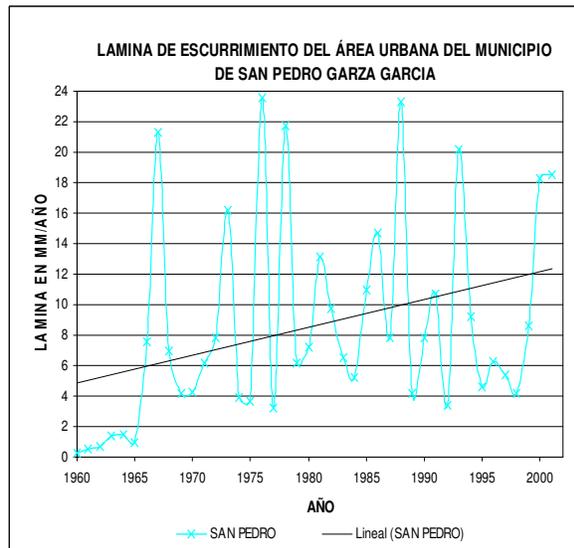
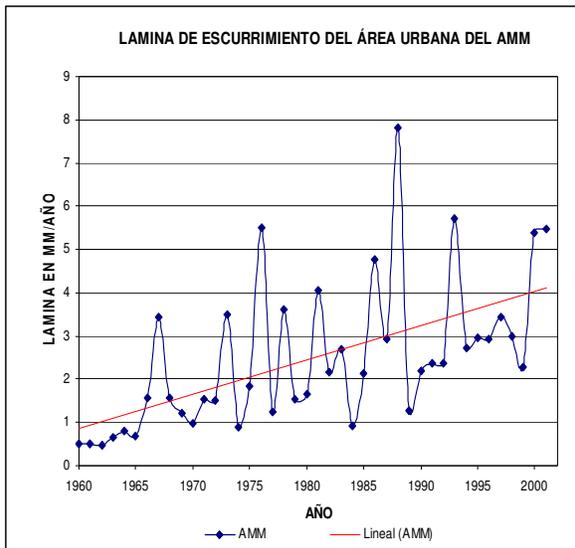
LAMINA DE ESCURRIMIENTO PROMEDIO ANUAL DE LOS MUNICIPIOS DEL AMM EN mm.										
AÑO	GARCIA	SANTA CATARINA	GENERAL ESCOBEDO	SAN PEDRO GARZA GARCIA	MTY	JUAREZ	GPE	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	APODACA	AMM
1960	2,3	14,7	4,8	4,1	26,2	39,1	7,0	3,0	10,6	13,3
1961	2,0	11,9	5,0	6,9	20,9	41,5	11,6	9,9	14,7	12,6
1962	1,3	12,7	1,7	6,8	21,2	32,0	11,4	9,4	14,4	11,6
1963	3,6	12,1	11,6	10,6	30,1	38,3	16,1	14,9	17,0	14,9
1964	3,4	17,4	8,5	8,9	22,1	68,0	11,5	9,5	14,4	17,3
1965	2,0	8,8	8,4	5,4	26,7	53,6	13,2	9,6	17,7	13,8
1966	4,0	18,5	12,2	36,9	56,2	86,4	54,0	59,5	48,2	29,9
1967	18,4	73,6	48,8	94,2	103,1	98,0	68,3	95,5	20,3	61,2
1968	2,7	12,5	8,2	27,8	47,1	108,2	39,0	42,2	33,8	26,0
1969	4,7	18,8	12,9	15,2	29,0	54,8	17,4	18,4	15,1	18,8
1970	4,0	10,0	13,6	14,2	27,8	36,4	18,4	19,7	16,9	14,3
1971	3,3	21,8	7,0	19,6	36,5	59,4	25,4	25,7	22,3	21,4
1972	7,0	10,5	25,5	23,5	42,0	53,8	25,5	32,2	11,2	19,8
1973	14,9	24,8	65,5	46,1	86,7	112,2	56,2	72,8	24,1	43,1
1974	2,0	9,2	4,0	10,5	22,4	25,4	13,0	15,1	8,2	10,3
1975	5,0	18,9	14,1	9,5	27,9	62,2	20,0	10,4	32,2	20,3
1976	10,0	44,5	36,8	58,2	91,7	154,3	95,8	87,3	103,4	57,5
1977	3,9	15,2	10,5	7,6	21,2	22,9	7,0	5,7	7,1	12,2
1978	10,1	24,9	41,6	48,9	62,6	65,3	60,8	76,7	31,3	33,9
1979	2,5	12,6	7,3	13,4	25,1	34,4	18,4	19,0	15,2	13,7
1980	5,3	19,0	13,1	14,8	15,3	24,5	14,8	19,2	7,9	14,1
1981	10,5	29,3	33,5	26,1	52,7	69,3	42,4	38,4	43,0	32,5
1982	9,3	25,8	7,0	18,8	16,2	16,8	17,4	26,9	2,8	16,5
1983	10,4	7,9	41,6	12,2	31,6	50,5	23,8	21,6	25,8	19,5
1984	3,3	6,1	8,6	9,5	7,6	11,7	7,4	10,2	4,4	6,3
1985	3,2	11,1	15,9	19,6	26,4	31,9	27,0	34,9	9,9	14,3
1986	10,6	21,2	34,4	25,7	49,6	85,8	38,6	32,7	38,9	30,5
1987	4,1	17,1	13,3	13,2	26,4	50,3	21,0	18,2	25,0	18,0
1988	16,7	41,8	47,2	38,8	59,8	84,3	77,9	59,9	93,1	46,1
1989	1,7	5,0	3,1	6,9	8,0	26,1	11,6	9,8	13,2	7,1
1990	3,2	10,7	9,7	12,6	12,9	36,5	16,7	15,9	18,2	12,0
1991	2,0	13,5	5,7	16,7	15,1	25,8	23,8	24,8	22,3	12,4
1992	1,3	14,9	4,4	5,2	10,2	37,1	9,1	6,1	24,5	12,0
1993	9,1	21,3	35,7	30,4	36,8	84,7	35,5	39,0	25,3	27,8
1994	6,1	12,5	21,4	13,7	10,6	28,2	12,8	11,3	16,9	12,8
1995	2,3	10,8	7,1	6,8	24,3	47,1	12,2	8,1	15,9	13,4
1996	3,8	19,0	13,1	9,0	8,3	25,2	10,7	8,8	11,9	12,8
1997	3,0	17,0	8,5	7,2	16,9	40,1	12,3	9,3	21,0	14,5
1998	2,9	8,1	5,8	4,7	17,5	35,1	10,4	7,2	12,3	10,8
1999	2,9	6,4	10,1	11,4	18,9	14,8	16,7	14,6	15,9	9,1
2000	5,2	17,8	16,7	24,0	34,7	50,9	32,2	34,0	25,6	20,8
2001	5,2	18,5	17,7	24,2	33,4	49,7	31,8	33,9	25,6	20,6

Tabla 5.32. Tendencia de los valores estimados de la Lámina de escurrimiento promedio anual en los municipios del AMM.

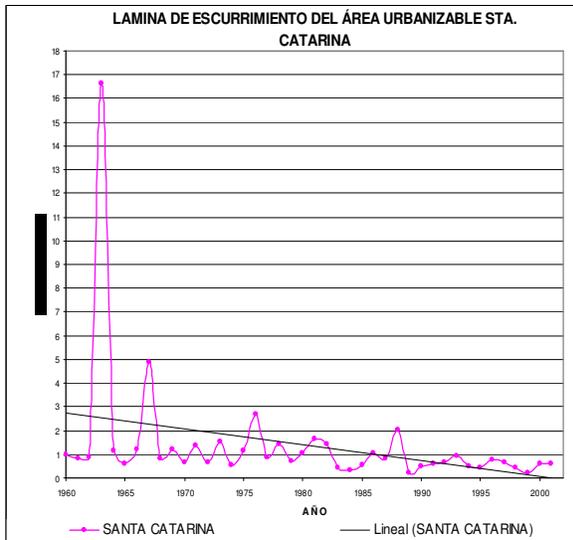
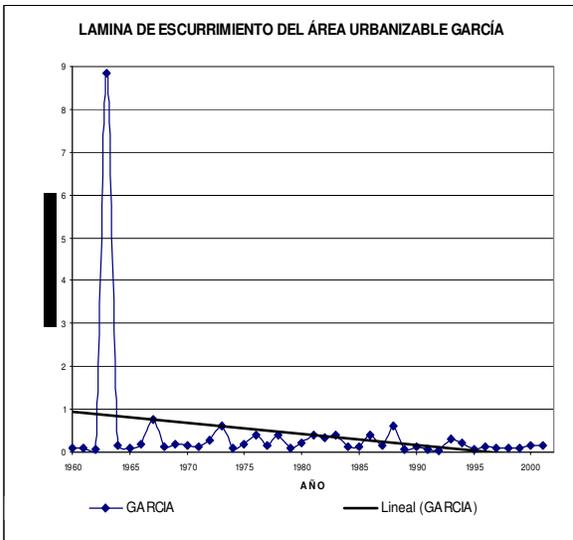
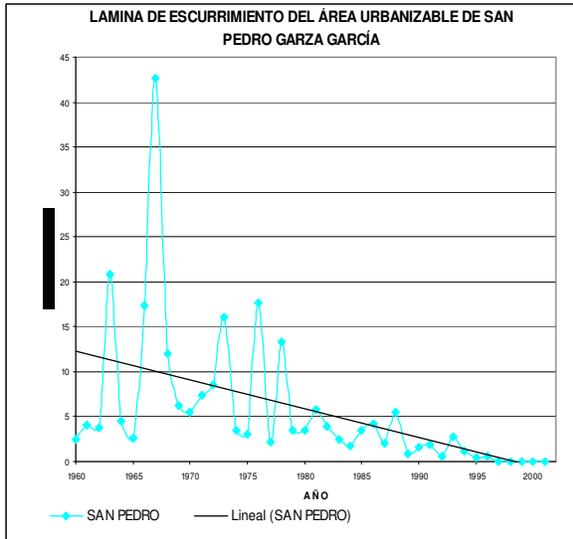
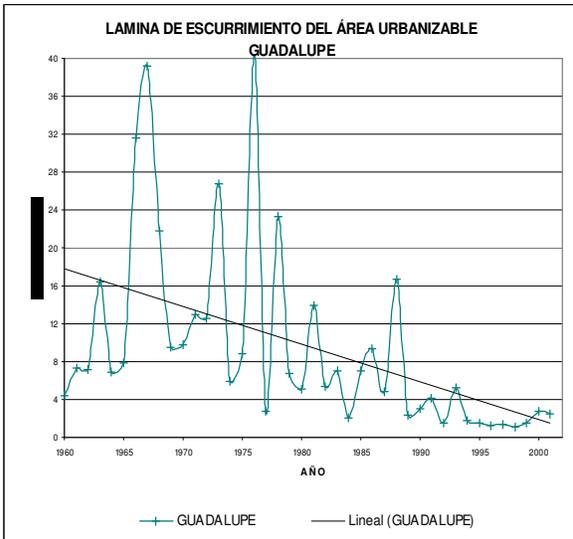
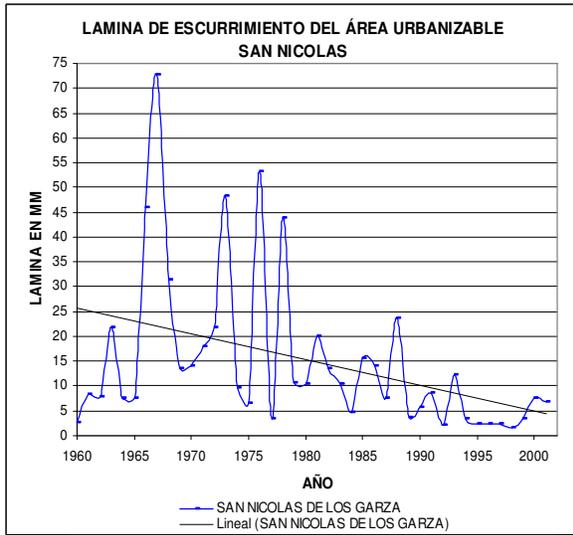
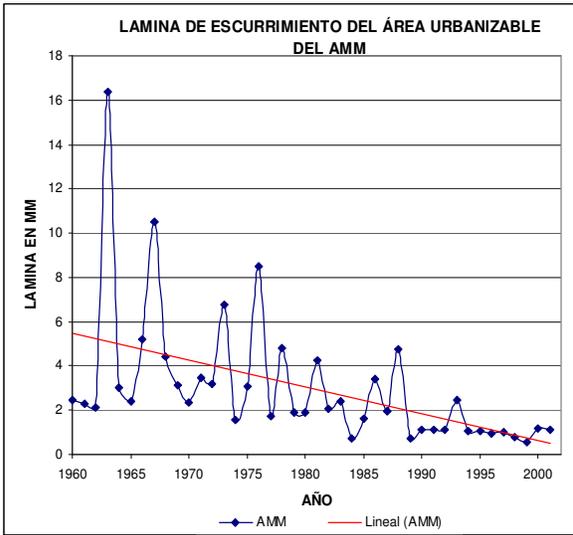
TENDENCIA DEL ESCURRIMIENTO PROMEDIO ANUAL MUNICIPAL DEL AMM EN mm.										
ESCURRIMIENTO	GARCIA	SANTA CATARINA	GENERAL ESCOBEDO	SAN PEDRO GARZA GARCIA	MTY	JUAREZ	GPE	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	APODACA	AMM
URBANO	0,12	0,92	3,7	7,47	2,98	4,2	14	10	9,15	3,25
URBANIZABLE	-0,95	-2,72	-4,91	-12,29	-7,6	-12,22	-15,65	-21,24	-7,75	-4,98
NO URBANIZABLE	-0,18	-5,63	-0,51	-4,12	-18,27	-25	-4,02	-0,051	-1,18	-7,4

Al analizar los valores estimados de la lámina de escurrimiento promedio anual municipal (1960-2001), es evidente que han sufrido cambios significativos (Tabla 5.32), fue necesario indagar en los diferentes tipos de áreas según su uso de suelo. Se apreció que la tendencia de los valores estimados de la lámina de escurrimiento en las áreas urbanas es creciente, resultado de la modificación del uso del suelo por el crecimiento urbano, el AMM muestra una tendencia de aumento de 3.25mm, los municipios mas urbanizados muestran mayor escurrimiento, como el municipio de Guadalupe con el mayor incremento de 14mm, seguido de San Nicolás de los Garza con 10mm y de Apodaca con 9.15mm, los de menor incremento son García con 0.12mm y Santa Catarina con 0.92mm, estos últimos municipios se reflejan un crecimiento urbano menos acelerado en comparación con los mencionados inicialmente, lo anterior se ratifica en las Graficas 5.2 y 5.4a a 5.4f.

Con lo que respecta a los valores estimados de la lámina de escurrimiento promedio anual en áreas urbanizables, se observó en general que existe una tendencia negativa; el AMM muestra un descenso de 4.98mm, los municipios con mayor decremento son los que se están urbanizando mas aceleradamente, el municipio con mayor reducción fue San Nicolás de los Garza con 21.24mm, seguido de Guadalupe con 15.65mm y de San Pedro Garza García con 12.29mm, los de menor descenso son García con 0.95mm y Santa Catarina con 2.72mm, confirmando que el crecimiento urbano es factor determinante en los escurrimientos. Lo anterior se corrobora en las Graficas 5.5a a 5.5f.

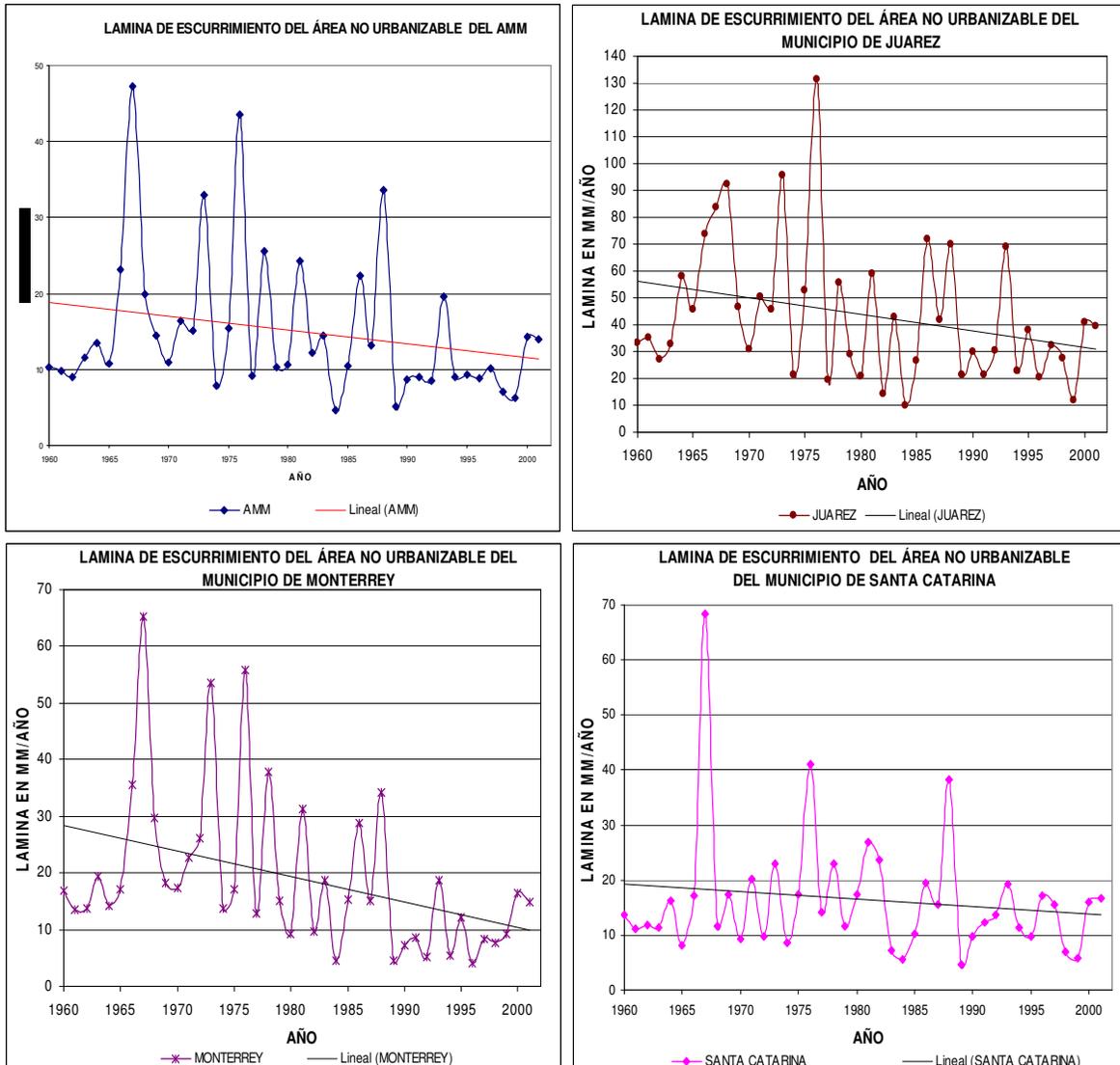


Graficas 5.4a a 5.4f. Tendencia de los valores estimados de la Lámina de escurrimiento promedio anual del área urbana en el AMM y de los municipios de San Pedro Garza García, Guadalupe, San Nicolás de los Garza, Apodaca y Juárez.



Graficas 5.5a a 5.5f. Tendencia de los valores estimados de la Lámina de escurrimiento promedio anual de las superficies urbanizables en el AMM y los municipios de San Nicolás de los Garza, Guadalupe, San Pedro Garza García, Apodaca, García y Santa Catarina

Por último, se observó en los valores estimados de la lámina de escurrimiento promedio anual en áreas no urbanizables, que en general existe una tendencia negativa; el AMM muestra un descenso de 7.4mm, el municipio con la mayor reducción estimada en lámina de escurrimiento fue Juárez con 25mm y Monterrey con 18.27mm, el municipio con menor reducción es San Nicolás de los Garza con 0.05mm, sin duda es el que contaba con la menor área no urbanizable, lo anterior se constata en las Graficas 5.6a a 5.6d.



Graficas 5.6a a 5.6d. Tendencia de los valores estimados de la Lámina de escurrimiento promedio anual de Áreas No Urbanizables del AMM y los municipios de Juárez, Monterrey y Santa Catarina.

Finalmente se obtuvo la Lámina de infiltración promedio anual por municipio en mm.

$$\bar{h}_{\text{INFILTRACION ANUAL MUNICIPAL } i} = \overline{\text{LAMINA}}_{\text{LL MUNICIPAL ANUAL } i} - \bar{h}_{\text{ESC ANUAL MUNICIPAL } i} \quad (5.11)$$

Donde:

$\bar{h}_{\text{INFILTRACION ANUAL MUNICIPAL } i}$ = Lámina de infiltración promedio anual municipal (mm)

$\overline{\text{LAMINA}}_{\text{LL MUNICIPAL ANUAL } i}$ = Lámina de lluvia promedio anual por municipio en mm

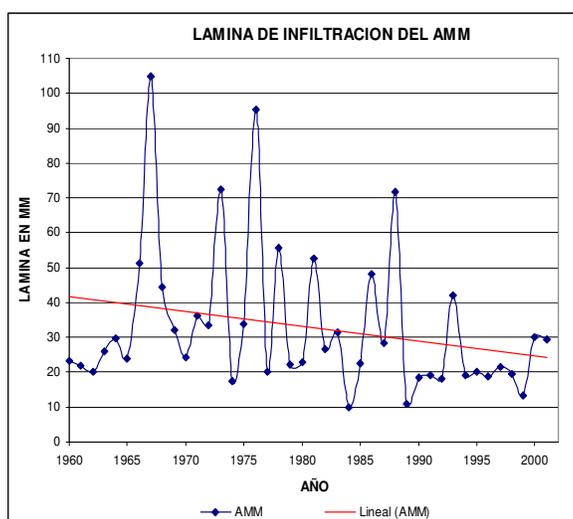
$\bar{h}_{\text{ESC ANUAL MUNICIPAL } i}$ = Lámina de escurrimiento promedio anual por municipio en mm

Los resultados de la Lámina de infiltración anual según usos del suelo en los municipios del AMM, se reflejan en la Tabla 5.33.

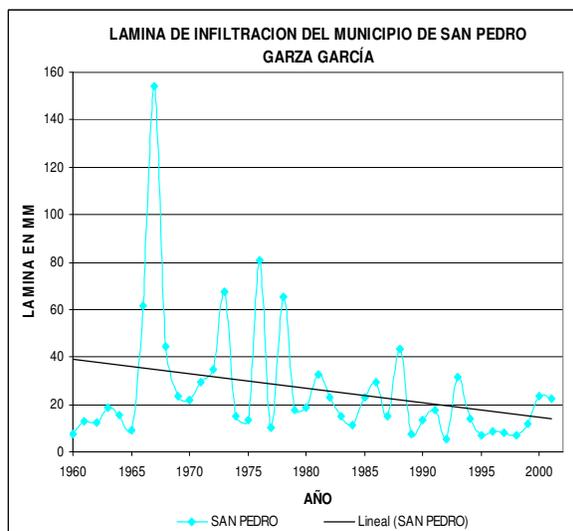
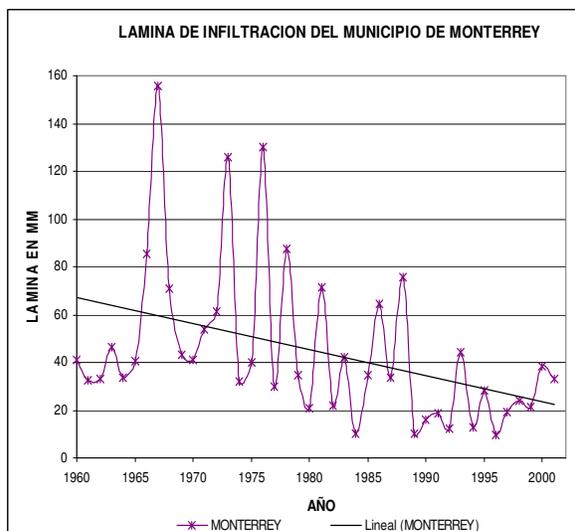
Tabla 5.33. Lámina de infiltración promedio anual en los municipios del AMM.

LAMINA DE INFILTRACION PROMEDIO ANUAL DE LOS MUNICIPIOS DEL AMM EN mm.										
AÑO	GARCIA	SANTA CATARINA	GENERAL ESCOBEDO	SAN PEDRO GARZA GARCIA	MTY	JUAREZ	GPE	SAN NICOLAS DE LOS GARZA	APODACA	AMM
1960	4,0	26,1	8,6	7,7	41,0	68,7	12,6	5,0	19,6	23,1
1961	3,5	21,1	8,9	12,7	32,6	73,0	21,1	16,2	27,1	21,9
1962	2,2	22,5	3,1	12,2	33,0	56,2	20,7	15,3	26,5	20,1
1963	6,1	21,6	20,6	18,7	46,5	67,3	28,8	23,9	31,4	25,8
1964	5,8	30,9	15,2	15,3	33,9	119,6	20,4	15,2	26,6	29,8
1965	3,4	15,6	14,9	9,1	40,8	94,3	23,2	15,1	32,6	23,8
1966	6,9	32,8	21,8	61,6	85,4	151,9	94,3	92,5	88,6	51,4
1967	31,5	130,5	86,7	154,2	155,9	172,4	117,7	146,6	37,3	104,8
1968	4,6	22,1	14,6	44,6	70,7	190,3	66,4	63,8	62,1	44,3
1969	8,0	33,2	22,9	23,8	43,2	96,4	29,2	27,4	27,7	32,0
1970	6,8	17,6	24,2	21,8	41,1	64,0	30,4	29,0	30,8	24,3
1971	5,7	38,5	12,5	29,6	53,7	104,3	41,2	37,2	40,6	36,2
1972	12,0	18,6	45,1	35,0	61,4	94,4	40,6	46,0	20,2	33,4
1973	25,5	43,7	115,9	67,4	125,8	197,0	87,9	102,0	43,3	72,5
1974	3,4	16,2	7,0	15,1	32,2	44,6	19,9	20,8	14,6	17,3
1975	8,5	33,2	24,8	13,5	39,9	109,2	30,1	14,1	57,1	33,8
1976	17,0	78,1	65,0	80,8	130,2	270,8	141,0	116,0	181,5	95,4
1977	6,6	26,7	18,6	10,3	29,8	40,2	10,1	7,4	12,3	20,1
1978	17,2	43,7	73,3	65,2	87,5	114,6	85,7	98,1	53,9	55,8
1979	4,2	22,1	12,9	17,5	34,7	60,3	25,3	23,8	25,9	22,4
1980	9,1	33,2	23,0	18,9	21,0	43,0	19,9	23,6	13,3	23,0
1981	17,8	51,1	58,6	32,7	71,5	121,0	55,9	46,2	71,5	52,7
1982	15,7	45,0	12,1	23,1	21,8	29,3	22,5	31,7	4,6	26,6
1983	17,6	13,8	72,3	14,8	42,1	87,4	30,0	24,9	42,0	31,3
1984	5,6	10,6	14,9	11,3	10,1	20,2	9,1	11,5	7,0	10,1
1985	5,4	19,2	27,4	22,9	34,6	54,6	32,5	38,5	15,8	22,7
1986	18,0	36,8	59,1	29,6	64,4	145,9	45,4	35,3	61,1	48,1
1987	6,9	29,5	22,6	15,0	33,8	85,1	24,2	19,2	38,8	28,3
1988	28,4	72,2	79,6	43,3	75,9	142,0	87,9	61,7	142,9	71,9
1989	2,9	8,6	5,2	7,5	10,1	43,8	12,8	9,9	20,0	11,0
1990	5,4	18,5	16,1	13,6	16,0	60,8	18,0	15,6	27,3	18,5
1991	3,5	23,2	9,2	17,8	18,5	42,8	25,2	23,9	32,9	19,0
1992	2,2	25,6	7,1	5,5	12,5	61,2	9,4	5,7	35,7	18,2
1993	15,4	36,5	56,8	31,4	44,5	139,1	36,2	35,8	36,3	42,1
1994	10,3	21,5	33,6	13,9	12,7	46,1	12,9	10,1	24,0	19,3
1995	3,9	18,5	11,0	6,7	28,5	76,5	12,0	7,1	22,2	20,0
1996	6,4	32,4	19,8	8,8	9,6	40,7	10,4	7,6	16,4	18,9
1997	5,0	29,0	12,7	7,8	19,3	64,6	11,7	7,8	28,4	21,4
1998	4,8	24,7	8,8	6,7	24,0	64,8	10,0	4,9	15,0	19,3
1999	4,9	10,9	14,5	11,5	21,1	23,6	15,5	11,8	20,9	13,2
2000	8,7	30,2	23,5	23,6	38,2	80,8	29,6	26,8	33,2	30,0
2001	8,6	31,4	25,9	22,6	33,2	78,3	26,2	23,7	32,7	29,4

De los resultados anteriores, la lámina de infiltración se ha visto reducida en el AMM y en todos los municipios, esto supone que se está extrayendo más agua de la que se infiltra, los acuíferos están siendo sobreexplotados y se está agotando la disponibilidad de las aguas subterráneas, que cada vez son aguas más profundas y consecuentemente de menor calidad. La infiltración tiene una tendencia decreciente en todos los municipios (1960 al 2001), en el AMM la disminución es alrededor de 17.5mm (Gráfica 5.7), en Monterrey 45mm (Gráfica 5.8a), 25mm en San Pedro Garza García (Gráfica 5.8b), 32mm en San Nicolás de los Garza que está prácticamente urbanizado y con escasas zonas para la infiltración y García que muestra una disminución inapreciable.



Gráfica 5.7. Tendencia de la Lámina de infiltración promedio anual en el AMM.



Gráficas 5.8a y 5.8b Tendencia de la Lámina de infiltración promedio anual en los municipios de Monterrey y San Pedro Garza García.

Dentro del Área Metropolitana de Monterrey se localizan los acuíferos Durazno, Buenos Aires y AMM, de este último se extrajo la misma cantidad de agua que la que recibió, el acuífero Buenos Aires que abastece al AMM mostró una sobre-explotación del 67% y el acuífero el Durazno con el más alto nivel de sobre-explotación de dos veces y media la recarga, tiene un rendimiento mínimo y se encuentran en el límite de su extracción.

Actualmente las fuentes de abastecimiento subterráneas de agua potable del AMM provienen de pozos, túneles de captación, galerías y manantiales. En la parte Oeste se encuentran los campos de perforación de Buenos Aires o La Huasteca, Monterrey, Mina, formados por calizas que es el material más productivo en cuanto a la extracción de agua, debido a su alta permeabilidad. El sistema Huasteca se encuentra al pie de la Sierra Madre Oriental, en el municipio de García. En el municipio Santa Catarina, 20Km hacia el suroeste, se encuentran 27 pozos en un campo denominado Buenos Aires, al pie de la Sierra Madre Oriental. En ese mismo sitio se localizan las galerías Morteros y Huasteca. En el municipio Mina (no metropolitano) hacia el noroeste, a una distancia de 40 kilómetros de Monterrey, existe un campo denominado Mina con 25 pozos profundos desde donde el agua es enviada a la ciudad, además abastece a las poblaciones de Mina, Hidalgo, Abasolo, El Carmen y Salinas Victoria. En el municipio de Santiago (no metropolitano) al sureste a 38Km de la ciudad, se localizan tres túneles de captación, uno conocido como el Socavón de San Francisco, los otros dos denominados Cola de Caballo I y II.

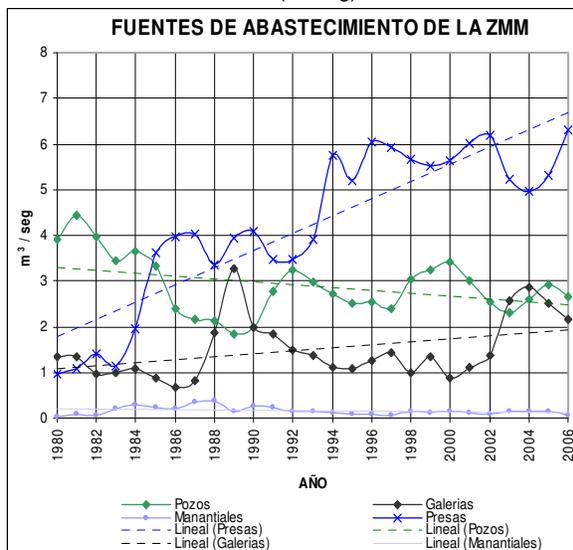
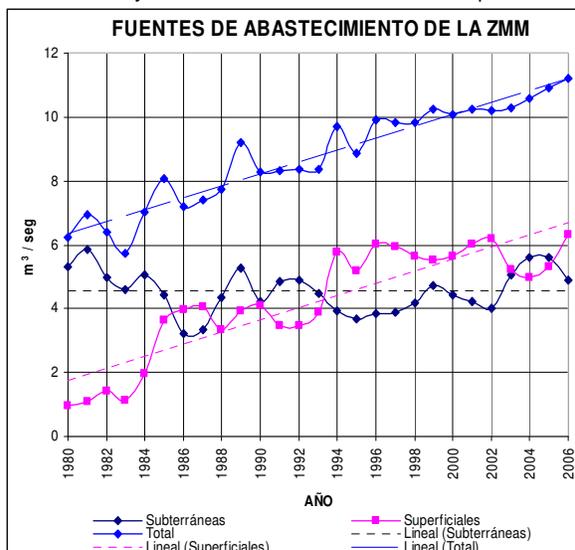
En general el AMM denota una tendencia de reducción en la capacidad de infiltración de 17.5mm en la recarga de los acuíferos. El proceso de infiltración y recarga de los acuíferos depende del tipo de suelo y de la cobertura vegetal. Con el crecimiento de las zonas urbanas, el cambio de uso del suelo de bosques y pastizales a suelo urbanizable ó agrícola y la deforestación, los suelos pierden la capacidad natural para retener humedad, por lo que tienden a secarse y compactarse, de esa manera se reduce la capacidad de infiltración, la recarga de los acuíferos, la alimentación de los manantiales y de los ríos. El conocimiento de tales efectos puede hacer posible su predicción e incluso su control.

Tabla 5.31. Fuentes de Abastecimiento y volumen promedio diario de extracción de agua potable para el AMM por tipo de fuente.

AÑO	Volumén promedio diario de extracción (m ³ / seg)						
	Pozos profundos	Galerías Filtrantes	Manantiales	Total de Subterráneas	Presas	Total de Superficiales	Total
1980	3,91	1,35	0,04	5,30	0,95	0,95	6,25
1981	4,44	1,35	0,08	5,87	1,08	1,08	6,95
1982	3,96	0,95	0,06	4,97	1,41	1,41	6,38
1983	3,44	0,98	0,19	4,61	1,13	1,13	5,74
1984	3,66	1,09	0,30	5,05	1,97	1,97	7,02
1985	3,32	0,87	0,24	4,43	3,62	3,62	8,05
1986	2,39	0,66	0,19	3,24	3,96	3,96	7,20
1987	2,17	0,83	0,35	3,35	4,04	4,04	7,39
1988	2,12	1,87	0,37	4,36	3,36	3,36	7,72
1989	1,84	3,26	0,16	5,26	3,93	3,93	9,19
1990	1,98	1,98	0,25	4,21	4,08	4,08	8,29
1991	2,77	1,85	0,24	4,86	3,47	3,47	8,33
1992	3,25	1,49	0,14	4,88	3,47	3,47	8,35
1993	2,97	1,36	0,15	4,48	3,90	3,90	8,38
1994	2,71	1,11	0,13	3,95	5,76	5,76	9,71
1995	2,50	1,08	0,09	3,67	5,19	5,19	8,86
1996	2,53	1,25	0,08	3,86	6,03	6,03	9,89
1997	2,40	1,44	0,06	3,90	5,94	5,94	9,84
1998	3,04	0,99	0,14	4,17	5,66	5,66	9,83
1999	3,25	1,34	0,13	4,72	5,52	5,52	10,24
2000	3,41	0,89	0,14	4,44	5,63	5,63	10,07
2001	3,01	1,10	0,13	4,24	6,02	6,02	10,26
2002	2,55	1,38	0,10	4,03	6,18	6,18	10,21
2003	2,32	2,58	0,15	5,05	5,22	5,22	10,27
2004	2,61	2,86	0,14	5,61	4,96	4,96	10,57
2005	2,92	2,52	0,16	5,60	5,32	5,32	10,92
2006	2,67	2,15	0,07	4,89	6,30	6,30	11,19

FUENTE: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADEM), *Volúmenes promedios diarios de extracción de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Zona Metropolitana de Monterrey, 1980-2006*. Monterrey, Nuevo León, 2007. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *Anuario Estadístico Nuevo León*. Ediciones 1984, 1986, 1992-2006.

Gráfica 5.9a. y 5.9b Tendencia de los Volúmenes promedios diarios de extracción del AMM (m³/seg).



FUENTE: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADEM), *Volúmenes promedios diarios de extracción de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Zona Metropolitana de Monterrey, 1980-2006*. Monterrey, Nuevo León, 2007.

Debido al déficit que existe en los acuíferos que abastecen de agua potable al AMM, es preciso adoptar medidas de control en las extracciones del agua subterránea, protegerlas evitando incrementos de extracciones en aquellos cuerpos de agua que se encuentran en equilibrio o que están sobreexplotados, con el fin de evitar que lleguen a un estado de agotamiento y que una mayor cantidad se sobreexploten en un futuro, pues el estado en el que se hallan varios acuíferos ha rebasado la disponibilidad natural, lo que representa una situación de alerta en los recursos hídricos subterráneos.

Por lo anterior, es importante modernizar la red de monitoreo de las aguas subterráneas, así como realizar acciones que repercutan en un mejor aprovechamiento del uso del suelo y del agua, con una mejor planeación para poder satisfacer la demanda urbana, al mismo tiempo conservar un balance del suelo-agua para la recarga de los acuíferos.

5.4 TEMPERATURAS MÁXIMAS Y MINIMAS

5.4.1 Estaciones Climatológicas

Una forma de determinar si ha existido un aumento en la temperatura es a través del estudio y análisis de los registros climatológicos de temperaturas máximas y mínimas.

La dependencia responsable de obtener y mantener los registros climatológicos en el país, es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Según esta dependencia, en Nuevo León existen 149 estaciones climatológicas, trece de las cuales están suspendidas en la actualidad. Cuarenta por ciento de ellas fueron instaladas en los años ochenta, 20% en los años setenta y solamente el 18% entre 1900 y 1940; antes de que el acelerado proceso de industrialización del AMM iniciara. Casi todas las estaciones ubicadas en el AMM tienen altos niveles de confiabilidad (la cual fluctúa de 90% a 100%).

5.4.2 Cambio Climático

El delicado equilibrio climático del planeta se ha visto alterado en los últimos 200 años y más específicamente en los últimos 50, debido al proceso de

industrialización, durante el cual se ha añadido a la atmósfera un 28% adicional de bióxido de carbono (CO₂), que pasó de 275 a 353 partes por millón, o el metano, que pasó de 800 a 1,720 partes por billón.

Aunque se sabe que en un futuro el cambio climático podría tener efecto a escala regional, está claro que las emisiones antropógenas alterarán considerablemente los climas regionales, y que influirán de manera diferente en las condiciones climáticas según las regiones. Estos cambios locales y regionales conllevarán necesariamente a cambios en la duración de las estaciones de cultivo, en la disponibilidad del agua, y en la incidencia de regímenes de perturbación (valores extremos de alta temperatura, crecidas, sequías, incendios y plagas) que, a su vez, repercutirán notablemente en la estructura y función de los entornos naturales y artificiales. Algunos de los sistemas y actividades especialmente sensibles al cambio climático y a los consiguientes cambios de nivel del mar son: los bosques; los ecosistemas montañosos, acuáticos y costeros; la gestión de recursos hidrológicos e hídricos; la producción de alimentos y fibras; la infraestructura humana y la salud humana. Los estudios de impacto existentes son, en su mayoría, análisis de los efectos que conllevaría un cambio climático en equilibrio si los niveles de CO₂ aumentaran al doble; son pocos los estudios que han contemplado la adopción progresiva de medidas de respuesta frente a unas condiciones más realistas que conlleven un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. [16] y [31].

Estos gases junto con el óxido nitroso (NO) y los fluoroclorocarbonos (CFC's), se conocen como "gases de efecto de invernadero" debido a que dificultan la reemisión a la atmósfera de radiación infrarroja, ocasionando un aumento en la temperatura superficial. Según lo establecen los modelos desarrollados para analizar el cambio climático global, la temperatura aumentará entre 1.5 °C y 3.5° C, lo que no parece un valor demasiado alto. Sin embargo, debido a la rapidez con que se está dando este cambio, desde la perspectiva de la escala geológica del tiempo, aun el rango menor de aumento tendría implicaciones serias (Masera, 1999). Una de ellas es el cambio en los patrones de precipitación pluvial mundial, con diferencias importantes a escala regional. Además, las latitudes Norte más

altas sufrirían un calentamiento que se estima será de 50% a 100% mayor que el promedio.

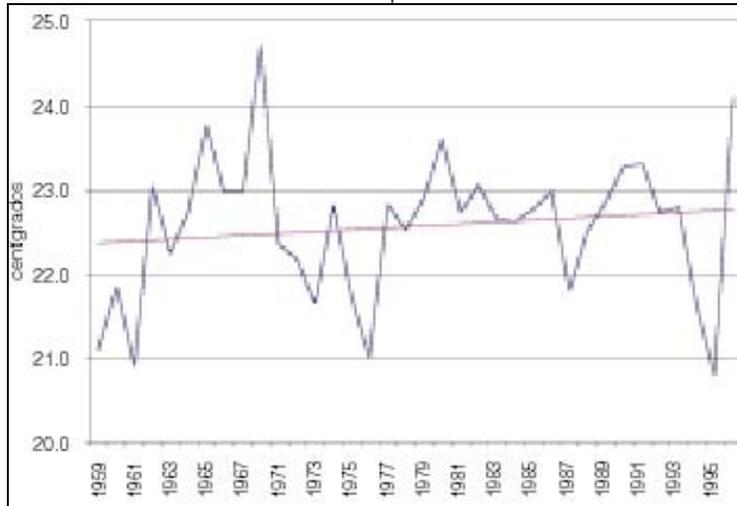
En México, el 56% del territorio corresponde a zonas áridas y semiáridas, ubicadas en el Norte y centro del país, cuya principal característica es la escasez de lluvia (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 1997). La agricultura de temporal depende de las lluvias estacionales, así que la alteración en los ciclos de precipitación pluvial podría tener consecuencias económicas y sociales desastrosas. Se estima que hasta el 25% de la superficie actual de cultivo de maíz no sería ya apta debido a este cambio climático (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), 1997). La fauna y flora silvestres, también tendrían cambios en su distribución, especialmente los bosques templados, que debido al aumento de temperatura serían desplazados por otro tipo de vegetación, alterando la cantidad de absorción de bióxido de carbono y el hábitat de especies animales.

Para poder enfrentar estos cambios, existe cada vez un mayor consenso en la necesidad de realizar una gestión holística de los recursos hidráulicos. Hay que confesar que el concepto es todavía muy difuso. En términos generales, se suele entender por gestión integral el considerar todos los factores que inciden en el proceso de gestión del agua, es decir, los aspectos ambientales, sociales, legales, de medio ambiente, y no solo el aprovechamiento del agua, como era lo usual [31].

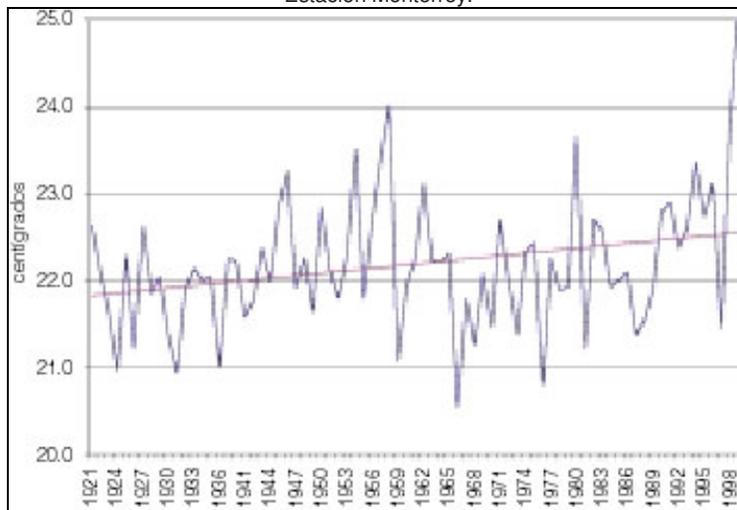
5.4.3 Incremento de Temperatura Media.

Un aspecto relevante que se encontró durante el análisis de la información, es la tendencia al aumento en la temperatura media anual en casi todas las estaciones del AMM. El aumento va desde **0.5°C** en la Estación Topo Chico (1959-1996), **0.8°C** en la Estación Monterrey, que tiene el periodo de registro más largo de temperaturas (1921-1999), hasta **1.5°C** en la Estación Santa Catarina (1954-1999). La línea roja en las figuras indica la tendencia de aumento (Gráficas 5.10a a 5.10c).

Estación Topo Chico.



Estación Monterrey.



Estación Santa Catarina.



Gráfica 5.10a a 510c Temperatura media anual en la Estación Topo Chico, Santa Catarina y Monterrey.
Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA), 2000.

5.4.4 Análisis del Incremento de Temperaturas Máxima y Mínima.

Para realizar el análisis de los incrementos de temperatura, se utilizaron los registros de temperaturas diarias máximas y mínimas correspondientes a los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre que son los meses donde se registran las mayores temperaturas. Se obtuvo un $T_{MAX-MINd}$ de la diferencia de las veces que se presentó una temperatura máxima considerada de (27 °C, 28 °C, 29 °C, 30 °C, 31 °C, 32 °C, 33 °C, 34 °C, 35 °C, 36 °C, 37 °C, 38 °C, 39 °C, 40 °C, 41 °C, 42 °C, 43 °C, 44 °C, 45 °C, 46 °C, 47 °C, 48 °C y 49 °C) en cada mes con la mínima del día correspondiente, en seguida en una tabla con temperaturas grado a grado se localizo cada evento mes a mes a lo largo de la longitud del registro, se estableció para la zona de estudio una temperatura de 22 °C durante la noche como el umbral máximo de confort, tomando en cuenta las características del lugar, la temperatura media de la región y las condiciones mínimas necesarias de temperatura para que el ser humano se recupere de las actividades realizadas a lo largo del día.

$$T_{MAX-MINd} = T_{MAX} - T_{MINd} \quad (5.12)$$

$$T_{MAX-Ti} = T_{MAX} - T_{Ti} \quad (5.13)$$

Donde:

T_{MAX} = Temperatura establecida inicialmente como máxima en °C

T_{MINd} = Temperatura mínima del día correspondiente en °C

T_{Ti} = Temperatura de 22 °C considerada como la de confort, en °C

$T_{MAX-MINd}$ = Diferencia de una Temperatura establecida inicialmente como máxima con la mínima del día correspondiente.

T_{MAX-Ti} = Diferencia de la temperatura establecida inicialmente como máxima menos la temperatura ideal mínima.

Si $T_{MAX-MINd} < T_{MAX-Ti}$ Temperatura ↑

Se obtuvo la diferencia de la temperatura establecida inicialmente como máxima menos la temperatura ideal mínima T_{MAX-Ti} (5.13) y la temperatura inicial máxima menos la temperatura mínima del día correspondiente $T_{MAX-MINd}$ (5.12) con las diferencias obtenidas, donde si la última es menor que la primera, se alcanza una temperatura mínima mayor a la de confort. Estas temperaturas superiores a las

de confort se contabilizaron mensualmente grado por grado a lo largo de la longitud del registro y se graficaron contra el tiempo. Para poder deducir que existe un incremento de las temperaturas se hizo una comparación del comportamiento de éstas, con aumentos de un grado mes por mes, se representaron gráficamente y se obtuvo una tabla.

A continuación se describe la forma en que se obtuvieron los incrementos del número de veces en que se presenta una diferencia de temperatura menor a la de confort ($T_{MAX-MINd} < T_{MAX-Ti}$) lo que significa que la diferencia $T_{MAX} - T_{MINd}$ cada vez es menor con respecto a la diferencia $T_{MAX} - T_{Ti}$ es decir, que la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima diaria ha disminuido ($T_{MAX-MINd}$) ↓, por lo tanto, la recuperación para una temperatura de confort también se ha reducido y el número de veces que se presentan estas diferencias ha aumentado, por lo tanto las temperaturas se han incrementado.

Tabla 5.31. Incrementos del número de veces que se presenta una diferencia de temperatura menor a la de confort, de la Estación Topo Chico.

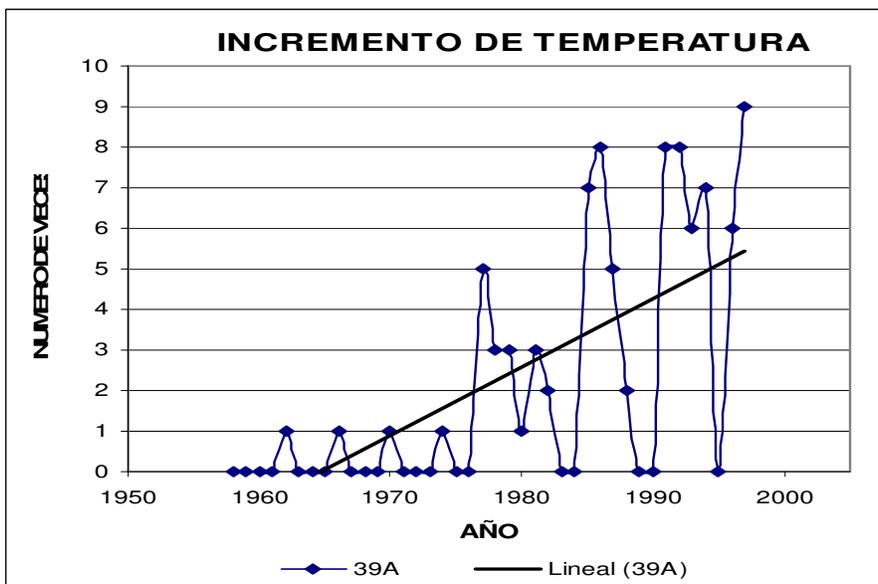
Temperatura °C		30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
ESTACION	MES	Δ																
19061	MAYO	-0,18	-0,17	-0,90	-1,35	-0,40	0,42	-0,14	0,45	3,00	0,85	1,00	0,30	0,41	-0,04	-0,02	0,00	0,13
19061	JUNIO	-0,19	-0,20	-0,63	0,60	-0,75	-0,50	0,40	2,2	3,35	2,15	2,40	1,00	0,35	0,16	0,09	0,00	0,00
19061	JULIO	-0,20	-0,95	-0,42	-1,05	-1,80	0,45	0,78	1,10	3,60	3,95	3,95	1,30	0,54	0,29	0,00	0,00	0,00
19061	AGOSTO	-0,70	-0,55	-2,20	-1,22	-1,40	-0,75	0,87	0,86	4,35	5,45	1,85	0,58	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
19061	SEPT	-0,17	-0,70	-0,35	-0,28	-0,20	0,50	0,87	1,45	0,53	0,42	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

La Tabla 5.31 corresponde a la Estación Topo Chico (19061), se construyó con las tendencias de cada mes y de cada grado, por ejemplo para el mes de Agosto de todo el registro (1958-1997), con una $T_{MAX} = 39^{\circ}C$, la $T_{Ti} = 22^{\circ}C$ y las T_{MINd} fueron las temperaturas mínimas diarias del día en que se presentaron temperaturas máximas de $39^{\circ}C$, se percibe una tendencia de incremento de 5.45 veces su presencia. Esto se observa en la Gráfica 5.11.

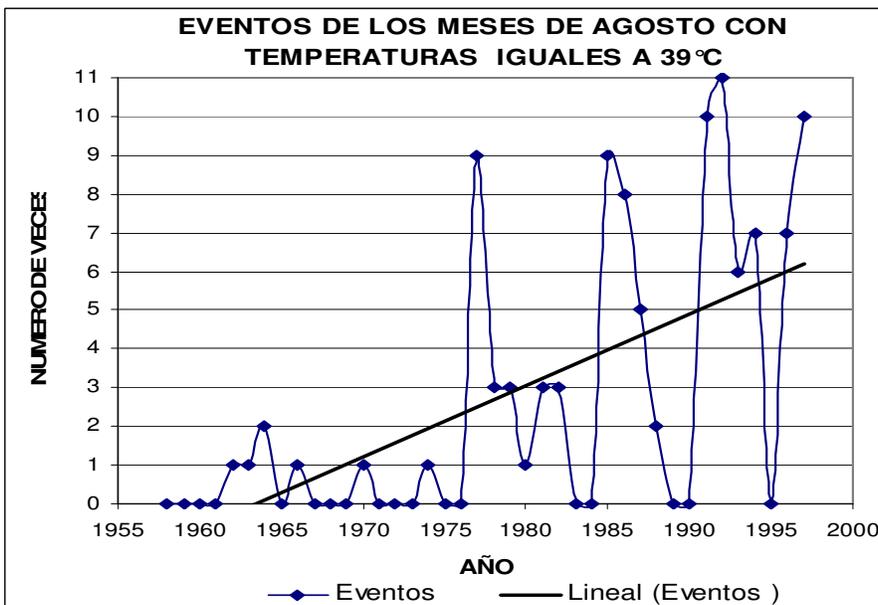
En la Tabla 5.32 se dan los valores de las tendencias de cada mes y de cada grado de la variabilidad en cuanto al número de veces que se presentan las temperaturas para una T dada, por ejemplo en el mes de Agosto del registro (1958-1997), con $T_{MAX} = 39^{\circ}C$, la $T_{Ti} = 22^{\circ}C$ y las T_{MINd} (temperaturas mínimas diarias del día en que se presentaron las temperaturas máximas de $39^{\circ}C$), se aprecia una tendencia de aumento de 6.2 veces su presencia, se observa en la Gráfica 5.12.

Tabla 5.32. Valores de las tendencias de la variabilidad en cuanto al número de veces que se presentan las temperaturas de la Estación Topo Chico.

Temperatura °C		30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	
ESTACION	MES	Δ																	
19061	MAYO	0,55	-0,60	-1,65	-0,55	0,88	2,15	-1,80	1,23	0,45	1,40	1,65	1,00	0,67	0,11	-0,02	0,00	0,13	
19061	JUNIO	-0,28	-1,95	-2,15	0,55	-1,35	-0,95	-0,75	2,10	1,00	1,20	3,10	1,20	0,60	0,25	0,09	0,00	0,00	
19061	JULIO	-1,17	-1,85	-1,65	-1,55	-2,80	0,40	-0,25	1,17	1,28	2,50	4,00	1,35	0,58	0,33	0,00	0,00	0,00	
19061	AGOSTO	-1,40	-3,00	-4,50	-3,60	-3,90	-1,20	0,07	1,55	4,30	6,20	1,85	0,60	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	
19061	SEPT	-0,85	-0,60	0,10	0,41	-0,62	1,50	-0,80	1,22	-0,35	0,42	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
PROMEDIO		-0,63	-1,60	-1,97	-0,95	-1,56	0,38	-0,71	1,45	1,34	2,34	2,42	0,83	0,44	0,14	0,01	0,00	0,03	

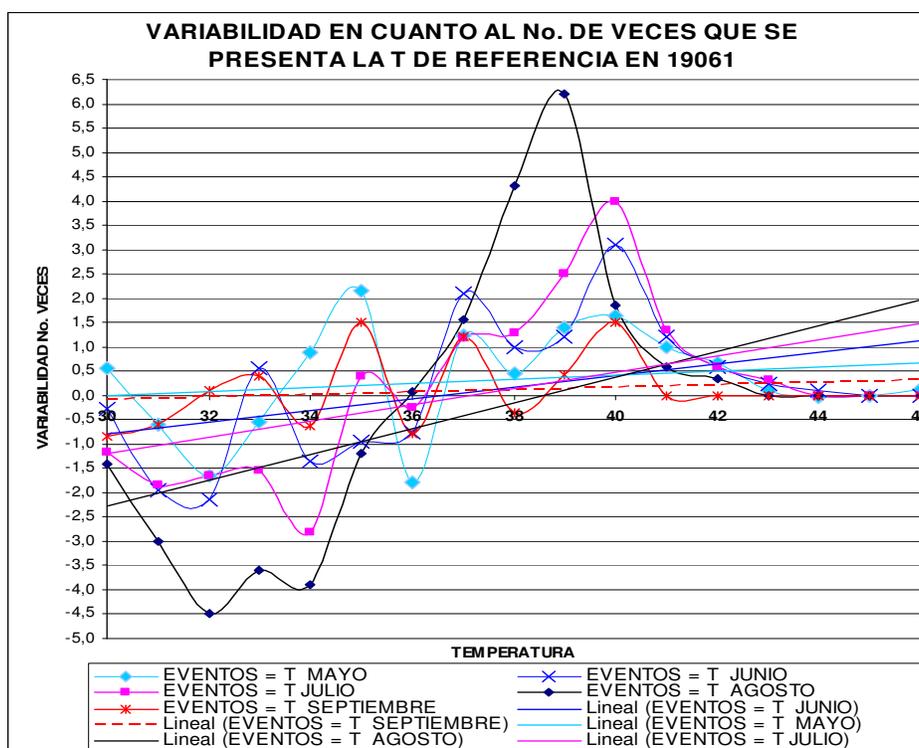


Gráfica 5.11 Incrementos del número de veces que se presenta una diferencia de temperatura menor a la de confort con una temperatura de 39°C, en los meses de agosto en la Estación Topo Chico



Gráfica 5.12 Variabilidad en cuanto al número de veces que se presentan las temperaturas de 39°C, en los meses de Agosto en la Estación Topo Chico.

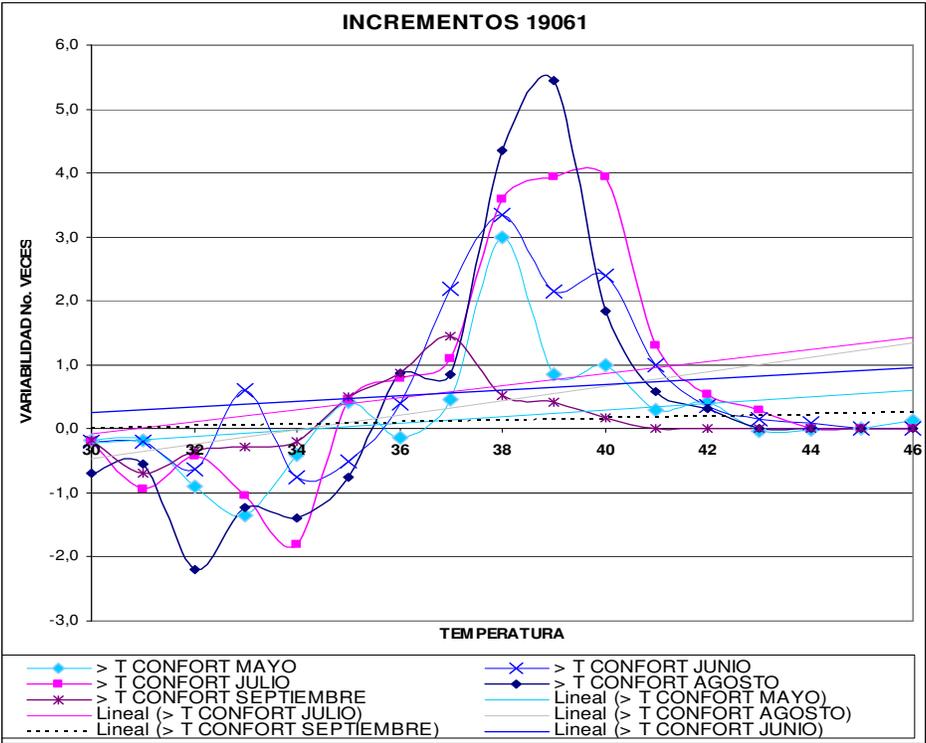
En la Estación Topo Chico (19061), se observó que la presencia de las temperaturas ha sido la siguiente: las de **30°C** han decrecido hasta en 1.5 veces por mes y 0.6 en promedio, las de **31°C y 32°C** se han reducido hasta en 4.5 ocasiones por mes y 1.8 veces en promedio, las de **33°C** bajaron hasta en 3.5 veces y 1 ocasión en promedio por mes, las de **34°C** han disminuido hasta en 4 ocasiones por mes y 1.6 en promedio, las de 35°C aumentaron hasta en 2 ocasiones y en casi 0.5 veces en promedio, las de **36°C** decrecieron hasta en 1.5 veces y 0.7 veces en promedio por mes, las de 37°C y 38°C se incrementaron hasta en 2 ocasiones y 1.4 veces en promedio mensual, mientras que las de 39°C y 40°C se intensificaron hasta en 4 ocasiones y 2.4 veces en promedio, las de 41°C se elevaron hasta en 1.5 ocasiones y en una ocasión en promedio, finalmente las de 42°C crecieron hasta en 1.5 veces y 0.5 veces en promedio, las otras se mantuvieron casi de forma similar.



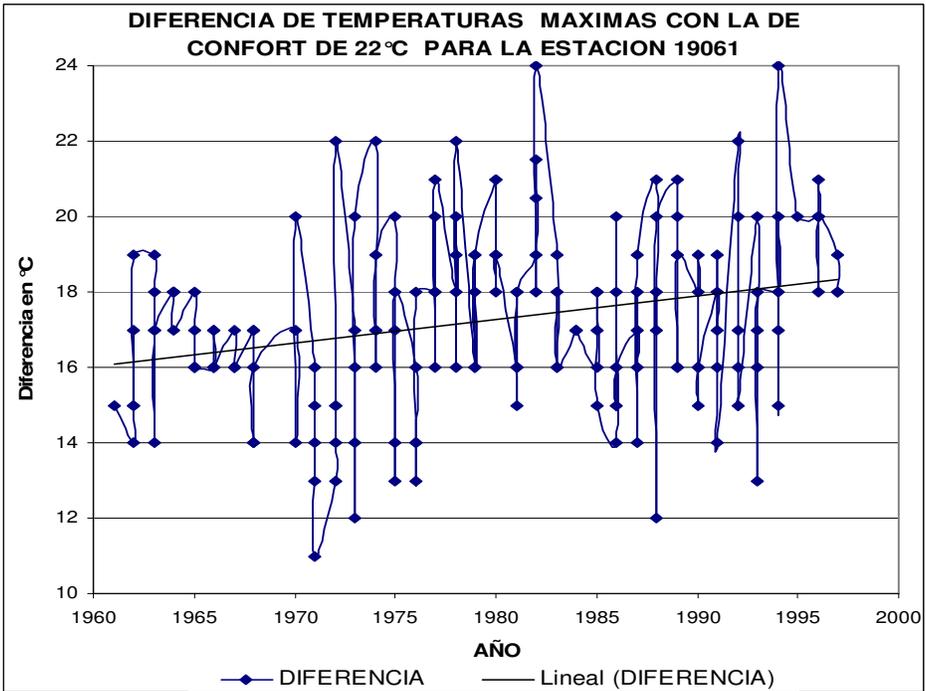
Gráfica 5.13. Muestra la variabilidad en cuanto al número de veces que se presentan las temperaturas

En la Gráfica 5.13 se muestra la variabilidad en cuanto al número de veces que se presentan las temperaturas (30°C, 31°C, 32°C, 33°C, 34°C, 35°C, 36°C, 37°C, 38°C, 39°C, 40°C, 41°C, 42°C, 43°C, 44°C, 45°C y 46°C) durante los meses de

Mayo a Septiembre en La Estación Topo Chico (19061), la gráfica 5.14 pertenece a la misma estación y se refiere a los incrementos del número de veces que se presenta una diferencia de temperatura menor a la de confort ($T_{MAX-MINd} < T_{MAX-Ti}$).



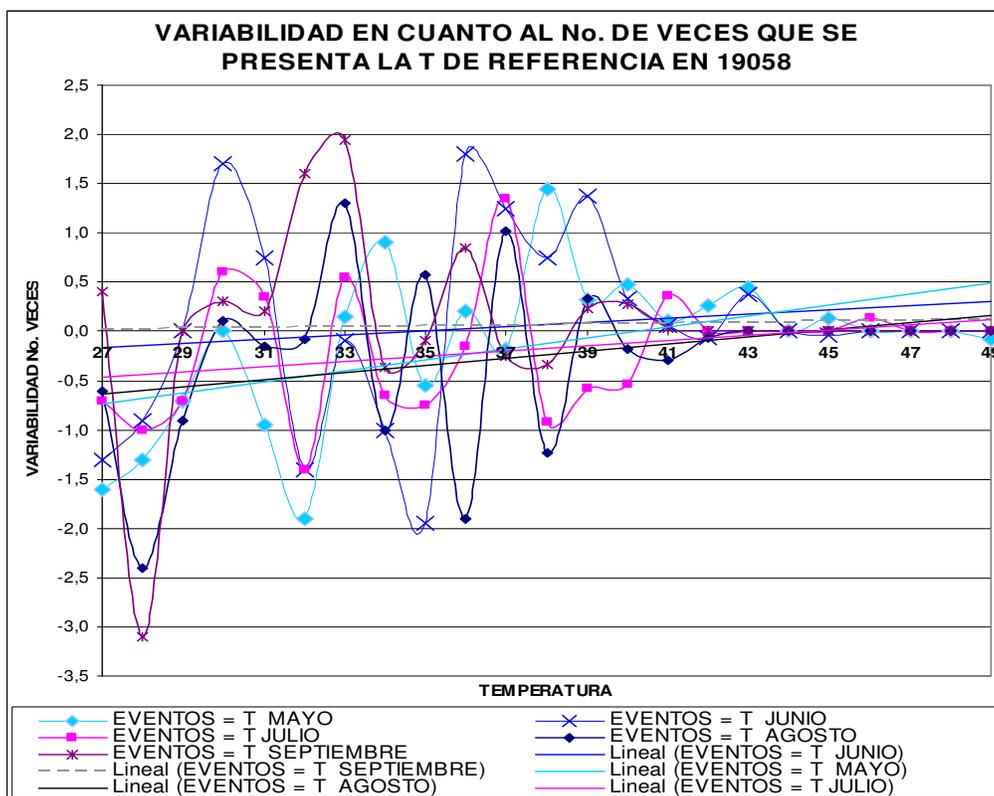
Gráfica 5.14. Muestra los incrementos del número de veces que se presenta una diferencia de temperatura menor a la de confort.



Gráfica 5.15 Tendencia en el incremento de las temperaturas máximas con respecto a la de confort.

Esto indica que en promedio las temperaturas de 30°C y 36°C han descendido 0.7 veces, las de 31°C a 34°C se presentan 1.5 veces menos, por el contrario las de 35°C y 42°C se han incrementado en 0.4 veces, las de 37°C, a 40°C ha aumentado en 2 ocasiones, en la Gráfica 5.15 se manifiesta una tendencia en el incremento de las temperaturas máximas con respecto a la de confort de 2.2°C para La Estación Topo Chico (19061).

De forma análoga en La Estación Santa Catarina (19058), se observó que en promedio la presencia de temperaturas de 27°C a 29°C han descendido una vez, las de 30°C y 31°C se manifiestan 0.3 veces menos, las temperaturas de 32°C han decrecido 0.65 veces, las de 33°C se han intensificado en 0.8 veces, las de 34°C y 35°C han aumentado en 0.5 veces, las de 36°C y 37°C se han elevado en 0.4 veces, las de 38°C a 49°C no tienen incremento, esto ratifica una tendencia en el incremento de las temperaturas máximas con respecto a la de confort en 2.5°C para La Estación Santa Catarina (19058).



Gráfica 5.16. Muestra la variabilidad en cuanto al número de veces que se presentan las temperaturas

En la Gráfica 5.16 se aprecia la variabilidad en cuanto al número de veces que se presentan las temperaturas de (27°C, 28°C, 29°C, 30°C, 31°C, 32°C, 33°C,

34 °C, 35 °C, 36 °C, 37 °C, 38 °C, 39 °C, 40 °C, 41 °C, 42 °C, 43 °C, 44 °C, 45 °C, 46 °C, 47 °C, 48 °C y 49 °C) durante los meses de Mayo a Septiembre en La Estación Santa Catarina (19058).

Similarmente se hizo un análisis con La Estación Monterrey (19049), donde se observó que en promedio las temperaturas de 32 °C a 34 °C se presentan dos veces menos, en cambio la aparición de temperaturas de 35 °C a 41 °C han aumentado en una ocasión, esto confirma una tendencia de incremento de las temperaturas máximas con respecto a la de confort en 1.2 °C para La Estación Monterrey (19049).

De lo anterior, se fijó para el área de estudio una temperatura de 22 °C durante la noche como el umbral máximo de confort, donde el ser humano puede descansar, tener un ambiente adecuado para la recuperación de las actividades físicas, laborales y demás realizadas durante el día, se analizaron, examinaron, valoraron y graficaron las diferencias $T_{MAX-MINd} < T_{MAX-Ti}$ y los incrementos $\Delta T_{(MAX-MINd)} > \Delta T_{(MAX-Ti)}$ de los registros en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre; se observó que tienen una tendencia de incremento en las temperaturas máximas y mínimas, se percibe que existe un incremento en días con temperaturas mayores a las de confort, es importante mencionar que cada vez son más los días en los que el $\Delta T_{MAX-MINd} > \Delta T_{MAX-Ti}$, además la diferencia $T_{MAX-Ti} = T_{MAX} - T_{Ti}$ muestra una tendencia de incrementos de **2.2 °C** en La Estación Topo Chico (19061), **2.5 °C** en La Estación Santa Catarina (19058) y **1.2 °C** en La Estación Monterrey (19049), lo que significa que la recuperación de temperatura máxima del día con respecto de la noche se ha reducido y comprueba que ahora las temperaturas mínimas de confort serían en La Estación Topo Chico **24.2 °C** durante la noche, en La Estación Santa Catarina **24.5 °C** y para La Estación Monterrey **23.2 °C**, así podemos confirmar el incremento acelerado de las temperaturas en poco tiempo.

Las diferencias encontradas entre una y otra estación pueden estar influidas por la altitud, topografía, tipos y usos del suelo, áreas verdes, bosques, áreas de reserva ecológica y aspecto del lugar en el que se ubican éstas, que dan origen a lo que se conoce como "isla de calor" ó microclimas.

El incremento global de la temperatura, consecuencia del "efecto invernadero", la degradación de las cuencas, la disminución de la cobertura vegetal, la deforestación, la degradación de los suelos, el cambio de uso de suelo, el crecimiento de la mancha urbana, la disminución de la infiltración que altera el ciclo hidrológico, además los centros urbanos son grandes generadores de calor, las actividades humanas son una considerable fuente de calor, el aumento de temperatura representa un incremento en la demanda de energía eléctrica para la industria, el comercio y el uso domestico para la operación de equipos de aire acondicionado y de equipos industriales de enfriamiento, esto origina un aumento de las emisiones atmosféricas de las plantas generadoras de energía, sin dejar de mencionar el calor producido por los vehículos.

El calentamiento global también contribuye a la proliferación de insectos, los que favorecen la incidencia de plagas y de enfermedades que estos vectores transmiten, debido a las variables de temperatura que representan un alto costo para el gobierno y la población.

El crecimiento urbano es la causa de diversos cambios en los patrones climáticos, por eso es importante tomar medidas más precisas en la planeación de centros urbanos, tomando en cuenta todas las variables que se afectan, tratando de conservar lugares y áreas para la recarga de los acuíferos, así como reforestando, protegiendo, conservando los bosques y las áreas verdes.

CONCLUSIONES:

La población, el desarrollo y el medio ambiente son los ejes del futuro sustentable de las ciudades, el cual se alcanzará si se logra un equilibrio entre los medios urbanos y rurales, de tal forma que la población obtenga una buena calidad de vida en ambos.

El crecimiento urbano modifica las variables climáticas, que se reflejan en las diferencias de: temperatura, humedad, precipitación, niebla, radiación solar y velocidad del viento en la metrópoli y sus alrededores, asimismo el desarrollo de algunos municipios a un ritmo mas acelerado que otros, el cambio de usos del suelo (de área no urbana a urbanizable, de bosques y pastizales a suelo agrícola ó urbanizable) y la deforestación, propician que los suelos pierdan la cobertura vegetal y la capacidad natural para retener la lluvia, debido a lo anterior tienden a secarse, compactarse y erosionarse, modificando cada una de las variables del ciclo hidrológico, así se reduce la capacidad de infiltración, la recarga de los acuíferos, la alimentación de los manantiales y de los ríos, por lo que las fuentes superficiales y subterráneas se alteran sustancialmente, generando la necesidad de buscar nuevas fuentes de abastecimiento cada vez más lejanas para llevar el agua a la metrópoli, esto tiene un alto costo económico, político, social y ambiental, producido por la construcción de obras de captación, almacenamiento, conducción y distribución, que afectan al ciclo hidrológico de otras regiones y generan problemas entre los municipios o estados.

La lámina de precipitación promedio anual municipal del AMM, muestra tendencias negativas. En el AMM la tendencia de precipitación promedio ha descendido 40.5mm, en los municipios de Monterrey y Juárez 100mm, en San Nicolás de los Garza 65mm, en San Pedro Garza García 57mm y en Guadalupe 55mm, cifras significativas si se toma en cuenta que la precipitación promedio de la Región VI Río Bravo es escasa e irregular con un valor medio anual de 480mm y en la Subregión de Planeación San Juan es de 659mm, esto significa de un 10% a un 15% del valor anual municipal, que se refleja directamente en los incrementos de temperatura, de evapotranspiración y de escurrimiento, y en la disminución de la

capacidad de infiltración, afectando la recarga de los acuíferos y el almacenamiento de las presas.

La evapotranspiración real promedio anual municipal del AMM(1952-2001) revela tendencias de incrementos en sus porcentajes, para el AMM son del 2.6%, en los municipios de Monterrey y Juárez son los más altos con 6.3% y 5.2% respectivamente; en los municipios de San Pedro Garza García, Guadalupe y San Nicolás de los Garza son mayores del 3%, esto produce que Guadalupe y San Nicolás de los Garza, muestren valores de evapotranspiración real promedio anual por encima del 92% de su precipitación, además San Pedro Garza García y García con valores por encima del 94% de su precipitación. Considerando que el valor medio de la región es cercano al 90% de la precipitación; se percibe como se esta alterando el ciclo hidrológico por diferentes motivos que afectan el medio natural, lo que se refleja directamente en la disminución de la lámina de precipitación, además las actividades agrícolas y ganaderas se ven disminuidas en su producción, debido a que la demanda de agua es mucho mayor y la disponibilidad es cada vez menor.

Es evidente que las láminas de escurrimiento promedio anual municipal del AMM (1960-2001), han sufrido cambios significativos (Tabla 5.28a), fue necesario indagar en los diferentes tipos de áreas según su uso de suelo. Se aprecio que la tendencia de los valores estimados de la lámina de escurrimiento en las áreas urbanas es creciente resultado de la modificación del uso del suelo debido al crecimiento urbano, en general el AMM muestra una tendencia de aumento de 3.25mm, el municipio con mayor incremento es Guadalupe con 14mm, seguido de San Nicolás de los Garza con 10mm y de Apodaca con 9.15mm. En lo que respecta a las áreas urbanizables se observó una tendencia negativa; el AMM muestra un descenso de 4.98mm, el municipio con mayor reducción fue San Nicolás de los Garza con 21.24mm, seguido de Guadalupe con 15.65mm y de San Pedro Garza García con 12.4mm, esto es debido a que dicha área disminuye con el paso del tiempo. En las áreas no urbanizables existe también una tendencia negativa; el AMM muestra un descenso de 7.4mm, el municipio con mayor reducción estimada en lámina de escurrimiento fue Juárez con 25mm y Monterrey con 18.27mm, el municipio con menor reducción es San Nicolás de los Garza con 0.05 mm, sin duda

es el que tenía la menor área no urbanizable y en la actualidad ya no cuenta con área no urbanizable. Confirmando que el crecimiento urbano es determinante en los escurrimientos, mismos que al intensificarse en áreas urbanas generan problemas de inundaciones, alcantarillado y accidentes.

Lo anterior ha repercutido en la reducción de la lámina de infiltración promedio anual municipal y de toda el Área Metropolitana de Monterrey, la tendencia de la infiltración es negativa en todos los municipios del AMM, en el Municipio de García es inapreciable, la disminución en los demás municipios es la siguiente: en General Escobedo 4mm, Santa Catarina y Apodaca 11mm, San Pedro Garza García 25mm, Guadalupe y San Nicolás de los Garza 32mm, Monterrey 45mm y finalmente Juárez 53mm. En general el AMM (1960 al 2001) denota una tendencia de reducción en la capacidad de infiltración de 17.5mm en la recarga de los acuíferos. Se puede decir que se han dejado de infiltrar a partir del 2001 alrededor de 57.02 Mm³/año, con ese volumen se podría satisfacer el 42% de la demanda de aguas subterráneas para el AMM que en el 2001 fue de 133.71Mm³. Es importante destacar que gráficamente los niveles de extracción no se ven reflejados, pues la tendencia de extracciones sigue igual, sin embargo cabe reflexionar sobre la lámina de infiltración del AMM que se ha visto reducida significativamente, en consecuencia los niveles de los acuíferos están disminuyendo de forma más acelerada porque no existe una proporción equilibrada entre los volúmenes de extracción y de infiltración, debido al déficit que existe en los acuíferos que abastecen de agua potable al AMM, es preciso adoptar medidas de control en las extracciones del agua subterránea, protegerlas evitando incrementos de extracciones en aquellos cuerpos de agua que se encuentran en equilibrio o que están sobreexplotados, con el fin de evitar que lleguen a un estado de agotamiento y que una mayor cantidad se sobreexploten en un futuro. El estado en el que se hallan varios acuíferos ha rebasado la disponibilidad natural de las aguas subterráneas, cada vez son aguas más profundas y de menor calidad, esto representa una situación de alerta en los recursos hídricos subterráneos. La explotación irracional de aguas subterráneas provoca insuficiencia de agua, lo mismo sucede con las aguas superficiales, esto esta relacionado con un

crecimiento desmedido sin planeación, sin estrategias, sin compromisos que compromete el desarrollo urbano y económico de las ciudades. El conocimiento de tales efectos puede hacer posible su predicción, planeación e incluso su control, pero la realidad es otra, por lo tanto se deben de efectuar medidas para no agotar este recurso natural.

Respecto a las temperaturas máximas y mínimas, se fijo una temperatura de 22°C durante la noche como el umbral máximo de confort, donde el ser humano puede descansar, tener un ambiente adecuado para la recuperación de las actividades físicas, laborales y demás realizadas durante el día, se analizaron, examinaron, valoraron y graficaron las diferencias $T_{MAX} - MIN_d < T_{MAX-Ti}$ y los incrementos $\Delta T_{(MAX - MIN_d)} > \Delta T_{(MAX-Ti)}$ de los registros en los meses de mayo a septiembre; se estimo una tendencia de incremento en las temperaturas máximas y mínimas, que genera un incremento en días con temperaturas mayores a las de confort, es importante mencionar que cada vez son más los días en los que el $\Delta T_{MAX - MIN_d} > \Delta T_{MAX-Ti}$, además la diferencia $T_{MAX-Ti} = T_{MAX} - T_{Ti}$ muestra una tendencia de incrementos de **2.2°C** en La Estación Topo Chico (19061), **2.5°C** en La Estación Santa Catarina (19058) y **1.2°C** en La Estación Monterrey (19049), significa que la recuperación de temperatura máxima del día con respecto de la noche se ha reducido y comprueba que ahora las temperaturas mínimas de confort serían en La Estación Topo Chico **24.2°C** durante la noche, en La Estación Santa Catarina **24.5°C** y para La Estación Monterrey **23.2°C**, así podemos confirmar el incremento acelerado de las temperaturas en poco tiempo.

Es innegable que en las últimas décadas ha habido una tendencia en el aumento de los niveles de temperatura. Esto está relacionado con la degradación de las cuencas, con la deforestación, los suelos pierden la capacidad natural para retener humedad, tienden a secarse y compactarse lo que produce un descenso en la capacidad de infiltración y la reducción en la recarga de los acuíferos causa la disminución en el suministro a los manantiales, ríos y lagos, conjuntamente el cambio de uso de suelo, el crecimiento de la mancha urbana, provocan que los centros urbanos generen grandes cantidades de calor, sus construcciones, edificios y asfalto, constituyen evidentemente una alteración profunda al medio natural, sus

actividades son una formidable fuente de calor, el aumento de temperatura representa un incremento en la demanda de energía eléctrica para la industria, el comercio y el uso domestico, para la operación de equipos de aire acondicionado y de equipos industriales de enfriamiento, que por supuesto tienen que bombear aire caliente hacia afuera para producir su efecto refrigerante, esto origina que las plantas generadoras de energía produzcan grandes emisiones de contaminantes a la atmósfera, sin dejar de mencionar el calor producido por los vehículos.

Lo que supone cambios en los patrones de la precipitación, donde la lluvia caerá en forma torrencial en pocos días del año, o más aún en pocas horas con las consecuencias de inundaciones en algunas zonas y en otras habrá periodos de sequías prolongados. Los daños por inundación se destacan por la presencia de asentamientos humanos en zonas propensas a ellas, como los cauces naturales y zonas bajas, y son más severos porque el agua se concentra más rápidamente y en mayor volumen como consecuencia de la pérdida de la cobertura vegetal originada por la deforestación. El crecimiento urbano es parte de la causa de estas alteraciones, pues definitivamente se modifica el ciclo hidrológico, por eso es importante tomar medidas más precisas en la planeación de centros urbanos, considerando todas las variables que se afectan, conservando las áreas para la recarga de los acuíferos, así como reforestando, protegiendo y conservando los bosques, las áreas verdes, para un mejor desarrollo sustentable.

RECOMENDACIONES:

Modificar los actuales patrones de desarrollo urbano-metropolitano de México y la gestión político-administrativa, así como enfrentar los desafíos de la urbanización futura, adoptar nuevos enfoques e instrumentos de análisis para determinar la dimensión de dicha realidad desde una óptica holística e integral, además de reconocer la necesidad del crecimiento social y económico que contribuyan al uso sustentable de los recursos naturales, a la conservación y protección efectiva del medio ambiente.

Plantear modelos y soluciones de crecimiento metropolitano bajo esquemas de armonía de concentración-desconcentración será un instrumento eficaz para el desarrollo urbano.

Debido al crecimiento urbano, demográfico y a las crecientes demandas en las ciudades, es de suma importancia desarrollar una base de datos adecuada y oportuna que nos proporcione la información estadística y geográfica de las metrópolis, así como los incrementos de la mancha urbana y el cambio de usos del suelo, para poder evaluar su comportamiento con perspectivas de la planificación y solución de las prioridades urbanas, con el propósito de lograr la sustentabilidad ambiental, el bienestar económico y social, además de la gobernabilidad.

Adoptar medidas que conduzcan al equilibrio del ciclo hidrológico, indispensable para lograr el uso sustentable del agua en el país, con el apoyo técnico y financiero disponible, además de modernizar la red de monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas, ajustar las extracciones eficientes del agua, realizar acciones que repercutan en un mejor aprovechamiento del uso del suelo y del agua, con una mejor planeación para poder satisfacer la demanda urbana, la conservación de la cobertura vegetal y del suelo, conservar un balance del suelo-agua para la recarga de los acuíferos, asimismo reforestar y atender los bosques, las áreas verdes, proteger y evitar asentamientos en áreas consideradas como reserva ecológica, zonas de gran importancia en la captación del agua debido a su alta permeabilidad y en áreas inundables, la adecuada implementación de medidas de seguridad civil en estrecha coordinación interinstitucional en caso de emergencias.

Con las medidas anteriores se disminuirá la necesidad de buscar nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable de lugares cada vez más lejanos, que provocan problemas políticos por lucha de la propiedad del agua, económicos por los altos costos en la construcción, conducción y distribución, y ambientales que afectan el ciclo hidrológico de otras regiones.

Estas medidas deberán basarse en la adecuación del marco jurídico, respetando y haciendo respetar las leyes por parte de los gobernantes, además con el apoyo decidido de la sociedad, es indispensable la participación activa y corresponsable de todos los sectores de la sociedad (población, comercio, industria, usuarios, sector académico e instancias de gobierno), aportando los medios a su alcance, para la adopción generalizada de una cultura del agua, además fomentar la cultura del reuso del agua residual tratada, desarrollar nuevas tecnologías y la ampliación de la infraestructura, para aprovechar el agua con mayor eficiencia, pero lo más importante es educar a la población en la cultura del manejo y buen uso del agua, a través de la promoción de campañas publicitarias, cursos, talleres, incentivos económicos, etc. Se requiere de la voluntad y del compromiso de una sociedad convencida de que el agua es un recurso valioso y finito, que en un futuro se verá limitada, además de que se valoren los beneficios y vislumbren los resultados esperados, esto facilitará la coordinación y la realización eficaz de acciones tendientes al uso sustentable de los recursos hidráulicos.

El futuro sustentable de las ciudades deberá abarcar tres grandes ejes: población, desarrollo y medio ambiente. El primero tiene que ver con la dinámica de la población, el segundo con las actividades económicas y estructuras productivas y el tercero con la sustentabilidad que está muy relacionada con la dinámica espacial, socioeconómica de las ciudades, fenómenos naturales, fenómenos ecológicos, servicios ambientales, factores de bienestar, vulnerabilidad y riesgo social.

BIBLIOGRAFIA:

1. Aparicio, M Francisco J. *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa-Noriega editores. México, 2005.
2. Campos Aranda D. F., *Procesos del Ciclo Hidrológico*, Universidad Autónoma de San Luís Potosí. Editorial Universitaria Potosina. 3era. Reimpresión. México, 1998.
3. Carabias, Julia, Landa R., Collado, J., Martínez P., *Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*, UNAM, El Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte, Primera edición, México D.F. 2005.
4. Comisión de Desarrollo Urbano del Estado de Nuevo León, *Plan Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey, 2020*, documento para la Consulta Pública, Monterrey, Nuevo León, 1995.
5. Comisión Nacional del Agua (CNA). *Estadísticas del Agua en México, 2005*. Primera edición, 2005. México
6. Comisión Nacional del Agua (CNA). *Programa Hidráulico de Gran Visión, 2001-2025 de la Región VI Río Bravo*. México. 2003
7. Comisión Nacional del Agua (CNA). *Programa Hidráulico Regional 2002-2006*, Región VI Río Bravo. Primera edición. México, 2003.
8. Comisión Nacional del Agua (CNA). *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*, México, 2001.
9. Conferencia Internacional sobre Agua Dulce, *El agua: Una de las claves del desarrollo sostenible*, Bonn, Alemania, Diciembre de 2001; www.water-2001
10. Consejo Nacional de Población, *Proyecciones de la población total de las localidades, 2000-2030*; www.conapo.gob.mx
11. Chow, V. T., Maidment, David R., Mays, Larry W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, 1988.
12. García Ortega, Roberto, *Monterrey y Saltillo hacia un nuevo modelo de planeación y gestión urbana metropolitana*. El Colegio de la Frontera Norte/Universidad Autónoma de Coahuila. 2003.

13. Garza, Villarreal Gustavo, *Atlas de Monterrey*, Gobierno del Estado de Nuevo León/Universidad Autónoma de Nuevo León/Instituto de Estudios Urbanos de Nuevo León/El Colegio de México, México, 1995.
14. Garza Villarreal, Gustavo. *La Gestión Municipal en el Área Metropolitana de Monterrey, 1989-1994*. Instituto de Investigaciones Sociales de la UNAM, 1998.
15. Guajardo, Alatorre Alicia A. *Análisis Estratégico del Área Metropolitana de Monterrey: Un diagnóstico para el desarrollo*. Centro de Desarrollo Estratégico Metropolitano. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). Monterrey, Nuevo León, 2002.
16. Houghton John, Meira Gylvan, Griggs David, Maskell Kathy, *Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas*. Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio Climático. IPCC. Febrero de 1997.
17. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *Anuario Estadístico Nuevo León*. Ediciones 1984, 1986, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005 y 2006.
18. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Carta Edafológica, escala 1:1,000,000*, Primera impresión. México, 1981.
19. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Carta Fisiográfica, escala 1:250,000*, inédita.
20. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Carta Hidrológica de Aguas Subterráneas, escala 1:250,000, Monterrey G14-7*. México, 2000.
21. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Carta Hidrológica de Aguas Superficiales, escala 1:250,000, Monterrey G14-7*. Segunda impresión. México, 2003.
22. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Carta Topográfica, escala 1:250,000, Monterrey G14-7*. 2ª edición, México, 1997.
23. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *Ciudades Capitales: Una visión histórica urbana* (CR-ROM). 2000. Aguascalientes, México.

24. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *Conteo de Población y Vivienda, 1995 y 2005. Resultados Definitivos Tabulados Básicos*, México.
25. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *Estadísticas del Medio Ambiente de la Zona Metropolitana de Monterrey 2001*. Aguascalientes, México, 2002.
26. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Marco Geoestadístico Municipal 2005, (disco compacto), México.
27. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Nuevo León, VII, VIII, IX, X, XI y XII. Censos Generales de Población y Vivienda 1950, 1960, 1970, 1980, 1990 y 2000.
28. Kingsley D., *Cities, their origin, growth and human impact*. W.H. Freeman and Company, London by Scientific American, 1976.
29. Linsley, Ray K., Kohler Max A., Paulhus, Joseph L.H. *Hidrología para Ingenieros*. Segunda Edición. McGraw-Hill, México, 1994.
30. López, Pérez Roberto. *Notas, Revista de información y análisis: Bases conceptuales y técnicas para la delimitación de zonas metropolitanas en México*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). México, 2003.
31. Martínez Austria, P.F., *Paradigmas emergentes para el manejo del agua en el siglo XXI. Conferencia Enzo Levi 2000*. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XVI, num. 4, 2001.
32. Sánchez San Román F., *Evapotranspiración*, Departamento de Geología.
33. Schteingart, M., D'andrea, García O., *Servicios urbanos, gestión local y medio ambiente: Área Metropolitana de Monterrey. Problemática ecológica, servicios urbanos y medio ambiente*. Secretaría de Desarrollo Urbano del Gobierno del Estado de Nuevo León. El Colegio de México. C.E.R.F.E. México, 1991.
34. Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*. Primera edición 2004.

35. Secretaría de Desarrollo Urbano del Gobierno del Estado de Nuevo León. *Plan Director de Desarrollo Urbano del Área Metropolitana de Monterrey 1988-2010*, Dirección de Planificación de Desarrollo Urbano. Monterrey, México, 1988.
36. Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Estudios Municipales, Gobierno del Estado de Nuevo León. *Los Municipios de Nuevo León*, en "Enciclopedia de los Municipios de México". Monterrey, N.L. 1988.
37. Secretaría de Programación y Presupuesto/Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, *Carta de Climas escala 1:1,000,000*, México, 1980.
38. Secretaría de Programación y Presupuesto/Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, *Síntesis Geográfica de Nuevo León*, México, 1981.
39. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADEM), *Registros de los volúmenes promedios diarios de extracción de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Zona Metropolitana de Monterrey, 1980-2006*. Monterrey, Nuevo León, 2007.
40. Unikel, Ruiz y Garza, *El desarrollo urbano de México*, El Colegio de México, México, 1980.
41. Viessman, W., Lewis Gary L., Knapp John W., *Introduction to Hydrology*, Harper & Row, Publishers. New York 3rd ed. 1989.
42. Ward Andy D., Trimble Stanley W. *Environmental Hydrology*. Lewis Publishers. Second Edition. 2004.

Fuentes de información:

Organismos que proporcionaron información:

Comisión Nacional del Agua (CNA)

Consejo Nacional de Población (CONAPO)

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)

Desarrollo Urbano del Estado de Nuevo León (DUNL)

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)

Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADEM)

Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL)

Secretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas del Estado de Nuevo León.

Secretaría de Gobernación (SEGOB)

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE)

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP)

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM)

Centro Metropolitano de Desarrollo (CEDEM)