



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

Cuantificación del volumen de percolación de lixiviados mediante el balance de humedad de los residuos sólidos

Tesis

que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias del Agua

Presenta:

Jannet Martínez Arias

Tutor académico:

Dr. en Ing. Jaime Gárfias Soliz

Tutor adjunto:

Mtra. Ingrid Vargas Azofeifa

Agradecimientos

A Dios por todo lo recibido y por darme la fuerza para salir adelante ante las adversidades

A mi papá, mamá, hermanas y hermano, por su apoyo incondicional, por creer en mí, por sus esfuerzos constantes, por compartir conmigo tristezas, alegrías, éxitos y fracasos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para cursar mis estudios de Maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por la beca brindada para la culminación de esta investigación.

Al Dr. Jaime Garfías por brindarme la ayuda, paciencia y sobre todo su tiempo y dedicación para asesorar el desarrollo de esta investigación. Gracias por darme la oportunidad de trabajar con usted.

A la Mtra. Ingrid Vargas Azofeifa por su generoso recibimiento durante la pasantía realizada en la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica, quien además con sus observaciones ayudó a la mejora de esta investigación.

A los revisores de este trabajo, por sus acertadas observaciones para mejorar este trabajo de investigación.

A mis compañeros por su apoyo y comprensión, porque juntos aprendimos muchas cosas y por hacerme reír en cualquier circunstancia.

A Nancy y Elizabeth (Liz) quienes fueron un gran apoyo durante mi estancia en el CIRA-IITCA.

A todas aquellas personas que siempre han estado ahí apoyándome y animándome en los momentos difíciles y que de alguna forma contribuyeron para que esto fuera posible.

Resumen

En las últimas décadas el crecimiento de la población y, por ende, el aumento en la generación de residuos sólidos ha generado la proliferación de sitios de disposición final que no cumplen con la normatividad para evitar la contaminación tanto del suelo como del agua subterránea; por efecto de los productos generados por la descomposición de los residuos sólidos, tales como el lixiviado y el biogás. Bajo este contexto, un problema de este tipo afecta directamente el abastecimiento de agua, sobre todo en lugares donde el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la población, como, es el caso de la región del valle de Toluca, además que el acuífero también es fuente de abastecimiento para la Ciudad de México. En contraste con lo anterior, a la fecha existen escasos trabajos enfocados en esta problemática ambiental. De esta manera, el presente trabajo ha tenido como fin principal la cuantificación del volumen de lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos los cuales están ubicados en la cuenca del valle de Toluca. Además, con el propósito de tener una visión más amplia del comportamiento de la producción de lixiviados se realizó el análisis tomando como referencia tres escenarios diferentes de años hidrológicos, es decir, un año hidrológico seco, un año hidrológico promedio y un año hidrológico húmedo. Se han desarrollado diversos modelos que permiten realizar la estimación de los lixiviados producidos en sitios de disposición final por tal motivo en este trabajo se seleccionaron dos métodos: el Modelo de Balance Hidrológico (WBM, por sus siglas en inglés) y el modelo de Evaluación Hidrológica de Rellenos Sanitarios (HELP, por sus siglas en inglés). Por tanto, para dar cumplimiento al objetivo, primero se realizó la identificación de sitios de disposición final que contaran con información disponible, que ayudará a la estimación del volumen de lixiviados. Bajo este contexto, también se recabo información sobre las características de los sitios de disposición final. Paralelamente, se realizó la recopilación, análisis y tratamiento de la información meteorológica como la precipitación, la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, necesaria para la estimación del volumen de lixiviados, así como el cálculo de parámetros como el LAI y la información de propiedades físicas de los residuos sólidos. A partir de la metodología planteada para este trabajo, se obtuvieron los siguientes resultados: para el caso de la

selección de los sitios a estudiar, en principio se contaba con aproximadamente 150 sitios, posterior al análisis de imágenes satelitales y de la información bibliográfica se llegó a la elección de ocho sitios, de los cuales cinco son sitios no controlados, es decir, carecen de medidas para evitar la contaminación del ambiente, de estos el sitio ubicado en Metepec es un sitio clausurado. Los tres restantes son considerados rellenos sanitarios. En segundo lugar, se tienen los resultados de la cuantificación de la generación de los lixiviados, para los tres años hidrológicos, con los que se puede apreciar como es el comportamiento de la aparición de los lixiviados y como varía su cantidad con relación a la precipitación registrada. A partir de la comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos aplicados, en el caso del WBM, que es un método menos elaborado (sus resultados sirven más para mostrar un panorama general de la situación), los resultados reflejan que la producción de lixiviados presenta una similitud para los ocho sitios, ya que la producción de lixiviados está en función de la precipitación registrada, en tal sentido, el sitio con una mayor precipitación es el que presenta la mayor producción de lixiviados. Por otra parte, los resultados obtenidos por el modelo HELP3, reflejan una clara distinción entre los sitios no controlados y los rellenos sanitarios, dichas diferencias se atribuyen principalmente al acomodo y número de capas que presentan los rellenos sanitarios. En este sentido, la generación de lixiviados varía de 3 al 15% de la precipitación total, mientras que en los sitios no controlados este porcentaje se eleva al 35%. A partir de los resultados observados, se tiene que los resultados obtenidos por el modelo WBM se encuentran aproximadamente un 50% arriba de lo estimado por el modelo HELP3. Por ejemplo, en promedio para los ocho sitios el volumen de producción de lixiviados estimados por el modelo WBM es de 17,800 m³/año mientras que para el modelo HELP es de 8,600 m³/año. Si bien, los resultados de esta investigación muestran que las estimaciones con el modelo HELP fueron menores para los rellenos sanitarios en términos del porcentaje de precipitación que se convierte en lixiviado. No obstante, al hablar en términos de volumen (m³/año) los rellenos sanitarios son los que presentan una mayor cantidad de lixiviado generado, ya que son los sitios que presentan una mayor área. Finalmente, a partir de los datos obtenidos se llegó a la clasificación de los sitios por su amenaza a la calidad del agua subterránea, dicha clasificación se realizó considerando el tiempo requerido por el lixiviado para fluir de manera advectiva a través de la zona no saturada, considerando solo el flujo advectivo se encontró que los sitios de Almoloya del Río,

Metepec y Mexicaltzingo son donde el lixiviado alcanza el nivel freático en menor tiempo. Sin embargo, es importante que se realice un manejo de todos los sitios para evitar la contaminación del agua subterránea.

Abstract

In the last decades the population growth and, therefore, the increase in the generation of solid waste has generated the proliferation of final disposal sites that do not comply with the regulations to avoid contamination of both soil and groundwater; by the effect of the products generated by the decomposition of solid waste, such as leachate and biogas. Under this context, such a problem directly affects the water supply, especially in places where groundwater is the main source of drinking water supply for the population, as is the case in the Toluca Valley region, in addition, the aquifer is also a source of supply for Mexico City. In contrast to the above, to date, there are few works focused on this environmental problem. In this way, the present work has had as its main purpose the quantification of the volume of leachate generated in solid waste final disposal sites which are located in the Toluca valley basin. In addition, in order to have a broader view of the behavior of leachate production, the analysis was carried out taking as reference three different scenarios of hydrological years, that is, a dry hydrological year, an average hydrological year and a wet hydrological year. Various models have been developed that allow the estimation of leachate produced in final disposal sites for this reason, in this work two methods were selected: the Hydrological Balance Model (WBM) and the Hydrological Evaluation model Landfill (HELP). Therefore, to fulfill the objective, the identification of final disposal sites that had available information was first carried out, which will help to estimate the volume of leachate. Under this context, information was also collected on the characteristics of the final disposal sites. In parallel, the collection, analysis and treatment of meteorological information such as precipitation, temperature, solar radiation, wind speed, necessary for the estimation of leachate volume, as well as the calculation of parameters such as LAI and Information on the physical properties of solid waste. From the methodology proposed for this work, the following results were obtained: in the case of the selection of the sites to be studied, in principle there were approximately 150 sites, after the analysis of satellite images and the bibliographic information was reached eight sites are chosen, of which five are uncontrolled sites, that is, they lack measures to prevent contamination of the environment, of which the site located in Metepec is a closed site. The remaining three are considered landfills. Secondly, we have the

results of the quantification of the leachate generation, for the three hydrological years, with which we can see how the behavior of the leachate appearance is and how its quantity varies in relation to precipitation registered. From the comparison of the results obtained by both methods applied, in the case of the WBM, which is a less elaborate method (its results serve more to show an overview of the situation), the results reflect that leachate production presents a similarity for the eight sites, since leachate production is a function of the rainfall recorded, in this sense, the site with the highest rainfall is the one with the highest leachate production. On the other hand, the results obtained by the HELP3 model reflect a clear distinction between uncontrolled sites and sanitary landfills, these differences are mainly attributed to the accommodation and the number of layers presented by landfills. In this sense, the generation of leachate varies from 3 to 15% of the total rainfall, while in uncontrolled sites this percentage rises to 35%. Based on the observed results, the results obtained by the WBM model are approximately 50% higher than estimated by the HELP3 model. For example, on average, for the eight sites the volume of leachate production estimated by the WBM model is 17,800 m³ /year, while for the HELP model it is 8,600 m³ / year. Although, the results of this research show that the estimates with the HELP model were lower for landfills in terms of the percentage of precipitation that becomes leached. However, when speaking in terms of volume (m³ / year), landfills are those that present the greatest amount of leachate generated, since they are the sites with the greatest area. Finally, from the data obtained, the classification of the sites was reached due to their threat to the quality of the groundwater, said classification was made considering the time required for the leachate to flow advectively through the unsaturated area, considering only the advective flow it was found that the sites of Almoloya del Río, Metepec and Mexicaltzingo are where the leachate reaches the water table in less time. However, it is important that all sites are managed to avoid groundwater contamination.

ÍNDICE

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1	Introducción	1
1.2	Repercusiones ambientales de los sitios de disposición final de los residuos sólidos	2
1.3	Objetivo de la investigación	4
1.3.1	Objetivo general	4
1.3.2	Objetivos específicos	4
1.4	Hipótesis	5
1.5	Organización de la tesis	5

CAPÍTULO II ANTECEDENTES

2.1	El problema de los sitios de disposición final de los residuos sólidos	7
2.2	Generación de lixiviado y su tratamiento	12
2.3	Balance hídrico en sitios de disposición final.....	16
2.4	Métodos de estimación del volumen de lixiviado	19
2.5	Contaminación del agua subterránea	22

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Marco físico regional de la zona de estudio	24
3.1.1	Características climatológicas	26

3.1.2	Contexto geológico regional.....	26
3.1.3	Contexto hidrogeológico del acuífero del valle de Toluca.....	30
3.2	Recopilación y análisis de la información	31
3.3	Selección y caracterización de los sitios de disposición final	31
3.4	Construcción de la base de datos para la estimación del volumen de lixiviado generado en sitios de disposición final	32
3.4.1	Análisis y tratamiento de los datos meteorológicos	35
3.4.2	Procesamiento de los datos estimados.....	41
3.5	Cuantificación de la producción de lixiviados en los sitios de disposición final seleccionados	44
3.6	Clasificación de los sitios por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea	45

CAPÍTULO IV
RESULTADOS

4.1	Selección y caracterización de los sitios de disposición final	49
4.2	Construcción de la base de datos para la estimación del volumen de lixiviado en sitios de disposición final.....	66
4.2.1	Análisis y tratamiento de los datos meteorológicos	67
4.2.2	Procesamiento de los datos estimados.....	80
4.3	Cuantificación del balance de humedad de los residuos sólidos	88
4.4	Clasificación de los sitios de disposición final por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea	110
4.5	Estrategias de protección para el agua subterránea	120

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones.....	124
5.2	Recomendaciones	128

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXO I	137
ANEXO II	141
ANEXO III.....	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolución de la generación de residuos sólidos por persona en México de 1997 al 2017. La tasa de aumento en la producción de los RS es de 44% entre el año 1997 al año 2017.	8
Figura 2.2 Modelo conceptual de los componentes del balance hídrico considerados para cuantificar la generación potencial de lixiviados en un sitio de disposición final de residuos sólidos.	18
Figura 3.1 Localización de la cuenca del valle de Toluca en el contexto nacional y estatal, donde se muestra la distribución de la zona urbana para el año 2010 (color amarillo), la corriente principal el río Lerma, así como la laguna de Almoloya.....	25
Figura 3.2 Contexto geológico superficial de la cuenca del valle de Toluca.....	29
Figura 3.3 Flujo a través de una sola capa de suelo: a) con una pérdida de carga: b) con flujo gravitacional..	47
Figura 4.1 Localización de los sitios de disposición final de residuos sólidos en el valle de Toluca. Se observa que, asimismo, en la zona centro-sur se tiene la mayor presencia de éstos. Además, se muestra el contexto geológico de cada sitio	51
Figura 4.2 a) Características físicas que presentan las celdas del vertedero de Almoloya del Río. b) Fotografía panorámica de la situación actual del vertedero. En la zona delimitada en rojo se encuentra una acumulación de lixiviados.....	54
Figura 4.3 a) Distribución de las secciones del vertedero de Calimaya, donde se observa que ambas celdas se encuentran rodeadas por áreas de cultivo de maíz, b) y c) Fotografías del tipo de residuos depositados en el vertedero de Calimaya, además, de residuos domésticos, se visualizan residuos textiles y presencia de cascajo.....	55
Figura 4.4 a) Se muestra la ubicación del área utilizada para la separación de residuos en el vertedero de Capulhuac, así como la ubicación del sitio donde se observó la fuga de lixiviados, b) Se aprecia la filtración de lixiviados a través de las paredes perimetrales del sitio. c) Fotografía del área donde se realiza la separación de PET, cartón y demás residuos que pueden ser reciclados	56
Figura 4.5 Distribución de los componentes que integran el vertedero de Mexicaltzingo, se puede observar que el sitio se encuentra rodeado por áreas de cultivo	58
Figura 4.6 a) Fotografía del área que funciona como colector de lixiviados para el vertedero de Mexicaltzingo. b) Pozo de biogás del vertedero de Mexicaltzingo	59
Figura 4.7 Situación actual del vertedero de Metepec, el crecimiento urbano de la zona donde se ubica ha ocasionado que el sitio quede a escasos metros de áreas habitacionales, centros comerciales y universidades	60

Figura 4.8 Vista parcial del relleno sanitario de San Antonio la Isla: a) Plano de distribución de los componentes del sitio, en rojo se muestra el área utilizada para el depósitos de los residuos, asimismo, se aprecia la laguna de evapotranspiración de lixiviados (color rosa), por su parte los polígonos de color azul son pequeñas lagunas de lixiviados formadas por la fuga de éstos alrededor del sitio, b) Fotografía de la maquinaria encargada del acomodo de los residuos, dentro del relleno sanitario se realiza la separación de residuos tales como el PET y otros que pueden ser reutilizados, c) Fotografía de la laguna de evaporación de lixiviados, se aprecia que esta cuenta con geomembrana para prevenir la fuga de lixiviados. Debido a que la visita fue en temporada de estiaje se observa la laguna parcialmente seca.....	63
Figura 4.9 a) Plano distribución de las celdas del relleno sanitario de Xonacatlán, b) Fotografía de la disposición de la geomembrana en una pared lateral del relleno sanitario, lo que hace suponer que ésta está colocada en toda la celda.	64
Figura 4.10 Distribución de las celdas que componen el relleno sanitario de Zinacantepec, es de resaltar que la laguna de evaporación es pequeña para las dimensiones del relleno sanitario.....	65
Figura 4.11 Ubicación de las estaciones meteorológicas y las estaciones automáticas dentro de la cuenca del valle de Toluca. Se observa que, en la zona centro-sur, se tiene la mayor presencia de sitios de disposición final de residuos contrastando con la ubicación de las estaciones que se encuentran en la zona norte y oeste de la cuenca. En color azul se presenta el área de influencia de cada estación.....	70
Figura 4.12 Precipitación promedio de los años hidrológicos por estación en el valle de Toluca. Las líneas color negro representan el rango de precipitación media anual de la cuenca del valle de Toluca.....	72
Figura 4.13 Temperatura y precipitación mensual para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo de las estaciones, a)15056, b)15057 y c)15089	74
Figura 4.14 Temperatura y precipitación mensual para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo de las estaciones: a)15266 y b)15295	75
Figura 4.15 Temperatura y precipitación mensual para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo de las estaciones: a)15373 y b)15395	76
Figura 4.16 Radiación solar promedio diaria para el periodo 2012-2017 de las tres estaciones automáticas, cuya información fue utilizada para la aplicación del modelo HELP	79
Figura 4.17 Valores del Índice del Área foliar medidos directamente por el sensor MODIS, que comprende a la medición del promedio diario de los días 6 al 13 de septiembre del 2011	82
Figura 4.18 Valores del Índice del Área Foliar, obtenidos a partir del uso del NDVI, los resultados presentados comprenden la imagen ráster correspondiente al promedio diario de los días 29 de agosto al 13 de septiembre del 2011	83

Figura 4.19 a) Esquema conceptual de los perfiles de los sitios de disposición final de residuos sólidos utilizados en el modelo HELP, los perfiles fueron determinados a partir de la información histórica y datos de campo observados, a) Perfil para los sitios no controlados, b) Perfil para los rellenos sanitarios, el número de capas depende de la profundidad de los residuos para cada RESA.....	87
Figura 4.20 Producción mensual de lixiviados en mm para los ocho sitios de disposición final de residuos sólidos, estimados a partir del modelo WBM: (a) Año seco, (b) Año promedio y (c) Año húmedo	93
Figura 4.21 Comparación de la generación diaria de lixiviados estimada con el modelo HELP en mm para los vertederos de Metepec y Capulhuac: a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En la parte superior de cada gráfica se muestra la precipitación diaria registrada para cada año (color azul)	100
Figura 4.22 Comparación de la producción diaria de lixiviados para las celdas del vertedero de Almoloya del Río estimada con el modelo HELP en mm: a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En azul se muestra la precipitación diaria registrada para cada año.....	101
Figura 4.23 Comparación de la producción diaria de lixiviado estimada con el modelo HELP en mm, para los vertederos de Mexicaltzingo y Calimaya; a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En azul se muestra la precipitación diaria registrada para cada año.....	102
Figura 4.24 Comparación de la producción diaria de lixiviados cuantificado con el modelo HELP en mm, para los rellenos sanitarios de San Antonio la Isla, Xonacatlán, Zinacantepec; a) Año seco b) Año promedio y c) Año húmedo.....	103
Figura 4.25 Producción diaria de lixiviado cuantificada con el modelo HELP en mm, para las celdas del relleno sanitario de Zinacantepec; a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En la parte superior de cada grafica se muestra la precipitación diaria registrada para cada año.....	104
Figura 4.26 Localización y distribución de los piezómetros respecto a la localización de los sitios de dispossición final de residuos sólidos	112
Figura 4.27 Gráficas de cajas y bigotes para los sitios no controlados, se observa que los cinco sitios presentan una distribución similar, los datos graficados son para los valores estimados de lixiviados para el año húmedo.....	116
Figura 4.28 Gráficas de cajas y bigotes para los valores diarios de producción de lixiviado de los rellenos sanitarios estimados mediante el modelo HELP para el año húmedo.....	116
Figura 4.29 Clasificación de los sitios de disposición final de residuos sólidos por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea. Además, se presenta la dirección del flujo subterráneo obtenido de la CTAEM (2018) y los pozos de extracción ubicados dentro de la cuenca del valle de Toluca.	119

Figura 4.30 Comparación de la variación de la producción de lixiviados para los sitios de disposición final, considerando las condiciones actuales y las condiciones propuestas para cada sitio la estimación se realizó con el modelo HELP3: (a) Calimaya y (b) Capulhuac. En la parte superior de cada gráfica se muestra la precipitación diaria en mm registrada en el año hidrológico comprendido entre 1994-1995 122

Figura 4.31 Comparación de la variación de la producción de lixiviados para los sitios de disposición final, considerando las condiciones actuales y las condiciones propuestas para cada sitio, la estimación se realizó con el modelo HELP3: (a) Mexicaltzingo y (b) Metepec. En la parte superior de cada grafica se muestra la precipitación diaria registrada en mm para el año hidrológico comprendido entre 1994-1995 123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de los sitios de disposición final de acuerdo con el volumen de residuos sólidos que se depositan (NOM-083-SEMARNAT-2003).....	11
Tabla 3.1 Parámetros de entrada para la aplicación de los modelos hidrológicos WBM y HELP, requeridos para la elaboración de un balance hídrico. Se especifican también las unidades de cada parámetro	33
Tabla 3.2 Fuentes de información utilizadas para la recopilación de los parámetros de entrada para la aplicación de los modelos hidrológicos WBM y HELP. Se presentan los parámetros base, ya que a partir de ellos se calculan los demás parámetros	34
Tabla 3.3 Estaciones meteorológicas y estaciones automáticas ubicadas en la zona de estudio, las cuales fueron utilizadas para la obtención de los datos meteorológicos requeridos para la aplicación de los modelos de balance de humedad	37
Tabla 4.1 Principales características de los vertederos presentes en la cuenca del valle de Toluca	68
Tabla 4.2 Estaciones meteorológicas utilizadas por cada sitio de disposición final de residuos sólidos, para la obtención de la información meteorológica necesaria para la cuantificación de la producción de lixiviados, la selección de cada estación se realizó a partir de su área de influencia	69
Tabla 4.3 Valores de precipitación por año hidrológico para el periodo de 1989-2011 por estación. Los años hidrológicos seleccionados se encuentran resaltados dentro de la tabla, se observa que la precipitación anual para los 22 años se encuentra dentro del rango de precipitación media anual de 700 a 1000 mm.....	71
Tabla 4.4 Valores de los criterios de ajuste para la evaluación del desempeño de los modelos empleados para completar los datos de precipitación, temperatura mínima y máxima diarias	78
Tabla 4.5 Valores promedio de humedad relativa y velocidad del viento para el periodo de 2008-2017, obtenidos a partir de la información recopilada de las estaciones meteorológicas localizadas en el valle de Toluca.	80
Tabla 4.6 Rásters de NDVI y LAI utilizados para la estimación del valor máximo del LAI en la cuenca del valle de Toluca	81
Tabla 4.7 Valores del LAI obtenidos por las metodologías anteriormente descritas, de igual manera se presenta el valor promedio de ambas utilizado para el cálculo de la producción de lixiviados en los sitios de disposición final.....	84
Tabla 4.8 Síntesis de los parámetros hidráulicos de la capa de residuos sólidos en sitios de disposición final de residuos sólidos, información reportada en la literatura a partir de pruebas de laboratorio y ensayos in situ.	86

Tabla 4.9 Información meteorológica utilizada para la cuantificación de los lixiviados mediante el modelo WBM para la celda cubierta del vertedero de Almoloya del Río.....	89
Tabla 4.10. Información de entrada para el modelo HELP3 del vertedero de Metepec, para la cuantificación de la producción de lixiviados.....	90
Tabla 4.11 Generación anual de lixiviados cuantificados en los sitios de disposición final de residuos sólidos a partir de la aplicación del modelo HELP para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo	99
Tabla 4.12 Síntesis del volumen de lixiviado generado en cada sitio de disposición final de residuos sólidos ubicados en el valle de Toluca, estimados por el modelo WBM y el modelo HELP3 para el año hidrológico seco 2010-2011	107
Tabla 4.13 Síntesis del volumen de lixiviado generado en cada sitio de disposición final de residuos sólidos ubicados en el valle de Toluca estimados por el modelo WBM y el modelo HELP para el año hidrológico promedio 1992-1993	108
Tabla 4.14 Síntesis del volumen de lixiviado generado en cada sitio de disposición final de residuos sólidos ubicados en el valle de Toluca estimados por el modelo WBM y el modelo HELP para el año hidrológico húmedo 1994-1995.....	109
Tabla 4.15 Piezómetros de la CONAGUA utilizados para inferir el perfil estratigráfico suyacente en los sitios de disposición final.....	111
Tabla 4.16 Composición del perfil estratigráfico presente por debajo de los sitios no controlados de disposición final, los primeros tres son los reportados por Torres (2016), Morales (2008) y Gómez (2014).....	113
Tabla 4.17 Composición del perfil estratigráfico presente por debajo de los rellenos sanitarios, incluye un revestimiento de arcilla	114
Tabla 4.18 Tiempo en años estimado para que el lixiviado fluya de manera advectiva a través de la zona no saturada de cada sitio de disposición final	118
Tabla 4.19 Síntesis de la producción de lixiviados a partir de las medidas propuestas en comparación con las condiciones actuales de los sitios de disposición final. La cuantificación se realizó con el modelo HELP, considerando las condiciones meteorológicas del año hidrológico húmedo, que constituye el escenario más desfavorable para la cuantificación de la producción de lixiviados... ..	124
Tabla 4.20 Síntesis del volumen total de lixiviados generados en los sitios de disposición final, considerando sus condiciones actuales y las medidas propuestas para la reducción de la producción de lixiviados, asimismo, se incluye el porcentaje total de lixiviado reducido a partir de las medidas propuestas.....	124

Capítulo I

Generalidades

1.1 Introducción

Actualmente el incremento en la población, así como de los índices de consumo, han traído consigo un aumento en la generación de residuos sólidos, agravando los problemas ambientales, económicos y sociales ya existentes involucrados en la disposición final de los residuos sólidos (Renou *et al.*, 2008). A pesar de las iniciativas para mejorar el reciclaje y la reutilización de los residuos, además de las diferentes técnicas para la disposición final de éstos, los vertederos siguen siendo la opción más utilizada para la eliminación de los residuos sólidos (Frikha *et al.*, 2017). Desafortunadamente, la construcción y manejo de los vertederos de residuos sólidos no se realiza según las normas establecidas. Por lo tanto, como sugiere Breza-Boruta *et al.* (2016), a un mediano y largo plazo puede ocasionar efectos negativos sobre el ambiente, como, por ejemplo, la generación de lixiviados y gases de efecto invernadero.

Ante estos problemas, para poder hacer y plantear estrategias de protección primero es necesario saber la cantidad de lixiviados o biogás que se genera, ya que, se parte de la premisa “lo que se puede medir se puede administrar/controlar”. Por tanto, lo ideal es que en los sitios de disposición final se cuente con sistemas que permitan la medición del volumen de lixiviados generados de tal manera, que a partir de estos registros se planteen medidas y

estrategias personalizadas para cada sitio. Sin embargo, aún se tienen muchas carencias de infraestructura, la principal razón se relaciona con los costos que conlleva la instalación y mantenimiento de dicha infraestructura.

Por lo tanto, existen herramientas que pueden adaptarse para la estimación de la producción de los lixiviados, como, por ejemplo, el balance hidrológico en un sitio de disposición final, que además de contemplar entradas y salidas de agua, considera la humedad presente en los residuos sólidos, ya que, de esta dependerá los cambios en el almacenamiento. Es decir, si los residuos presentan una humedad elevada no serán capaces de retener el agua entrante producto de la precipitación lo que da lugar al movimiento descendente del agua a través del vertedero y que, al entrar en contacto con los productos generados de la descomposición de los residuos sólidos, propiciará la generación de los lixiviados.

El poder contaminante de los lixiviados depende principalmente de la composición de los residuos sólidos, que pueden estar conformados por materiales orgánicos que se descomponen fácilmente como hojas, ramas, cáscaras y alimentos del hogar, inorgánicos, su degradabilidad es larga como plástico, telas sintéticas, papel o vidrio, y peligrosos material médico quirúrgico, pilas y baterías, ácidos y sustancias químicas corrosivas, entre otros.

De acuerdo con Fenn *et al.* (1975); Orta *et al.* (2003); Abunama *et al.* (2017), los lixiviados constituyen una de las fuentes principales de contaminación potencial tanto del suelo como del agua subterránea. Sin embargo, se ha prestado escasa atención a dicho problema, aun cuando el agua subterránea es una de las principales fuentes de abastecimiento para las diversas actividades.

1.2 Repercusiones ambientales de los sitios de disposición final de residuos sólidos

Los países en desarrollo, como México, utilizan los vertederos como el método principal para eliminar los residuos sólidos debido a sus considerables ventajas, incluida la disposición de grandes cantidades de residuos a un costo relativamente bajo (Aziz *et al.*, 2012; Sáez *et al.*, 2014; Ya *et al.*, 2018). No obstante, dichos sitios no cumplen con las condiciones mínimas para prevenir la contaminación del aire, el agua y el suelo. Lo anterior se deriva de la situación compleja de factores sociales y económicos que se involucran en el proceso de selección y operación de un sitio para la disposición final de los residuos sólidos.

Aunado a lo anterior, se tiene que los residuos depositados en dichos sitios no reciben una clasificación al momento de su recolección y posterior disposición, lo que propicia una composición diversa en los residuos, dando como consecuencia la producción de lixiviados más peligrosos y tóxicos (Breza-Boruta *et al.*, 2016; Moody y Townsend, 2016). Es entonces cuando la generación de lixiviados se vuelve un problema de gran impacto ambiental que contamina el aire, el suelo, el agua, la flora y la fauna, alterando así las condiciones de salud como al ambiente (Fatta *et al.*, 1999; Mor *et al.*, 2006).

Cabe destacar que los impactos ambientales de los vertederos dependen de varios factores, como la composición de los desechos, las barreras técnicas, el funcionamiento del vertedero y las condiciones climáticas (Frikha *et al.*, 2017). Por tanto, siendo el agua subterránea una de las principales fuentes de abastecimiento para consumo humano, como, es el caso de la región del valle de Toluca, es de particular importancia mantenerla con las mejores condiciones en términos de calidad. En tal sentido, se debe prevenir su contaminación, además de que su remediación o descontaminación tendría costos muy elevados.

En México, son pocos los estudios sobre lixiviados provenientes de sitios de disposición final de residuos sólidos, por lo general, en estos sitios, no existe control de lixiviados y biogases, además de que, las rocas donde se localizan muchos de ellos son de alta porosidad y permeabilidad (SEMARNAT, 2009). Por otra parte, en el Estado de México el aumento de la población en las últimas décadas ha generado un aumento en la producción de residuos sólidos situación que ha propiciado la proliferación de vertederos a lo largo del territorio.

No obstante, aun teniendo presente los posibles efectos de la contaminación del agua subterránea por la percolación de lixiviados, a la fecha no se cuenta con un estudio de cuantificación de los volúmenes de lixiviados generados a partir de un análisis regional, sobre todo en los sitios donde el manejo no es adecuado, por lo que la realización de este estudio cobra más relevancia para la zona de estudio.

1.3 Objetivo de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Dada la relevancia de la contaminación dentro de la gestión sustentable de los recursos hídricos en el acuífero del valle de Toluca, y la importancia de esta fuente para atender las necesidades de los distintos usuarios, el principal objetivo de este proyecto es cuantificar el volumen de lixiviados generados en distintos sitios de disposición final de residuos sólidos mediante evaluación del balance de humedad de los residuos sólidos en dichos sitios, que sirva para la orientación de planes de monitoreo ambiental, así como para la prevención de la contaminación de fuentes de abastecimiento cercanas.

1.3.2 Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- i)* Seleccionar y caracterizar los sitios de disposición final considerando la información disponible.
- ii)* Estructurar una base de datos climatológicos, identificación de las propiedades hidrodinámicas de cada sitio para la aplicación de los modelos de balance de humedad de los residuos sólidos.
- iii)* Estimar el volumen de lixiviados generados mediante dos métodos: el Método del Balance Hídrico (WBM) y el modelo de Evaluación Hidrológica de Rellenos Sanitarios (HELP).
- iv)* Comparar y evaluar el grado de relación entre los resultados obtenidos mediante el análisis de la humedad de los residuos sólidos a partir de las metodologías seleccionadas.
- v)* Clasificar los sitios por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea, así como, sugerir estrategias de control y protección para disminuir la cantidad de lixiviados generados y por ende evitar su infiltración.

1.4 Hipótesis

La dinámica de flujo de infiltración de lixiviados en la región del acuífero del Valle de Toluca, Estado de México, está condicionada principalmente por la capacidad de campo de los residuos y la intensidad de las precipitaciones orográficas que se originan en la Sierra de Las Cruces y el Volcán de Toluca, que regulan la variabilidad espacio-temporal de los procesos involucrados en los procesos de infiltración, cuya caracterización requiere en general un grado de resolución alto, para su uso en los programas de gestión de proyectos relacionados con la utilización, la conservación y la protección del agua.

1.5 Organización de la tesis

Esta tesis está dividida en cinco capítulos, posterior al capítulo introductorio, en el capítulo II se muestran los antecedentes abarcando una revisión del estado del arte en materia de sitios de disposición final mejor conocidos como vertederos de residuos sólidos, así como las consecuencias ambientales atribuidas a las deficiencias constructivas y operacionales de dichos sitios. Paralelamente se describe de manera general cual es el proceso de generación de los lixiviados. De igual manera, se describen los métodos existentes para la estimación del volumen de lixiviados generados por el proceso de descomposición de los residuos en los sitios de disposición final.

En el capítulo III se presentan una descripción de las generalidades de la zona de estudio, así mismo en dicho capítulo se describe el proceso metodológico empleado, se incluye la descripción de los pasos realizados para el cumplimiento de los objetivos propuestos, también se presentan las herramientas utilizadas para la aplicación de la metodología.

Por otra parte, el análisis y presentación de resultados se presentan en el capítulo IV, teniendo la misma organización que el capítulo III, la primera parte aborda la identificación y caracterización de los sitios de interés, posteriormente se presenta el análisis de la información requerida para la aplicación de los modelos de balance de humedad. Consecutivamente, se presentan los resultados obtenidos de la cuantificación de lixiviado generado en los diferentes sitios, por las dos metodologías empleadas en este trabajo. También, se presenta una clasificación de los sitios de disposición final basada en la potencial amenaza de contaminación para el agua subterránea con base al flujo advectivo. Además, se

presentan las estrategias sugeridas para el manejo de los sitios de disposición final con la finalidad de reducir la producción de lixiviados. Finalmente, en el capítulo V se plantean las conclusiones y recomendaciones tomando en consideración lo observado durante el desarrollo de la presente investigación.

Capítulo II

Antecedentes

2.1 El problema de los sitios de disposición final de residuos sólidos

La disposición final de los residuos sólidos es uno de los grandes retos que se enfrentan en la actualidad, tal como mencionan Acurio *et al.*, (1997) éste es un problema complejo que ha ido evolucionando a la par de la urbanización, el crecimiento económico y la industrialización, que, a su vez, han generado un incremento en la producción de residuos. Entre las técnicas para la disposición final de los residuos se encuentran: la incineración, el compostaje aerobio, los vertederos, los rellenos sanitarios, la recuperación y la reducción de los residuos, siendo los vertederos la técnica más utilizada en el mundo por su bajo costo y amplia capacidad de almacenamiento (Aziz *et al.*, 2012).

La situación respecto a los residuos sólidos en México en general es crítica, por ejemplo, para el 2017 una persona generaba aproximadamente 1.2 *kg* de residuos en comparación con el 0.5 *kg* que generaba una persona en el año de 1995 (*Figura 2.1*), dando lugar a que sea uno de los países que más residuos genera en América Latina. De esta manera, para el año 2010 México se encontraba dentro de los diez países que más residuos generaba con 39,385,595 ton/año. En este sentido, el promedio de generación diaria se encuentra por encima del promedio mundial y del promedio para el continente americano (0.74 *kg* y 0.87 *kg*, respectivamente) (Kaza *et al.*, 2018).

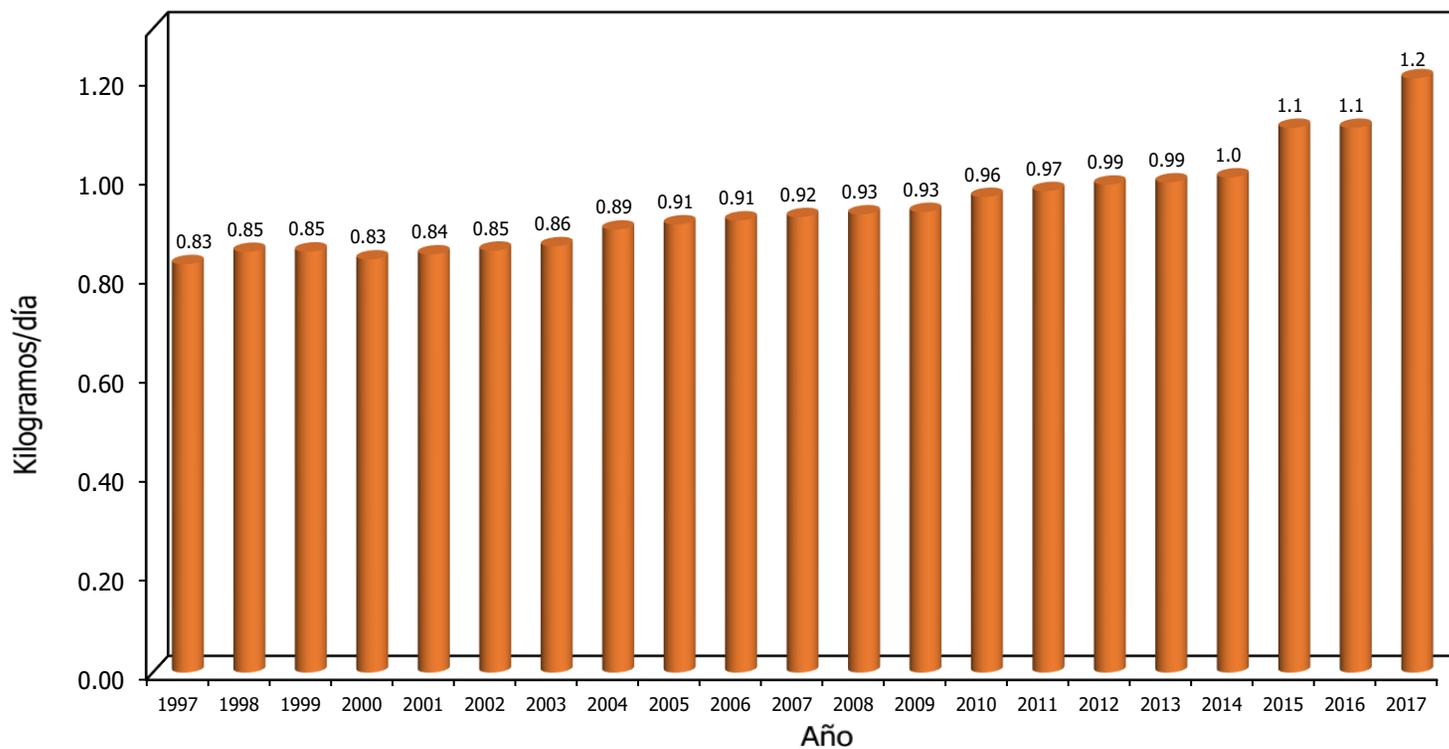


Figura 2.1. Evolución de la generación de residuos sólidos por persona en México de 1997 al 2017. La tasa de aumento en la producción de los RS es de 44% entre el año 1997 al año 2017 (SEMARNAT, 2012; INEGI, 2019).

En este contexto, según datos de SEMARNAT (2012) las entidades federativas que generaron los mayores volúmenes de residuos fueron el Estado de México (16% del total nacional, 6.789 millones de toneladas), Ciudad de México (12%, 4.949 millones de toneladas), Jalisco (7%, 3.051 millones de toneladas), Veracruz y Nuevo León (5%, 2.301 y 2.153 millones de toneladas respectivamente), de los que un gran porcentaje acaba en vertederos o basureros a cielo abierto.

De acuerdo con INEGI (2016), en México se cuenta con 1,905 sitios de disposición final, de los cuales 260 son rellenos sanitarios y 1,645 son sitios controlados y no controlados. Para el año 2011 se estimó que 72% del volumen generado de residuos se dispuso en rellenos sanitarios y sitios controlados, el 23% se depositó en sitios no controlados y el 5% restante se recicló (SEMARNAT, 2012).

En lo que se refiere a los lineamientos que rigen la política de protección ambiental en materia de contaminación del suelo, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA), estipula que los residuos deben ser controlados en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos (Morales, 2008). Por otra parte, se tiene la Norma Oficial, NOM-083-SEMARNAT-2003, que plantea las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

En dicha norma se manejan tres diferentes tipos de sitios, los rellenos sanitarios (RESA), los sitios controlados y los sitios no controlados. Los rellenos sanitarios son una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructuras adicionales, los impactos ambientales. Y, por tanto, constituyen la mejor solución para la disposición final de los residuos sólidos; este tipo de infraestructura involucra métodos y obras de ingeniería particulares que controlan básicamente la fuga de lixiviados y la generación de biogases (SEMARNAT, 2012).

En un RESA, a medida que se van colocando los residuos, éstos son compactados con maquinaria y cubiertos con una capa de tierra y otros materiales para posteriormente cubrirlos

totalmente, y sobre estos depositar otra capa de residuos y así sucesivamente hasta que el relleno sanitario se da por saturado. Al término de su vida útil, estos sitios son destinados a la reforestación o a otras actividades ecológicas (Tchobanoglous *et al.*, 1994).

Los rellenos sanitarios originalmente se diseñaron para evitar la contaminación al ambiente. Se considera un método de disposición para muchos tipos de residuos. Sin embargo, muchos de rellenos son pobremente diseñados, originando la filtración de lixiviados que contaminan las aguas subterráneas poco profundas y posteriormente las que se encuentran en un nivel más profundo (Morales, 2008).

Por otra parte, los sitios controlados son sitios de disposición final que cumple con al menos con una de las siguientes características: camino de acceso de uso permanente, cubierta diaria de residuos o sistemas de control de lixiviados, biogás y aguas pluviales. Finalmente, los sitios no controlados, vertederos o tiraderos a cielo abierto, son sitios inadecuados de disposición final que no cumplen con los requisitos establecidos en la Norma. Siendo estos últimos los más empleados para depositar todo tipo de residuos, domésticos, comerciales e industriales (Fenn *et al.*, 1975; Alslaibi *et al.*, 2013; Breza-Boruta *et al.*, 2016).

Independientemente de que tipo de sitio se trate, la Norma establece una categorización de los sitios de disposición final, en función a la cantidad de toneladas de residuos sólidos que ingresan por día a la instalación (*Tabla 2.1*).

Tanto los sitios controlados como los no controlados no cumple con las especificaciones de impermeabilización para el control de lixiviados que se producen durante el proceso de acumulación y descomposición microbiana de los residuos sólidos. Estos productos generados son fuentes potenciales de contaminación para el ambiente y por consecuencia para la salud humana. La contaminación puede presentarse en forma sólida, líquida y gaseosa (Kiss y Encarnación, 2006), es decir, en polvo y materiales ligeros arrastrados por el viento o incluso como partículas sólidas suspendidas en el lixiviado (LaGrega *et al.*, 2010). Debido a que los lixiviados pueden infiltrarse a través del suelo hasta alcanzar el nivel freático, éstos se convierten en una de las fuentes principales de contaminación del agua subterránea (Fatta *et al.*, 1999).

La composición y toxicidad de los lixiviados depende de la naturaleza de los residuos (Naveen *et al.*, 2016; Breza-Boruta *et al.*, 2016). Por su parte, la composición de los residuos depende de factores como, el nivel de vida de la población, la estación del año, la ubicación y las costumbres de la población. Sin embargo, independientemente de los factores antes mencionados, una característica sobresaliente de los residuos es su alto contenido de materia orgánica (Tatsi y Zouboulis, 2002; Gómez *et al.*, 2008).

En términos generales, en los vertederos se pueden encontrar residuos orgánicos (representando aproximadamente el 48% del total de los residuos) e inorgánicos. Sin embargo, la falta de regulación en los vertederos ocasiona que también ahí se depositen residuos peligrosos como pinturas, baterías usadas, medicamentos, entre otros. En este contexto, el poder contaminante de los lixiviados se agrava derivado de la composición variada de los residuos, haciéndolos más tóxicos y peligrosos (Kiss y Encarnación, 2006; LaGrega *et al.*, 2010; Breza-Boruta *et al.*, 2016).

Tabla 2.1. Clasificación de los sitios de disposición final de acuerdo con el volumen de residuos sólidos que se depositan (NOM-083-SEMARNAT-2003).

Categoría	Tonelaje recibido ton/día
A	Mayor a 100
B	50 hasta 100
C	10 y menor a 50
D	Menor a 10

2.2 Generación de lixiviado y su tratamiento

En términos generales, los lixiviados consisten en agua y compuestos solubles en agua presentes en los desechos, que se acumulan a medida que el agua se mueve a través del vertedero o relleno sanitario o por la propia dinámica de la descomposición de los residuos (Álvarez y Suárez, 2006; Rolecky y Trkowski, 2000; Alslaibi *et al.*, 2013). Por su parte, la NOM-083-SEMARNAT-2003, define un lixiviado como “el líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contiene en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos”.

La formación de lixiviados y gases es consecuencia de los procesos biológicos, químicos y físicos dentro de los vertederos que favorecen la degradación de los residuos, los cuales al entrar en contacto con el agua y una vez alcanzada la capacidad de campo propician el movimiento del agua a través del vertedero dando como resultado la generación de lixiviados con alta carga contaminante, y mientras más fluya el agua a través de los residuos mayor es la toxicidad de los lixiviados (Fenn *et al.*, 1975).

En la mayoría de los sitios de disposición final, el lixiviado está formado por el líquido que entra en el sitio por fuentes externas (lluvia, drenaje superficial, entre otros), y en su caso el líquido producido por la descomposición de los residuos (Tchobanoglous *et al.*, 1994). Fenn *et al.*, (1975); Alslaibi *et al.*, (2013); Farquhar (1995), sugieren que para los vertederos existen dos fuentes de agua que provocan la generación de lixiviados, la primera es el agua o humedad presente en los residuos cuando éstos son vertidos (lixiviado primario) y la segunda es el agua que entra al vertedero proveniente de la infiltración producto de la precipitación y las entradas de agua subterránea (lixiviados secundarios).

Por su parte, Jaber y Nassar (2007) mencionan que los factores que afectan la generación y calidad de los lixiviados son el clima (lluvia, radiación solar, temperatura), la topografía (escurrimiento), la cobertura vegetal y el tipo de residuos. Todo sitio de disposición de residuos puede considerarse único en cuanto a su composición y a los lixiviados que se generan en él.

El proceso de formación comienza una vez ha iniciado el depósito de los residuos sólidos en el sitio de disposición final, éstos empiezan a degradarse, como consecuencia de la naturaleza de los residuos, la humedad (tanto la del residuo, como la de la infiltración), la temperatura, el pH, la presencia de microorganismos y la disponibilidad de nutrientes. Como bien se sabe, los resultados de esta degradación, dependiendo de la fase en la que se encuentre el sitio de disposición final, son: generación de lixiviados, producción de biogás, hasta alcanzar la estabilización del residuo.

Además, la antigüedad del relleno es un factor importante en la composición química de los lixiviados debido a que tienden a estabilizarse con el transcurso de los años, observando una disminución en la concentración de sus componentes. Debe considerarse que un vertedero producirá lixiviado a lo largo de su vida útil y también durante varios cientos de años después de su cierre definitivo (Wang, 2013).

De igual manera, Kiss y Encarnación (2006) sugieren que las reacciones derivadas del proceso de descomposición en gran medida dependen de factores como composición de los residuos, su contenido de humedad, el método de eliminación, edad del vertedero y condiciones climatológicas al igual que la profundidad de los residuos, siendo el contenido de humedad el factor primordial para la generación potencial de lixiviados dentro de los sitios de disposición final.

Asimismo, Farquhar (1989) sugiere que los procesos de descomposición se pueden dividir en aeróbicos y anaeróbicos, un alto contenido de humedad favorece la presencia de microorganismos aeróbicos. Es importante destacar que, el contenido de humedad inicial en los residuos sólidos varía aproximadamente de 20 a 40%, por tanto, el agua que ingresa debido a la precipitación juega un papel importante para alcanzar la humedad necesaria para favorecer los bioprocesos, según Kiss y Encarnación (2006) el contenido de humedad debe estar alrededor del 60% para favorecer dichos procesos.

En este sentido, a pesar del alto contenido de humedad durante los procesos aeróbicos la producción de lixiviados es nula, ya que las reacciones de oxidación son generalmente exotérmicas, bajo estas condiciones según Kiss y Encarnación (2006) la temperatura dentro del vertedero puede alcanzar los 60°C favoreciendo la evaporación, la cual ocurre en las capas superiores del vertedero. Asimismo, los principales productos de este proceso aeróbico

son el bióxido de carbono, amoníaco (que posteriormente se transforma en nitrato) y agua. En cambio, los procesos anaeróbicos que prevalecen principalmente en el interior del vertedero hacen que el proceso de descomposición de la materia orgánica sea más lento, debido a que las condiciones externas no intervienen, la temperatura se mantiene elevada, y no hay posibilidad de evaporación al ambiente este proceso anaeróbico produce cierta cantidad de lixiviados y gases.

Aunado a lo anterior, los sitios que están expuestos permanentemente a la precipitación, presentan una posterior infiltración de agua hacia los residuos, con esta infiltración una vez alcanzada la capacidad de campo se da pie al movimiento del agua dentro del vertedero disolviendo diferentes componentes de los residuos (Kiss y Encarnación, 2006; Alslaibi *et al.*, 2013), lo cual produce un arrastre de productos de la descomposición aeróbica y anaeróbica, generando los lixiviados, siendo esta la cantidad más considerable que la producida en cualquier otro proceso.

Dichos procesos se presentan tanto en los rellenos sanitarios como en los vertederos no controlados, bajo las condiciones de operación, son los vertederos donde el problema se agrava por la falta de una geomembrana, revestimiento adecuado o sistema de recolección para evitar las fugas, tanto en la protección del suelo, así como del agua subterránea.

Los procesos de descomposición de los residuos sólidos pueden ser clasificados en función del tiempo en cinco fases (Johannessen 1999; Kiss y Encarnación, 2006). La primera es la fase inicial, los procesos son primordialmente aeróbicos y donde inicia la descomposición de la materia orgánica, por tanto, hay un aumento en la producción de dióxido de carbono. La fase II, también llamada fase ácida, es la transición a los procesos anaeróbicos, el lixiviado generado en esta fase tiene un alto contenido de ácidos orgánicos y el amoníaco se presenta en su máxima concentración.

La fase III es una etapa metanogénica intermedia en donde predominan las condiciones totalmente anaerobias. La proporción del metano se incrementa, mientras el contenido de bióxido de carbono decrece. Los ácidos grasos volátiles son transformados a biogás y su concentración disminuye en el lixiviado; esto conlleva a un aumento en el pH, mientras que la carga orgánica del lixiviado se reduce considerablemente. Cuando se llega a la estabilidad comienza la fase IV, conocida como fase metanogénica estable. Es un periodo anaeróbico

durante el cual se alcanza una máxima producción de metano. El lixiviado se mantiene con un pH elevado, con concentraciones significativas de amoníaco al igual que una carga orgánica decreciente. La fase V y última, es la etapa de estabilización de los residuos. La producción de metano decrece y el bióxido de carbono se sustituye por nitrógeno y oxígeno conforme se introduce el aire atmosférico a través de las capas superficiales del vertedero.

De acuerdo con Tchobanoglous *et al.*, (1994), el tratamiento de lixiviados comprende desde la recirculación de éstos, mediante la aspersión sobre zonas seleccionadas en la misma área de disposición hasta tratamientos *in situ* mediante la combinación de procesos fisicoquímicos y biológicos (anaeróbicos o aeróbicos). Los primeros son las tecnologías más usadas para el tratamiento de lixiviados, su principal desventaja son los elevados costos derivados de las altas cantidades de reactivos químicos usados.

Por consiguiente, la elección de cualquier tratamiento dependerá en gran medida de la composición de los lixiviados, de la concentración de los contaminantes y del volumen generado, así como de su variación en el tiempo (Moody *et al.*, 2016). Por ejemplo, para lixiviados con un alto contenido de sólidos suspendidos y color Longsdon *et al.*, (2002) recomiendan los procesos de coagulación-floculación. En cambio, los lixiviados de rellenos jóvenes que poseen elevadas concentraciones de materia orgánica, se recomienda que sean tratados mediante procesos biológicos.

En este contexto, el tratamiento de lixiviados es un tema difícil debido a la complejidad de éstos. Ya que como mencionan Breza-Boruta *et al.*, (2016), éstos contienen una amplia gama de contaminantes en concentraciones elevadas, lo cual condiciona que su tratamiento sea más complejo que el de las aguas residuales. Por tanto, la eficiencia de los tratamientos dependerá de las características de cada lixiviado.

Por ello, la elección, diseño, dimensionamiento y explotación adecuados del tipo de tratamiento a utilizar, es necesario una caracterización del lixiviado a tratar, es decir es indispensable conocer el volumen y poder contaminante de los lixiviados, además de las características físicas del lugar. De igual manera, conocer el volumen de lixiviados permite el desarrollo de estrategias para prevenir la contaminación del agua subterránea.

2.3 Balance hídrico en sitios de disposición final

De acuerdo con Lobo *et al.*, (2016) se estima que el proceso de degradación de los residuos puede prolongarse de 80 a 100 años después de su clausura. Por tanto, para poder aplicar estrategias de prevención y remediación se requiere saber el tiempo que tardan los lixiviados en aparecer y la cantidad aproximada que se genera a lo largo de la vida del relleno sanitario (El-Fadel *et al.*, 1997; Sivakumar, 2013). Esta información resulta ser muy útil para diseñar los dispositivos de manejo de lixiviados, tales como líneas de conducción o sistemas de recirculación, lagunas de evaporación o plantas de tratamiento (El-Fadel *et al.*, 1997).

En este contexto, el potencial de formación de lixiviado puede cuantificarse mediante la aplicación de un balance hidrológico del sitio, el cual se compone de todos los aportes, consumos y salidas de agua dentro del relleno sanitario o vertedero, sin olvidar la capacidad de retención de agua de los residuos. Por tanto, la cantidad potencial de lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la capacidad de retención de humedad del material en el relleno.

Los procesos que integran el ciclo del hidrológico son los mismo que van a influir directamente en la generación de lixiviados en un sitio de disposición final de residuos sólidos. No obstante, existen otros factores que intervienen en la generación de lixiviado como los son la naturaleza de los residuos, el contenido de agua, así como el grado de compactación. La producción de lixiviado es generalmente más grande cuando el residuo esta menos compacto, ya que con ello se aumenta la filtración (Renou *et al.*, 2008)

La *Figura 2.2* muestra los componentes del balance hídrico para un sitio de disposición final. De esta manera, podemos considerar como entradas a la precipitación, los aportes de agua subterránea y la humedad inicial presente en los residuos al momento de ser depositados. Mientras que las salidas estarán representadas por la evapotranspiración, la escorrentía superficial y la percolación, conforme a esto se tiene que la percolación sería igual a la cantidad potencial de lixiviado producido. Su representación algebraica puede expresarse con la ecuación 2.1 (Farquhar, 1989):

$$Perc = P - ETR - RO + G - \Delta ST \quad (2.1)$$

donde: *Perc*: percolación en el fondo del sitio; *P*: precipitación; *ETR*: evapotranspiración; *RO*: escurrimiento; *G*: intrusión de agua subterránea; ΔST : cambios en el almacenamiento.

Si bien, cada uno de los componentes anteriormente mencionados juega un papel importante para la producción de lixiviados, de acuerdo con Alslaibi *et al.*, (2010) la precipitación es el factor más influyente en la producción de lixiviados, ya que a menor cantidad de lluvia menor es producción de lixiviados, dando como resultado una menor posibilidad de percolación hacia el agua subterránea. Sin embargo, la capacidad de campo de los residuos también es fundamental en el movimiento del agua dentro del vertedero, como mencionan (Alslaibi *et al.*, 2013), solo cuando el valor de la capacidad de campo es superado se produce movimiento del agua a través de los residuos, inicialmente en condiciones no saturadas, si hay suficiente agua en condiciones de saturación. La producción de lixiviado varía temporalmente a lo largo del año teniendo variaciones del 30 al 40%, entre los valores mínimos y máximos de dicha producción (Farquhar, 1989).

Considerando el planteamiento anterior se han desarrollado diversos métodos, para la cuantificación del volumen de lixiviados generados e independientemente que todos están basados en la ecuación de la continuidad, cada uno de estos modelos contempla diferentes métodos para la cuantificación de cada uno de sus componentes, y a su vez los métodos utilizados dependerán en gran medida de la información disponible para el sitio en evaluación, además, se debe considerar que algunos de los componentes varían en el tiempo. A pesar de la dificultad que representa el cálculo de un balance hídrico dentro de un sitio de disposición final, dicho balance es aplicado cada vez más, ya que permite conocer una serie de información muy importante para la correcta gestión de dichos sitios.

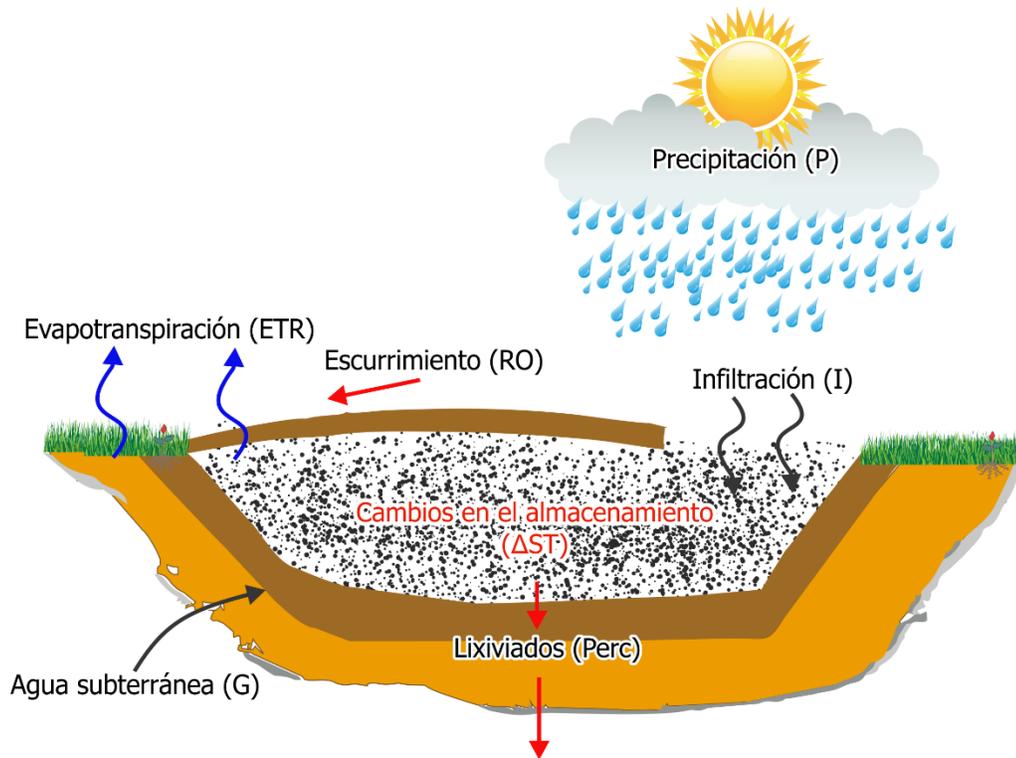


Figura 2.2 Modelo conceptual de los componentes del balance hídrico considerados para cuantificar la generación potencial de lixiviados en un sitio de disposición final de residuos sólidos.

2.4 Métodos de estimación del volumen de lixiviado

La masa de contaminante que producen los sitios de disposición final depende de la concentración de los elementos en el lixiviado y del volumen de lixiviado generado en el tiempo. Por lo general, en los vertederos no se dispone con un sistema de medición de la producción de lixiviado, por lo que una forma de estimar el volumen de lixiviado es mediante la realización de un balance hídrico (Vadillo y Carrasco, 2005).

Se han desarrollado varios modelos matemáticos que intentan predecir la producción de lixiviados a partir del conocimiento de factores hidrológicos básicos, la evaluación de la calidad y la cantidad de los lixiviados del vertedero es esencial para evaluar su impacto ambiental, así como para su tratamiento y gestión. Los factores que influyen en el proceso de producción de lixiviados varían en el tiempo y el espacio, por lo que el proceso de evaluación se vuelve más difícil y complejo. Dichos modelos están disponibles desde lo más sencillos que consisten en determinar el porcentaje de precipitación que llega a percolarse hasta modelos más elaborados.

El modelo de balance hídrico (WBM) (Fenn *et al.*, 1975), el modelo de Simulación Hidrológica en Sitios de Eliminación de Desechos Sólidos (HSSWDS por sus siglas en inglés) (Perrier & Gibson, 1982), SOILINER (Johnson, 1986), FULLFILL (Noble *et al.*, 1991), la Investigación del Flujo de Lixiviado (FILL por sus siglas en inglés) (Noble *et al.*, 1992), el Balance de Agua en Serie (BASE) (Cruz *et al.*, 1997) y el más popular y usado actualmente el modelo de Evaluación Hidrológica de Rellenos Sanitarios (HELP por sus siglas en inglés) (Schroeder *et al.*, 1984). Cabe resaltar que cada programa presenta ciertas ventajas, restricciones y un grado de aproximación diferente.

El método del balance hídrico (WBM) (Fenn *et al.*, 1975), se basa en la cuantificación de diversos parámetros que intervienen en la producción de lixiviados, tales como la precipitación, la evapotranspiración, el escurrimiento superficial, la infiltración y la percolación. Así mismo, el balance hídrico admite distintos modelos para cuantificar cada uno de sus términos y, por ello, surgen distintas formulaciones para aplicarlo. El planteamiento básico del método es que toda el agua que encuentra por debajo de la zona de evapotranspiración puede percolar y eventualmente convertirse en lixiviados, lo que sólo ocurrirá cuando los residuos presentes dentro del vertedero hayan cubierto su capacidad de

retención de agua, lo cual se produce en un tiempo considerable (Lobo, 2003). Por tanto, la evapotranspiración y la capacidad de campo de los residuos son la clave para el cálculo del balance del agua en un vertedero, ya que de ellos depende la cantidad de agua disponible para infiltrarse. Al no requerir datos muy detallados del sitio, es uno de los métodos más utilizados para estimación de las cantidades de lixiviados (Aziz *et al.*, 2012). La cantidad potencial del lixiviado es la cantidad de agua en exceso sobre la cantidad de retención de humedad del material dispuesto en el vertedero (Tchobanoglous, 1994).

Asimismo, la evapotranspiración está en función de la temperatura, la humedad, la radiación solar, la velocidad del viento, la disponibilidad de agua, el tipo de vegetación y la temporada de crecimiento. Respecto al método planteado por Fenn *et al* (1975) su principal desventaja es que estima los volúmenes de lixiviados de manera mensual y solo es útil para periodos de tiempo cortos (Farquhar, 1995), lo cual dificulta la comparación de resultados con algún otro modelo. Además, el método se restringe solo a la capa superficial del sitio en términos de percolación, a diferencia del modelo HELP que proporciona un balance de agua general en todo el perfil del vertedero.

El modelo de Simulación Hidrológica en Sitios de Eliminación de Desechos Sólidos (HSSWDS) (1982), fue diseñado para simular las características del flujo hidrológico en vertederos de residuos sólidos comunes y peligrosos, el cual utiliza un enfoque determinístico del balance hídrico para predecir el flujo de humedad en el vertedero. Los datos requeridos son la localización geográfica, el área del sitio, las características hidrológicas, la cobertura final de suelo y la vegetación (Murphy y Garwell, 1998).

SOILINER (1986), el programa predice la tasa de flujo de lixiviados a través de revestimientos de arcilla dada la conductividad hidráulica saturada de las capas, el gradiente hidráulico y la porosidad efectiva, es decir, proporciona una herramienta comprensiva para el diseño de configuraciones del revestimiento, específicamente conductividad y espesor del revestimiento.

Así mismo, el modelo FULFILL (1991) está basado en una estructura unidimensional de diferencias finitas, la ecuación principal del modelo se basa en el principio de conservación de masa, en donde se considera el movimiento del avance hidráulico del lixiviado para calcular el caudal de estos líquidos (Murphy y Garwell, 1998).

Por su parte, el modelo FILL (The Flow Investigation for Landfill Leachate) (1992), es un modelo de dos dimensiones, para simular el flujo de humedad en estado transitorio. Esta herramienta es aplicable a la predicción de los caudales de lixiviados a través de los vertederos. El modelo utiliza una ecuación de onda cinemática para calcular la escorrentía, teniendo en cuenta la pendiente y la rugosidad de la superficie. El análisis de la infiltración se basa en los métodos de solución de Philip (1969).

Por otra parte, el modelo de Balance de Agua en Serie (BASE) (1997), se desarrolló bajo la coordinación del Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), es una herramienta de cálculo sencilla y práctica, que permite predecir, con una precisión aceptable el lixiviado a generarse en un relleno sanitario (Cruz *et al.*, 1997). Sin embargo, esta precisión depende de la conformación del relleno sanitario, es decir, que el mismo sea ordenado mediante celdas uniformes, las cuales deben tener un seguimiento desde su inicio hasta su clausura. Su limitación es que se ajusta solo para sitios bien controlados y con un seguimiento diario de su operación.

Por último, el modelo HELP (Hydrology Evaluation Leachate Performance) (Schroeder *et al.*, 1994; versión 3) es un modelo desarrollado para la simulación de los procesos hidrológicos en rellenos sanitarios, la evaluación de los diseños para vertederos y la estimación de las tasas de recarga de las aguas subterráneas. Éste está basado en los mismos principios que el balance hídrico, pero sus cálculos son más detallados, pudiendo calcular el volumen de lixiviado de manera diaria, mensual o anual. Sus autores lo definen como un modelo cuasi-bidimensional, ya que, además de contener un modelo de drenaje vertical unidimensional, añade un modelo de drenaje lateral unidimensional. El modelo HELP es la herramienta más utilizada a nivel mundial para la predicción de la cantidad de lixiviados y el análisis del balance de agua en vertederos, debido a su gran aplicabilidad tanto para sitios cerrados, semi cerrados o abiertos.

Se observa una tendencia al uso del modelo HELP por ejemplo los trabajos de Yalcin y Demirer, (2002); Alslaibi *et al.*, (2010); Alslaibi *et al.*,(2013); Yang *et al.*, (2015). Estos estudios, además de cuantificar el volumen de lixiviados, comparan sus resultados con los datos registrados para verificar la exactitud de las estimaciones realizadas por el modelo. Por ejemplo, el estudio realizado por Alslaibi *et al.*, (2010), realiza también una estimación a

través del modelo de balance hídrico. Los resultados muestran que los valores obtenidos para ambos modelos fueron muy cercanos, sin embargo, la comparación con las mediciones registradas puede decirse que ambos modelos sobreestiman el volumen generado de lixiviados, aunque también puede deberse a un error en las mediciones realizadas. A partir de un análisis de los componentes que intervienen, Alslaibi *et al.*, (2010) concluyen que la evapotranspiración es el principal componente que influye en el balance del volumen de lixiviados, debido a las condiciones climáticas del lugar en estudio.

Además de la comparación entre datos medidos y datos calculados también puede hacerse una evaluación entre el rendimiento de vertederos húmedos y vertederos secos. Ejemplo de ello es lo presentado por Yuen *et al.*, (2001), de esta manera los resultados obtenidos son importantes en términos de manejo de lixiviados para ambos sitios.

Independientemente del modelo con que se trabaje, la precisión de los datos variará según el lugar y el tiempo en estudio, si bien el modelo HELP presenta la mayor precisión en lo que a resultados se refiere, éste también presenta errores de cálculo, como lo expresan Fatta *et al.*, (1999) y Berger (2015), dependiendo de la región de estudio habrá componentes que se ajusten a lo medido en campo y componentes que se sobreestimen o subestimen.

Finalmente se debe tener presente que para la descripción del balance de agua y la estimación de la probable cantidad de lixiviados generados en el vertedero existen diferentes métodos y fórmulas. Sin embargo, por la complejidad del caso en particular y por el gran número de factores influyentes, los modelos siempre representan una simplificación, por lo que los resultados obtenidos serán una estimación o aproximación de la realidad hasta ciertos límites, cuyo éxito debe probarse después.

2.5 Contaminación del agua subterránea

El término contaminación hace referencia a la modificación de las características fisicoquímicas del agua, debida a la intervención humana y que la inutiliza para un uso determinado. No obstante, también podría haber un deterioro de la calidad del agua debido a razones naturales, como la disolución de minerales del material rocoso. Sin embargo, en la mayoría de las veces a contaminación del agua subterránea es casi siempre resultado de la actividad humana.

En este sentido, las fuentes de contaminación del agua subterránea provienen de diferentes actividades, como, por ejemplo, la fuga de lixiviados de sitios de disposición final. Por lo que, en los lugares en los que los sitios de disposición final se localizan sobre materiales relativamente permeables, como arena, grava o roca fracturada, el movimiento del lixiviado puede contaminar áreas mucho mayores que la que ocupa el sitio de disposición final.

De esta manera, los contaminantes pueden llegar al agua subterránea de varias maneras. Los mecanismos de introducción de un contaminante hacia el agua subterránea se pueden clasificar en cuatro tipos: (i) propagación a partir de la superficie del suelo, un claro ejemplo se presenta en un sitio de disposición final de residuos sólidos, (ii) propagación originada a partir de la ZNS, esto puede ocurrir a partir de fugas del alcantarillado y tuberías de drenaje enterradas en el subsuelo, (iii) propagación originada en la zona saturada, situación que se genera a partir de la inyección directa al acuífero y la alteración del régimen del flujo este caso se presenta en las costas cuando se bombea de manera intensiva y se propaga la cuña salina hacia tierra adentro. Por tanto, la manera de proteger las fuentes de agua subterránea es identificar las áreas y los mecanismos por los cuales los contaminantes entran al sistema lo que permitirá una mejor gestión integral del recurso.

Por otra parte, los mecanismos de migración de contaminantes en un medio poroso incluyen procesos físicos como la advección, la dispersión y la difusión. Sin embargo, también ocurren procesos químicos y biológicos en el proceso de transporte, estos incluyen reacciones químicas, retardo de contaminantes, intercambio iónico, atenuación natural, entre otras.

La advección es el arrastre de la sustancia contaminante por el agua, es decir, la advección simplemente es el transporte de contaminantes sin que se considere algún otro proceso. Si solo existiera este proceso, el contaminante viajaría a la misma velocidad que el agua y la extensión ocupada sería constante.

Capítulo III

Materiales y métodos

3.1 Marco físico regional de la zona de estudio

La zona de estudio está definida por los límites físicos de la cuenca del valle de Toluca, la cual se localiza en el Curso Alto del Río Lerma, en la porción central del Estado de México, cubriendo una superficie aproximada de 2,116 km², con una altitud máxima de 4,680 *msnm* correspondiente al Nevado de Toluca, que determinan la divisoria hidrográfica principal, y una altitud promedio de 2600 *msnm* (Figura 3.1).

La principal corriente superficial que atraviesa al valle de Toluca es el río Lerma, esta corriente nace prácticamente en el poblado de Almoloya del Río, a partir de este punto su cauce sigue una dirección hacia el norte, atravesando el valle de Ixtlahuaca- Atlacomulco (CONAGUA-GTZ, 2008).

A lo largo de su cauce, el río Lerma recibe numerosas aportaciones provenientes de ríos con caudal considerable o de arroyos intermitentes con escurrimientos estacionales y poco definidos. Sin embargo, también recibe los sobrantes de agua de canales de riego del valle de Toluca, al igual que aguas negras y residuales que se originan en las poblaciones asentadas en el valle y en las zonas industriales; lo anterior ha provocado la fuerte contaminación del cuerpo de agua superficial (GEM, 2011).

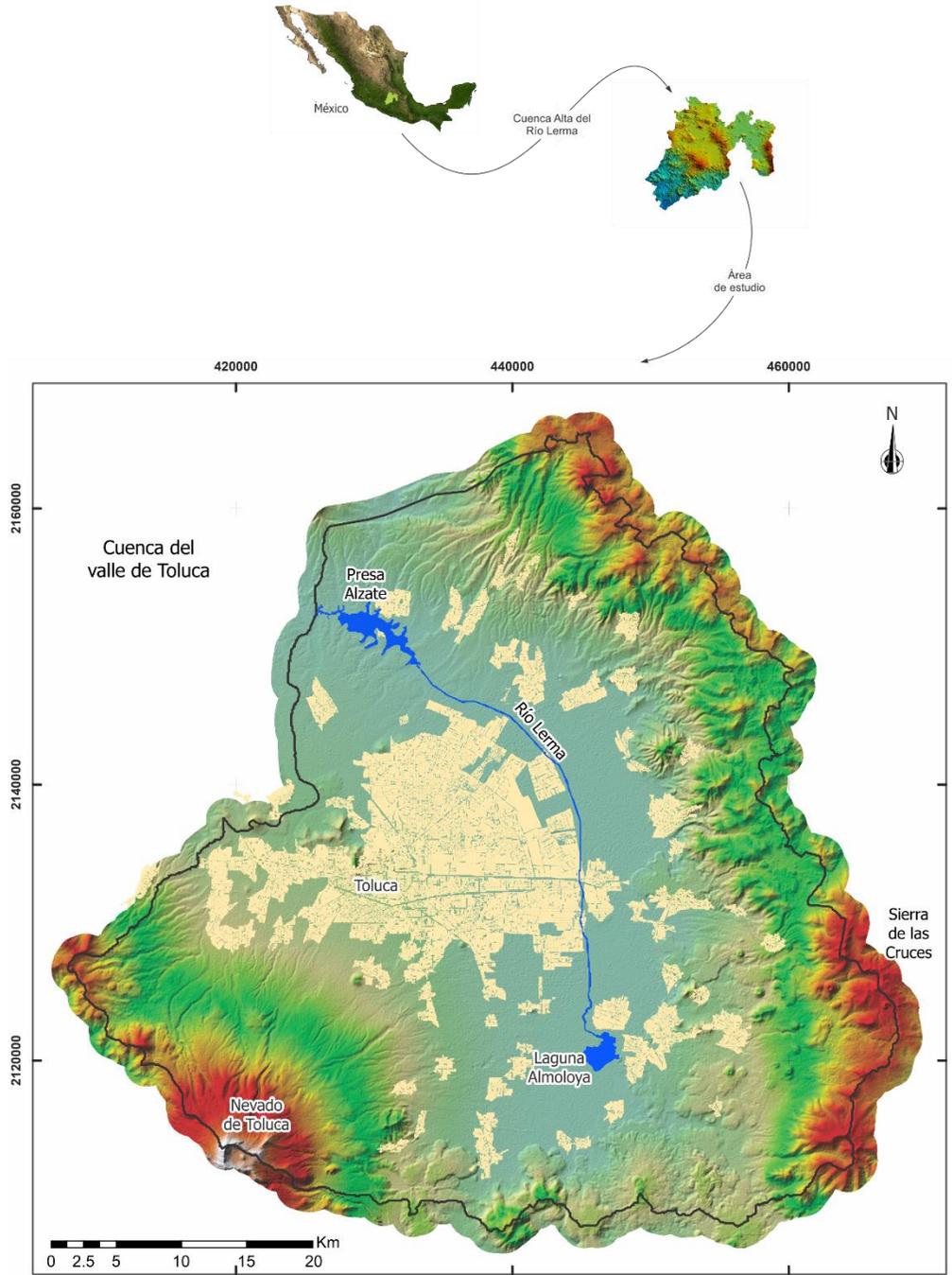


Figura 3.1. Localización de la cuenca del valle de Toluca en el contexto nacional y estatal, donde se muestra la distribución de la zona urbana para el año 2010 (color amarillo), la corriente principal del río Lerma, así como la laguna de Almoloya.

3.1.1 Características climatológicas

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (1981), el clima en la región del valle de Toluca se clasifica como templado subhúmedo, con lluvias en verano y un porcentaje de precipitación invernal menor de 5 *mm* mensuales. En la zona noreste, que incluye las Sierra de las Cruces y las estribaciones del Nevado de Toluca, se presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con un porcentaje de precipitación invernal entre 5 *mm* y 10.2 *mm*. Mientras que en la zona más alta del área (Nevado de Toluca), se define como un clima altamente frío (CONAGUA, 2009).

La precipitación media anual se encuentra entre los 700 y 1,000 *mm* para el valle de Toluca, mientras que hacia las faldas del Nevado la precipitación se incrementa a 1,200 *mm*. La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, siendo más intensa en los meses de junio a septiembre, con valores cercanos a unos 140 *mm/mes*. La época de estiaje tiene lugar entre noviembre y abril, con precipitaciones del orden de 12 *mm/mes* (CONAGUA-GTZ, 2008).

Respecto a la temperatura media anual, en el valle de Toluca oscila entre los 12° y 14°C, en los meses de diciembre y enero la temperatura es aproximadamente de 9.5°C e incrementa hasta el mes de mayo donde alcanza los 14°C, para volver a descender gradualmente hasta diciembre (CONAGUA-GTZ, 2008).

La evaporación, factor determinante en la disponibilidad de agua debido a que gran parte del agua que se precipita es regresada a la atmósfera como vapor de agua, presenta valores máximos en las partes planas de la cuenca, con disminuciones considerables en las partes altas.

3.1.2 Contexto geológico regional

La zona de estudio se ubica dentro del marco que impone el Eje Neovolcánico, lo que implica una importante actividad volcánica reciente donde las rocas aflorantes presentan edades que van del Terciario Medio (26 millones de años) al reciente, el terciario contribuyó con gran cantidad de rocas volcánicas de composición ácida a intermedia, en forma de serranías bordeando los valles, los cuales constituían antiguamente cuencas endorreicas, en donde se depositaron importantes volúmenes de materiales granulares y piroclásticos, como relleno de

una topografía preexistente (García-Palomo *et al.*, 2008). Las rocas aflorantes pueden ser asociadas a tres grandes grupos (CONAGUA, 2009).

El primer grupo está representado por rocas de origen volcánico localizadas en las partes altas, constituidas por basaltos y andesitas principalmente (unidades geológicas Qhv, Qpv, Qpvc, Tmpv, Tmv, Tpv); el segundo por materiales piroclásticos que se encuentran bordeando las sierras, incluyen tobas, aglomerados, brechas, cenizas volcánicas y depósitos de pie de monte (unidades geológicas Qpvc y Tpv); y el tercero por materiales producto de la desintegración y erosión de los dos grupos anteriores constituidos principalmente por arenas, gravas, arcillas, limos y depósitos lacustres (unidades geológicas Qal, Qla, y Qpla) (Figura 3.2).

Los basaltos y andesitas se encuentran en forma de extensos mantos de lava, expulsados por fisuras o por numerosos volcanes que se localizan principalmente en la parte sur del acuífero, estas rocas presentan generalmente una gran porosidad y permeabilidad debido a las numerosas fracturas que poseen y a las intercalaciones con capas de material escoriáceo, como ocurre en los afloramientos del sur que marcan los límites del acuífero con la cuenca del río Balsas.

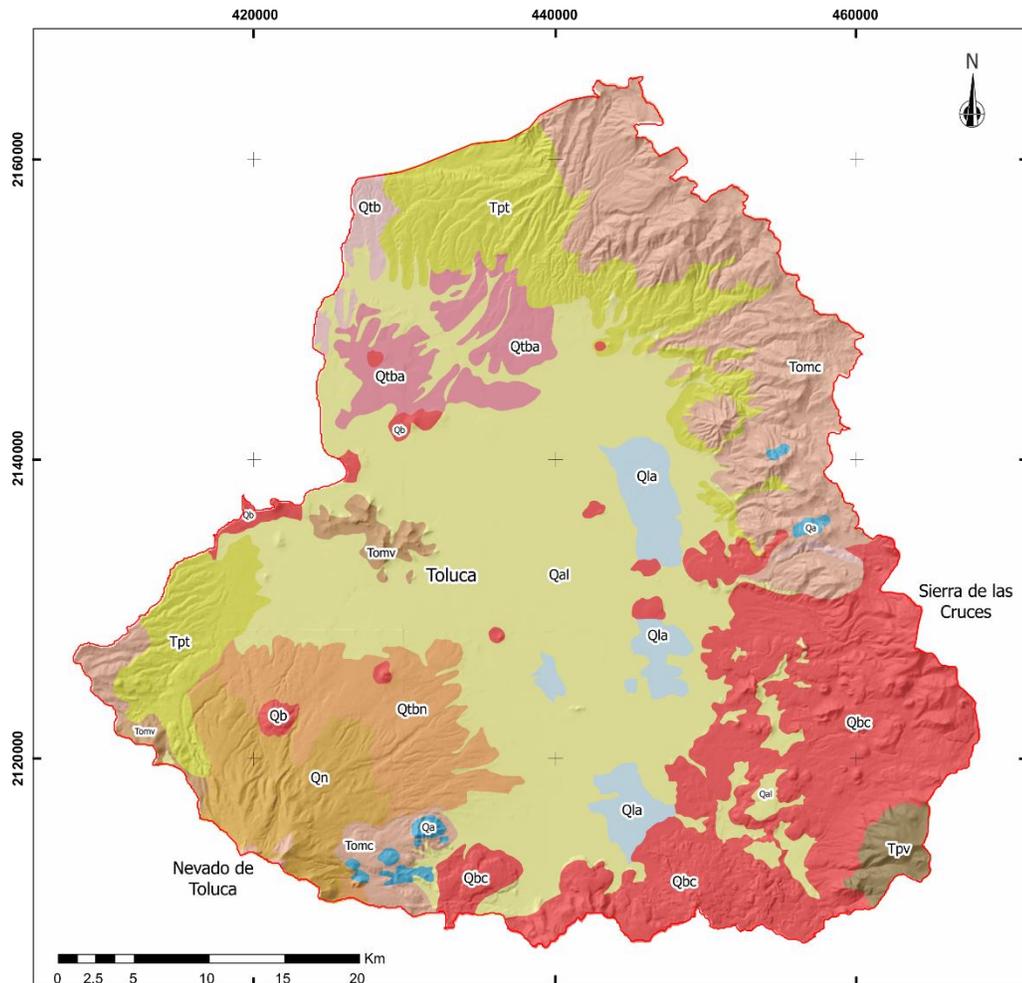
Estos afloramientos son de gran importancia además de por su extensión por considerarse que son una importante zona de recarga del acuífero. Afloramientos de rocas andesíticas y dacíticas constituyen además los núcleos de las principales sierras como son; Sierra de las Cruces y el Nevado de Toluca (CONAGUA-GTZ, 2008).

Las rocas piroclásticas producto de erupciones volcánicas explosivas cubren extensas porciones del valle, especialmente en las partes de poca pendiente o planas, y están constituidas principalmente por tobas lacustres con intercalaciones de limo, arcilla, ceniza y horizontes de pómez; y se caracterizan por presentar un elevado potencial de recarga y almacenamiento de agua por la intercalación de materiales de diferente granulometría (Expósito, 2012).

Los depósitos lacustres del Holoceno están constituidos por sedimentos arcillosos y limosos dispuestos en capas laminares muy delgadas. Se localizan en las zonas donde existieron lagunas como las de Almoloya, Mexicaltzingo, Lerma y San Bartolo. Se considera que estos

depósitos, dadas sus características litológicas y extensión presentan poca importancia en la recarga al acuífero.

Por otra parte, los depósitos de aluvión se originaron por la erosión de rocas de las zonas altas y por el transporte de las corrientes de los ríos, que ocupan las partes planas del Valle de Toluca y cubren los depósitos volcanoclásticos. Estos depósitos están constituidos por acarreos de tamaño variable, que va de arcillas, arenas, gravas hasta cantos sin consolidar, presentan una alta capacidad de infiltración y se consideran buenos acuíferos.



Leyenda

Qla	Depósitos lacustres	Qtbn	Tobas andesíticas y piroclastos del Nevado de Toluca
Qal	Depósitos aluviales no consolidados	Qa	Domos andesíticos
Qtba	Depósitos piroclásticos de grano fino	Tpt	Depósitos volcanoclásticos Formación Tarango
Qtb	Depósitos piroclásticos de grano grueso	Tomc	Rocas volcánicas de la Formación las Cruces
Qb	Basaltos y conos recientes de la Formación Chichinautzin	Tpv	Rocas andesíticas
Qbc		Tomv	Andesitas del complejo volcánico de Xochitepec
Qn	Depósitos volcánicos del Nevado de Toluca		

Figura 3.2. Contexto geológico superficial de la cuenca del valle de Toluca (modificado de IFOMEGEM, 1994).

3.1.3 Contexto hidrogeológico del acuífero del valle de Toluca

Los trabajos desarrollados en la región del valle de Toluca han permitido definir el esquema hidrogeológico general (Ariel Consultores, 1996). En el acuífero del Valle de Toluca, las unidades estratigráficas integran un sistema que controla el almacenamiento y movimiento del agua subterránea, además tiene como fronteras laterales a las sierras perimetrales del Valle de Toluca, manifestando comunicación somera y continuidad hidráulica, únicamente a través del estrechamiento de Perales hacia el Valle de Ixtlahuaca, que, aunque topográficamente sean dos valles separados, desde el punto de vista hidrogeológico no dejan de tener cierta relación, ya que se establece comunicación entre ambos valles a través del cruce labrado por los escurrimientos del río Lerma (Ariel Consultores, S.A., 1996).

Hidrogeológicamente los materiales se integran en dos tipos de unidades acuíferas, una relacionada con el medio poroso representado por los depósitos de clásticos no consolidados que rellenan la cuenca del valle de Toluca y otra unidad relacionada con rocas volcánicas afectadas por tectonismo y que manifiestan permeabilidad secundaria por fracturamiento (CONAGUA, 2009).

El acuífero se caracteriza por tener tres flujos subterráneos principales: el procedente de infiltraciones del Nevado de Toluca, circulación Este – Noreste, el procedente del Nevado de Toluca, dirección del Norte para salir a Ixtlahuaca y el procedente de la Sierra de las Cruces, circulación Oeste - pie de la Sierra (CNA, 2002). Históricamente, el flujo subterráneo regional se dirigía de sur a norte, pero el bombeo de los pozos profundos a través de la cuenca ha alterado progresivamente su dirección. El mayor impacto se debe al sistema de pozos Lerma, el cual ha inducido el flujo hacia el este de la cuenca. Estos pozos podrían también captar una parte de la recarga regional de las montañas de la Sierra de las Cruces.

La principal fuente de recarga del acuífero del valle de Toluca proviene de las sierras circundantes, en particular de las faldas del Volcán Nevado de Toluca, y la Sierra de las Cruces. La recarga principal se produce sobre los abanicos aluviales de los cursos de agua que bajan de dichas sierras (CONAGUA-Desarrollo y Sistemas S.A., 2005).

3.2 Recopilación y análisis de la información

El primer paso metodológico, consistió en hacer una recopilación y revisión exhaustiva de la información disponible sobre la temática, a través de organismos académicos e instituciones como fueron: la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, así como dependencias de gobierno: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) y el Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM).

Además, se revisaron investigaciones relacionadas con la aplicación de modelos de balance hídrico en sitios de disposición final de residuos sólidos en revistas indexadas como: *Waste Management, Journal of Hydrology Environmental Pollution, Environmental Monitoring and Assessment, Environmental Geochemistry and Health, Environmental Engineering and Management Journal, Environmental Geology, Journal of hazardous materials, y Science of the Total Environment.*

3.3 Selección y caracterización de los sitios de disposición final

En esta etapa se seleccionaron los sitios que, por sus características pueden representar una amenaza potencial sobre la calidad del agua subterránea. Así pues, el inventario realizado por la GTZ en el 2004-2005 (Blanco, 2007), donde se identificaron los sitios que carecían de las medidas necesarias para el control de lixiviados y gases generados por la descomposición de los residuos, además del Atlas Geológico Ambiental del Estado de México publicado por el IFOMEGEM (2013), fueron los trabajos tomados como base para la localización de los sitios de disposición final.

A partir de estos trabajos y con la ayuda del programa *Google Earth Pro* se logró la identificación de 150 sitios divididos en rellenos sanitarios y sitios no controlados, contrastando con lo reportado por protección civil quien para el año 2018 reporta 69 sitios de disposición final en el estado de México, de los cuales 20 son rellenos sanitarios y 49 son sitios no controlados.

Posterior al análisis de la información se llegó a la selección de ocho sitios, la selección de estos se llevó a cabo considerando la disponibilidad de la información de estudios realizados en los sitios, así como la cantidad de residuos que recibe al día (*ton/día*).

El nombre asignado a cada sitio estuvo en función del municipio donde se localiza. La caracterización de los sitios presenta información respecto a su fecha de inicio de operaciones, el tonelaje de residuos que recibe al día, el espesor de los residuos, área que ocupa, tipo de sitio y su categorización según la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Finalmente, la información se complementó con lo recabado en el recorrido de campo realizado a los sitios seleccionados, pudiendo visualizar su estado actual de operación, la infraestructura con la que cuentan, así como el tipo de residuos que se depositan.

3.4 Construcción de la base de datos para la estimación del volumen de lixiviado generado en sitios de disposición final

Se han creado varios modelos hidrológicos para la estimación del volumen de lixiviados, teniendo como característica básica el balance hídrico. Para este trabajo se cuantifica el volumen de lixiviado generado en sitios de disposición final de residuos sólidos mediante dos metodologías: la primera es el Método de Balance Hídrico (WBM por sus siglas en inglés), propuesto por Fenn *et al*, en 1975 y la segunda mediante el Modelo de Evaluación Hidrológica de Rellenos Sanitarios (HELP por sus siglas en inglés) propuesta por Schroeder *et al*, en 1984, en su versión 3.

En la *Tabla 3.1* se muestran cada uno de los parámetros requeridos por los modelos, así como sus unidades, en la *Tabla 3.2* se muestra la fuente de donde se obtuvieron los datos para la construcción de la base de datos; para un mejor manejo y obtención de la información dichos parámetros pueden agruparse en dos, el primer grupo son los datos meteorológicos y el segundo se refiere a los datos o parámetros que tuvieron que ser estimados para cada sitio, en los apartados subsecuentes se describe como se recabaron y cuantificaron dichos datos.

Tabla 3.1 Parámetros de entrada para la aplicación de los modelos hidrológicos WBM y HELP3. Se especifican también las unidades de cada parámetro.

WBM		HELP	
Parámetro	Unidades	Parámetro	Unidades
Temperatura mensual promedio	°C	Precipitación diaria	mm/día
Índice de calor mensual	Adimensional	Temperatura promedio diaria	°C
Índice de calor anual (H)	Adimensional	Radiación solar diaria	MJ/m ²
Evapotranspiración potencial no ajustada (UPET)	mm	Velocidad del viento anual promedio	Km/h
Factor de corrección para la duración de la luz solar	Adimensional	Humedad relativa trimestral	%
Evapotranspiración potencial ajustada (PET)	mm	Profundidad de la zona evaporativa	cm
Precipitación mensual promedio	mm	Índice máximo del área foliar	Adimensional
Coefficiente de escurrimiento superficial (Cr/O)	Adimensional	Datos de inicio y fin de la temporada de crecimiento del cultivo	Fecha juliana
Escurrimiento superficial (R/O)	mm	Número de curva (NC)	Adimensional
Infiltración	mm	Profundidad de la capa de suelo (residuos)	cm
Agua disponible para almacenamiento (I-PET)	mm	Textura del suelo (residuos)	Adimensional
Pérdida de agua acumulada (ACCWL)	mm	Contenido de humedad	v/v
Almacenamiento de humedad en el suelo (ST)	mm	Porosidad total	v/v
Cambio en el almacenamiento de humedad del suelo a través del tiempo (Δ ST)	mm	Capacidad de campo	v/v
Evapotranspiración (AET)	mm	Punto de marchitez (WP)	v/v
		Conductividad hidráulica	cm/s

Tabla 3.2 Fuentes de información utilizadas para la recopilación de los parámetros de entrada para la aplicación de los modelos hidrológicos WBM y HELP3. Se presentan solo los parámetros base, ya que a partir de ellos se calculan los demás parámetros.

WBM		HELP	
Parámetro	Fuente	Parámetro	Fuente
Temperatura mensual promedio	Estaciones meteorológicas	Precipitación diaria	Estaciones meteorológicas
Precipitación mensual promedio		Temperatura promedio diaria	
Coeficiente de escurrimiento superficial (Cr/O)	Adimensional	Radiación solar diaria	
Almacenamiento de humedad en el suelo (ST)	mm	Velocidad del viento anual promedio	Estaciones automáticas
		Humedad relativa trimestral	
		Índice máximo del área foliar	Imágenes satelitales
		Profundidad de la capa (residuos)	Recopilación bibliográfica e imágenes satelitales
		Textura del suelo (residuos)	
		Contenido de humedad	
		Porosidad total	Datos reportados en la literatura
		Capacidad de campo	
		Punto de marchitez (WP)	
		Conductividad hidráulica	

3.4.1 Análisis y tratamiento de los datos meteorológicos

En este apartado se presenta el tratamiento y el análisis de la información disponible correspondiente a las series de datos de la precipitación, la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento. La información base fue proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para un total de 21 estaciones meteorológicas convencionales, cuyos datos incluyen los valores con una frecuencia diaria que se extiende de 1962 al 2016 para la precipitación, la temperatura máxima, la temperatura mínima y la temperatura promedio. Sin embargo, para este estudio se consideró la serie de datos que se extiende de 1989 al 2011, que es el periodo que presenta una mayor continuidad y consistencia. No obstante, para la cuantificación de lixiviados se llevó a cabo una selección de años hidrológicos representativos, es decir, un año húmedo, un año promedio y un año seco, con la finalidad de mostrar diferentes escenarios, que permitan visualizar como podría ser el comportamiento de la generación del lixiviado ante la presencia de diferentes precipitaciones.

Por su parte la información de la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento se obtuvo de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs), administradas por el SMN, así como por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacifico (OCLSP). En este caso se cuenta con registros a partir del año 2008 para algunas estaciones, siendo el periodo de 2012 al 2017 donde se cuenta con registros para todas las EMAs emplazadas en la zona de estudio, por lo tanto, es este periodo el que se utiliza en este trabajo.

La selección de las estaciones a utilizar para en el cálculo del volumen de lixiviado se realizó de acuerdo con su cercanía con el sitio en estudio, para esto se utilizó el área de influencia de cada estación. Posteriormente, se procedió a completar estadísticamente los datos diarios faltantes del conjunto de estaciones meteorológicas seleccionadas.

a) Análisis de los datos de precipitación

Dado que no todas las estaciones contienen registros de las variables climatológicas bajo estudio y muchas carecen de información en diferentes periodos, se seleccionaron aquellas estaciones cuyos registros tuvieran una mayor continuidad.

Para completar las series faltantes de la precipitación existen una gran variedad de métodos, tales como el promedio aritmético, la proporción normal, la correlación lineal y el análisis acumulativo (Salas, 2012). Sin embargo, uno de los más usados tanto en hidrología como climatología es el promedio ponderado (Teegavarapu y Chandramouli, 2005). En este estudio se optó por utilizar el método de ponderación del coeficiente de determinación, cuya aplicación muestra una mejor consistencia con los datos disponibles, asimismo considera que los datos de las estaciones de apoyo guardan relación con la estación cuyo registro se desea completar.

En tal sentido, la estimación de la precipitación faltante θ_f se determina en función de la ponderación de los datos existentes en las estaciones vecinas θ_i , donde el factor de ponderación constituye el coeficiente de determinación R_i , para lo cual se emplea la siguiente ecuación:

$$\theta_f = \frac{\sum_{i=1}^n R_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (3.1)$$

donde θ_i representa cada una de las n estaciones con datos de la precipitación del día en cuestión. Las estaciones consideradas para este análisis fueron un total de 21 (*Tabla 3.3*) incluyéndose en el análisis a pesar de la distancia y su relativa influencia la información de estaciones alejadas de los sitios de disposición final. Con la serie de datos obtenidos con frecuencia diaria se procedió a calcular los valores mensuales. Así como el cálculo de los promedios anuales con la finalidad de obtener los años hidrológicos representativos.

Tabla 3.3. Estaciones meteorológicas y estaciones automáticas ubicadas en la zona de estudio, las cuales fueron utilizadas para la obtención de los datos meteorológicos requeridos para la aplicación de los modelos de balance de humedad

Clave	Nombre de la estación	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Dependencia
15014	Capulhuac	19.4408	-99.5453	2760	SMN
15030	Hacienda de la Y	19.4050	-99.5631	2576	SMN
15038	Joquicingo	19.0514	-99.5319	2797	SMN
15056	Mexicalcingo	19.2094	-99.5886	2602	SMN
15057	Mimiapan	19.4431	-99.4644	2882	SMN
15089	San Francisco Tlalcilcalpan	19.2922	-99.7678	2773	SMN
15122	Tenango	19.1069	-99.6172	2858	SMN
15126	Toluca (Obs)	19.2911	-99.7142	2726	SMN
15201	Trojes	19.4281	-99.6125	2583	SMN
211	Nueva Oxtotitlán	19.2789	-99.6858	2695	SMN
15231	Presa Iturbide	19.5294	-99.4642	3290	SMN
15240	San Francisco Putla	19.1189	-99.6319	2747	SMN
15266	CODAGEM	19.2483	-99.5756	2596	SMN
15276	San José Contadero	19.2344	-99.8081	3045	SMN
15282	Tres Barrancas	19.3408	-99.7983	2682	SMN
15293	San Juan de las Huertas	19.2375	-99.7642	2905	SMN
15295	San Pedro Zictepec D-10	19.1192	-99.5519	2560	SMN
15312	Colonia Álvaro Obregón	19.3778	-99.4958	2589	SMN
15367	Observatorio UAEM	19.2853	-99.6528	2668	SMN
15373	Rancho Villa Verde	19.1389	-99.6097	2680	SMN
15395	Zoológico de Zacango	19.1983	-99.6483	2910	SMN
*	Cerro Catedral	19.54	-99.52	3355	SMN
*	Nevado Toluca	19.12	-99.77	4568	SMN
*	Toluca	19.29	-99.71	2727	SMN
*	Hacienda La Y	19.4	-99.6	2579	OCLSP
*	Alzate	19.47	-99.7	2576	OCLSP
*	La Providencia	19.14	-99.61	2676	INIFAP

*Estaciones automáticas, SMN: Servicio Meteorológico Nacional, OCLSP: Organismo de Cuenca Lerma-Santiago-Pacífico; INIFAP: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

b) Análisis de los datos de temperatura

Dependiendo de la escala de interés, existen numerosos factores que determinaran la temperatura de una zona en particular. Por ejemplo, para regiones de extensión pequeña algunos factores que intervienen son las barreras de flujo de aire, los cuerpos de agua o hielo y las áreas urbanas. Para regiones de mediana escala cobran mayor relevancia aquellos factores relacionados con el terreno; mientras que en regiones de mayor escala como en la cuenca del valle de Toluca, la elevación es el factor más relevante. Puesto que la parte más baja se halla a 2,555 *msnm*, mientras que la parte más alta que es el Nevado de Toluca se localiza a 4,556 *msnm*, lo que resulta en un gradiente de altitud de 2,001 *msnm*. Otro de los factores que limita el completar las series faltantes de temperatura es la falta de información en las zonas altas, que dada la relevancia del gradiente de altitud constituye un elemento importante a la hora de definir un método para completar las series (Stahl *et al.*, 2006).

En este contexto, los valores de las series faltantes de temperatura se estimaron empleando el método de regresión ponderado con un filtro gaussiano, que además incorpora una función lineal para compensar la diferencia de altitudes entre las diferentes estaciones. El método se presenta a detalle en Stahl *et al.*, (2006) y se le denomina LWR-G (por sus siglas en inglés de *Lapse Rate by Weighted Regression with Gaussian Filter*). La ecuación fundamental de este método es:

$$T_a = \frac{\sum_{i=1}^n w(r)_i [T_i + b_0 + b_1 (h_p + h_i)]}{\sum_{i=1}^n w(r)_i} \quad (3.2)$$

donde b_0 y b_1 son coeficientes del análisis de regresión entre la estación de referencia i , que registra una temperatura T_i a una altura h_p , n es el número de estaciones que se utilizan para completar los datos. El parámetro $w(r)_i$ es un factor de peso basado en un filtro gaussiano en función de la distancia r entre las estaciones definido como:

$$w(r) = \begin{cases} 0; & r > R_p \\ \exp \left[- \left(\frac{r}{R_p} \right)^2 \alpha \right] e^{-\alpha}; & r \leq R_p \end{cases} \quad (3.3)$$

donde α es una constante que determina la curvatura del filtro gaussiano, cuyo valor puede variar de 1 a 7, en este caso se comprobó que un valor de 1 se ajustaba más a los valores observados. La distancia de truncamiento R_p es la distancia entre la estación donde se requiere calcular T_a y la estación meteorológica más lejana que se incluye en la estimación del dato faltante. De acuerdo con esto, el factor $w(r)$ de la ecuación 3.3 asigna una ponderación mayor a las estaciones más cercanas.

Las estaciones consideradas para este análisis fueron las mismas que se utilizaron en el llenado de los datos de precipitación (*Tabla 3.3*). El método se aplicó tanto a la temperatura máxima como a la temperatura mínima, para posteriormente estimar la temperatura promedio diaria, así como la temperatura promedio mensual.

c) Análisis del rendimiento de los modelos utilizados en el llenado de los datos meteorológicos faltantes

En este apartado se compararon los resultados de los valores medidos y estimados tanto para la precipitación como para la temperatura, esto se realizó a partir de los criterios estadísticos también conocidos como índices de ajuste utilizados en la evaluación cuantitativa del desempeño de modelos utilizados en la simulación de los datos climatológicos faltantes.

Los cinco criterios estadísticos que se emplearon fueron los siguientes: Error Máximo (ME), Error Cuadrático Medio (RMSE), Coeficiente de Determinación (CD), Coeficiente de Eficiencia de modelado (EF), y el Coeficiente de Masa Residual (CRM). En este sentido, el valor máximo para EF es uno, mientras que EF y CRM pueden ser negativos y el límite inferior para ME, RMSE y CRM es cero. A su vez el coeficiente de determinación (CD) proporciona la relación entre la dispersión de la serie simulada y la observada. El valor óptimo de CD es 1, sin embargo, sus rangos van de 0 a $+\infty$ (Vázquez y Feyen, 2003). Un valor de EF negativo especifica que el valor medio de los valores habría sido mejor predicción que la del modelo.

Por otra parte, un valor alto de Error Máximo (ME) denota el peor escenario de implementación del caso del modelo, mientras que un valor alto de Error Cuadrático Medio (RMSE) indica cuán considerables las estimaciones sobreestiman o subestiman las mediciones. Por su parte, el valor del Coeficiente de Masa Residual (CRM) indica el grado

de predisposición del modelo a sobrevalorar o infravalorar la medición, en la que un CRM negativo muestra una tendencia a sobreestimar (Vázquez y Feyen, 2003). No obstante, si los datos simulados y medidos fueran iguales, los valores de dichos indicadores serían: ME=0, RMSE=0, CD=1, EF=1 y CRM=1. La expresión matemática de los cinco criterios estadísticos mencionados queda definida de la siguiente manera:

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n, \quad (3.4)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2}, \quad (3.5)$$

$$CD = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right)^{0.5} \left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right)^{0.5}} \right)^2, \quad (3.6)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \text{ y} \quad (3.7)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3.8)$$

d) Análisis de los datos de la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento

Por su parte la información de la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento se obtuvo de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs), una EMA está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la

recopilación y monitoreo de variables meteorológicas como: la velocidad del viento, la dirección del viento, la presión atmosférica, la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la precipitación, para generar archivos del promedio diario de todas las variables (SMN, 2018).

En la *Tabla 3.3* se presentan las seis estaciones automáticas localizadas dentro de la cuenca del valle de Toluca, así como sus coordenadas y la dependencia que las administra. Cabe aclarar que la información disponible para cada estación varía según el año de inicio de operación de cada una, siendo, el periodo de 2012-2017 donde se cuenta con información para todas las EMAs.

Los registros proporcionados eran para cada hora, por tanto, fue necesario obtener los promedios diarios por año, dado que el periodo de registros no entra dentro de alguno de los años hidrológicos seleccionados, se optó por utilizar un promedio de los cinco años de registros. De igual manera, solo fue necesario la conversión de unidades para la radiación solar de W/m^2 a MJ/m^2 , ya que son las unidades requeridas en el modelo HELP3, el cálculo realizado fue el siguiente:

$$MJ = W \times 10^{-6} \times 24 \times 60 \times 60 \quad (3.9)$$

3.4.2 Procesamiento de los datos estimados

a) Índice del área foliar, LAI

En el modelo HELP3 el Índice del Área Foliar (LAI) es utilizado para la estimación de la evapotranspiración. Existen dos métodos para la medición del LAI los destructivos y los no destructivos, los primeros requieren una inversión alta tanto en costo como tiempo. Por otra parte, los no destructivos pueden obtenerse mediante la medición *in situ* con un ceptómetro lineal o mediante la estimación a través de la aplicación de herramientas de teledetección, este método es recomendado sobre todo cuando se trabaja a una escala regional.

Los valores de LAI se obtuvieron a partir de datos del satélite *Terra*, que incorpora el sistema MODIS (siglas en inglés de Moderate resolution Imaging Spectroradiometer). La información disponible del satélite para el parámetro LAI es de un promedio diario por cada

8 días, además de contar con una resolución espacial de 1 *km* x 1 *km*. Para este trabajo se emplearon 35 rásters cubriendo un periodo de octubre de 2010 a septiembre de 2011.

Además, se ha demostrado que el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) como un índice de reflectancia espectral ampliamente utilizado es un buen estimador de LAI y puede usarse para estimar el LAI indirectamente (Colombo *et al.* 2003; Fan *et al.*, 2008). La relación del LAI con el NDVI ha sido informada por diversos autores para diferentes sitios, para este trabajo utiliza la ecuación propuesta por Fan *et al.*, (2008) que fue modificada de Saito *et al.*, (2001):

$$LAI = 0.57^{2.33*NDVI} \quad (3.10)$$

donde *NDVI*: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Para la aplicación de la *ecuación 3.10* fue necesario recabar los valores del NDVI, para ello también se utilizó la información disponible del sensor *MODIS*. La resolución espacial del parámetro NDVI es de 250 *m* x 250 *m* con lo que es posible distinguir las distintas densidades de vegetación, la información disponible es de un promedio diario por cada 16 días, el periodo de análisis comprende de octubre de 2010 a septiembre de 2011, empleando un total de 23 rásters, con dicha información y una vez aplicada la ecuación 3.4 se obtuvo el índice del área foliar. Debido a que el modelo HELP requiere el valor máximo de LAI, no fue necesario sacar promedios mensuales, solo se buscó el valor máximo para cada sitio en el periodo estudiado, dicho valor es el que se emplea en las simulaciones para los tres años hidrológicos. La información se descargó del sitio LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center).

Para un mejor manejo de las imágenes, fue necesario realizar la reproyección de estas, dicho proceso se realizó mediante la herramienta MODIS Reprojection Tool (MTR), disponible en el mismo sitio. Por otra parte, el criterio para emplear o descartar un archivo en ambos casos es que estos cubrieran el área donde se encontraban los sitios de disposición final.

Considerando que el modelo HELP es en gran medida insensible a valores superiores a 5, y que además los vertederos no están diseñados con las condiciones ideales para el crecimiento vegetativo, se esperaba obtener un LAI entre 0 y 2.

b) Propiedades físicas de los residuos

El conocimiento del potencial de retención de humedad de los residuos es importante para estimar la cantidad de humedad que se agregará a un vertedero antes de que se produzca un lixiviado y se drene por la parte inferior. Esta cantidad de humedad expresada en peso o en forma volumétrica como porcentaje del volumen total de residuos, respectivamente, se denota como la capacidad de campo de los residuos sólidos.

Si bien, el término capacidad de campo hace referencia al contenido máximo de agua que puede retener el suelo antes de que exista un flujo, en el caso de un vertedero para cuantificar la capacidad de retención de humedad de los residuos antes de producirse la lixiviación se ha adoptado el mismo término de capacidad de campo (Lobo, 2003; Vargas, 2009).

En este contexto, se tiene que dentro de un vertedero el movimiento de la humedad y la cantidad generada de lixiviado está gobernada por las propiedades de los residuos sólidos, tales como la capacidad de campo, la porosidad total, el punto de marchitez y la conductividad hidráulica, además de otros parámetros físicos como la densidad de compactación o la distribución de las capas. Por tanto, la evaluación de estas propiedades resulta crítica para el entendimiento del proceso de formación de lixiviados, así como en el diseño del sistema de contención y almacenamiento en un relleno sanitario (Torres, 2016; Schroeder *et al.*, 1994).

Es bien sabido, que, si en un vertedero se confinan residuos con alto porcentaje de humedad, como suelen ser los provenientes de alimentos o los residuos en estado líquido, notablemente se disminuirá la capacidad de almacenamiento de humedad de la masa de residuos promoviendo la producción de lixiviados (Bagchi, 1994). Por otro lado, la presencia de altas proporciones de papel, cartón u otros similares mejorará la capacidad de absorción de los residuos, de ahí que se refleje en una disminución en la cantidad generada de lixiviados (Chen y Chynoweth, 1995). De este modo, se espera que residuos con proporciones altas de materiales absorbentes tengan valores más altos de capacidad de campo en relación con aquellos que no los tienen, incrementando significativamente el tiempo de percolación del lixiviado en la base del vertedero (Torres, 2016). Para esta investigación la caracterización física (parámetros hidráulicos) de los residuos se obtuvo de la recopilación de datos reportados por otros autores, para otros sitios de disposición final de residuos sólidos.

Además, de los parámetros antes mencionados para la aplicación del modelo HELP, es importante contar con datos sobre el sitio de disposición final como el porcentaje de la superficie que pudiera generar escorrentía, el contenido inicial de humedad, definir el perfil del vertedero, para ello el modelo HELP permite disponer de cuatro tipos de capas que son: capa de percolación vertical, capa de drenaje lateral, revestimiento de barrera de suelo y revestimientos de geomembrana. La capa o capas de residuos se representan dentro del perfil como capa de percolación vertical.

Así mismo, en caso de contar con capas de drenaje lateral es necesario ingresar datos relativos a la longitud máxima de drenaje, pendiente del drenaje en tanto por ciento, porcentaje de lixiviados que se recirculan y la capa que recibe dicha recirculación en caso de que esto suceda. Para las geomembranas, el modelo cuenta con diferentes tipos de geomembranas, asimismo se pueden ingresar datos como: la densidad de los poros, defectos en la instalación, conductividad hidráulica saturada.

También, se debe introducir el número de curva según el método del SCS USDA, para esto el modelo brinda tres opciones: 1) introducir directamente el número de curva, 2) introducir un número de curva y que el modelo realice el ajuste en función de la pendiente de la superficie del vertedero y de la longitud de dicha pendiente, y 3) el modelo realice el propio cálculo a partir de los datos de longitud y superficie de la pendiente, características de la capa superior y tipo de cubierta vegetativa (Senent, 2012), siendo esta la opción elegida.

3.5 Cuantificación de la producción de lixiviados en los sitios de disposición final seleccionados

Una vez recopilados todos los datos necesarios para la aplicación de los modelos, se realizó la cuantificación para los tres años hidrológicos representativos por cada método para cada uno de los sitios. En términos generales, los elementos que entran en juego para la formación de los lixiviados se esquematizan en la *Figura 2.2*, tanto para los residuos que cuentan con cobertura como aquellos que están a la intemperie. Por tanto, el método analítico usado para cuantificar el volumen de lixiviado producido, es llamado balance de humedad y su representación algebraica puede expresarse con la ecuación 3.11 (Farquhar, 1989):

$$Perc = P - ETR - RO - \Delta ST \quad (3.11)$$

donde: *Perc*: percolación en el fondo del vertedero; *P*: precipitación; *ETR*: evapotranspiración; *RO*: escurrimiento; ΔST : cambios en el almacenamiento. Para este caso se consideran despreciables los aportes de agua subterránea.

El principio adoptado en el WBM fue deducido a partir de estudios de balances de agua en el ciclo hidrológico y en aplicaciones de irrigación (El-Fadel *et al.*, 1997). Posteriormente, esos mismos principios que fundamentaron el WBM fueron subsecuentemente adoptados en el modelo Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) (Schroeder *et al.*, 1994).

De este modo, el desarrollo del Método de Balance Hídrico (WBM) es determinar el agua disponible para infiltración, basándose en la evapotranspiración y el coeficiente de escurrimiento, posteriormente se calcula el cambio de humedad del suelo, así como el cálculo de la evapotranspiración actual para finalmente calcular la percolación, es decir realiza un balance general del vertedero (en el Anexo I se hace una descripción detallada del método). Por su parte, en el modelo HELP3 los procesos hidrológicos son simulados diariamente, además de realizar balances de agua secuenciales bajo un enfoque determinístico y quasi-bidimensional. Por estas razones, el modelo HELP es el modelo más empleado en la predicción de la generación de lixiviados (Alslaibi, 2009; Bou-Zeid y El-Fadel, 2004).

3.6 Clasificación de los sitios de disposición final por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea

Con la finalidad de dar cumplimiento al último objetivo específico de esta investigación, se realizaron actividades que permitieran la clasificación de los sitios de disposición final según su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea. Si bien la fuga de lixiviados provenientes de los sitios de disposición final es una amenaza directa a la calidad del agua subterránea, existen otros factores, como, por ejemplo, el espesor de la zona no saturada y la estratigrafía presente por debajo del sitio, que son determinantes al momento de evaluar la potencial amenaza de contaminación del agua subterránea.

En la zona no saturada los mecanismos de migración de contaminantes incluyen procesos físicos como la advección, la dispersión y la difusión. Sin embargo, con la finalidad de llegar a la clasificación de los sitios por su amenaza al agua subterránea el proceso básico empleado en esta investigación es: la advección, que hace referencia al movimiento de los

contaminantes junto con el flujo del agua. Por tanto, la clasificación de los sitios de disposición final se realizó a partir del cálculo del tiempo de tránsito requerido por el lixiviado para fluir de manera advectiva a través de una capa de suelo. En este sentido partiendo de la ecuación de Darcy, puede describirse la tasa de flujo advectivo de lixiviados a través de una sola capa de suelo (*Figura 3.3*) como:

$$q = K \cdot i = K \frac{\Delta h}{l}, \quad (3.12)$$

donde, K es la conductividad hidráulica del suelo, i es el gradiente hidráulico, Δh es la pérdida de carga a través de la capa de suelo y l es el espesor de la capa de suelo. En tanto Giroud *et al.*, (1997), sugieren que el flujo gravitacional (*Figura 3.3b*) es el que mejor representa el flujo del lixiviado a través de la capa de suelo, en ese caso $\Delta h = h + l$, por lo tanto:

$$q = K \cdot \frac{(h+l)}{l}, \quad (3.13)$$

De igual manera, considerando que la velocidad del flujo a través del suelo entre dos puntos en la misma línea de flujo está dada por:

$$v = \frac{q}{n}, \quad (3.14)$$

De tal manera que, si se considera que el tiempo de tránsito ocurre en un estado estacionario, t o el tiempo requerido para que el lixiviado fluya advectamente a través de una capa de suelo estará dado por la ecuación 3.15:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{n \cdot l}{q}, \quad (3.15)$$

Por tanto, combinando la ecuación 3.13 con la 3.15 se obtiene el tiempo de tránsito en estado estacionario para el flujo gravitacional:

$$t = \frac{n \cdot l}{K \cdot (1 + h/l)}, \quad (3.16)$$

donde, t es el tiempo requerido para que el lixiviado fluya de manera advectiva a través de una capa de suelo bajo condiciones estacionarias; n es la porosidad, l es el espesor de la capa

de suelo; K es la conductividad hidráulica del suelo y h es la altura del lixiviado en la base del vertedero. Por tanto, la ecuación 3.16 fue la utilizada para realizar la estimación del tiempo de tránsito requerido por el lixiviado para fluir advectivamente a través de la capa de suelo.

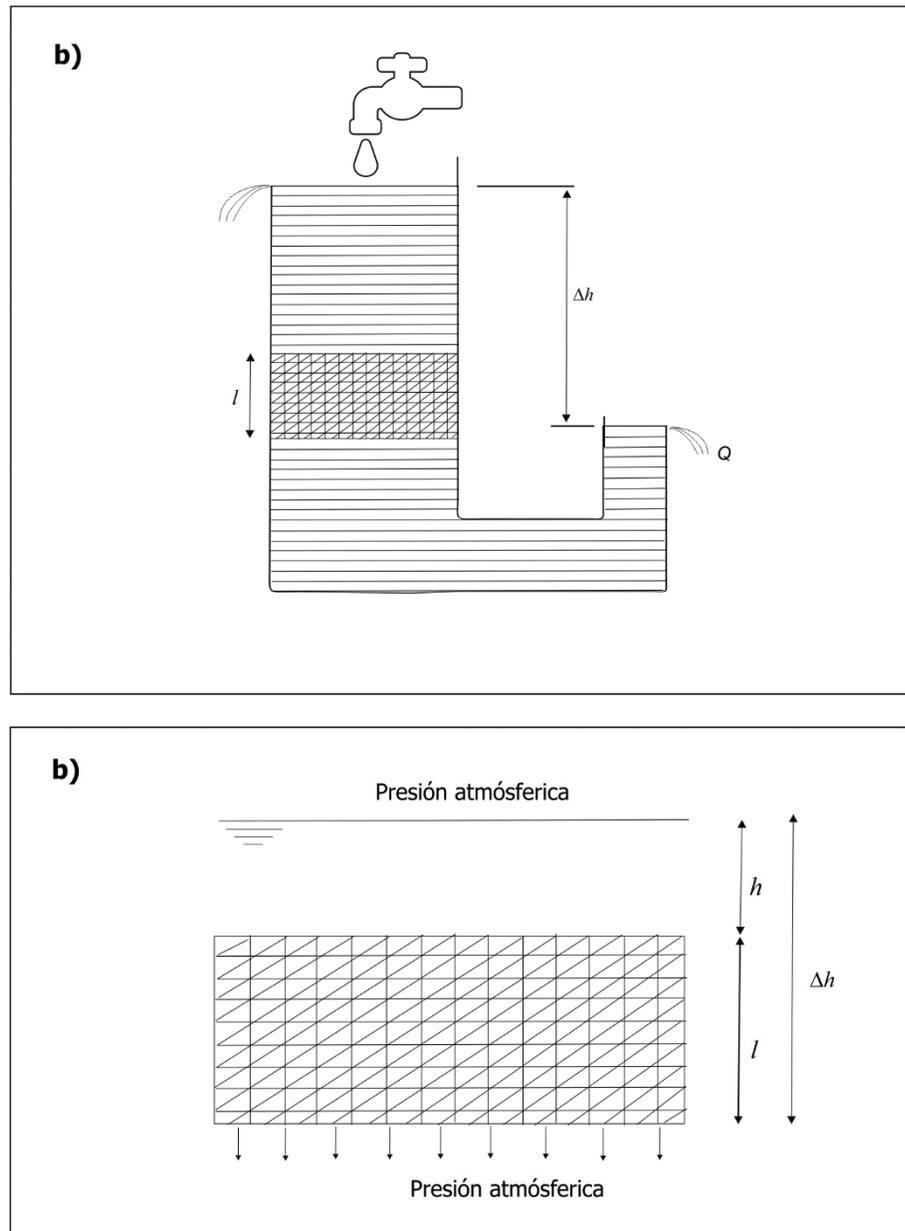


Figura 3.3 Flujo a través de una sola capa de suelo: a) con una pérdida de carga: b) con flujo gravitacional.

Para poder realizar la estimación del tiempo de tránsito fue necesario la recopilación de información referente al espesor de la zona no saturada y de la estratigrafía que subyace en cada sitio de disposición final. Las fuentes de información fueron los cortes litológicos de los piezómetros de la CONAGUA, por otra parte, se encuentra lo reportado por estudios realizados en algunos sitios de disposición final. Así mismo, para la estimación del espesor de la zona no saturada se retomaron los valores de la profundidad del nivel del agua subterránea reportados por la CTAEM (2018). En tanto como ya se conocían las cotas topográficas para la base de cada vertedero se le resta la profundidad del nivel del agua subterránea para obtener el espesor de la zona no saturada. Respecto a los valores de conductividad hidráulica y porosidad asignados a los estratos estos se obtuvieron a partir de lo reportado por Freeze y Cherry (1979).

Por su parte, para determinar el valor que se le asignaría a h (altura del lixiviado en la base del vertedero) se realizó un análisis de los datos diarios de producción de lixiviados estimados por el modelo HELP. En este sentido, el análisis se realizó mediante la gráfica de caja y bigotes (box plot, en inglés), ya que esta permite resumir, describir y analizar aspectos generales y particulares de los datos. Debido a que se representan datos centrales, adyacentes y raros (atípicos y extremos). De tal manera, que el valor utilizado fue la mediana de los datos. Una vez que se contó con todos los datos requeridos se procedió a realizar el cálculo de los tiempos de tránsito advectivo para cada sitio, de tal manera que se llegó a la clasificación de los sitios por su potencial amenaza al agua subterránea tomando como referencia el tiempo que requiere el lixiviado para llegar al agua subterránea considerando sólo el flujo advectivo.

Capítulo IV

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología desarrollada, primero se presenta la caracterización de los sitios de disposición final de residuos sólidos seleccionados, en seguida se muestra el manejo de la información utilizada en la construcción de la base de datos que permitió la aplicación de los modelos de balance de humedad, posteriormente se hace el análisis de los resultados obtenidos por el modelo WBM y el modelo HELP. A partir de los datos de la fase anterior, además, de datos como espesor de la zona no saturada y textura del suelo se presenta una clasificación de los sitios de disposición final por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea. Finalmente se presentan sugerencias de manejo de los sitios para disminuir la producción de lixiviados y por tanto minimizar la infiltración de estos hacia el agua subterránea.

4.1 Selección y caracterización de los sitios de disposición final

En el trabajo de Blanco (2007) se reportaban aproximadamente 150 sitios de disposición final que carecían de las medidas necesarias para el control de lixiviados y gases generados en el proceso de descomposición de los residuos, sin embargo, no se consideró la extensión o la cantidad de residuos depositados o su impacto al ambiente, por tanto, se consideraba como sitio de disposición final cualquier acumulación de residuos. Para llegar a la selección de los sitios se realizó una depuración de dicha base de datos, para esto se cotejó la información con lo reportado por IFOMEGEM (2013), dando una cifra preliminar de 37 sitios. Posteriormente

con el apoyo de imágenes satelitales y del programa *Google Earth Pro*, además de considerar la información disponible de cada sitio como el tonelaje depositado por día, se llegó a la identificación de ocho sitios en el área del valle de Toluca, en la *Figura 4.1* se puede observar que éstos se localizan principalmente en la zona centro-sur del área de estudio.

Cabe destacar, que, de los ocho sitios de disposición final, siete de ellos se encontraban en operación al momento de realizar el recorrido de campo y uno es un sitio clausurado. De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, donde considera relleno sanitario a aquellos sitios que cumplen con los requisitos mínimos de infraestructura para el control de lixiviados y gases generados en la descomposición de los residuos, de igual manera, un sitio no controlado es aquel que carece de toda medida preventiva para la protección del ambiente. En este sentido, cinco de los sitios seleccionados entran dentro de la clasificación de sitios no controlados: Almoloya del Río, Calimaya, Capulhuac, Metepec y Mexicaltzingo y por su parte los tres sitios restantes se catalogan como rellenos sanitarios (RESA): San Antonio la Isla, Xonacatlán y Zinacantepec; considerando esta clasificación a continuación se describen cada uno de los sitios de interés

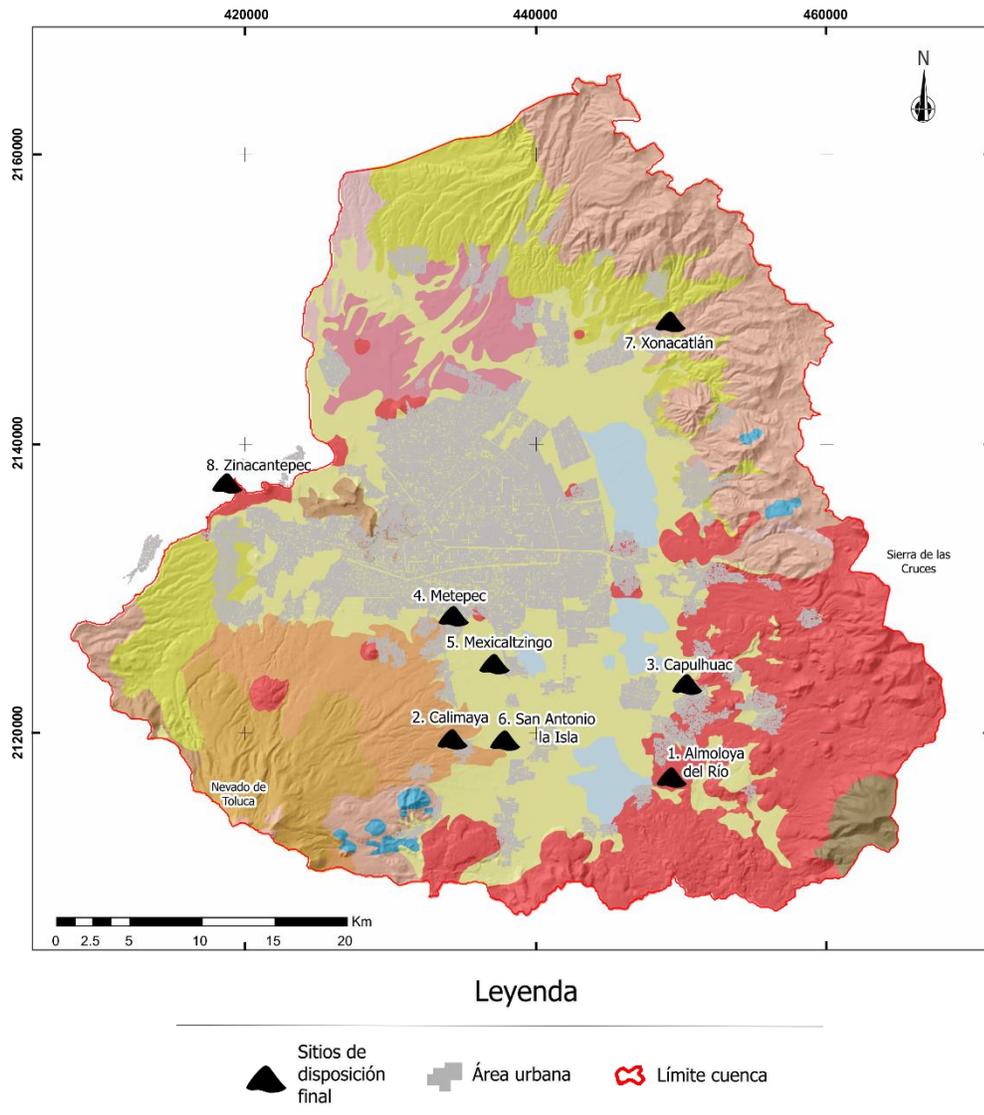


Figura 4.1. Localización de los sitios de disposición final de residuos sólidos en la cuenca del valle de Toluca. Se observa que, asimismo, en la zona centro-sur se tiene la mayor presencia de éstos. Además, se muestra el contexto geológico de cada sitio (elaboración propia).

a) Sitios no controlados

1. Almoloya del Río

Se ubica al sureste de la cabecera municipal, el vertedero comenzó a operar aproximadamente en el año de 1997, bajo la responsabilidad de la autoridad municipal, como la mayoría de los sitios no controlados, se construyó en un socavón de 0.64 hectáreas y 13 m de profundidad, sin que se haya acondicionado previamente con alguna obra de ingeniería para evitar la contaminación por lixiviados y biogás generado. Se depositan aproximadamente 7 toneladas diarias, provenientes del mismo municipio, además el sitio no está resguardado o cercado, facilitando el ingreso de los residuos sin ningún control. Actualmente se distinguen dos secciones; una de 4,545 m² que se encuentra sellada desde 2011, con una capa de 60 cm, de arena limpia bien graduada con pocas partículas de finos (SW), y la otra se encuentra a la intemperie (Torres, 2016). En el recorrido de campo se observó que la parte de residuos que se encuentra sin una cobertura fue calcinada (*Figura 4.2*), además se aprecia la acumulación de lixiviados en el fondo de la celda sin cobertura.

2. Calimaya

Se localiza en la cabecera municipal, el sitio comenzó a operar aproximadamente en el año de 2003, cuenta con un área de 4.5 hectáreas en un socavón producto de la explotación de material pétreo como arena y grava, el municipio es el encargado de administrar este sitio, sin embargo, según datos proporcionado por el municipio el único mantenimiento que se le realiza es la compactación mensual de la basura. El sitio tiene dos secciones, sin embargo, en la visita de campo se observó que solo una de ellas es la que está en funcionamiento. (*Figura 4.3*). Este sitio recibe aproximadamente 37 toneladas diarias, provenientes del mismo municipio. Además de residuos urbanos-domésticos se observó presencia de residuos textiles, así como cascajo.

Durante el recorrido de campo se observó que el sitio se encontraba rodeado por áreas de cultivo, las cuales se ven afectadas por la dispersión de los residuos plásticos (bolsas principalmente), debido a la falta de una cobertura y/o barda perimetral que limite el movimiento.

3. Capulhuac

El vertedero de Capulhuac se ubica en el suroeste del municipio, cuenta con un área de 2.2 hectáreas, según los registros del Gobierno de Estado de México el vertedero recibe aproximadamente 30 toneladas diarias de residuos, de origen doméstico principalmente, no obstante, también se reciben residuos de origen animal como viseras y restos óseos, producto de la actividad económica de la zona que es la producción de barbacoa. El municipio es el encargado del manejo de este sitio, cabe señalar que este sitio es catalogado como centro de transferencia por las autoridades, sin embargo, este funciona más como un centro de almacenamiento. Según datos del municipio cada mes se realiza la transferencia de la basura hacia el relleno sanitario de Xonacatlán.

Este sitio cuenta con bardas perimetrales que limitan hasta cierto punto la movilidad de los residuos (principalmente bolsas plásticas), desafortunadamente dichas bardas están a punto de colapsar por la presión generada por la acumulación de los residuos y la falta de mantenimiento (*Figura 4.4a*).

Hasta hace un par de años se realizaba lombricomposta con la carne y huesos de ingresaban, misma que era vendida y el dinero recolectado servía para el mantenimiento del lugar, sin embargo, esta actividad se detuvo sin ninguna explicación, generando una mayor concentración de este tipo de residuo. Durante la visita al vertedero se observó la presencia de maquinaria encargada de distribuir los residuos, además, la filtración de lixiviados a través de las bardas perimetrales (*Figura 4.4b*).

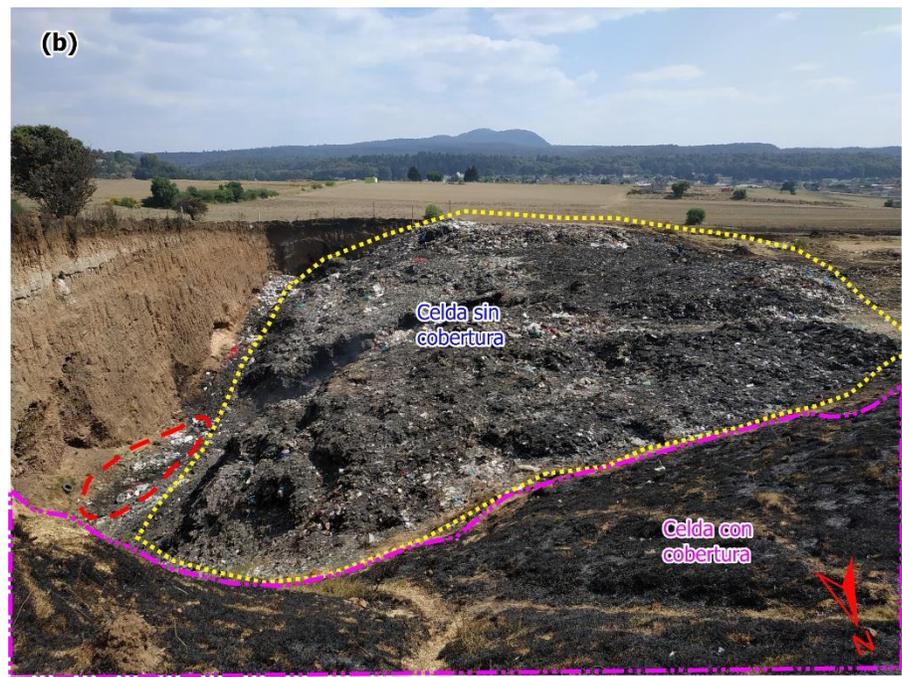


Figura 4.2. a) Características físicas que presentan las celdas del vertedero de Almoloya del Río; b) Fotografía panorámica de la situación actual del vertedero. En la zona delimitada en rojo se encuentra una acumulación de lixiviados.

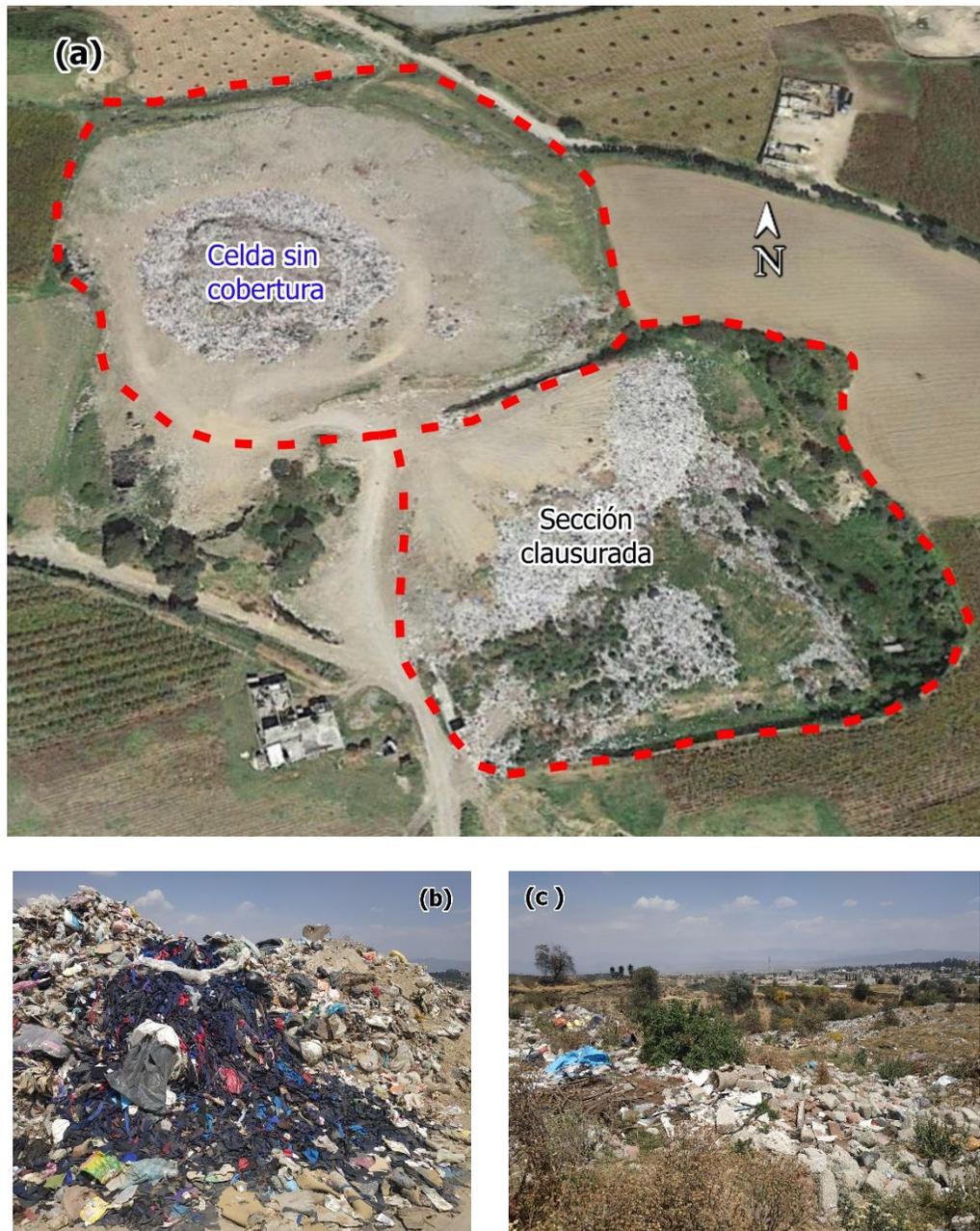


Figura 4.3. a) Distribución de las secciones del vertedero de Calimaya, donde se observa que ambas celdas se encuentran rodeadas por áreas de cultivo de maíz, b) y c) Fotografías del tipo de residuos depositados en el vertedero de Calimaya, además de residuos domésticos se visualiza residuos textiles y presencia de cascajo.



Figura 4.4. a) Se muestra la ubicación del área utilizada para la separación de residuos en el vertedero de Capulhuac, así como la ubicación del sitio donde se observó la fuga de lixiviados, b) Se aprecia la filtración de lixiviados a través de las paredes perimetrales del sitio; c) Fotografía del área donde se realiza la separación de PET, cartón y demás residuos que pueden ser reciclados.

4. Mexicaltzingo

Se localiza al poniente de la cabecera municipal, el ayuntamiento es el encargado de su manejo, sin embargo, este se encuentra en condiciones lamentables, ya que funciona fuera de la normatividad, los residuos se depositan sin un previo tratamiento, sobre un socavón producto de la extracción de materiales pétreos, el área para depósito de los residuos cubre un área de 2 hectáreas, dejando libre una superficie de aproximadamente $3,800 m^2$, que funciona como laguna de lixiviados, además, en la visita de campo se observó que en esta contiene residuos en su interior derivado del colapso del montículo de residuos (*Figuras 4.5 y 4.6*). El vertedero inicio a operar en el año de 1999 y el socavón contaba con una profundidad de aproximadamente 8 m por debajo del nivel de la superficie del terreno (Gómez, 2014), considerando que en este sitio se han depositado varias capas de residuos, se calcula que la capa de residuos tiene una profundidad aproximada de 18 m.

Además de residuos sólidos urbanos (domésticos), se encuentra residuos orgánicos provenientes de deshechos animales, en el municipio se dedican a la producción de carnitas por tanto los desperdicios de esta actividad son depositados en el vertedero (Gómez, 2014). Durante el recorrido de campo se observó que una parte del sitio contaba con una barda perimetral, sin embargo, este colapso a consecuencia de la carga de residuos y la falta de mantenimiento. De igual manera, se notó la presencia de “madrigueras” ocupadas por perros callejeros.

5. Metepec (sitio clausurado)

El vertedero de Metepec es el único sitio clausurado que se estudia en este trabajo, este sitio empezó a operar en el año de 1979 hasta el 2009 cuando fue clausurado, tiene un área de 9 hectáreas (*Figura 4.7*). La falta de planeación del crecimiento urbano origino que este sitio quedara ubicado prácticamente en el centro de plazas comerciales, universidades y centros de salud que se vieron y ven afectados por el funcionamiento del vertedero.

El municipio era el encargado de administrar este sitio, durante su operación este vertedero recibía los residuos tanto del propio municipio, así como de municipios como Toluca, Lerma, San Mateo Atenco, Ocoyoacac, y Zinacantepec, lo que contribuyó al agotamiento prematuro de la capacidad de almacenamiento del vertedero (Morales, 2008).

Para su clausura en el año 2009 los residuos se cubrieron con una capa de aproximadamente 50 cm de profundidad el material utilizado fue tepetate, posterior a esto en el vertedero se dio paso al desarrollo del crecimiento de pasto, con el tiempo el municipio ha invertido para transformar este sitio en un parque. No obstante, en la visita se observó que se usa como estacionamiento para los camiones recolectores, además de que es el único sitio que está cubierto de vegetación (pasto), aún se pueden observar los pozos de biogás.



Figura 4.5. Distribución de los componentes que integran el vertedero de Mexicaltzingo, se puede observar que el sitio se encuentra rodeado por áreas de cultivo.



Figura 4.6 a) Fotografía del área que funciona como colector de lixiviados para el vertedero de Mexicaltzingo, b) Pozo de biogás del vertedero de Mexicaltzingo.



Figura 4.7. Situación actual del vertedero de Metepac, el crecimiento urbano de la zona donde se ubica ha ocasionado que el sitio quede a escasos metros de áreas habitacionales, centros comerciales y universidades.

b) Rellenos sanitarios

6. Relleno sanitario de San Antonio la Isla

El relleno sanitario de San Antonio la Isla se ubica al oeste del municipio del mismo nombre, según los registros de la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México el relleno sanitario inicio operaciones en 2008 operado por la compañía denominada “La Estación de San Antonio S.A. de C.V”, cubriendo un área de 9.6 hectáreas, además cuenta con una laguna de evaporación de lixiviados de 1.65 hectáreas (*Figura 4.8*). De acuerdo con los datos presentados por la Secretaría de Seguridad Ciudadana del Estado de México en el 2012 el relleno sanitario recibía los residuos de 10 municipios del Estado de México, entre ellos se encuentra los del propio municipio, así como del municipio de Toluca, Metepec, Atizapán, Tenango, entre otros, recibiendo a diario aproximadamente 900 toneladas al día de residuos.

En la visita de campo se pudo observar que, el relleno cuenta con geomembrana para la protección del acuífero, sin embargo, no se pudo verificar las condiciones de instalación, por tanto, en la cuantificación de lixiviados se asumió una mala calidad de instalación. Además, en dichas visitas se logró observar que existía la fuga de lixiviado sobre los márgenes del relleno sanitario, cabe agregar que la visita se dio en temporada de estiaje.

7. Relleno sanitario de Xonacatlán

Se ubica en la porción centro del municipio, el relleno sanitario inicio operaciones en 2006 en la celda uno la cual tiene un área de una hectárea, en el 2009 entro en operación la celda dos que tiene un área de 5 hectáreas, esta operado por Grupo Contadero, S.A. de C.V. El relleno sanitario recibe los residuos del propio municipio, así como del municipio de Lerma, Temoaya, San Mateo, Huixquilucan, entre otros, recibiendo a diario aproximadamente 1,500 toneladas de residuos. En la visita de campo se pudo observar, que este cuenta con geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) para la protección del acuífero, esta tiene un espesor de 1.0 mm, sin embargo, se desconocen las condiciones de su instalación. El relleno cuenta con un cárcamo de lixiviados de donde posteriormente son bombeados para una laguna de evaporación la cual tiene un área de 1,000 m², según cifras de los encargados al año se obtiene 1,200 m³ de lixiviados (*Figura 4.9*).

Respecto a la disposición de los residuos primero se coloca la geomembrana, posteriormente se colocan aproximadamente 30 *cm* de residuos diarios hasta alcanzar los 8 *m* para posteriormente colocar una capa de cobertura (tepetate) de 30 *cm* y continuar con la colocación de más residuos hasta volver a alcanzar los 8 *m*, hasta el momento de la visita la celda uno ya estaba clausurada teniendo una profundidad de residuos promedio de 45 *m* y una capa de cobertura final de 80 *cm*. Respecto a la celda dos esta tiene una profundidad de 60 *m*, según los administradores esta celda alcanzara una altura de 100 *m*.

8. Relleno sanitario de Zinacantepec

Se ubica en la zona norte del municipio, inicio operaciones en 2006 cuenta con un área de aproximadamente 12 hectáreas, sin embargo, no toda el área es utilizada para depósito de residuos a diferencia del relleno de San Antonio la Isla y el de Xonacatlán. Hasta el momento cuatro celdas han sido clausuradas, la celda cinco está en operación, la celda 6 está en construcción para su posterior operación (*Figura 4.10*), el relleno está operado por la empresa Mantenimiento y Servicios Ambientales S.A de C.V. Recibe los residuos del propio municipio, así como del municipio de Toluca, Almoloya de Juárez, entre otros, recibiendo a diario entre 900 y 1,000 toneladas de residuos. En la visita de campo se pudo observar, que este cuenta con una laguna de evaporación de lixiviados, así como un área destinada a la conservación.

Un dato interesante es que para la celda II se reporta un recubrimiento inferior que está constituido por tres capas impermeables, la primera conformada por material arcilloso con un espesor de 0.30 *m* compactado al 90% de la prueba proctor, la segunda se compone de una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1.5 *mm* de espesor, la tercera capa que servirá de protección a la geomembrana está compuesta por 0.20 *m* de material arcilloso compactado al 85% de la prueba proctor. Para el manejo de lixiviados se cuenta con cárcamos y drenes colectores que confluyen en la laguna de evaporación (Marin *et al.*, 2013).

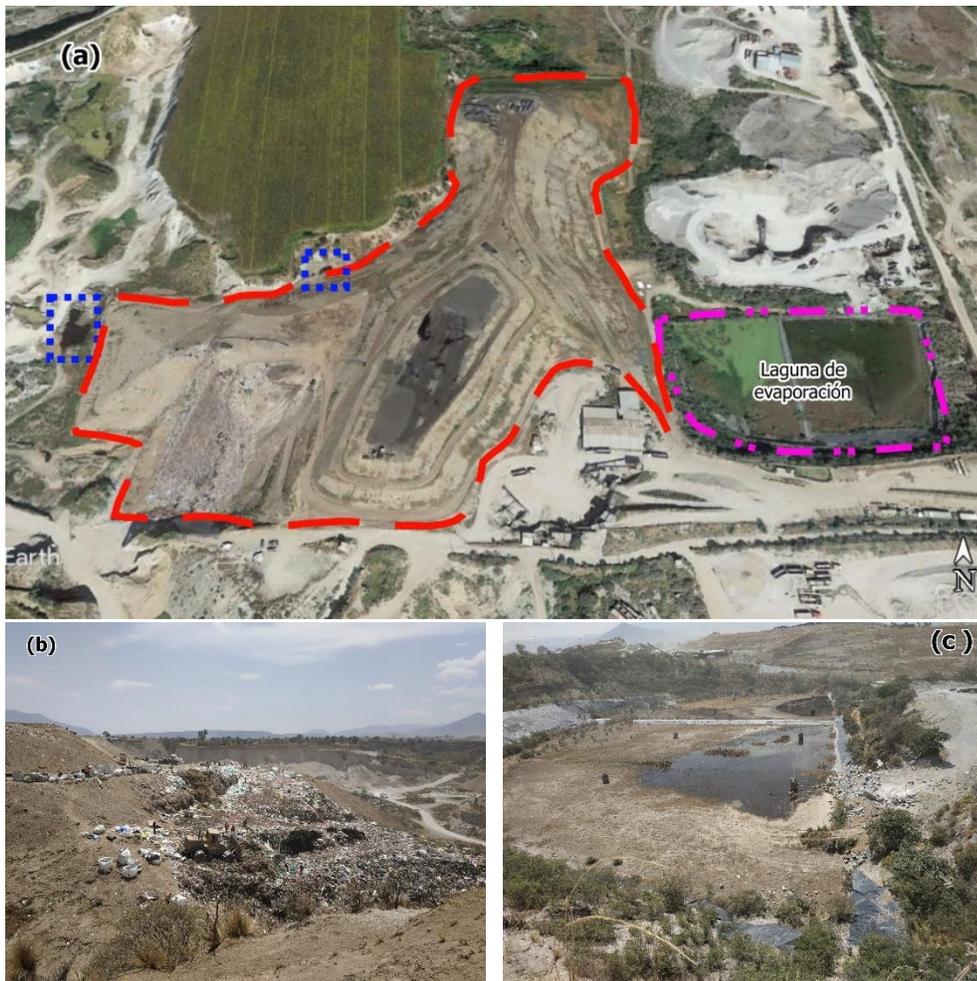


Figura 4.8 Vista parcial del relleno sanitario de San Antonio la Isla: a) Plano de distribución de los componentes del sitio, en rojo se muestra el área utilizada para el depósitos de los residuos, asimismo, se aprecia la laguna de evaporación de lixiviados (color rosa), por su parte los polígonos de color azul son pequeñas lagunas de lixiviados formadas por la fuga de éstos alrededor del sitio, b) Fotografía de la maquinaria encargada del acomodo de los residuos, dentro del relleno sanitario se realiza la separación de residuos tales como el PET y otros que pueden ser reutilizados, c) Fotografía de la laguna de evaporación de lixiviados, se aprecia que esta cuenta con geomembrana para prevenir la fuga de lixiviados. Debido a que la visita fue en temporada de estiaje se observa la laguna parcialmente seca.



Figura 4.9 a) Plano de distribución de las celdas del relleno sanitario de Xonacatlán, b) Fotografía de la disposición de la geomembrana en una pared lateral del relleno sanitario, lo que hace suponer que ésta está colocada en toda la celda.



Figura 4.10 Distribución de las celdas que componen el relleno sanitario de Zinacantepec, es de resaltar que la laguna de evaporación es pequeña para las dimensiones del relleno sanitario.

De manera general para todos los sitios de disposición final, a excepción del vertedero de Capulhuac, el método de construcción utilizado es una combinación de área y trinchera, la combinación de ambos métodos representa un aumento en la vida útil del relleno sanitario o vertedero. A excepción de Capulhuac y Zinacantepec, el resto de los vertederos se construyeron aprovechando los espacios creados a partir de la explotación de materiales pétreos, por lo que en su estratigrafía puede encontrarse arenas, gravas y arcillas, en diferentes porcentajes para cada sitio.

En el recorrido de campo se observó que en los sitios no controlados al no haber una compactación y/o cobertura, alrededor de los sitios se encuentra una gran cantidad de bolsas plásticas, generando una mala imagen a la zona donde se ubica el vertedero. Además, los cuatro sitios no controlados están rodeados por zonas agrícolas y en algunos casos asentamientos humanos generando un foco de contaminación severo. Por su parte en los rellenos sanitarios la cobertura de los residuos no es diaria, esta se realiza hasta que la capa de residuos alcanza el espesor deseado.

En la *Tabla 4.1* se presenta el resumen de las características de los sitios de interés recabadas en la primera etapa de trabajo, se muestra la cantidad de toneladas de residuos recibidos por día, el área que cubre, el año de inicio de operación, la profundidad de la capa de residuos, así como su clasificación según la norma NOM-083-SEMARNAT, dicha clasificación se basa en el tonelaje de residuos sólidos recibidos por día (*Tabla 2.1, capítulo 2*), dicha información se ocupa para la aplicación de los modelos para cuantificar el volumen de lixiviados.

4.2 Construcción de la base de datos para la estimación del volumen de lixiviado en sitios de disposición final

Como se mencionó en el apartado de antecedentes hasta la fecha se han desarrollado varios modelos hidrológicos para la estimación de la producción de lixiviados, teniendo como característica básica el balance hídrico. Por tanto, en este trabajo se cuantifica el volumen de lixiviados generados en los sitios de disposición final por dos metodologías: la primera es el Método de Balance Hídrico (WBM), la segunda mediante el Modelo de Evaluación Hidrológica de Rellenos Sanitarios (HELP por sus siglas en inglés). De manera general, el

desarrollo del método WBM es determinar el agua disponible para infiltración, basándose en la evapotranspiración, el coeficiente de escurrimiento, posteriormente se calcula el cambio de humedad del suelo, así como el cálculo de la evapotranspiración actual para finalmente calcular la percolación. Por su parte el modelo HELP, comienza el cálculo en la capa superficial por medio de la evapotranspiración y escurrimiento, posteriormente va realizando el cálculo para cada una de las capas subyacentes hasta completar el perfil especificado por el usuario. Para su recopilación los parámetros se dividieron en dos: datos meteorológicos y parámetros estimados. A continuación, se describen cada uno de ellos.

4.2.1 Análisis y tratamiento de los datos meteorológicos

a) Análisis de la precipitación

El período de análisis comprende 22 años de registros desde octubre de 1989 hasta septiembre de 2011, que es el periodo donde se tiene mayor continuidad en los registros, por tanto, los coeficientes de correlación de la *ecuación 3.1* se calcularon para dicho periodo, posteriormente se realizó el llenado de los datos faltantes de las estaciones seleccionadas para cada vertedero, es importante aclarar que debido a que uno o más vertederos entran en el área de influencia de una estación, hay estaciones que se repiten, en la *Tabla 4.2* se presentan la estación a utilizar para cada vertedero, en la *Figura 4.11* se puede apreciar la ubicación de las estaciones respecto a cada sitio de disposición final. Con los datos de las estaciones se calculó el promedio anual para determinar los años hidrológicos, siendo los años 1994-1995, 1992-1993, 2010-2011, el año húmedo, el año promedio y el año seco respectivamente. La *Tabla 4.3* presenta un resumen de los valores de la precipitación promedio anual en milímetros (*mm*), por estación meteorológica de 1989-2011. En la *Figura 4.12* se presenta la precipitación por año hidrológicos para cada estación, en esta se puede observar que el promedio anual de los años se encuentra dentro de la media anual para el valle de Toluca.

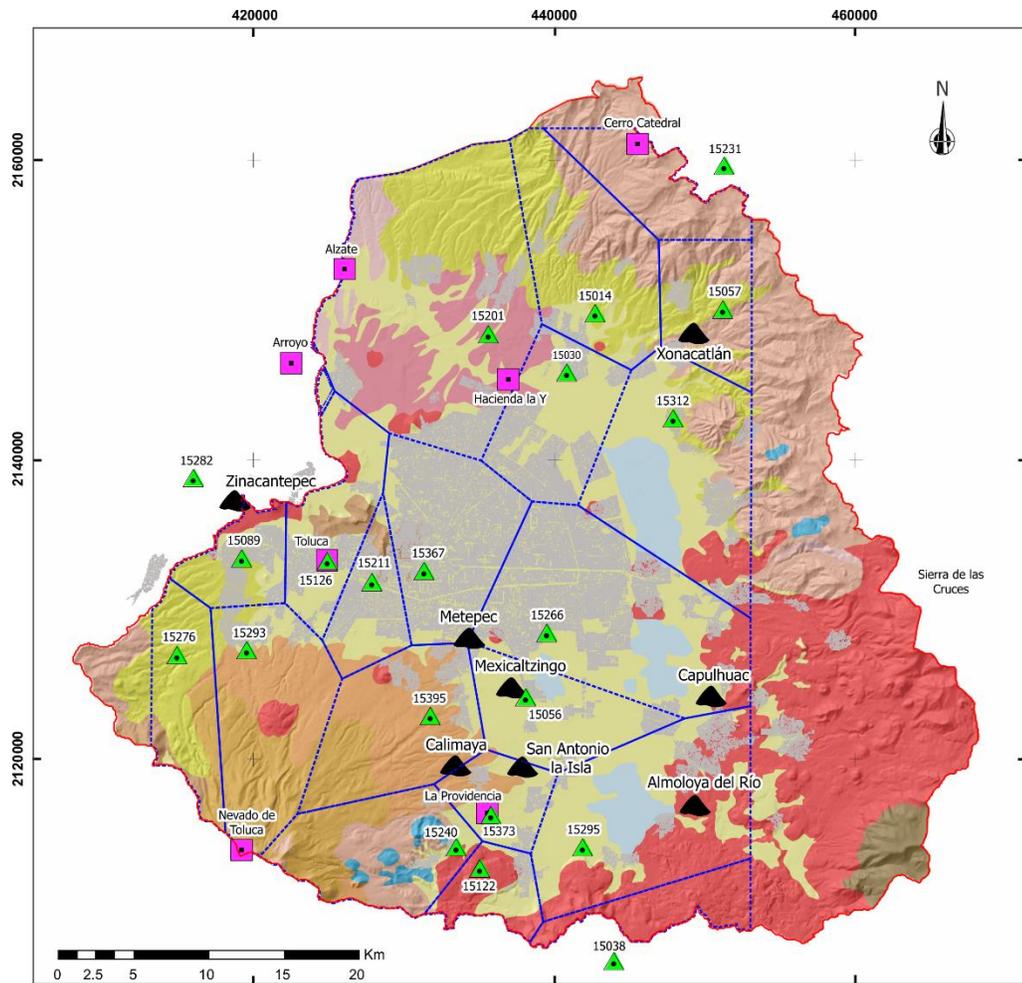
Tabla 4.1. Principales características de los vertederos presentes en la cuenca del valle de Toluca (Cárdenas, 2014; GEM, 2012; Macedo-Miranda et al., 2011; Torres, 2016, Morales, 2008, Gómez, 2014).

No.	Nombre del sitio	Longitud	Latitud	Tipo de sitio	Ton/día	Inicio de operación	Área (ha)	Profundidad de los residuos (m) ¹	Clasificación NOM-083
1	Almoloya del Río	-99.482	19.1455	Sitio no controlado	7	1997	0.64	13	D
2	Calimaya	-99.6255	19.1695	Sitio no controlado	37	2003*	4.5	20 ²	C
3	Capulhuac	-99.4714	19.2037	Sitio no controlado	30	2004	2.2	5	C
4	Metepc	-99.6252	19.246	Sitio clausurado	-	2009 ⁺	9	40	-
5	Mexicaltzingo	-99.5979	19.2165	Sitio no controlado	19	1999	2.0	18	C
6	San Antonio la Isla	-99.5905	19.1684	Relleno sanitario	900	2008	9.6	40 ²	A
7	Xonacatlán	-99.4828	19.4301	Relleno sanitario	1500	2006	5**	60	A
8	Zinacantepec	-99.7724	19.3284	Relleno sanitario	900	2006	12	41 ²	A

*Los datos fueron calculados con ayuda de un SIG. ** área de la celda dos que será la celda analizada. ⁺Vertedero fuera de operación, año de clausura.
¹ La profundidad de los residuos se estableció con base a la revisión bibliográfica, además de la ayuda de SIG. ² Altura promedio. Toneladas al día:
A: Mayor a 100, B: 50-100, C: 10-49 y D: menor de 10

Tabla 4.2. Estaciones meteorológicas utilizadas por cada sitio de disposición final de residuos sólidos, para la obtención de la información meteorológica necesaria para la cuantificación de la producción de lixiviados, la selección de cada estación se realizó a partir de su área de influencia (Figura 4.11).

No.	Nombre del sitio	Clave y nombre de la estación meteorológica
1	Almoloya del Río	15295 – San Pedro Zictepec D-10
2	Calimaya	15395 – Zoológico de Zacango, México
3	Capulhuac	15266 – CODAGEM, México
4	Metepc	15266 – CODAGEM, México
5	Mexicaltzingo	15056 – Mexicaltzingo, México
6	San Antonio la Isla	15373 – Rancho Villa Verde, México
7	Xonacatlán	15057 – Mimiapan
8	Zinacantepec	15089 – San Francisco Tlalcilcalpan



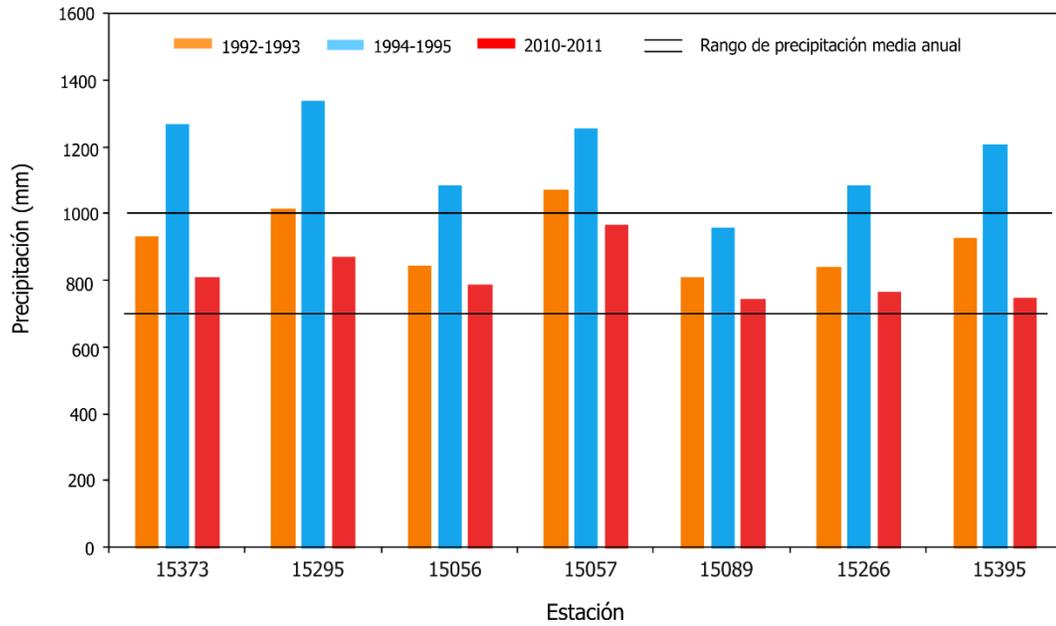
Leyenda



Figura 4.11 Ubicación de las estaciones meteorológicas y las estaciones automáticas dentro de la cuenca del valle de Toluca. Se observa que, en la zona centro-sur, se tiene la mayor presencia de sitios de disposición final de residuos contrastando con la ubicación de las estaciones que se encuentran en la zona norte y oeste de la cuenca. En color azul se presenta el área de influencia de cada estación.

Tabla 4.3 Valores de precipitación por año hidrológico para el periodo de 1989-2011 por estación. Los años hidrológicos seleccionados se encuentran resaltados dentro de la tabla, se observa que la precipitación anual para los 22 años se encuentra dentro del rango de precipitación media anual de 700 a 1000 mm.

Año hidrológico	Clave de estación							Precipitación promedio anual (mm)
	15373	15295	15056	15057	15089	15266	15395	
1989-1990	644.2	1139.9	548.5	1121.3	833.4	861.7	666.2	830.7
1990-1991	907.2	1054.2	695	1580.3	768.5	978.9	869.2	979.0
1991-1992	858.2	1573.7	825.2	1304.4	850.7	878.9	816.9	1015.4
1992-1993	933	1018	846	1075	813.2	841	931	922.5
1993-1994	883.7	1230	778.6	948.6	715.2	790.1	900.4	892.4
1994-1995	1269	1340	1087	1258	958.4	1086.5	1211	1172.8
1995-1996	846	1171.2	862.7	1014	845.6	795.7	608	877.6
1996-1997	813.7	1218.3	808.3	942.3	997.3	868.7	627.5	896.6
1997-1998	991.5	951.6	989	1065.7	899.2	1057.7	689.5	949.2
1998-1999	786.6	988.3	767.1	1151.1	824.4	855.5	912.6	897.9
1999-2000	866.2	1034.3	739.7	1134.1	887.6	884.8	886	919.0
2000-2001	1015.8	1265.9	1013.8	1146.1	1018.2	907.6	1049.9	1059.6
2001-2002	726.8	1026.4	790.1	969.8	765.6	755.1	798.5	833.2
2002-2003	613.6	1007.2	960.8	1238.5	832.2	1051.3	668	910.2
2003-2004	750.3	1113.4	1040.5	1340	912.2	905	608.1	952.8
2004-2005	693.3	1272.3	884	864	718.6	738	720	841.5
2005-2006	888.5	1139.7	1068.1	1197.4	989.3	1026.7	755.9	1009.4
2006-2007	897	1132.9	930.7	1154.4	868	897.7	788.2	952.7
2007-2008	812.3	1313.5	1277	1119.9	850	841	779.3	999.0
2008-2009	882.8	850	850	1164.5	837.7	957.5	962.8	929.3
2009-2010	991.5	871	989.9	1364.4	1083	821.6	1028	1021.3
2010-2011	810	874	791	967	744.8	767	750	814.8

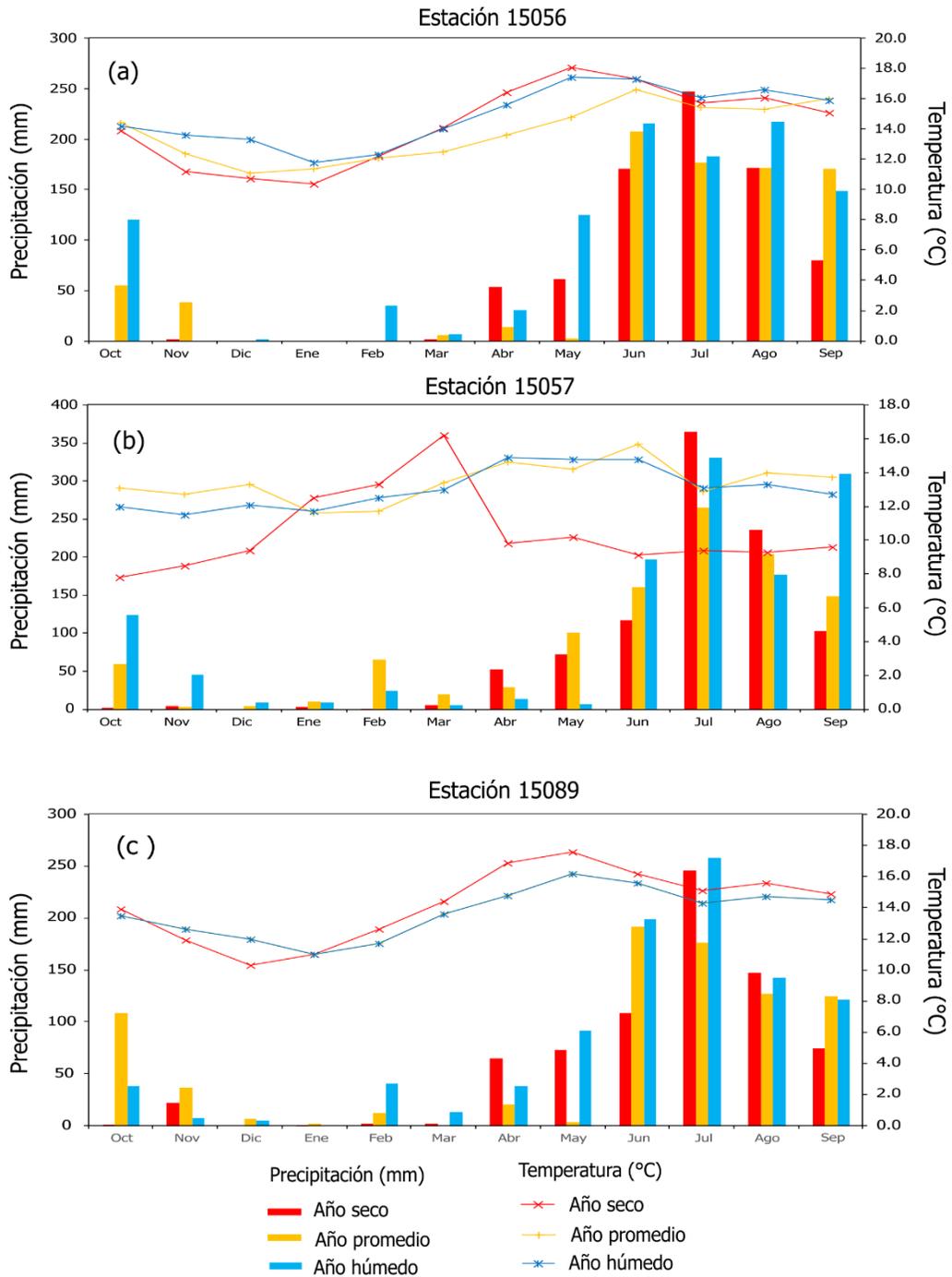


Figuras 4.12. Precipitación promedio de los años hidrológicos por estación en el valle de Toluca. Las líneas color negro representan el rango de precipitación media anual de la cuenca del valle de Toluca.

b) Análisis de la temperatura

En el caso de la temperatura el llenado de los datos faltantes se realizó solo para los años hidrológicos, seleccionados en la etapa anterior, es decir, año seco 2010-2011, año promedio 1992-1993 y año húmedo 1994-1995, sin embargo, para definir los coeficientes para el análisis de regresión utilizado para completar los datos se utilizó el periodo comprendido entre 1989 a 2011.

En las *Figuras 4.13* a la *4.15* se presentan el comportamiento de la temperatura de manera mensual, también se muestra la precipitación para cada una de las estaciones utilizadas en la cuantificación de la generación de lixiviados. En cada figura se presentan los tres años hidrológicos, se puede observar que las temperaturas máximas se presentan entre los meses de abril, mayo y junio. Por su parte, las temperaturas más bajas comienzan a registrarse a partir del mes de noviembre siendo los meses de diciembre y enero los más fríos. En el caso de precipitación esta se presenta de manera más marcada en los meses de junio a septiembre, y los meses de noviembre a abril se considera la temporada de estiaje.



Figurara 4.13. Temperatura y precipitación mensual para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo de las estaciones: a)15056, b)15057 y c)15089.

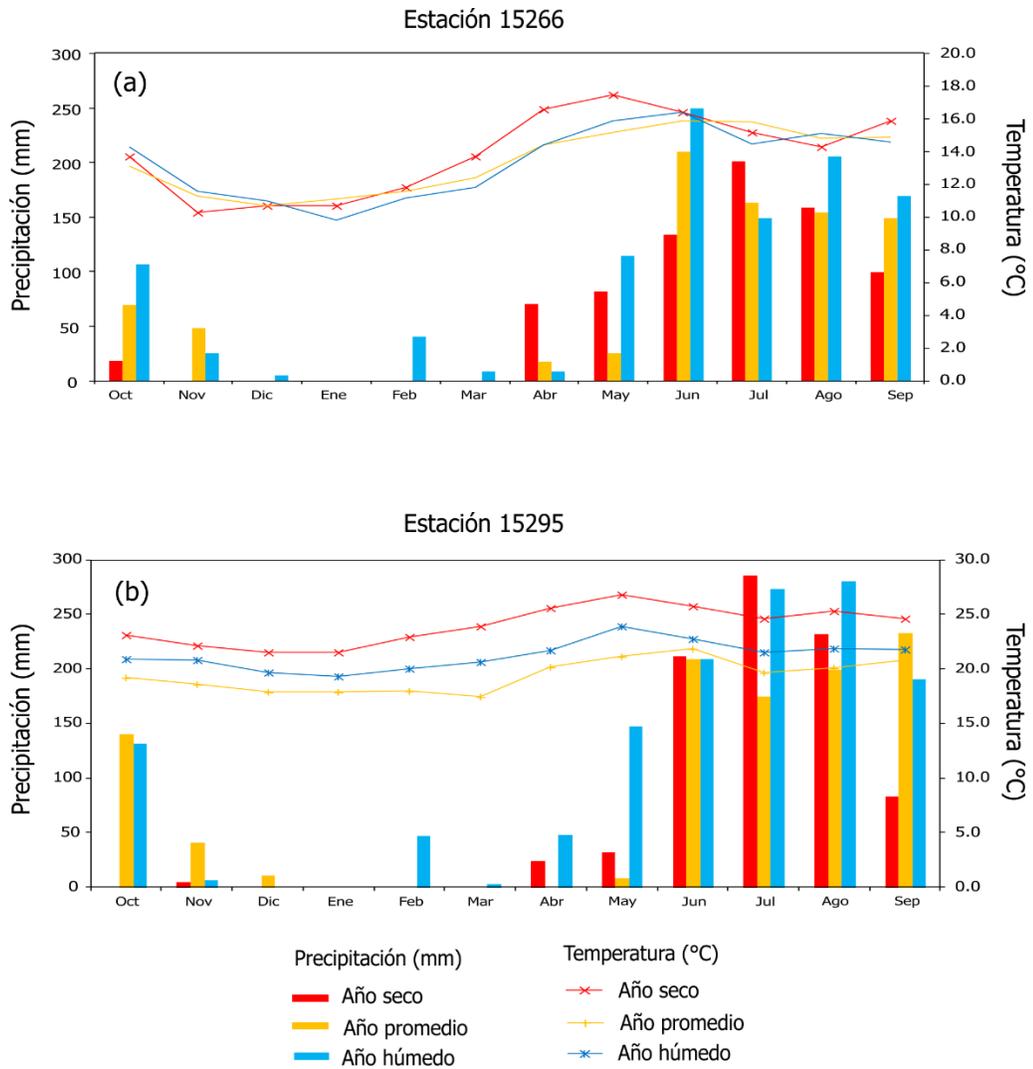


Figura 4.14. Temperatura y precipitación mensual para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo de las estaciones: a)15266 y b)15295.

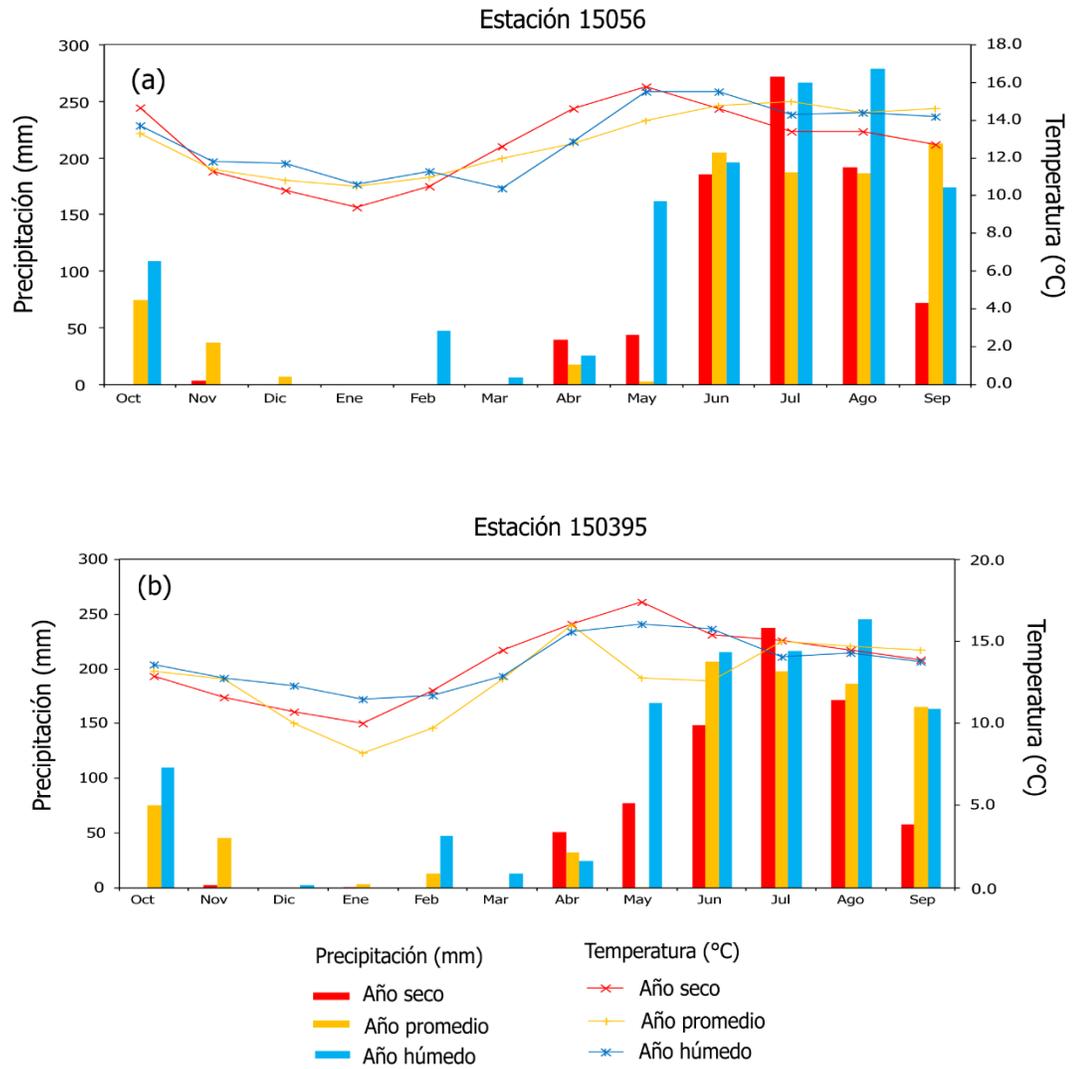


Figura 4.15. Temperatura y precipitación mensual para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo de las estaciones: a) 15373 y b) 15395.

c) Análisis del rendimiento de los modelos utilizados en el llenado de los datos meteorológicos faltantes

Con el fin de analizar la precisión de los valores estimados, los resultados obtenidos por los métodos aplicados para completar las series de datos climatológicos fueron evaluados mediante cinco criterios de análisis estadístico. Estos son el error máximo (ME), el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (CD), la eficiencia de modelado (EF) y el coeficiente de masa residual (CRM). Sus expresiones matemáticas están ampliamente definidas en la literatura hidrológica (ecuaciones 3.4-3.8).

En la *Tabla 4.4* se presentan los valores obtenidos para el ME, el RMSE, el CD, el EF y el CRM. Los valores obtenidos para la temperatura mínima y máxima fueron similares a los obtenidos por Stahl *et al.*, (2006), donde se encontraron valores para RMSE que oscilan entre 1.42 y 2.69, sin embargo, mientras más bajo se el valor de RMSE el rendimiento del modelo puede indicarse como óptimo. Para algunos casos los valores del EF nos indican que los valores medidos promediados mostrarían una mejor estimación que los valores obtenidos a partir de la aplicación de los métodos para completar los datos. Además, los valores obtenidos de CRM nos indican una ligera tendencia a sobreestimar los valores tanto de precipitación como de temperatura, por tanto, si solo se considera únicamente el CRM los modelos aplicados obtuvieron un bajo desempeño.

d) Análisis de los datos de la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento

Debido a la falta de estaciones automáticas en la zona sureste de la cuenca, la estación La Providencia fue la utilizada para cinco de los ocho vertederos, la estación de Toluca se ocupó para los vertederos de Metepec y Zinacantepec, finalmente para el sitio de Xonacatlán se utilizó la estación automática de Hacienda de la Y. Los registros obtenidos de las estaciones de Toluca y Hacienda de la Y fueron lecturas para cada hora, por ello, fue necesario el cálculo del promedio diario para la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa de ambas estaciones. Para la velocidad del viento una vez que se obtuvo el promedio diario se procedió a calcular el promedio anual. En el caso de la humedad relativa fue necesario el cálculo del promedio trimestral.

Tabla 4.4 Valores de los criterios de ajuste para la evaluación del desempeño de los modelos empleados para el llenado de los datos faltantes de la precipitación, la temperatura mínima y máxima diarias.

Estación	Variable	Índices				
		ME	RMSE	CD	EF	CRM
15295	Precipitación	57.60	5.86	2.25	0.53	0.23
	T mínima	17.50	8.20	0.23	-3.54	0.53
	T máxima	11.00	3.81	1.05	-0.28	0.09
15266	Precipitación	16.30	2.60	1.38	0.80	0.04
	T mínima	9.70	2.44	1.49	0.66	0.04
	T máxima	9.30	2.45	1.27	0.19	-0.02
15056	Precipitación	43.50	5.50	1.06	-0.08	-0.47
	T mínima	11.60	2.53	1.31	0.62	-0.02
	T máxima	10.40	2.88	1.11	-0.04	0.06
15373	Precipitación	34.00	5.94	1.29	-0.29	0.03
	T mínima	12.80	3.60	2.28	0.18	0.38
	T máxima	15.70	5.69	0.23	-3.99	-0.22
15057	Precipitación	41.00	5.12	1.35	0.46	0.00
	T mínima	13.10	4.83	0.27	-3.41	-0.35
	T máxima	19.90	4.34	1.57	-0.29	-0.10
15089	Precipitación	33.00	3.25	1.21	0.59	-0.04
	T mínima	8.80	2.44	0.59	0.42	0.16
	T máxima	12.00	2.42	0.77	0.15	0.06
15395	Precipitación	58.50	5.76	1.39	-0.04	-0.13
	T mínima	10.00	2.86	1.11	0.43	0.03
	T máxima	12.50	3.01	1.71	0.10	0.03

Un aspecto para resaltar es que las estaciones automáticas comienzan con registros para el año 2008, sin embargo, es el periodo de 2012-2017 en el cual las tres estaciones presentan registros, por tanto, no se cuentan con registros para los años hidrológicos, en este caso los valores utilizados son los promedios de los registros de cada estación de un total de cinco años. En la *Figura 4.16* se presenta la radiación promedio diaria para las tres estaciones, se observa que al igual que la temperatura máxima los valores máximos de radiación se presentan entre los meses de marzo a mayo, a pesar de que los valores para las tres estaciones tienen un comportamiento similar, se aprecia que los valores registrados en la estación automática de Toluca presentan una mayor fluctuación. Por su parte la *Tabla 4.5* se presentan los valores trimestrales de la humedad relativa y el promedio anual de la velocidad del viento para el periodo de 2012-2017, obtenidos de las EMAs, se observa que los valores de humedad relativa son similares para las tres estaciones.

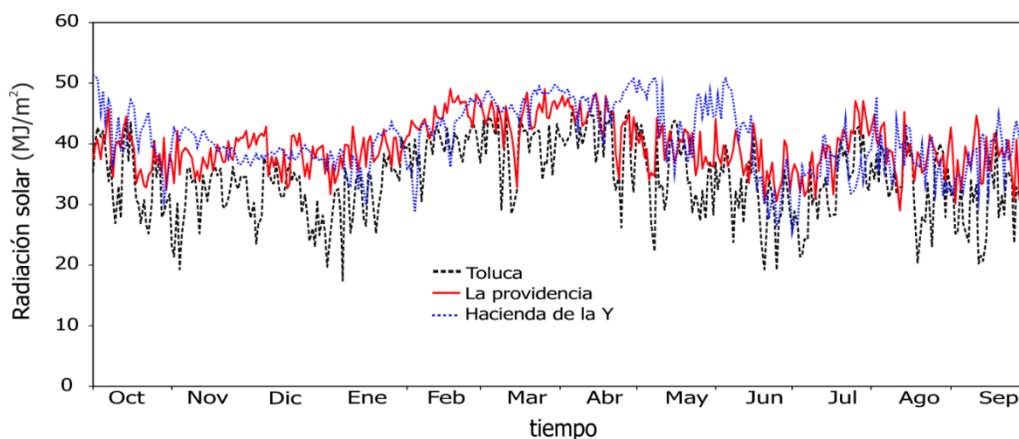


Figura 4.16. Radiación solar promedio diaria para el periodo 2012-2017 de las tres estaciones automáticas localizadas en el valle de Toluca, cuya información fue utilizada para la aplicación del modelo HELP.

Tabla 4.5. Valores promedio de humedad relativa y velocidad del viento para el periodo 2008-2017, obtenidos a partir de la información recopilada de las estaciones automáticas localizadas en el valle de Toluca.

Estación	Humedad relativa % (trimestral)				Promedio anual del viento (km/h)
	1er	2do	3er	4to	
Hacienda la Y	72.0	60.0	63.0	85.0	7.6
La Providencia	73.0	57.0	66.0	82.0	4.0
Toluca	72.0	55.0	60.0	77.0	5.1

4.2.2 Procesamiento de los datos estimados

a) Índice del área foliar

La *Tabla 4.6* presenta los rásters tanto del LAI como del NDVI utilizados para la estimación del valor máximo del LAI, se simplificaron los nombres para un fácil manejo de la información, cambiando su nombre de descarga por la fecha de inicio en día juliano, de igual manera se presenta la clasificación que se realizó considerando la calidad de las imágenes, las imágenes utilizadas fueron aquellas que entraban en la categoría de buena calidad, es decir que tenían el 90% o más de píxeles que cubrieran la cuenca del valle de Toluca. Dando un total para el NDVI de 15 rásters y 35 rásters para el LAI.

En la *Figura 4.17* y *4.18* muestra el valor máximo de LAI para la cuenca del valle de Toluca, el cual varía en un rango de 0.2 a 6.6, cabe destacar que el valor máximo para el LAI a partir del cálculo con el NDVI se encontró en el ráster que comprende del día 241 al 256, que comprende del 29 de agosto al 13 de septiembre del 2011, por su parte el valor máximo de LAI medido directamente por el sensor MODIS se encontró en el ráster del día 249 al 256 que corresponde al periodo del 6 al 13 de septiembre del 2011, los valores obtenidos por ambos métodos son similares, además de que los valores para los vertederos se encuentran en un rango de 1 a 3, lo cual entra en el rango de lo sugerido por el modelo HELP. Finalmente, el valor utilizado para la aplicación del modelo HELP fue el obtenido a partir del promedio de los valores encontrados por las metodologías descritas (*Tabla 4.7*).

Tabla 4.6. *Rásters de NDVI y LAI utilizados para la estimación del valor máximo del LAI en la cuenca del valle de Toluca.*

NDVI		LAI			
Nombre	Calidad	Nombre	Calidad	Nombre	Calidad
273	Buena	273	Buena	89	Mala
289	Buena	281	Buena	97	Buena
305	Buena	289	Buena	105	Buena
321	Buena	297	Buena	113	Buena
337	Buena	305	Buena	121	Buena
353	Buena	313	Buena	129	Buena
1	Buena	321	Buena	137	Buena
17	Buena	329	Buena	145	Buena
33	Buena	337	Buena	153	Buena
49	Buena	345	Buena	161	Buena
65	Buena	353	Buena	169	Buena
81	Buena	361	Buena	177	Buena
97	Buena	1	Buena	185	Buena
113	Mala	9	Buena	193	Buena
129	Mala	17	Buena	201	Mala
145	Mala	25	Mala	209	Mala
161	Mala	33	Mala	217	Buena
177	Mala	41	Buena	225	Buena
193	Mala	49	Mala	233	Buena
209	Mala	57	Mala	241	Mala
225	Mala	65	Mala	249	Buena
241	Buena	73	Buena	257	Mala
257	Buena	81	Buena	265	Mala

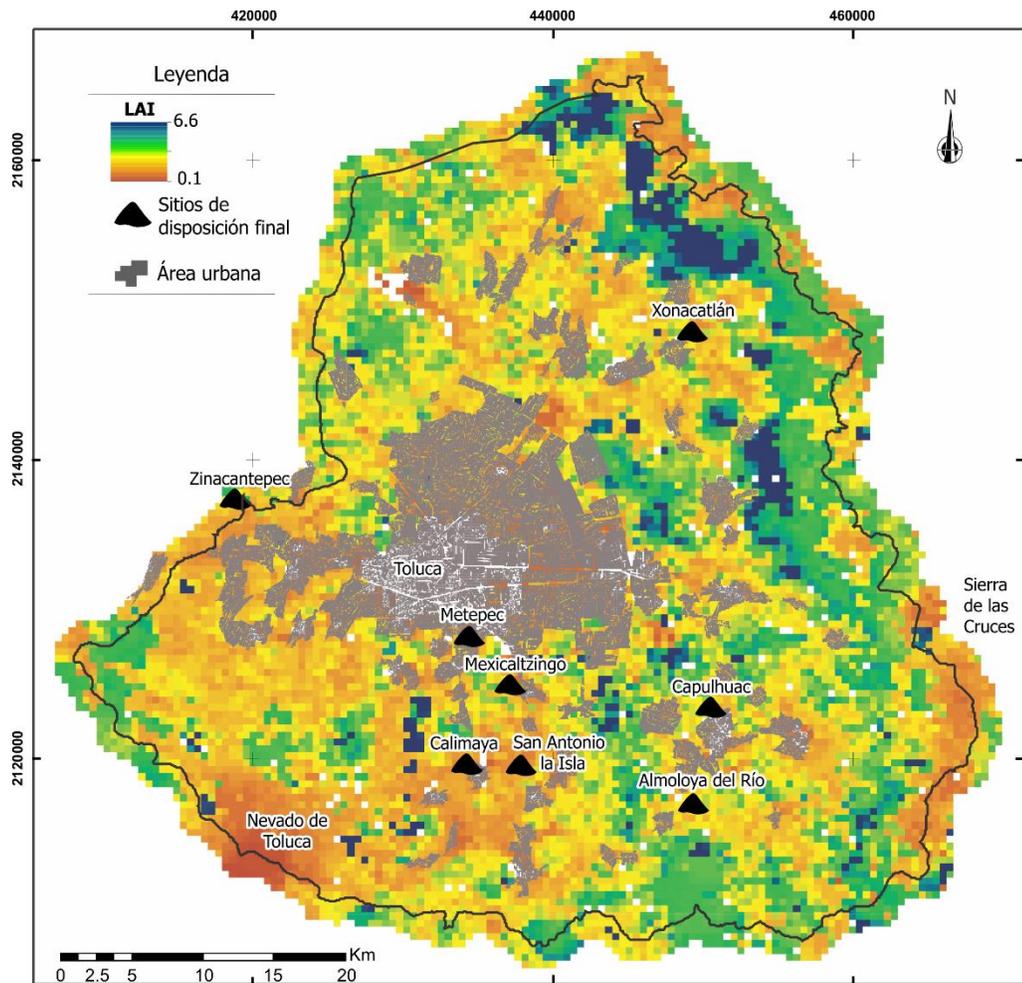


Figura 4.17. Valores del Índice del Área foliar medidos directamente por el sensor MODIS, que comprende a la medición del promedio diario de los días 6 al 13 de septiembre del 2011.

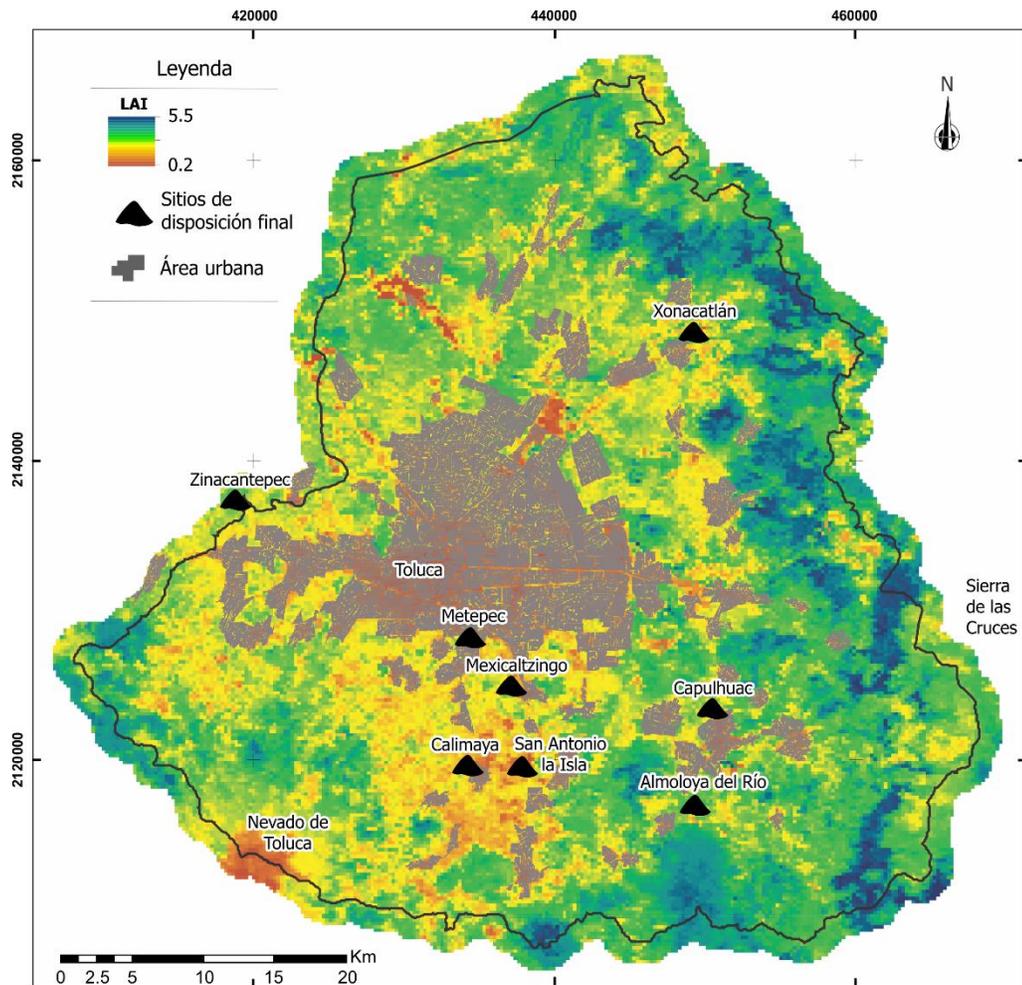


Figura 4.18. Valores del Índice del Área Foliar obtenidos a partir del uso del NDVI, los resultados presentados comprenden la imagen ráster correspondiente al promedio diario de los días 29 de agosto al 13 de septiembre del 2011.

Tabla 4.7. Valores del LAI obtenidos por las metodologías anteriormente descritas, de igual manera se presenta el valor promedio utilizado para el cálculo de la producción de lixiviados en los sitios de disposición final.

No.	Nombre del Sitio	LAI medido directamente	LAI obtenido a partir del NDVI	Promedio
1	Almoloya del Río	1.6	2.2	2
2	Calimaya	1.1	1.5	1
3	Capulhuac	1.2	1.1	1
4	Metepac	2	1.4	2
5	Mexicaltzingo	1	1	1
6	San Antonio la Isla	0.6	1.1	1
7	Xonacatlán	1.3	1	1
8	Zinacantepec	1	1	1

b) Características físicas de los residuos

Las características físicas de los residuos incluyen: peso específico, contenido de humedad, tamaño de partículas y distribución del tamaño, capacidad de campo, porosidad de los residuos compactados y conductividad hidráulica. La evaluación de estas propiedades resulta crítica para el entendimiento del proceso de formación de lixiviados, así como en el diseño del sistema de contención y almacenamiento en un relleno sanitario (Torres, 2016; Schroeder *et al*, 1994).

La capacidad de campo es de gran relevancia para la formación de lixiviados. El exceso de agua sobre la capacidad de campo se expresará en forma de lixiviado, la capacidad de campo varía con el grado de compactación, y el estado de descomposición en el que se encuentren los residuos, la capacidad de campo de los residuos no compactados de origen doméstico y comerciales varía del 50 al 60%. En tanto, la porosidad de los residuos es variable, generalmente se asemejan a las porosidades de un suelo arenoso que es de 0.4 *vol/vol*.

Los datos utilizados para la estimación de los lixiviados generados por los sitios de disposición final a partir del modelo HELP son los reportados por Torres (2016), la elección se debe a que estos valores fueron estimados para el sitio de Almoloya del Río, y, por tanto, se asume que la composición de los residuos es similar a la de los demás sitios de disposición final, la obtención de los parámetros se hizo mediante una columna de prueba en laboratorio.

La *Tabla 4.8* resume valores para los parámetros hidráulicos de los residuos sólidos reportados en la literatura, además especifica como fueron obtenidos los parámetros.

A parte de los parámetros antes mencionados para la aplicación del modelo HELP, es importante contar con datos sobre el vertedero como la superficie, el porcentaje de la superficie que pudiera generar escorrentía, contenido inicial de humedad, definir el perfil del vertedero, para ello HELP permite disponer de cuatro tipos de capas que son: capa de percolación vertical, capa de drenaje lateral, revestimiento de barrera de suelo y revestimientos de geomembrana. La capa o capas de residuos se representan dentro del perfil como capa de percolación vertical.

De igual manera, el perfil de los vertederos está estrechamente relacionado con el tipo de construcción utilizada, en este caso como se mencionó en la descripción de los vertederos el método utilizado es combinado, primero es del tipo trinchera, esto es para aprovechar los socavones producto de la extracción de materiales pétreos, una vez que se ha alcanzado el nivel del terreno se aplica el método área. Respecto a las capas que conforman el sitio de disposición final, la cantidad de estas depende del tipo de sitio que sea, en el caso de los sitios no controlados su perfil está representado simplemente por una capa de residuos de altura variable para cada sitio, a excepción del sitio de Metepec que se encuentra clausurado, por tanto, su perfil está definido por una capa de residuos, cubierta por una capa de aproximadamente 60 *cm*, además de presentar un desarrollo de vegetación (pastos) (*Figura 4.19(a)*). Respecto a los rellenos sanitarios, el perfil está compuesto por una geomembrana, una capa de residuos de aproximadamente 8 *m*, después una capa de cobertura de 30 *cm* aproximadamente y así sucesivamente hasta alcanzar la altura establecida para cada sitio, estos datos fueron los proporcionados por los encargados del relleno sanitario de Xonacatlán y al no contar con la información para los otros dos rellenos se asume que la disposición de las capas es similar (*Figura 4.19(b)*).

Tabla 4.8. Síntesis de los parámetros hidráulicos de la capa de residuos sólidos en sitios de disposición final de residuos sólidos, información reportada en la literatura a partir de pruebas de laboratorio y ensayos in situ.

Autor	Porosidad total	Capacidad de campo (vol/vol)	Conductividad hidráulica (cm/s)	Observación
Bleiker <i>et al.</i> , 1993			$10^{-5.8}$ - $10^{-8.0}$	Muestras de campo
Oweis, 1990	0.4-0.5	0.2-0.35	1.5×10^{-6} - 10^{-5}	Ensayos in situ
Schroeder <i>et al.</i> , 1994	0.671	0.292	1.0×10^{-3}	Tipo 18 HELP
	0.168	0.073	1.0×10^{-3}	Tipo 19 HELP
Huitric <i>et al.</i> , 1980		0.065-0.397		ensayos de laboratorio
Korfiatis <i>et al.</i> , 1984	0.5-0.6	0.20-0.30	1.3×10^{-4} 8×10^{-5}	Columnas de laboratorio
Koda y Zakowicz, 1998	0.3-0.4 a	0.32-0.38	5.3×10^{-4}	Ensayos in situ
	0.5-0.7	a 0.51-0.56	1.11×10^{-6}	
Zeis y Major, 1993		0.123-0.147		
Zeiss y Uguccioni, 1997		0.09-0.13		
Soh, 2003	0.477	0.240-0.191		
STAUB, 2009	0.57-0.72		4.6×10^{-4} - 7.4×10^{-3}	
Olivier and Gourc, 2007	0.48-0.51		1.0×10^{-6} - 1.0×10^{-4} (m/s)	
Torres, 2016	0.509	0.15	1.29×10^{-3}	Columnas de laboratorio

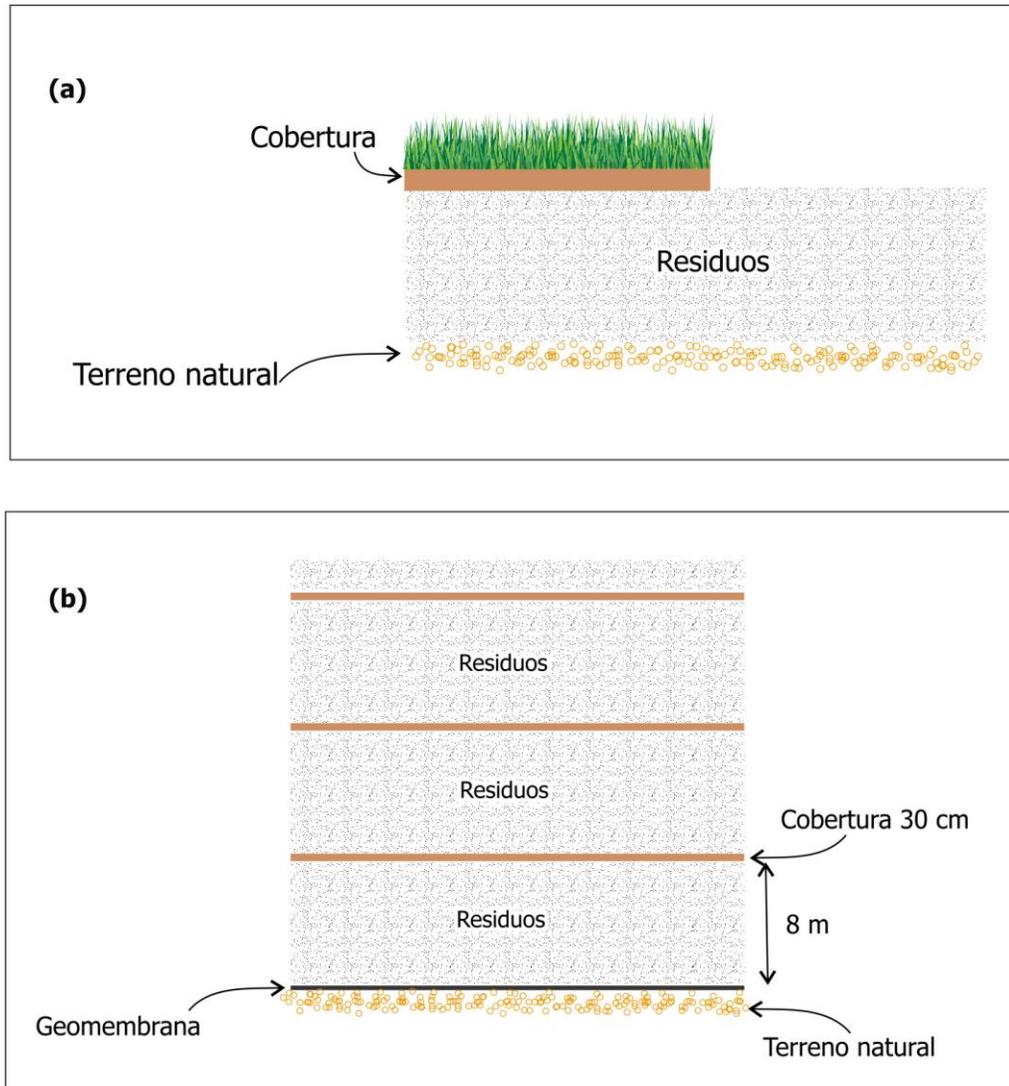


Figura 4.19. Esquema conceptual de los perfiles de los sitios de disposición final de residuos sólidos utilizados en el modelo HELP, los perfiles fueron determinados a partir de la información histórica y datos de campo observados: a) Perfil para los sitios no controlados, b) Perfil para los rellenos sanitarios, el número de capas depende de la profundidad de los residuos para cada RESA (elaboración propia).

4.3 Cuantificación del balance de humedad de los residuos sólidos

El cálculo realizado tuvo la finalidad de presentar la estimación del volumen de lixiviados que pueden llegar a infiltrarse en el área ocupada por un vertedero, llámese relleno sanitario o sitio no controlado, los resultados sirven para evaluar el comportamiento de la generación de lixiviados para tres escenarios diferentes, es decir, para un año hidrológico seco, un año hidrológico promedio y un año hidrológico húmedo. En este sentido, para la estimación de la generación de lixiviados se empleó tanto el modelo WBM como el modelo HELP3. Para esto fue necesario la recopilación de los parámetros anteriormente descritos en este capítulo.

La *Tabla 4.9* presenta los datos utilizados en el modelo WBM para realizar la cuantificación de los lixiviados, el ejemplo presentado es para el sitio de Almoloya del Río para la celda con cobertura, de igual manera en el Anexo II se presenta la información para los siete sitios restantes. Por su parte en la *Tabla 4.10* se presentan los datos utilizados en el modelo HELP3 para la cuantificación del sitio de Metepec, en el Anexo III se presentan los datos para cada uno de los siete sitios restantes.

En los apartados siguientes se describen los resultados obtenidos por cada uno de los métodos aplicados, primero se presentan los valores para el modelo WBM que son de manera mensual, posteriormente, se presentan los resultados obtenidos por el modelo HELP que son valores diarios. Finalmente, se presenta el volumen de lixiviados generado en cada sitio por año hidrológico para ambos modelos.

Tabla 4.9. Información meteorológica utilizada para la cuantificación del volumen de lixiviados mediante el modelo WBM para la celda cubierta del vertedero de Almoloya del Río.

		Oct	No v	Dic	Ene	Feb	Ma r	Abr	Ma y	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	13.5	12.6	12.0	11.0	11.7	13.6	14.8	16.2	15.6	14.3	14.7	14.5	
	Pp (mm)	38.3	7.8	5.7	0.0	41.2	13.4	38.2	92.0	199.1	258.1	143.1	121.5	958.4
Año promedio	Tem (°C)	19.2	18.6	17.9	17.9	18.0	17.5	20.2	21.2	21.9	19.7	20.1	20.8	
	Pp (mm)	141.0	41.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	209.0	175.0	200.0	233.0	1018.0
Año seco	Tem (°C)	23.1	22.1	21.5	21.5	22.9	23.9	25.6	26.8	25.7	24.6	25.3	24.6	
	Pp (mm)	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	24.0	32.0	212.0	286.0	232.0	83.0	874.0
	Coefficiente de escurrimiento		0.05-0.2											

Tabla 4.10 Información de entrada para el modelo HELP3 del vertedero de Metepec para la cuantificación de la producción de lixiviados.

Sitio	Metepec	Estación SMN	15266				
Latitud	19.25	EMA	La providencia				
Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
60	2	39-288	4.3	73	57	66	82
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m²)	Área (ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	4.5	75			
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K_s (cm/s)
1	1 (percolación vertical)	50	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
2	1 (percolación vertical)	5000	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
	Pendiente superficial (%)	Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva			
	18	39.5	3	75.7			

P= porosidad total, CC: capacidad de campo, PM: punto de marchitez y K_s: conductividad hidráulica.

a) **Modelo WBM**

En la *Figura 4.20* se muestran los resultados obtenidos de manera mensual para la generación de lixiviados estimados por el modelo WBM para cada uno de los sitios estudiados.

En la *Figura 4.20(a)* se observa que, para el año seco la producción de lixiviado aparece en el mes de julio, siendo el mes donde se presentan los mayores valores de producción de lixiviados, seguido por el mes de agosto, donde aún se presenta la generación de lixiviados para los ocho sitios, a diferencia del mes de septiembre donde solo cuatro de los ocho sitios presenta una generación de lixiviados, aunque en una cantidad menor que la de los meses anteriores.

Por otra parte, para el año seco el vertedero que ocupa el primer lugar en la generación de lixiviados es el relleno sanitario de Xonacatlán, que es el sitio que presenta una mayor precipitación (967.7 mm) para dicho año, con un lixiviado acumulado de 493 mm , representando el 51% de la precipitación registrada para ese año. En segundo lugar se encuentra el relleno sanitario de San Antonio la Isla que presenta una producción de lixiviados del 40% respecto a la precipitación registrada para ese sitio, en tercer lugar de producción se encuentran los sitios de Calimaya y Mexicaltzingo con un 30% de producción de lixiviados respecto a la precipitación registrada, finalmente se encuentran los sitios de Almoloya del Río, Capulhuac, Metepec y Zinacantepec con un 24%, cabe mencionar que este último es el sitio que tiene la menor precipitación para este año (744.8 mm).

Es importante destacar que el cálculo de los lixiviados generados por el modelo WBM depende en gran medida de la temperatura que es la base para cuantificar la evapotranspiración actual (real, ETP), por tanto, una temperatura elevada da como consecuencia una mayor cantidad de ETP repercutiendo directamente en la cantidad de agua disponible para la infiltración y posterior generación de lixiviados, en el caso del sitio de Xonacatlán además de registrar la precipitación más elevada para el año seco, se registró una temperatura baja que da como resultado una menor evapotranspiración y por tanto hay una mayor cantidad de agua disponible para la generación de lixiviados.

En el caso de los años promedio y húmedo (*Figura 4.20 (b) y (c)*), se aprecia que la aparición de los lixiviados se da de junio a octubre, lo que corresponde a la temporada más intensa de

lluvias para el valle de Toluca. Sin embargo, esto contrasta con lo reportado por Torres (2016), quien a partir del uso de lisímetros cuantificó el volumen de lixiviados en el vertedero de Almoloya del Río, donde encontró que la aparición de los lixiviados se da a partir del mes de mayo extendiéndose hasta diciembre, se asume que este es el comportamiento de aparición de lixiviados que siguen la mayoría de los sitios estudiados, desafortunadamente, al no contar con un registro a largo plazo no es posible hacer un análisis comparativo más certero.

En el caso del año promedio, al igual que en el año seco los dos sitios con una mayor cantidad de lixiviados son Xonacatlán y San Antonio la Isla, con una acumulación de lixiviado de 452.6 mm que es el 42% del total de la precipitación para el primer sitio (que al igual que el año seco este es el sitio que presenta la mayor precipitación 1,075 mm) y un acumulado de 377.4 mm representando el 40.5% para el segundo sitio. Después se encuentran los sitios de Calimaya, Almoloya del Río, Mexicaltzingo, Zinacantepec y Capulhuac con un porcentaje de lixiviados generados respecto a la precipitación de 38%, 36.5%, 34.8%, 32.5% y 32.3% respectivamente, por último, se encuentra el sitio de Metepec con total acumulado de lixiviado de 193.4 mm representando el 23% de la precipitación.

Finalmente, para el año húmedo la configuración de los sitios con mayor producción de lixiviados mantiene la misma dirección primero Xonacatlán, seguido por el relleno sanitario de San Antonio la Isla con un 52.5% y un 48% (respecto a la precipitación) respectivamente, posteriormente se encuentra el sitio de Calimaya (46.3%), Capulhuac (39.4%), Mexicaltzingo (39.2%), Almoloya del Río (36%), Zinacantepec (34.6%) y por último Metepec (30.3%). Para este año el sitio que presentó la mayor precipitación fue el de Almoloya del Río, sin embargo, también cuenta con una temperatura elevada lo que ocasiona que se presente una mayor evaporación y por ello la producción de lixiviado no es elevada como se esperaba.

Al comparar los resultados con trabajos realizados en sitios de disposición final, se tiene que Fenn *et al.*, (1975), cuantificó con el modelo WBM valores de percolado entre el 5 y el 20% en tres diferentes vertederos de los Estados Unidos, por su parte Alslaihi *et al.*, (2013), bajo el mismo método obtuvo un 39.6% de percolado, por tanto, los valores obtenidos en este trabajo entrarían dentro de un rango aceptable comprado con lo obtenido por lo reportado en otros trabajos.

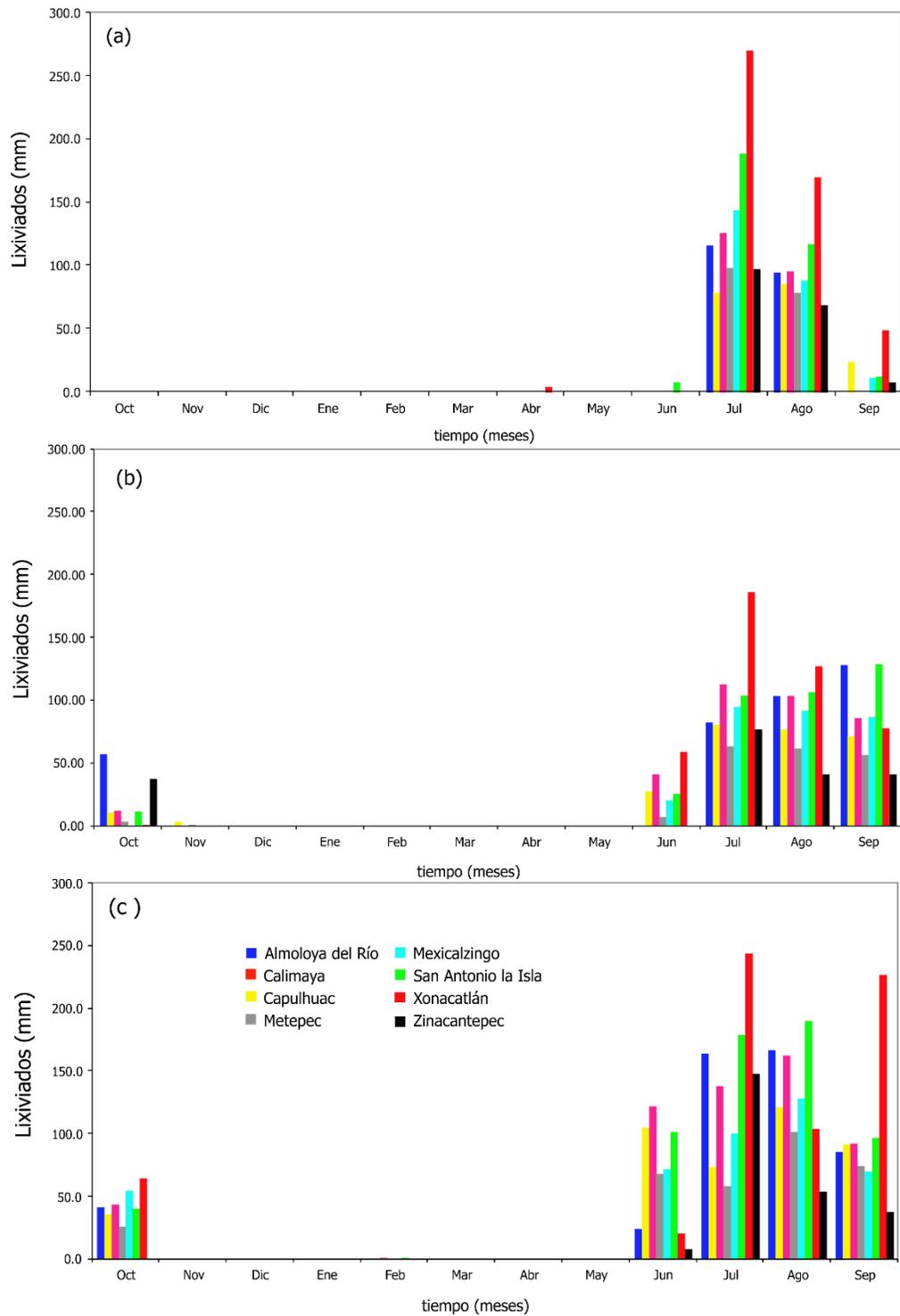


Figura 4.20. Producción mensual de lixiviados en mm para los ocho sitios de disposición final de residuos sólidos, estimados a partir del modelo WBM (a) Año seco; (b) Año promedio; (c) Año húmedo.

Por otra parte, se encuentran trabajos realizados en dos de los sitios estudiados, el primero es el vertedero de Almoloya del Río, donde Torres (2016) reporto un 18.5% de lixiviado estimado para la celda con cobertura, dicho valor es comparable con el 15% obtenido en este trabajo para el año seco en el mismo sitio, encontrándose en un rango aceptable el valor promedio de 23% para la celda con cobertura calculado en este trabajo. El mismo autor reporta un volumen equivalente al 42% de la precipitación, para el caso de la celda sin cobertura, por tanto, sería prudente afirmar que los valores de 24, 36 y 36.4% obtenidos para los años seco, promedio y húmedo respectivamente entran dentro de un rango de coincidencia aceptable. Por último, se tiene el trabajo de Gómez (2014), quien reporta un 65% de lixiviado acumulado para el vertedero de Mexicaltzingo, valor que es prácticamente el doble de lo encontrado en este trabajo donde el porcentaje máximo de lixiviados se encontró en el año húmedo con un 39%. Las diferencias entre los estudios podrían deberse sobre todo a la calidad de los datos empleados en la modelación del balance de humedad, además de la manera en que fueron cuantificados los parámetros requeridos.

En Resumen, el valor acumulado promedio de producción de lixiviados estimada por el modelo WBM es de 237 *mm/año* (29%), lo que significa una producción de 0.6 *mm/día*, para el año seco, de 311 *mm/año* (33%), teniendo una producción de 0.8 *mm/día* para el año promedio y de 436 *mm/año* (38%), dando una generación de 1.2 *mm/día* para el año húmedo.

b) Modelo HELP3

Es importante mencionar que, aunque el balance con el modelo HELP3 se realizó para todos los sitios, hay que recordar como menciona Vargas (2009); Gómez (2014); Torres (2016), el modelo es inestable al hacer la evaluación sin una capa de cobertura, aunque puede utilizarse para sitios clausurados o abiertos los resultados son más certeros cuando se trabaja con un sitio clausurado.

El resultado del balance hídrico con el HELP3 mostró, que la generación anual de lixiviados para los ocho sitios en estudios va de un 4% respecto a la precipitación hasta un 28.4 % para el año hidrológico seco. En el caso del año hidrológico promedio los porcentajes de producción de lixiviados respecto a la precipitación van de los 3.8% al 25% y finalmente los valores obtenidos para el año hidrológico húmedo van del 5.2% al 35.2% respecto a la

precipitación anual registrada en cada sitio. De acuerdo con Senent (2012) cuando se registran valores bajos de precipitación el modelo HELP muestra un comportamiento similar a lo registrado en las mediciones realizadas *in situ*, por tanto, los valores obtenidos para el año hidrológico seco podrían describir mejor como es el comportamiento de la producción de lixiviados. En la *Tabla 4.11* se presenta el porcentaje de producción para cada sitio, por año hidrológico.

En la *Figura 4.21* muestra la distribución de la producción diaria de lixiviados para los vertederos de Metepec y Capulhuac, esta comparación permite observar cómo se comporta la producción de lixiviados a partir de las diferentes características de los sitios, es decir, el vertedero de Metepec se encuentra clausurado, por tanto, su perfil tiene una configuración compuesta por una capa de material de cobertura, la cual sirve como soporte para el desarrollo de vegetación, favoreciendo la evapotranspiración, por su parte el vertedero de Capulhuac no cuenta con una cobertura que impida la infiltración de la precipitación, generando una mayor disponibilidad de agua para la producción de lixiviados. Estas diferencias son más notorias en el año húmedo, donde hay una mayor cantidad de agua (*Figura 4.21(c)*).

Asimismo, la *Figura 4.22* muestra la producción de lixiviados para el vertedero de Almoloya del Río tanto para su celda con cobertura como para la celda sin cobertura, se aprecia que las gráficas tienen un comportamiento similar al del ejemplo anterior donde la celda con cobertura tiene una menor producción de lixiviados, sin embargo, en este caso las diferencias son menos notorias, ya que mientras el lixiviado acumulado para la celda cubierta fue de 237.7, 241.7 y 401.6 mm para el año seco, promedio y húmedo respectivamente, los valores obtenidos para la celda sin cobertura fueron para el año seco 248.2 mm, 254.2 mm para el año promedio y 433.5 mm para el año húmedo.

Además, en ambas figuras (*Figuras 4.21 y 4.22*) se puede observar que existe una relación entre el comportamiento de la precipitación y la generación de lixiviados (percolación). Es posible que los picos y las depresiones en las gráficas no coincidan exactamente, debido a que en el modelo HELP3 la reacción a la precipitación se retarda unos días, pero es obvio que la generación de lixiviados mantiene un comportamiento influenciado por la distribución de la precipitación. De igual manera, a partir del análisis de estas dos situaciones puede

intuirse que una capa de cobertura por muy sencilla que parezca ayuda a disminuir la producción de lixiviados.

De igual modo, la *Figura 4.23* muestra como es la generación de lixiviados para los sitios de Calimaya y Mexicaltzingo, se aprecia que para el año promedio y húmedo el sitio de Calimaya presenta una mayor producción de lixiviados, y como se mencionó anteriormente la producción de lixiviados está en función de la cantidad de precipitación, por tanto, como muestra la *Tabla 4.11*, la precipitación de Calimaya es mayor que la de Mexicaltzingo, para los años hidrológicos promedio y húmedo, en el caso del año seco la precipitación de Mexicaltzingo es mayor al igual que la cantidad de lixiviados. Un caso similar ocurre con Almoloya del Río que presenta la mayor precipitación para los sitios no controlados, y esto se refleja en la cantidad lixiviados generados. En Almoloya del Río se presenta en promedio una percolación diaria de 0.9 mm, seguido de Calimaya con un promedio de 0.8 mm, posteriormente se encuentra Mexicaltzingo con 0.7 mm diarios en promedio y finalmente se encuentran los sitios de Metepec y Capulhuac se tiene una percolación diaria de 0.6 mm.

Para el análisis de los resultados de los rellenos sanitarios cabe señalar que para la estimación de la producción de lixiviados en el perfil de los sitios se contempló la geomembrana, por tanto, el valor obtenido representa la cantidad de lixiviados que logra percolar a través de la geomembrana, además habrá que recordar que se consideró el escenario más desfavorable para las características de instalación de la geomembrana.

Un punto a parte, son los resultados obtenidos para los rellenos sanitarios de San Antonio la Isla, Xonacatlán y Zinacantepec. El promedio diario de generación de lixiviados es de 0.4, 0.1 y 0.2 mm respectivamente, en la *Tabla 4.11* se presentan los porcentajes de lixiviados generados por año hidrológico para cada sitio, se sugiere que dichos valores están influenciados por la configuración del perfil de los rellenos sanitarios, que están dispuestos por varias capas de residuos y de cobertura además de contar con una geomembrana. Por tanto, se supone que existe un retraso en la transmisión de la humedad a través de las capas, lo que explicaría la forma que presentan las gráficas de la *Figura 2.24*. Lo que conlleva a que los resultados entre el modelo WBM y el modelo HELP3 contrasten sobre todo en estos tres sitios.

Sin embargo, al igual que los sitios anteriores la producción de lixiviados está influenciada por la precipitación registrada como aprecia en la *Figura 4.24*, el sitio de San Antonio la Isla presenta una mayor producción para el año hidrológico húmedo (es el sitio que más precipitación registra para ese año), en el caso de los años hidrológicos seco y promedio en la *Tabla 4.11* se aprecia que el acumulado anual de lixiviados es mayor para el año seco que para el año promedio por 8.9 *mm* lo cual se explica con la distribución de la precipitación durante estos años, ya que mientras el año seco específicamente hablando del meses de junio-julio, se presenta un registro continuo, con días que alcanzan los 20 *mm* de precipitación, mientras que en el año promedio se observan periodos con ausencia de precipitación, además que la precipitación registrada no excede los 15 *mm* para los mismos meses.

Además, en los rellenos sanitarios se tiene la oportunidad de visualizar el comportamiento de la producción de lixiviados entre una celda con cobertura y una con ausencia de ella, que es el caso de Zinacantepec (*Figura 4.25*). La tendencia de los resultados es similar, a la presentada por Almoloya del Río, solo que, en una menor magnitud, donde la celda cubierta tiene una menor producción de lixiviados con un 72, 88.3 y 108.2 *mm* (año seco, año promedio y año húmedo respectivamente), mientras en la celda sin cobertura se registró un valor acumulado de lixiviados de 72.8, 103.8 y 129.6 *mm* año seco, año promedio y año húmedo respectivamente. Como se aprecia el año seco presenta un valor similar para ambas celdas sin embargo la producción del lixiviado se presenta en diferentes tiempos, es decir la producción de lixiviados no está en sincronía con la precipitación.

Por otra parte, para el caso de los sitios no controlados se aprecia que la aparición de los lixiviados se da mayo a noviembre, que correspondería a la temporada de lluvias, lo que confirma la relación existente entre la precipitación y la generación de lixiviados. En contraste, para los rellenos sanitarios se aprecia que la aparición de lixiviados se presenta durante todo el año específicamente para los rellenos de Zinacantepec y San Antonio la Isla, por su parte el relleno de Xonacatlán la aparición de los lixiviados está definida por la distribución de la precipitación para cada uno de los años. Por tanto, los datos obtenidos por el HELP3 se encuentran dentro de un rango aceptable, si se compara con lo obtenido en campo por Torres (2016) donde encontró que para el vertedero de Almoloya la formación de lixiviados se da desde mayo a diciembre.

Ahora bien, Torres (2016) reportó un 32% de la precipitación para el vertedero de Almoloya del Río, de igual manera, Gómez (2015) reportó un 42% de la precipitación para el sitio de Mexicaltzingo. Por otra parte, Alslaibi *et al.*, (2013) en su trabajo reportaron un 35.2 % de la precipitación, además, Fatta *et al.*, (1999) reportó un 42.8% de la precipitación para un sitio con cobertura final. Como se encuentra en la literatura, para otros sitios de eliminación en Europa (Hjelmar 1989; Ehrig, 1991), la fuga anual desde la base del sitio, después de la cobertura final, generalmente varía entre 70 y 400 *mm*. Estas cantidades dependen, por supuesto, de las condiciones climáticas locales y de las características de diseño del sitio de eliminación. Por lo tanto, los resultados del presente estudio estuvieron en niveles normales y esperados en comparación con los datos de la literatura mencionados anteriormente.

Tabla 4.11. Generación anual de lixiviados cuantificados en los sitios de disposición final de residuos sólidos a partir de la aplicación del modelo HELP para los años hidrológicos seco, promedio y húmedo.

No	Nombre del sitio	Año seco			Año promedio			Año húmedo		
		Precipitación (mm)	Lixiviados (mm)	Porcentaje (%)	Precipitación (mm)	Lixiviados (mm)	Porcentaje (%)	Precipitación (mm)	Lixiviados (mm)	Porcentaje (%)
1	Almoloya del Río	874.0	248.2*	28.4	1018.0	254.2*	25.0	1340.0	433.5*	32.4
			237.7	27.2		241.7	23.8		401.6	30.0
2	Calimaya	750.0	212.3	28.3	931.0	224.6	24.1	1211.0	425.7	35.2
3	Capulhuac	767.0	158.1	20.6	841.0	171.6	20.4	1086.5	374.0	34.4
4	Metepec	767.0	119.9	15.5	841.0	152.1	18.1	1086.5	337.1	31
5	Mexicaltzingo	791.0	185.7	23.5	846.0	188.6	22.3	1087.0	355.6	32.7
6	San Antonio la Isla	810.0	128.9	15.9	933.0	120.0	12.9	1269.0	199.0	15.7
7	Xonacatlán	967.0	38.9	4.0	1075.0	40.3	3.8	1258.0	65.8	5.2
8	Zinacantepec	744.8	72.8*	9.8	813.2	103.8*	12.8	958.4	129.6*	13.5
			72.0	9.7		88.3	10.9		108.2	11.3

*valores para la celda sin cobertura

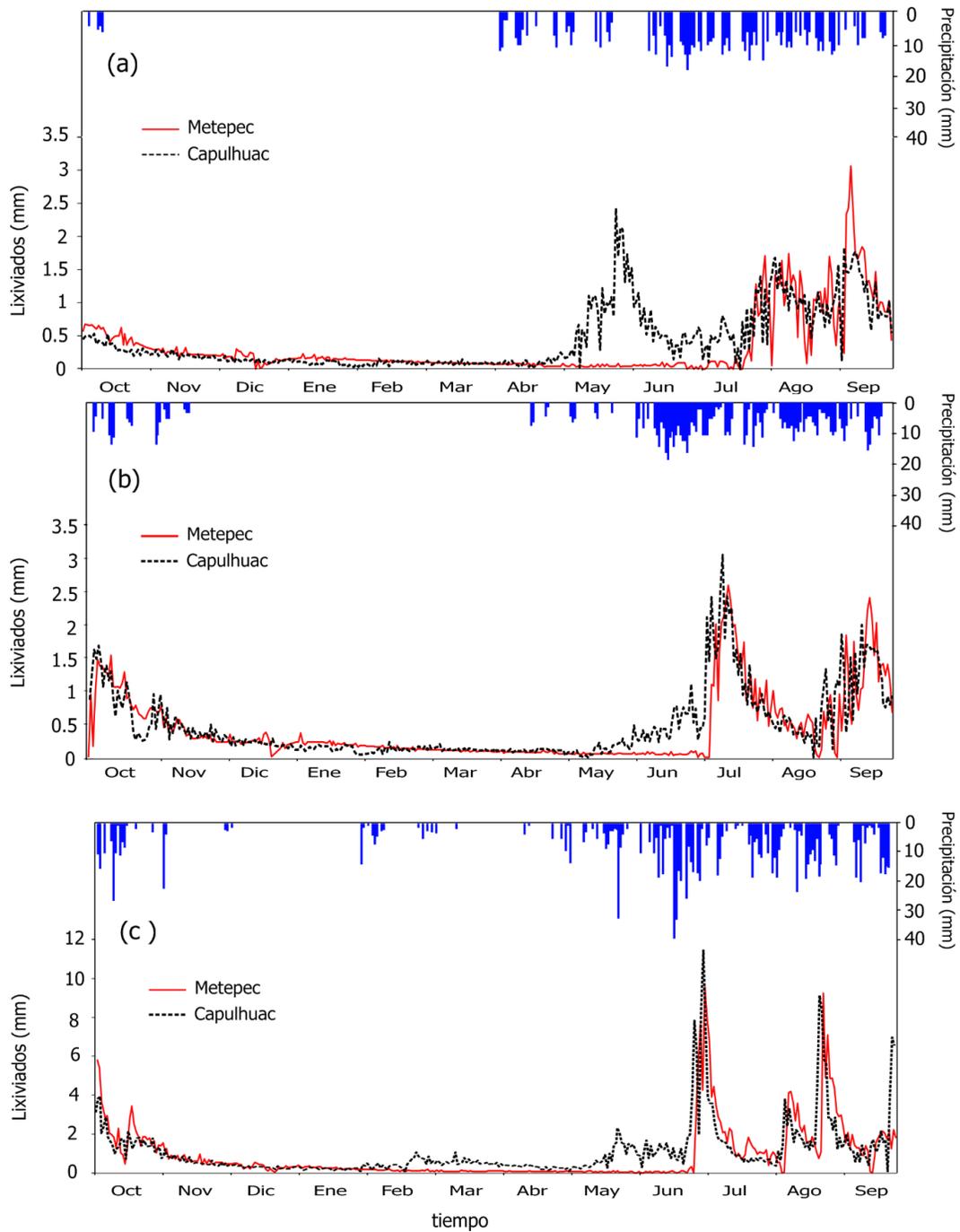


Figura 4.21. Comparación de la generación diaria de lixiviados estimada con el modelo HELP en mm para los vertederos de Metepec y Capulhuac: a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En la parte superior de cada gráfica se muestra la precipitación diaria registrada para cada año (color azul).

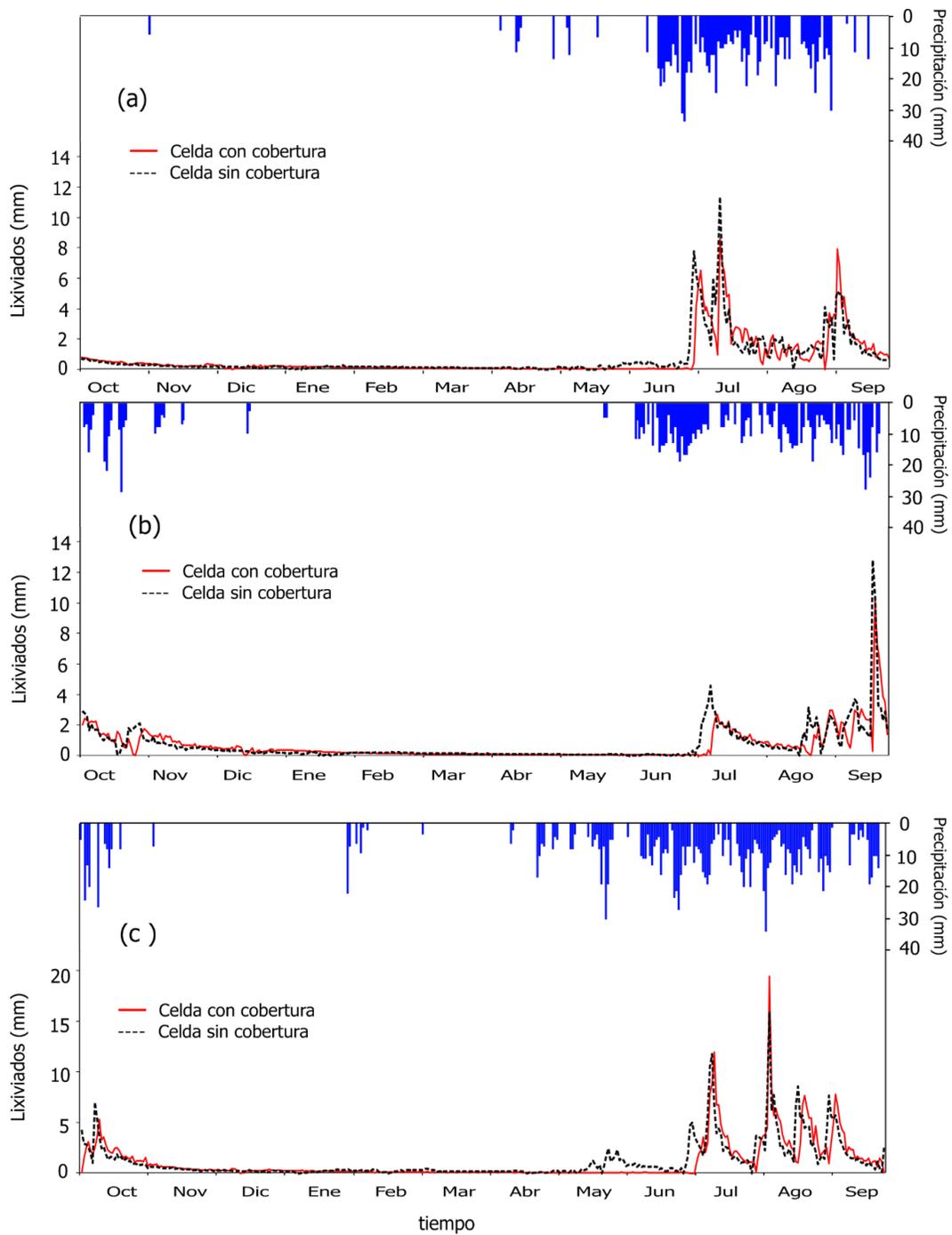


Figura 4.22. Comparación de la producción diaria de lixiviados para las celdas del vertedero de Almoloya del Río estimada con el modelo HELP en mm: a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En azul se muestra la precipitación diaria registrada para cada año.

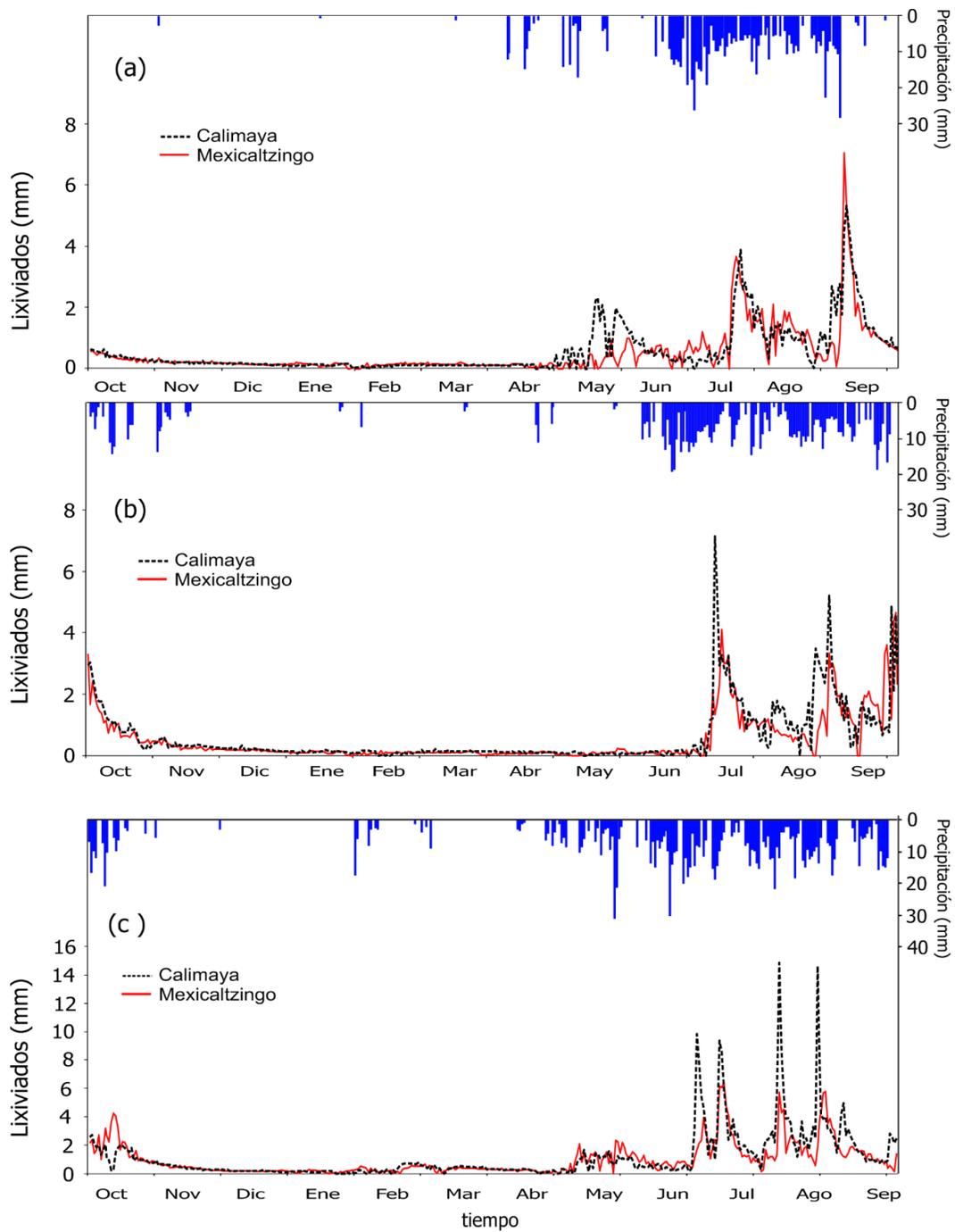


Figura 4.23. Comparación de la producción diaria de lixiviados estimada con el modelo HELP en mm para los vertederos de Mexicaltzingo y Calimaya; a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En azul se muestra la precipitación diaria registrada para cada año.

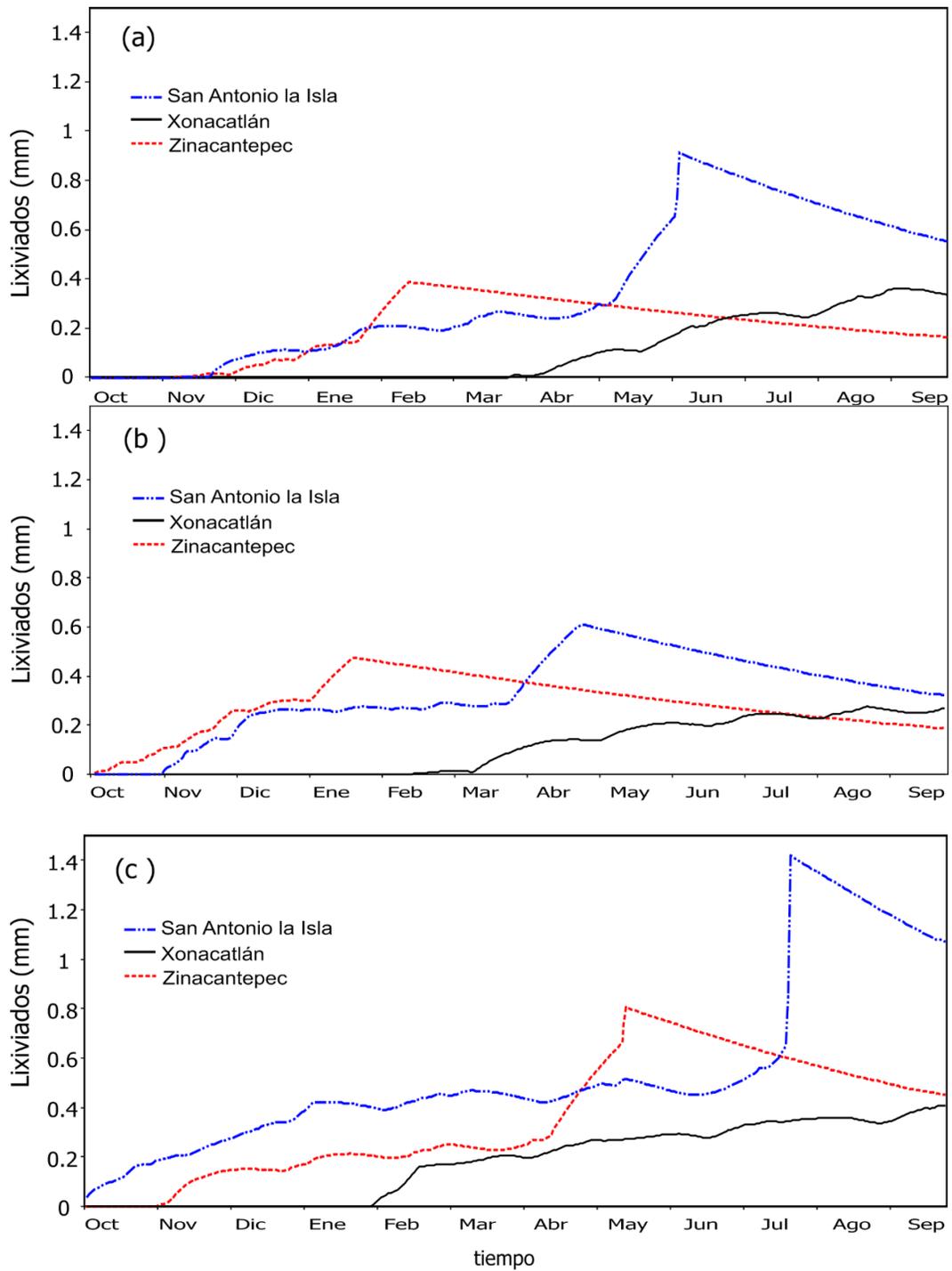


Figura 4.24 Comparación de la producción diaria de lixiviados cuantificado con el modelo HELP en mm para los rellenos sanitarios de San Antonio la Isla, Xonacatlán, Zinacantepec; a) Año seco b) Año promedio y c) Año húmedo.

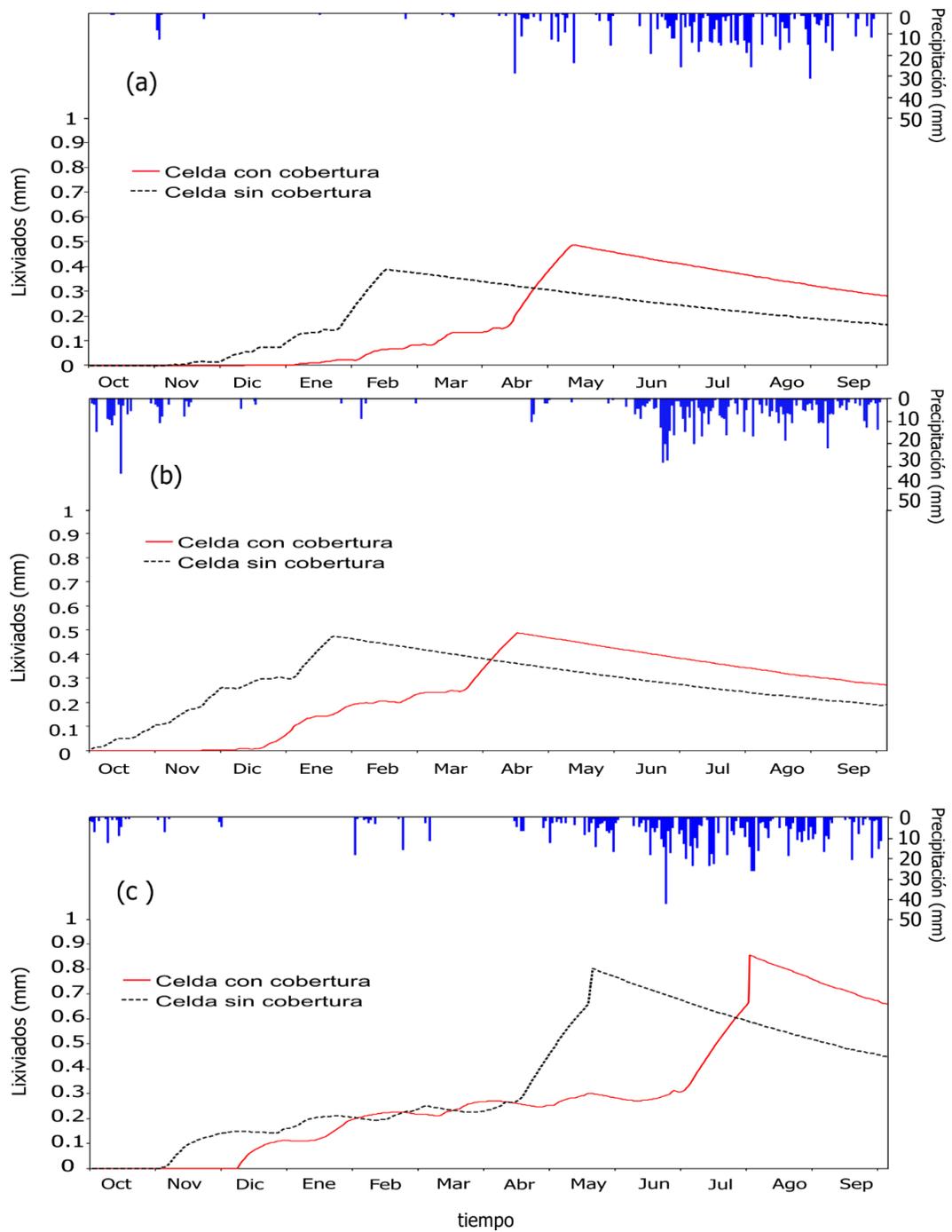


Figura 4.25 Producción diaria de lixiviado cuantificada con el modelo HELP en mm para las celdas del relleno sanitario de Zinacantepec; a) Año seco, b) Año promedio y c) Año húmedo. En la parte superior de cada gráfica se muestra la precipitación diaria registrada para cada año.

c) **Volumen de lixiviados generados por sitio de disposición final**

Siendo los sitios de disposición final de residuos sólidos una de las principales fuentes de contaminación del agua subterránea, debido a los productos generados por la descomposición de los residuos. Por tanto, el conocer la cantidad de lixiviados generados permite tomar las medidas de protección necesarias para prevenir o disminuir el impacto sobre dicho recurso.

A partir de la información presentada en los dos apartados anteriores y considerando la superficie de los sitios de disposición final se realizó la estimación del volumen de lixiviados generados para cada uno de los sitios por cada año hidrológico (*Tablas 4.12, 4.13 y 4.14*), es importante presentar el volumen de lixiviados para cada uno de los sitios ya que esto nos permite visualizar los sitios susceptibles de contaminación para el agua subterránea.

El volumen promedio de lixiviado generado se sitúa entre los 6,900 y 14,300 m^3 , sin embargo en los diferentes sitios se presenta una gran variación, ya que en algunos sitios se presenta un volumen de 1,000 m^3 y en otros alcanza los 58,500 m^3 para el modelo WBM, mientras que para el modelo HELP3 el volumen varía de 1,500 a 30,300 m^3 , para ambos modelos los valores más bajos corresponden al año hidrológico seco mientras el valor más grande se presenta en el año hidrológico húmedo.

En este contexto, para el año hidrológico húmedo se tiene una generación total (en el área de estudio) de lixiviados de 194,654.5 m^3 para el modelo WBM, mientras que para el modelo HEL3 se presenta una generación total de 101,320 m^3 , en este mismo orden de ideas para el año hidrológico promedio se tiene una acumulación total de 128,205 m^3 y 55,697 m^3 para el modelo WBM y el modelo HELP3 respectivamente, por último, para el año hidrológico seco se presenta un volumen total de 105,844 m^3 para el modelo WBM y de 50,424 m^3 para el modelo HELP3. Estas cifras solo reflejan el volumen producido por los sitios seleccionados, por tanto, habría que dimensionar más el problema si tomamos en cuenta que el IFOMOGEM contempla 20 sitios, lo cual incrementa el volumen de lixiviados que se infiltran y eventualmente puede llegar al agua subterránea y contaminarla, además es importante recordar que el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para la cuenca del Valle de Toluca.

Un dato para destacar es que la empresa que opera el relleno de Xonacatlán reportó que la producción de lixiviado generado es de $1,200 \text{ m}^3/\text{año}$ y sin embargo en las estimaciones realizadas por el modelo HELP3 ni siquiera el año hidrológico seco que presenta una menor precipitación presenta un valor cercano al reportado, las estimaciones realizadas indican que para dicho año la producción de lixiviados fue de $1,943 \text{ m}^3/\text{año}$, siendo este el único sitio donde puede compararse lo calculado con lo “medido”. Sin embargo, los datos reportados cuentan con cierta incertidumbre que no permite asegurar una apropiada comparación con los resultados obtenidos.

Tabla 4.12 Síntesis del volumen de lixiviado generado en cada sitio de disposición final de residuos sólidos ubicados en el valle de Toluca, estimados por el modelo WBM y el modelo HELP3 para el año hidrológico seco 2010-2011.

No.	Nombre del sitio	Precipitación (mm)	WBM		HELP3	
			Lixiviado acumulado (mm/año)	Volumen de lixiviado acumulado (m ³ /año)	Lixiviado acumulado (mm/año)	Volumen de lixiviado acumulado (m ³ /año)
1	Almoloya del Río*	874.0	350.0	1,026.4	486.3	1,543.2
2	Calimaya	750.0	221.6	9,972.0	212.3	9,552.2
3	Capulhuac	767.0	187.6	4,127.2	158.1	3,478.6
4	Metepec	767.0	177.0	15,930.0	119.9	10,791.0
5	Mexicaltzingo	791.0	243.7	4,874.0	185.7	3,713.4
6	San Antonio la Isla	810.0	325.5	31,248.0	128.9	12,377.5
7	Xonacatlán	967.0	492.9	24,645.0	38.9	1,943.0
8	Zinacantepec*	744.8	294.2	14,021.1	144.8	7,025.3

*incluye la suma de los valores para ambas celdas

Tabla 4.13 Síntesis del volumen de lixiviado generado en cada sitio de disposición final de residuos sólidos ubicados en el valle de Toluca estimados por el modelo WBM y el modelo HELP3 para el año hidrológico promedio 1992-1993.

No.	Nombre del sitio	Precipitación (mm)	WBM		HELP3	
			Lixiviado acumulado (mm/año)	Volumen de lixiviado acumulado (m ³ /año)	Lixiviado acumulado (mm/año)	Volumen de lixiviado acumulado (m ³ /año)
1	Almoloya del Río*	1018.0	649.8	1,958.5	495.9	1,570.8
2	Calimaya	931.0	357.0	16,065.0	224.6	10,106.1
3	Capulhuac	841.0	271.4	5,970.8	171.6	3,774.1
4	Metepec	841.0	193.4	17,406.0	152.1	13,689.0
5	Mexicaltzingo	846.0	294.0	5,880.0	188.6	3,771.0
6	San Antonio la Isla	933.0	377.4	36,230.4	120.0	11,520.0
7	Xonacatlán	1075.0	452.6	22,630.0	40.3	2,016.0
8	Zinacantepec*	813.2	461.4	22,064.4	192.1	9,249.7

*incluye la suma de los valores para ambas celdas

Tabla 4.14 Síntesis del volumen de lixiviado generado en cada sitio de disposición final de residuos sólidos ubicados en el valle de Toluca estimados por el modelo WBM y el modelo HELP3 para el año hidrológico húmedo 1994-1995.

No.	Nombre del sitio	Precipitación (mm)	WBM		HELP3	
			Lixiviado acumulado (mm/año)	Volumen de lixiviado acumulado (m ³ /año)	Lixiviado acumulado (mm/año)	Volumen de lixiviado acumulado (m ³ /año)
1	Almoloya del Río*	1340.0	843.4	2,537.7	835.1	2,630.7
2	Calimaya	1211.0	560.3	25,213.5	425.7	19,157.4
3	Capulhuac	1086.5	428.2	9,420.4	374.0	8,228.9
4	Metepec	1086.5	329.2	29,628.0	337.1	30,342.6
5	Mexicaltzingo	1087.0	426.6	8,532.0	355.6	7,111.2
6	San Antonio la Isla	1269.0	610.2	58,579.2	199.2	19,118.4
7	Xonacatlán	1258.0	660.3	33,015.0	65.8	3,291.5
8	Zinacantepec*	958.4	579.6	27,728.7	237.8	11,439.3

*incluye la suma de los valores para ambas celdas

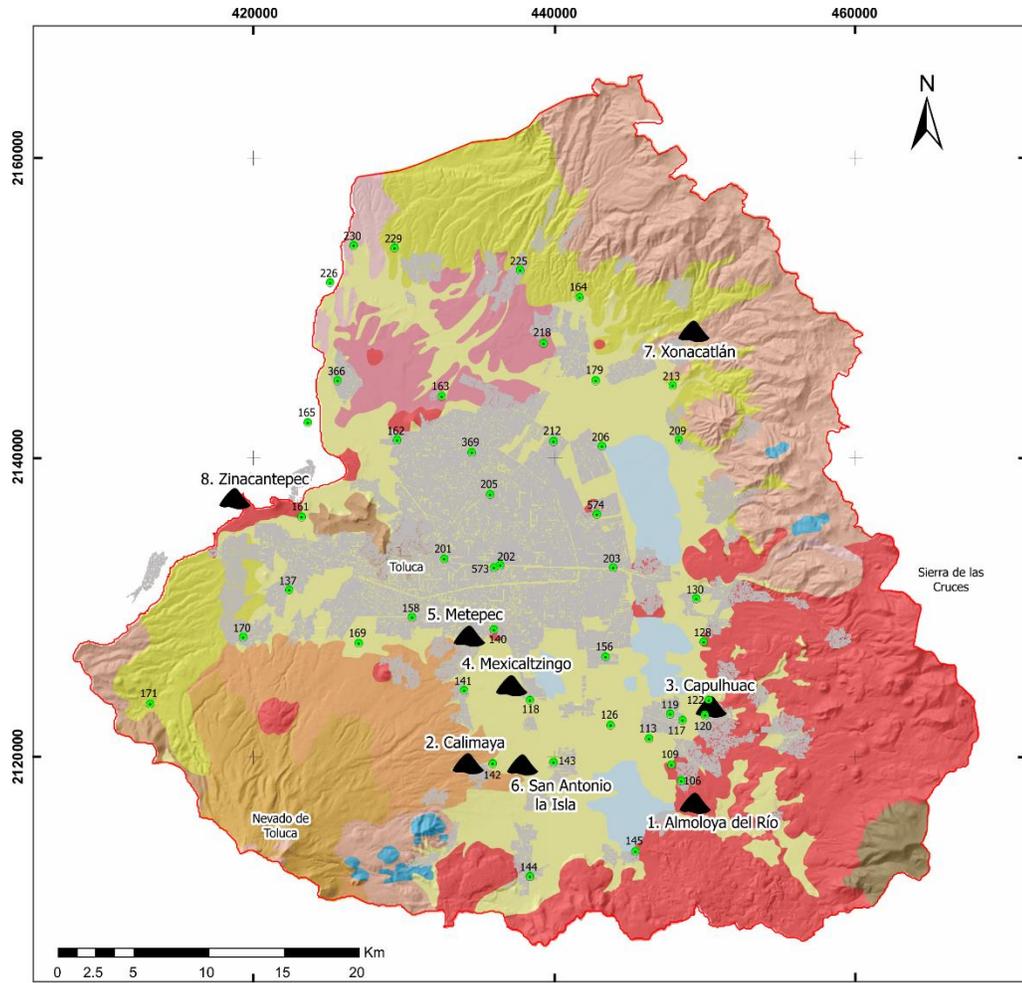
4.4 Clasificación de los sitios por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea

Una vez estimado el volumen de lixiviado generado en cada sitio de disposición final se procedió a realizar una clasificación de dichos sitios con la finalidad de asignar una medida cualitativa de la amenaza a la calidad del agua subterránea. Para esto se realizó la estimación del tiempo requerido para que el lixiviado fluya de manera advectiva a través de la zona no saturada, lo cual se obtuvo a partir de la aplicación de la con la ecuación 3.16. La estimación se realizó para cada uno de los estratos identificados en el perfil de cada sitio, posteriormente se procedió a la suma de los tiempos de cada estrato para finalmente obtener el tiempo total de tránsito requerido por el lixiviado para fluir de manera advectiva a través de la zona no saturada.

En la medida de lo posible y a partir de la información disponible descrita en el apartado de metodología se determinó el espesor de la zona no saturada y además se realizó la caracterización de los estratos que la componen. Cabe señalar que para los sitios de Almoloya del Río, Metepec y Mexicaltzingo los perfiles fueron retomados de lo reportado por Torres (2016), Morales (2008) y Gómez (2014) respectivamente, respecto a los sitios restantes el perfil se infirió a partir de los perfiles litológicos de los piezómetros de la CONAGUA (*Tabla 4.15*) que se ubican próximos a los sitios de disposición (*Figura 4.26*). En las *tablas 4.16-4.17* se presenta el material y espesor de los estratos presentes en la zona no saturada de cada sitio. Cabe señalar que para los rellenos sanitarios se contempló como primer estrato una capa de arcilla de 0.3 m, esto debido a que en la etapa de recopilación de la información se encontró que para el relleno sanitario de Zinacantepec antes de la colocación de la geomembrana se colocó una capa de arcilla para complementar a la geomembrana, por tanto, se asumió que los otros dos sitios al ser rellenos sanitarios presentan esta misma característica.

Tabla 4.15 Piezómetros de la CONAGUA utilizados para inferir el perfil estratigráfico subyacente en los sitios de disposición final.

No.	Nombre del sitio	PL-CONAGUA
2	Calimaya	142
3	Capulhuac	122
6	San Antonio la Isla	142 y 143
7	Xonacatlán	164
8	Zinacantepec	367 y 368



Legenda

- | | | | |
|---|---|---|---|
|  Sitios de disposición final |  Área urbana |  Límite cuenca |  Piezómetros y su número de inventario CONAGUA |
|---|---|---|---|

Figura 4.26 Localización y distribución espacial de los piezómetros respecto a la localización de los sitios de disposición final de residuos sólidos.

Tabla 4.16 Composición del perfil estratigráfico presente por debajo los sitios no controlados de disposición final de residuos sólidos los primeros tres son los reportados por Torres (2016), Morales (2008) y Gómez (2014).

	Material	Espesor de la capa (m)
Almoloya del Río	Arena	7
	Arena con arcilla y limo	4
	Arena	16
Meteppec	Arena arcillosa	3
	Arena mediana	1.2
	Arena arcillosa intercalada con arena fina	11
	Arena fina con intercalaciones de arcilla	8.4
	Arena mediana	6.4
Mexicaltzingo	Arena y gravas con poco o nada de finos	4.5
	Arenas limosas	1
	Arenas y gravas	5
	Arenas limosas	1
	Arenas y gravas	6.5
Calimaya	Arena	30
	Arena media	15
	Arena y grava	16
	Arena media con finos	49
Capulhuac	Arena arcillosa	12
	Franco arcilloso arenoso	8
	Arcilla limosa	5

Tabla 4.17 Composición del perfil estratigráfico presente por debajo de los tres rellenos sanitarios, incluye un revestimiento de arcilla.

	Material	Espesor de la capa (m)
San Antonio la Isla	Revestimiento de arcilla	0.3
	Arena limosa con grava	11
	Arena gruesa a fina con grava	2.7
	Material	Espesor de la capa (m)
Xonacatlán	Revestimiento de arcilla	0.3
	Limo arenoso	10
	Arena y grava	5
	Arena limosa	4
	Arcilla arenosa	5
	Limo	5
	Arena con arcilla y limo	30
	Arena	4.7
	Material	Espesor de la capa (m)
Zinacantepec	Revestimiento de arcilla	0.3
	Arcilla	5
	Arcilla limosa con arena	7
	Arcilla arenosa	18
	Arcilla	29.7

Es de resaltar que el cálculo del tiempo de tránsito se realizó solo para el año húmedo ya que, es el que presenta las condiciones más desfavorables en cuanto a la producción de lixiviados. Por tanto, para determinar la altura del lixiviado (h) a utilizar, se realizó un análisis de los valores diarios obtenidos por el modelo HELP para el año húmedo mediante la gráfica de caja y bigotes, de tal manera que se tuviera una análisis de las distribución de los datos. En las *Figuras 4.27 y 4.28* se muestra la gráfica obtenida para cada sitio.

El análisis de las gráficas muestra que para los sitios no controlados los valores se encuentran concentrados ya que la forma de las gráficas es un rectángulo achatado, además, presentan una asimetría positiva, lo que indica que la mayoría de la producción diaria de lixiviados se sitúa en los valores inferiores, asimismo la presencia de bigotes inferiores cortos representa una menor variabilidad en los valores inferiores, contrario a lo que ocurre con los bigotes superiores. Por otra parte, el análisis de las gráficas para los rellenos sanitarios muestra que en el caso del relleno sanitario de San Antonio la Isla los valores se encuentran concentrados, además es el único sitio en el que la distribución es simétrica. Respecto a Xonacatlán y Zinacantepec las gráficas muestran que existe una ligera dispersión en sus valores. Por otra parte, los valores de producción diaria de lixiviados para el sitio de Zinacantepec al igual que los sitios no controlados, presentan una asimetría positiva, a diferencia de lo mostrado para Xonacatlán donde los valores presentan una asimetría negativa, lo que representa que la mayoría de los valores para la producción diaria de lixiviados se sitúan en los valores superiores. Considerando que la mayoría de las distribuciones de los datos presentan asimetría positiva, parece más adecuado referirse a la mediana como al valor que mejor representa al conjunto de valores, por tanto, la altura del lixiviado utilizada fue el valor de la mediana de los valores para cada sitio de disposición final, en la *Tabla 4.17* se muestra el valor de la mediana para cada sitio de disposición final de residuos sólidos.

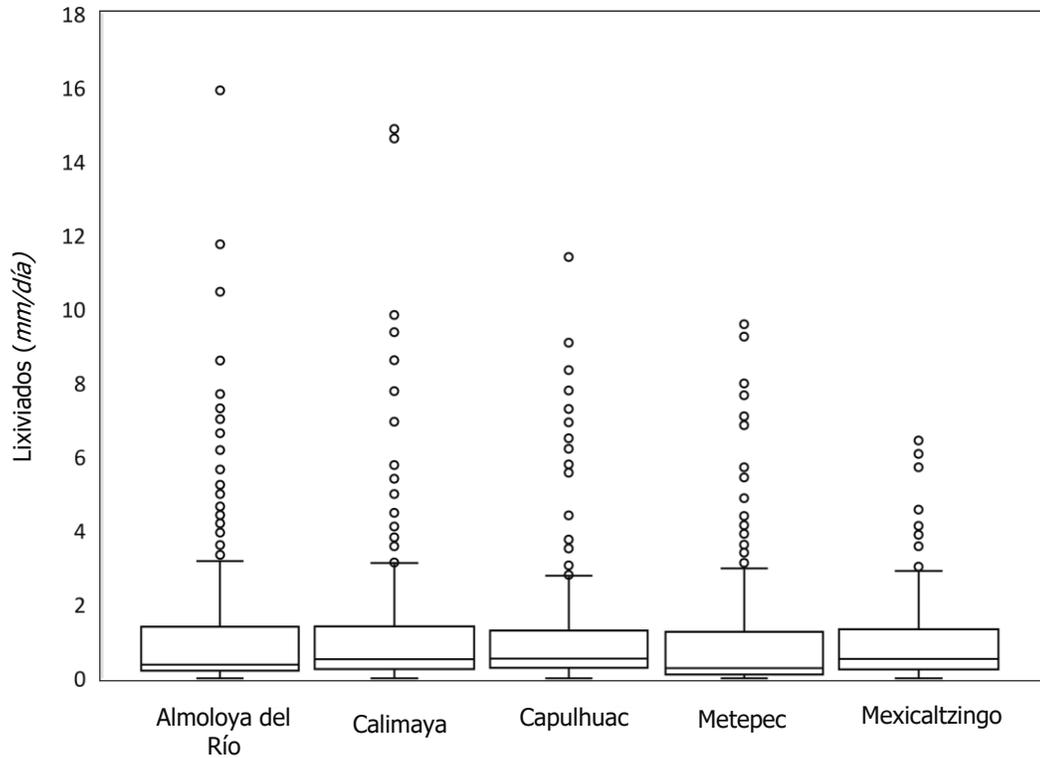


Figura 4.27. Gráficas de cajas y bigotes para los sitios no controlados, se observa que los cinco sitios presentan una distribución similar en los datos para el año húmedo. los datos graficados son para los valores estimados de lixiviados para el año húmedo.

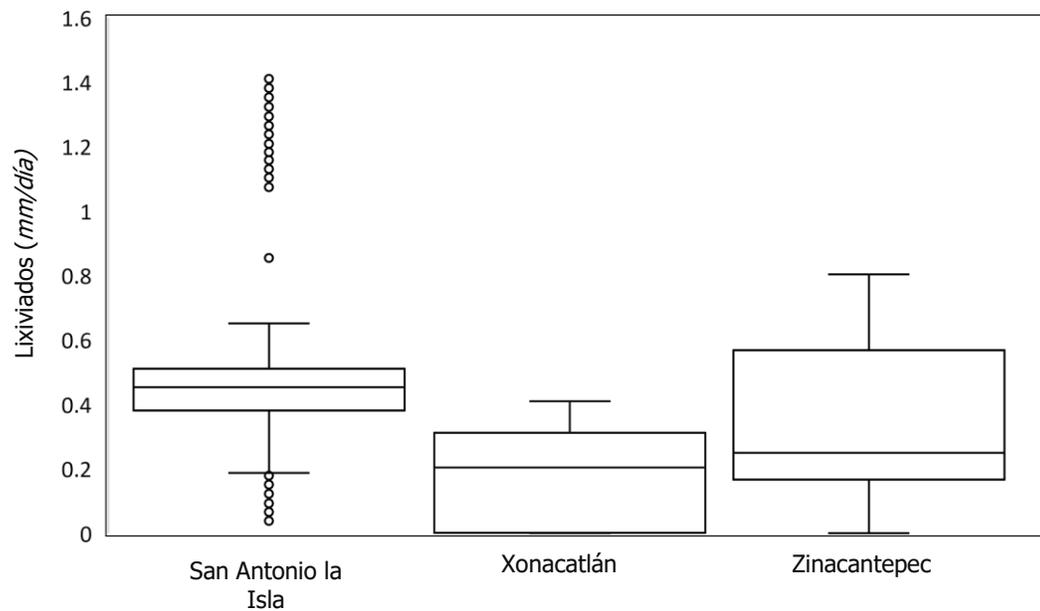


Figura 4.28. Gráficas de cajas y bigotes para los valores diarios de producción de lixiviado de los rellenos sanitarios estimados mediante el modelo HELP.

De esta manera, teniendo claro el valor que iba a tomar cada variable de la ecuación 3.16, se procedió a obtener los tiempos de tránsito para cada estrato presentado en el perfil de los sitios de disposición final de residuos sólidos, para posteriormente realizar la suma de cada uno y obtener el tiempo total requerido por el lixiviado para fluir de forma advectiva a través de la zona no saturada (*Tabla 4.18*).

Finalmente, a partir del análisis de los tiempos de tránsito advectivo se tiene que de los sitios no controlados el que representa una mayor amenaza es el sitio de Mexicaltzingo donde 0.52 *mm* de lixiviado tardarán aproximadamente 138 *días* en alcanzar el nivel freático considerando solo el flujo advectivo, en segundo lugar se encuentra el sitio de Almoloya del Río donde por sus características estratigráficas 0.21 *mm* de lixiviados tardarán en fluir a través de los estratos 312 *días* antes de alcanzar el nivel freático, posteriormente se encuentra el sitio de Calimaya que a pesar de presentar una zona no saturada de aproximadamente 110 *m* debido a la composición de su estratigrafía 0.51 *mm* de lixiviados tardarán en fluir de forma advectiva aproximadamente 379 *días*. En el caso de los rellenos sanitarios el sitio que presenta una menor tiempo de tránsito (aproximadamente 6.7 *años*) es el relleno sanitario de San Antonio la Isla, sin embargo, este tiempo es mayor que el estimado para los sitios no controlados. De igual manera, los tiempos obtenidos para los rellenos sanitarios demuestran que la capa de arcilla colocada por debajo de geomembrana ayuda en gran medida a disminuir el tiempo que tarda el lixiviado en llegar al agua subterránea. En este sentido en la *Figura 4.29* se presentan los sitios de disposición final clasificados por el tiempo que requiere el lixiviado para fluir de forma advectiva, se observa que los cinco sitios no controlados al presentar tiempos menores a la anualidad son lo que representan una alta amenaza a la calidad del agua subterránea.

Tabla 4.18 Tiempo en años estimado para que el lixiviado fluya de manera advectiva a través de la zona no saturada de cada sitio de disposición final.

No.	Sitio	Espesor Zona no Saturada (m)	Altura del lixiviado (mm)	Tiempo de transporte advectivo (años)
1	Almoloya del Río	27	0.21	0.9
2	Calimaya	110	0.51	1.0
3	Capulhuac	25	0.53	1.5
4	Metepec	30	0.28	1.4
5	Mexicaltzingo	18	0.52	0.4
6	San Antonio la Isla	14	0.45	6.7
7	Xonacatlán	64	0.2	9.7
8	Zinacantepec	60	0.25	47.1

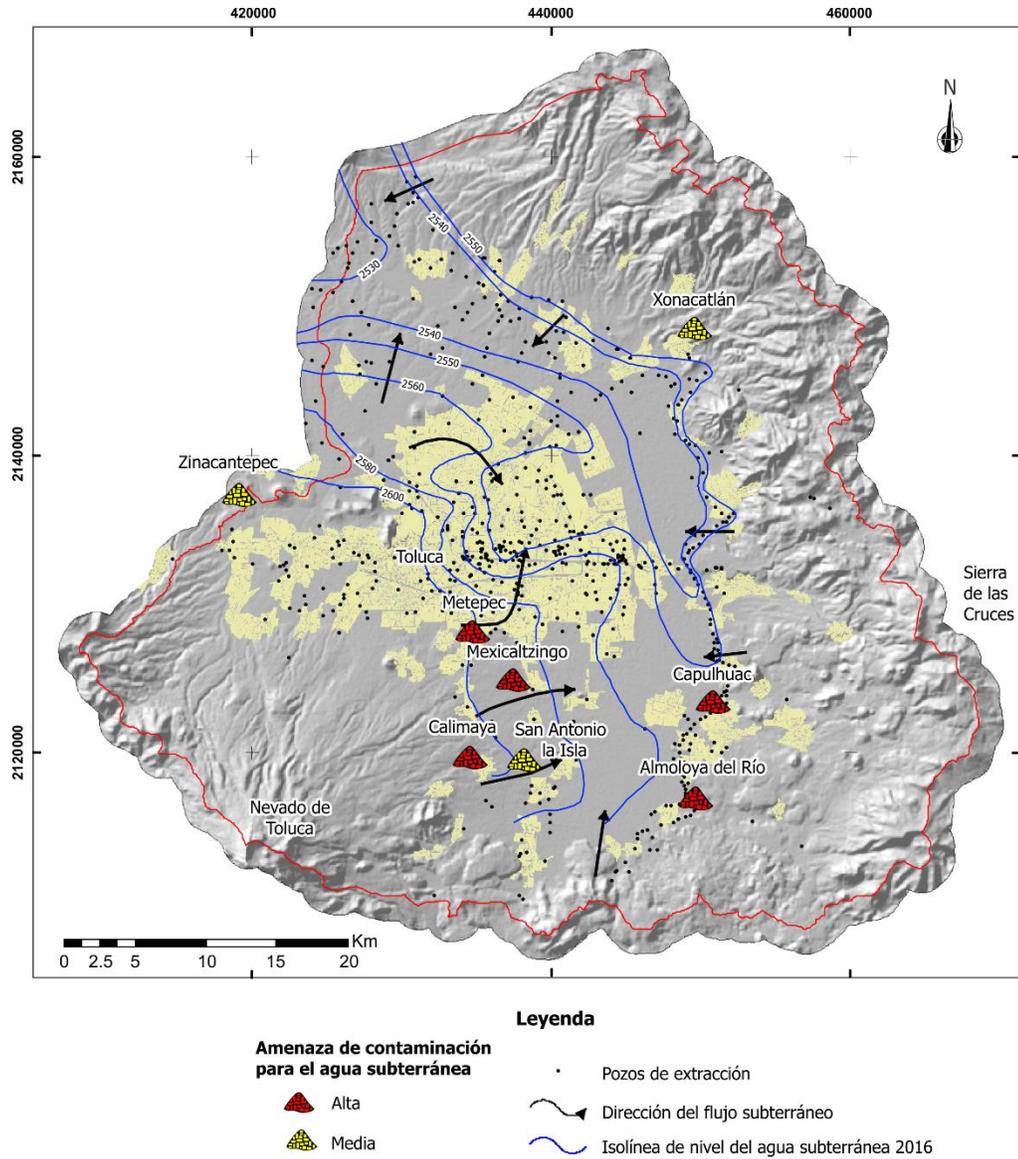


Figura 4.29 Clasificación de los sitios de disposición final de residuos sólidos por su potencial amenaza a la calidad del agua subterránea. Además, se presenta la dirección del flujo subterráneo obtenido de la CTAEM (2018) y los pozos de extracción ubicados dentro de la cuenca del valle de Toluca.

4.5 Estrategias de protección para el agua subterránea

Las estrategias planteadas para la protección del agua subterránea se enfocan al manejo de los sitios de disposición final, con la finalidad de disminuir la cantidad de lixiviado generado. Por el riesgo potencial que implica el permitir que se filtre lixiviado hasta el agua subterránea, la mejor práctica exige su eliminación o contención, es por ello que la principal estrategia para contrarrestar la producción de lixiviados en los sitios no controlados es la aplicación de una capa impermeable que cubra los residuos sólidos, el material que ha sido más usado es la arcilla, por su baja capacidad de infiltración, sin embargo, tiene desventajas como su propensión a agrietarse debido a la falta de agua.

Para el caso de los sitios no controlados la propuesta es que se realice la rehabilitación de los sitios, es decir, sanearlos de tal manera que se puedan aplicar las medidas básicas de protección como es la aplicación de una cobertura aunque sea de manera semanal, disminuyendo la infiltración del agua proveniente de la lluvia, además de favorecer disposición de los residuos en diversas capas, lo que un futuro ayudara a la disminución de la generación de lixiviado, como se pudo observar en la cuantificación realizada en los rellenos sanitarios que al estar compuestos por diversas capas su producción disminuye. Como se mencionó anteriormente el material idóneo es la arcilla, sin embargo a veces llevar este material hacia los sitios resulta en un proceso caro, es por ello que considerando que los sitios que se encuentran clausurados han sido cubiertos con el material denominado tepetate presente en el área, y al realizar su cuantificación este mostró una menor producción de lixiviados, se realizó una cuantificación suponiendo que se agregaba una capa de igual magnitud a todos los sitios y los resultados muestran que a pesar que el material propuesto presenta una infiltración moderada, la producción de lixiviados disminuye en todos los sitios (*Figura 4.30*)

Respecto al sitio de Metepec, la propuesta se enfoca a la aplicación de una nueva capa de cobertura, pero en este caso se habla de una geomembrana que en combinación con la capa de cobertura ya dispuesta favorece la disminución de lixiviados (*Figura 4.31*). En las *Tablas 4.19 y 4.20* se muestran los resultados obtenidos partir de las medidas propuestas en comparación a los valores obtenidos con las condiciones actuales para los sitios no controlados y el relleno sanitario de Zinacantepec, cabe señalar que para el sitio de Almoloya

del Río y el relleno sanitario de Zinacantepec no se realizó una nueva estimación, sino que se compararon y analizaron los resultados de sus celdas con cobertura con los resultados obtenidos en las celdas sin cobertura. Asimismo, se presenta el porcentaje de reducción en la producción y volumen de lixiviados. Se observa que, si bien de manera individual el porcentaje de reducción en la producción de lixiviados es poca, al realizar la suma total da como resultado un porcentaje de reducción del 22%, comparado con lo que se produce en las condiciones actuales de los sitios. En el caso de los rellenos sanitarios la opción más sencilla es la evaporación de los lixiviados, este proceso ya se realiza en los tres sitios, sin embargo, es importante mejorar la infraestructura de recolección y disposición del lixiviado, otra opción es optar por el reciclaje de lixiviados, lo que favorece su disolución, atenuando los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del vertedero. También, es importante implementar una red de monitoreo, si bien estas pueden llegar a ser “costosas”, a un mediano y largo plazo los beneficios obtenidos serán mayores, ya que esto favorecerá la preservación de la calidad del agua subterránea que es indispensable para el desarrollo de diversas actividades.

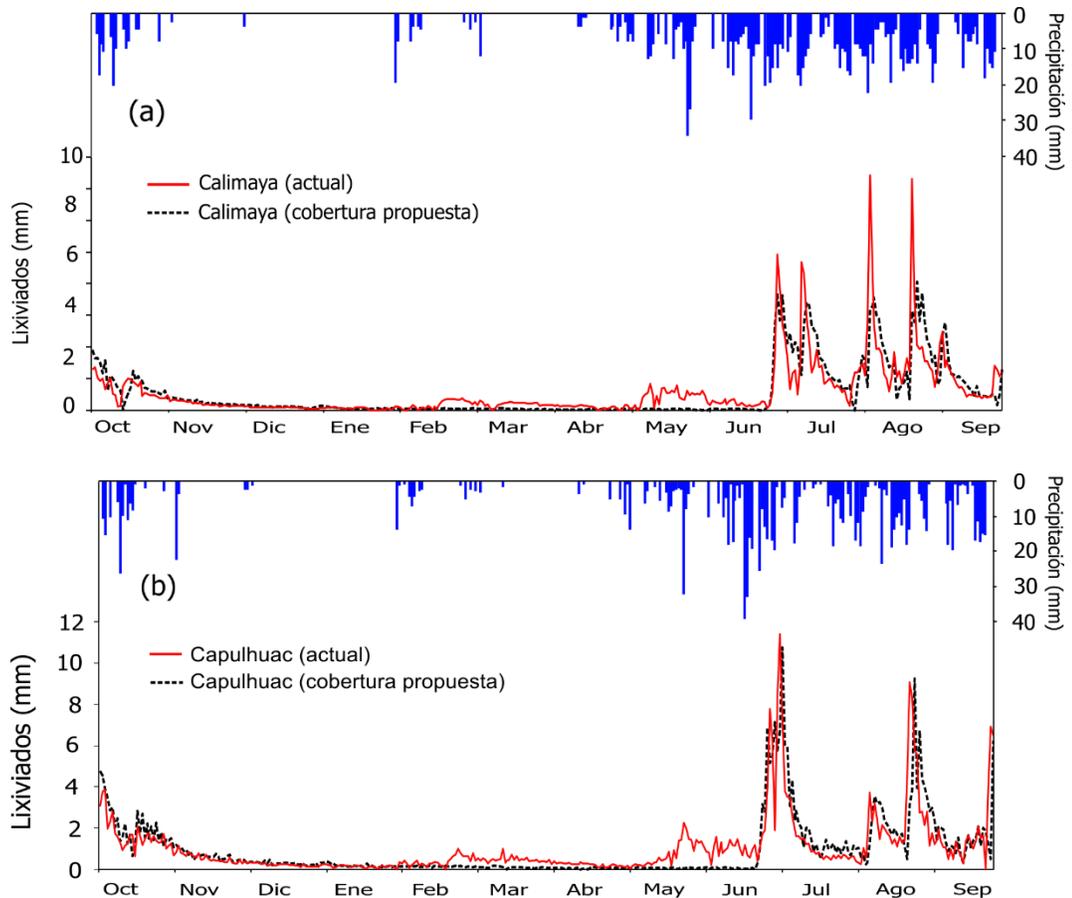


Figura 4.30 Comparación de la variación de la producción de lixiviados para los sitios de disposición final. La estimación se realizó con el modelo HELP considerando las condiciones actuales y las condiciones propuestas para cada sitio: (a) Calimaya y (b) Capulhuac. En la parte superior de cada gráfica se muestra la precipitación diaria en mm registrada en el año hidrológico comprendido entre 1994-1995.

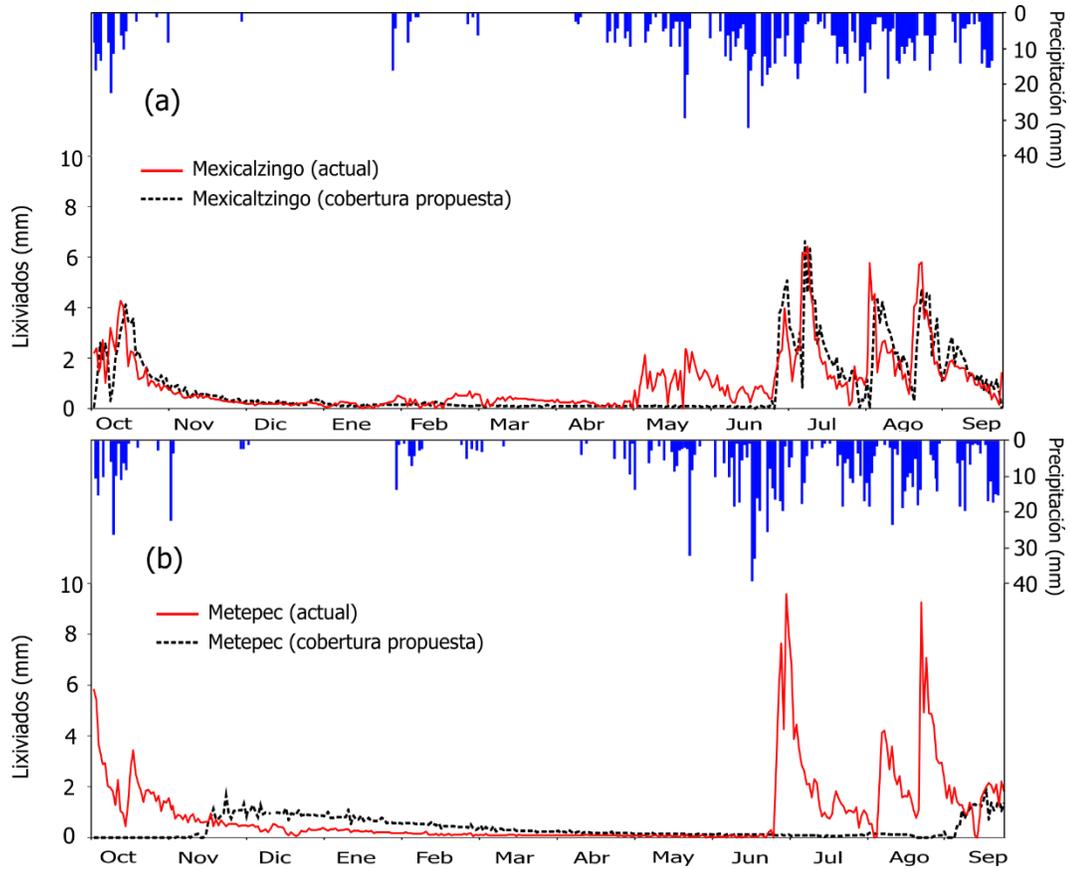


Figura 4.31 Comparación de la variación de la producción de lixiviados para los sitios de disposición final. La estimación se realizó con el modelo HELP3 considerando las condiciones actuales y las condiciones propuestas para cada sitio: (a) Mexicalzingo y (b) Metepec. En la parte superior de cada gráfica se muestra la precipitación diaria registrada en mm para el año hidrológico comprendido entre 1994-1995.

Tabla 4.19 Síntesis de la producción de lixiviados a partir de las medidas propuestas en comparación con las condiciones actuales de los sitios de disposición final. La cuantificación se realizó con el modelo HEL3P considerando las condiciones meteorológicas del año hidrológico húmedo, que constituye el escenario más desfavorable para la cuantificación de la producción de lixiviados.

No.	Nombre del sitio	Precipitación (mm)	Condiciones actuales lixiviado (mm/año)	Condiciones propuestas lixiviado (mm/año)	Porcentaje de reducción (%)
1	Almoloya del Río	1340	433.5	401.60	7.36
2	Calimaya	1211	425.7	397.60	6.60
3	Capulhuac	1086.5	374	367.70	1.68
4	Metepec	1086.5	337.1	137.00	59.36
5	Mexicaltzingo	1087	355.6	311.60	12.37
8	Zinacantepec	958.4	129.6	108.20	16.51

Tabla 4.20 Síntesis del volumen total de lixiviados generados en los sitios de disposición final considerando sus condiciones actuales y las medidas propuestas para la reducción de la producción de lixiviados. Asimismo, se incluye el porcentaje total de lixiviado reducido a partir de las medidas propuestas.

No.	Nombre del sitio	Precipitación (mm)	Condiciones actuales lixiviado (m ³ /año)	Condiciones propuestas lixiviado (m ³ /año)	Volumen reducido (m ³ /año)
1	Almoloya del Río	1340	2,630.7	2,570.2	60.5
2	Calimaya	1211	19,157.4	17,892.0	1,265.4
3	Capulhuac	1086.5	8,228.9	8,089.4	139.5
4	Metepec	1086.5	30,342.6	12,330.0	18,012.6
5	Mexicaltzingo	1087	7,111.2	6,232.0	879.2
8	Zinacantepec	958.4	11,439.3	9,738.0	1,701.3
Porcentaje de reducción					22%

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En términos generales, en los sitios de disposición final de residuos sólidos no se dispone de sistemas que permitan realizar el registro histórico de la producción de lixiviados generada dentro de cada sitio, la principal razón se relaciona con los costos que conlleva la instalación y mantenimiento de la infraestructura requerida para dicha tarea. Sin embargo, es necesario conocer el volumen de lixiviado que se produce para poder plantear y realizar acciones encaminadas a contrarrestar los efectos ocasionados por la presencia de los lixiviados en el ambiente. En este sentido, se han desarrollado diversos modelos que ayudan a la estimación de la producción de lixiviados, el factor común de dichos modelos es que están basados en el balance hidrológico, sin embargo, cada modelo contempla diferentes parámetros, además, los métodos de cuantificación para cada parámetro pueden variar. Bajo este contexto, en este estudio se optó por el modelo WBM y el modelo HELP3. En dichos modelos como parte del balance hidrológico se considera la humedad de los residuos sólidos, ya que, a partir de ésta los residuos presentaran una mayor o menor capacidad de retención de agua, lo que repercute directamente en la producción de los lixiviados.

A partir de los resultados observados, se tiene que los valores obtenidos por el modelo WBM se encuentran aproximadamente un 50% arriba de lo estimado en el modelo HELP. Por ejemplo, en promedio el volumen de producción de lixiviados estimados por el modelo WMB es de 17,800 m³/año mientras que el para el modelo HELP es de 8,600 m³/año. Esto se atribuye a la cantidad de parámetros que el modelo HELP utiliza para la estimación de la producción de lixiviados. Además, de que la estimación se realiza de una manera más enfocada, es decir, los cálculos se realizan capa por capa, asimismo, se hace la distinción entre las propiedades físicas de cada capa, lo que se manifiesta en los resultados obtenidos. En tal sentido, los valores obtenidos para los rellenos sanitarios con el modelo WBM muestran la misma tendencia de generación que los sitios no controlados y en el caso del modelo HELP la producción discrepa entre rellenos sanitarios y sitios no controlados. Por ejemplo, para el modelo WBM la producción de lixiviados se encuentran ente un 20 y 50% del total de la precipitación registrada para todos los sitios, mientras que para el HELP3 la producción de lixiviados en los rellenos sanitarios va del 3 al 15% del total de la precipitación y para los sitios no controlados esta cifra incrementa encontrándose en un rango del 15 al 35% con respecto al total de la precipitación aproximadamente.

Por otra parte, aun cuando los rellenos sanitarios operan según la normatividad establecida, se observaron deficiencias que pueden repercutir en la calidad del agua subterránea. Como consecuencia, de problemas en su construcción y manejo que dan origen a la fuga de lixiviados alrededor del perímetro de los sitios, si bien durante los recorridos de campo se observó que existe la geomembrana para la prevención de la filtración de los lixiviados, se desconoce las características de instalación, ya que, si estas no se cumplen la función de la geomembrana se ve reducida incrementando la amenaza a la calidad del agua.

En términos de cuantificación de la producción de lixiviados en *mm* por año son los sitios no controlados (Almoloya del Río, Capulhuac, Calimaya, Metepec y Mexicaltzingo) los que presentan una mayor producción de lixiviado, tanto para el modelo WBM como para el modelo HELP. Sin embargo, al hablar en términos de volumen de lixiviados (*m³/año*), solo los sitios de Metepec y Mexicaltzingo presentan una potencial amenaza para la calidad del agua. Por otra parte, los rellenos sanitarios a pesar de presentar una baja producción de lixiviados en *mm/año*, como consecuencia de su gran extensión al cuantificar el volumen

producido de lixiviados, los tres sitios se vuelven potencialmente amenazas para el agua subterránea. Por otra parte, a partir de análisis del tiempo de tránsito considerando solo el flujo advectivo se encontró que a pesar de que los rellenos sanitarios presentan una mayor cantidad de producción de lixiviados, y suponiendo que cuenten con una capa de arcilla de baja permeabilidad en la base del sitio, el tiempo que necesita cierta cantidad dada de lixiviado para fluir advectivamente entra en un rango de años, a diferencia de los sitios no controlados que al carecer de una capa impermeabilizante los tiempos de tránsito estimados son en días, siendo Mexicaltzingo el sitio que presenta el menor tiempo con 138 *días*, seguido por el sitio de Almoloya con 312 *días*. En términos generales, el perfil estratigráfico de los sitios está compuesto por arenas con intercalaciones de gravas y arcillas, lo que representa una permeabilidad mediana, lo que puede explicar los tiempos presentados. Cabe destacar que, para las estimaciones realizadas respecto a la potencial amenaza de contaminación solo se utilizaron datos generales, ya que paralelamente a este estudio se realizaba una investigación que evaluó el riesgo del agua subterránea a partir de un enfoque hidrodinámico en los mismos sitios de disposición final de residuos sólidos.

La configuración de los sitios de disposición final juega un papel importante dentro de la estimación del volumen de lixiviados, ya que mientras los sitios no controlados cuentan con un perfil simple, los rellenos sanitarios dependiendo de su altura presentan entre 6 y 8 capas de residuos, además, presentan una capa de cobertura entre cada capa de residuos dando un total de entre 12 y 16 capas, más la geomembrana, lo que favorece la disminución de la producción de lixiviados en términos del porcentaje de precipitación que llega a infiltrarse y por ende se convierte en lixiviado.

A partir de la segunda cuantificación realizada para estimar el volumen de lixiviados, donde se consideraba una capa de cobertura para los sitios no controlados, los resultados demostraron que la existencia de dos o más capas ayuda a disminuir la producción de lixiviados. La evidencia más significativa de este contexto, son los resultados obtenidos para el sitio de Metepec, puesto que se presentó una reducción de la producción de lixiviados de aproximadamente el 18% comparando con lo que se producía en las condiciones actuales del sitio. Dicha situación también se comprobó con el cálculo del tiempo de tránsito ya que, al considerarse una capa de arcilla como parte del perfil estratigráfico de los rellenos sanitarios

sus tiempos de tránsito se encontraron en la magnitud de *años*, contrastando con el tiempo en *días* para los sitios no controlados.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda dar seguimiento a este tipo de estudios, sin embargo, es necesario primero implementar acciones encaminadas a mejora en la medición de los parámetros utilizados con la finalidad de que los datos a utilizar sean lo más representativos de los sitios a estudiar, ejemplo, de ello es la información meteorológica. Si bien, el área de estudio se encuentra cubierta con estaciones meteorológicas que brindan los parámetros básicos como la precipitación y la temperatura, es necesario la instalación de estaciones que donde además de estos parámetros se registre información como la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad de viento, ya que estos parámetros también juegan un papel fundamental en la estimación de la producción de lixiviados. En el caso de la zona de estudio solo se encuentran tres estaciones con estas características. En este sentido, también debe promoverse la realización de estudios enfocados a la obtención de los parámetros hidráulicos de los residuos sólidos presentes en cada sitio de disposición final, ya que estos, gobiernan el movimiento de la humedad dentro del sitio de disposición final. El conocer más a detalle estos valores para cada sitio mejorará la estimación de la producción de lixiviados generados.

Por otra parte, para poder validar el uso de cualquier modelo para la zona de estudio es importante contar primero con mediciones en campo, lo que permitirá comparar los resultados de los modelos con los valores reales. Por tanto, se sugiere la implementación de lisímetros en los sitios para que en un futuro se pueda comparar la información, dando así pauta para que las estimaciones futuras puedan ser más representativas de cada zona. En tal sentido, la aplicación de esta medida puede comenzar en los rellenos sanitarios, ya que, al estar operados por empresas privadas se puede llegar a tener un mayor control respecto a ubicación y manejo de los lisímetros, además que los gastos generados pueden ser recuperados por la cuota cobrada para la disposición final de residuos dentro de sitio. Para los sitios no controlados se puede comenzar por la colaboración tanto de los municipios como instituciones educativas con la finalidad de implementar dichas medidas, de esta manera además de contar con registro se puede realizar paralelamente estudios que permitan aprovechar al máximo la inversión realizada.

Referencias bibliográficas

- Abunama, T., Othman, F., Alslaibi, T. y Abualqumboz, M., 2017. *Quantifying the Generated and Percolated Leachate through a Landfill's Lining System in Gaza Strip*, Palestine. Polish Journal of Environmental Studies, 26 (6): 2455-2461.
- Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P. F. y Zepeda, F., 1997. *Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y El Caribe*, Washington, D.C.: Banco Interamericano de Desarrollo y la Organización Panamericana.
- Albright, W.H., Benson, C.H., Gee, G.W., Roesler, A.C., Abichou, T., Apiwantragoon P., Lyles B.F., and Roel, S.A. 2004. *Field water balance of landfill final covers*. Journal Environmental Quality, 33:2317-2332.
- Alslaibi, T. M., Abustan, I., Mogheir, Y. K. y Afifi, S., 2013. *Quantification of leachate discharged to groundwater using the water balance method and the Hydrologist Evaluation of Landfill Performance (HELP) model*. Waste Management y Research, 31(1), pp. 50-59.
- Alslaibi, T. M., Mogheir, Y. K. y Samir, A. 2010. *Analysis of landfill components in estimating the percolated leachate to groundwater using the HELP model*, s.l.: Water Science y Technology.
- Alslaibi, T. 2009. *Evaluating the Impact of Landfill Leachate on Groundwater Aquifer*, Palestina: MSc thesis, p.127
- Álvarez, C. A. & Suárez, G. J. H. 2006. *Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario "El Guayabal" de la ciudad San José de Cúcuta*. Ingeniería y Desarrollo, 20, pp. 95-105
- Ariel Consultores, S.A. 1996. *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca*. Gerencia de Aguas Subterráneas, CNA. Reporte interno
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Nicks, A. D., y Sammons, N. B. 1989. *SWRRB, a Simulator for Water Resources in Rural Basins*. Agricultural Research Service, USDA, Texas A&M University Press, College Station, TX.
- Aziz, H. A., Adlan, M. N., Amilin, K., Yusoff, M. S., Ramly, N. H., & Umar, M., 2012. *Quantification of Leachate Generation Rate from A Semi-Aerobic Landfill in Malaysia*. Environmental Engineering and Management Journal, 11(9), pp. 1581-1585.
- Bagchi, A. 1994. *Design, Construction and Monitoring of Landfill*. Segunda edición. Wiley Interscience, New York. 376 pp.

- Berger, K. U., 2015. *On the current state of the Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model*. Waste Management, Volume 38, pp. 201-209.
- Blanco F, Á., 2007. *Assessment of groundwater contamination by landfill leachate in Toluca valley, Mexico*, Suderburg: Tesis de Maestría, p 88.
- Bou-Zeid, E. and EL-FADEL, M. 2004. Parametric Sensitivity Analysis of Leachate Transport Simulations at Landfills. Waste Management, 24, 681-689.
- Breza-Baruta, B., Lemanowicz, J. y Bartkowiak., 2016. *Variation in biological and physicochemical parameters of the soil affected by uncontrolled landfill sites*. Environ Earth Sci, 75(201), p. 1.
- Cárdenas P. 2014. *Estimación de biogás y lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos del Estado de México*. Tesis de Maestría en Ciencias en Bioprocesos. Instituto Politécnico Nacional
- Chen, T.H., and Chynoweth, D.P. 1995. *Hydraulic Conductivity of Compacted Municipal Solid Waste*. Bioresource Technology. 51(2-3). pp 205-212
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2002. *Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero del valle de Toluca, Estado de México*. Subdirección general técnica, gerencia de evaluación y modelación hidrogeológica. México, D.F.
- Colombo R, Bellingeri D, Fasolini D, Marino CM. 2003. *Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data*. Remote Sensing of Environment, 86(1): 120–131
- CONAGUA. 2009. *Actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea del acuífero 1501, Valle de Toluca, Estado de México*.
- CONAGUA-Desarrollo y Sistemas, S.A. 2005. *Zonas de reserva de agua potable para la ciudad de Toluca*. Reporte interno. México
- CONAGUA-GTZ. 2008. *Plan de manejo de la cuenca del río Lerma en el Valle de Toluca*. Informe Final.
- Cruz, R., Orta de Velásques, M.A., Sánchez, J. y Rojas Valencia, M.A., 1997. *Estimación de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios mediante un balance de agua en serie*. Universidad Autónoma de Nacional de México.
- CTAEM (Comisión Técnica del Agua del Estado de México). 2018. *Plan Operativo de Manejo del Acuífero del Valle de Toluca*. Secretaría de Obra Pública. Estado de México.
- Duran, A., Garcés, M., Velasco, A.R., Marín, J.C., Gutiérrez, R., Moreno, A. y Delgadillo, N.A. 2013. *Mexico City's municipal solid waste characteristics and composition analysis*. Revista internacional de contaminación ambiental, 29(1), 47-57.
- El-Fadel, M., Findikakis, A. N., Y Leckie, J. O., 1997. *Modeling leachate generation and transport in solid waste landfills*. Environmental Technology, 18, pp. 669-686

- Expósito, J.L. 2012. Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea. Tesis de Doctorado en Ciencias del Agua. Facultad de Ingeniería, CIRA-UAEM. Estado de México, p. 220
- Fan, L., Gao, Y., Bruck, H., Bernhofer, Ch. 2008. *Investigating the relationship between NDVI and LAI in semiarid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements*. Theoretical and Applied Climatology 95, pp: 151-156
- FAO., 2012. *The ETo Calculator. Evapotranspiration from a reference Surface. Reference manual Version 3.2* September 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Land and Water Division. FAO, Via delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy
- Farquhar, G. J., 1995. *Water Balance Modelling for a Landfill*. En: E. A. Mc Bean, F. A. Rovers y G. J. Farquhar, edits. Solid Waste Landfill Engineering and Design. United States: Prentice Hall, pp. 127-154
- Farquhar, G., 1989. *Leachate: Production and Characterization*. Canada Journal Civil Engineering, 16:317-325.
- Fatta, D., Papadopoulos, A. y Loizidou, m., 1999. *A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area*. Environmental Geochemistry and Health, Volumen 21, pp. 175-190.
- Fenn, D., Hanley, K. y Degeare, T., 1975. *Use of the Water Balance Method for Predisting Leachate Generation from Solid Waste Disposal Sites*, Washington D. C.: U.S Environmental Protection Agency, EPA.
- Franco., R. 2002. *Adecuación del método de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos (DRASTIC), mediante el uso del trazado de partículas en el acuífero del curso alto del río Lerma, estado de México*. Tesis maestría ciencias del agua. CIRA-UAEM
- Freeze, R. A., y Cherry, J. A. 1979. *Groundwater*. PrenticeHall
- Fries, C., (1960). *Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín, núm. 60*.
- Frika, Y., Fellner, J., Zairi, M. 2017. *Leachate generation from landfill in a semi-arid climate: A qualitative and quantitative study from Sousse, Tunisia*. Waste Management and Research, 35 (9):940-948.
- García, E. 1981. *Atlas Nacional del Medio Físico*. SPP.3
- García-Palomo, A., Zamorano, J.J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R. y Macías, J.L. 2008. *El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México central*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25 (1), 158-178
- GEM. 2011. *Atlas de la cuenca del río Lerma en el Estado de México*. Compendio. Gobierno del Estado de México. México

- Giroud, J.P., Badu-Tweneboah, K. y Soderman, K.L. 1997. *Comparison of leachate flow through compacted clay liners and geosynthetic clay liners in landfill liner systems*. Geosynthetics International, 4 (3-4):391-431.
- Gobierno del Estado de México. GEM. 2012. *Programa de protección civil para basureros*. Secretaria de seguridad Ciudadana. Protección Civil del Estado de México.
- Gómez G., Meneses M., Ballinas L. y Castells F. 2008. *Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico*. Waste Manage. 28, 2465-2471
- Gómez, G. 2014. *Evaluación Del Comportamiento De La Pluma De Contaminación Generada En El Vertedero De Residuos Del Municipio De Mexicaltzingo, Estado De México*. Tesis de Doctorado, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali.
- González, R. C. A. y Buenrostro, D. O., 2012. *Composición de Residuos Sólidos Urbanos en Dos Sitios de Disposición Final*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 28(1), pp. 13-18.
- IFOMEGEM. 2013. Atlas Geológico Ambiental del Estado de México (Reporte final). Toluca, Estado de México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2016. Residuos (en línea). Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/temas/residuos> Consultado el 16 de enero de 2019.
- Jaber, A. y Nassar, A., 2007. *Assessment of Solid Waste Dumpsities in Gaza Strip, Gaza Strip: The Japan International Cooperation Agency (JICA)*.
- Jensen, D. T., Hargreaves, F. H., Temesgen, B. y Allen, R. G. 1997. *Computation of ETo under nonideal conditions*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. pp. 394-400.
- Johannessen, L.M., 1999. *Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills*. World Bank, Urban Development Division, Urban Waste Management Thematic Group, Working Paper Series 4.
- Johnson, R.A., 1986. *SOILINER Model - Documentation and User's Guide, U.S. Environmental Protection Agency, Hazardous Waste Engineering Research Lab. EPA 530-SW-86-006A*.
- Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development; Washington, DC: World Bank
- Kiss, K. G. y Encarnación, A. G., 2006. *Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final*. Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambientales. Instituto Nacional de Ecología, Volumen 79, pp. 39-51.
- Kulikowska, D., and Klimiuk, E. 2008. *The effect of landfill age on municipal leachate composition*. Bioresource Technology. 99. pp 5981-5985.

- LaGrega, M., Buckingham, P. y Evans, J., 2010. *Hazardous Waste Management*. 2nd ed. Estados Unidos: Waveland Pres. Inc.
- Liggett, J E., 2004. *Comparison of approaches for aquifer vulnerability mapping and recharge modelling at regional and local scales, Okanagan Basin, British Columbia*. Canada: University of Alberta, tesis Máster of science
- Lobo A., 2003. *Desarrollo de MODUELO 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos*. Universidad de Cantabria
- Lobo, A., Zantó, M. y Llamas, S., 2016. *Cierre, sellado y reinserción de antiguos vertederos. Experiencias en Iberoamérica*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Vol. 32, pp. 123-139.
- Longsdon G., Hess A. y Horsley M., 2002. *Guía para la selección de procesos de tratamientos de agua*. McGraw-Hill, Madrid.
- Macedo-Miranda M.G, Gómez-Beltrán G, Barrientos-Becerra B, Hernández M.C, Morales G.P. Ovando B.C. 2011. *Perfil estratigráfico del suelo de dos sitios de disposición final de residuos sólidos y su influencia en la contaminación de suelo y agua subterránea*. En Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima. pág 316-320
- Marin V. J., Díaz L.V., Hernández M. C., Mañon M. C., González J.C. y Santillán E. 2013. *Estimación de Metano generado en el relleno sanitario de Zinacantepec, Estado de México*. 6to. Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos, 3 Foro Regional de Energías renovables 37-41
- Moody, C. M. y Townsend, T. G., 2016. *A comparison of landfill leachates based on waste composition*. Waste Management, p. 1.
- Mor, S., Ravindra, K., Dahiya, R. P. Y Chandra, A., 2006. *Leachate Characterization and Assessment of Groundwater Pollution Near Municipal Solid Waste Landfill Site*. Environmental Monitoring and Assessment, Volumen 118, pp. 435-456.
- Morales, P., 2008. *Evaluación de los mecanismos preferenciales de atenuación natural de una pluma de lixiviado generada en el vertedero municipal de Metepec, Estado de México*. Tesis de Doctorado, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Autónoma del Estado de México.
- Moreno, A., 2008. *Simulación de flujo y estimación del potencial transporte de contaminantes en el vertedero de Metepec*. Tesis de Doctorado, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Autónoma del Estado de México.
- Murphy, R.J., y Garweell, J. E., 1998. *Infiltration Rates Through Landfill Liners*, Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management. Report #97-11.
- Naveen, B., Mahapatra, D., Sitharam, T., Sivapullaiah, P., & Ramachandra., 2016. *Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate*. Environmental Pollution, pp. 1-12.

- Neilsen, D., Smith, C.A.S., Frank, G., Koch, W., Alila, Y., Merritt, W.S., Taylor, W.G., Barton, M., Hall, J.W., and Cohen S.J., 2006. *Potential impacts of climate change on water availability for crops in the Okanagan Basin, British Columbia*. Canadian Journal of Soil Science 86:921-936.
- Noble J.J. Y Arnold A.E., 1991. *Experimental and Mathematical Modeling of Moisture Transport in Landfill*. Department of Chemical Engineering, Tufts University, Vol. 100.
- Orta, d. V. M. T., Cruz-Rivera, R., Rojas-Valencia, N. y Monje-Ramírez, I., 2003. *Serial water balance method for predicting leachate generation in landfills*. Water Management y Research, Volume 21, pp. 127-136.
- Perrier, E. y Gibson, A., 1981. *Hydrologic Simulation on Soild Waste Disposal Sites*. Report No. EPA-530/SW-868. USEPA.
- Ramaswamy, J. N. 1970. *Effects of hydraulic retention time on landfill leachate and gas characteristics*. PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada
- Renou, S., Givaudan, J.G., Poulain, S., Dirassouyan, F. y Moulin, P. 2008. *Landfill leachate treatment: Review and opportunity*. Journal Hazardous Materials 150, pp 468-493
- Reyes-López, J., Ramírez-Hernández, J., Lázaro-Mancilla, O., Carreón-Diazconto, C., Martín-Loeches, M. 2008. *Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in México*. Waste Management28, pp: 33-39
- Ritchie, J. T., 1972. *A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. Water Resources Research, 8(5), pp. 1204 – 1213.
- Rolecki, R. y Trkowski, S. 2000. *Características toxicológicas de contaminantes potencialmente liberados de rellenos sanitarios. Métodos de evaluación de riesgos para la salud por la exposición a sustancias peligrosas liberadas por rellenos sanitarios*. OPS/CEPIS.
- Sáez, A., G, U. y Joheni, A., 2014. *Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe*. Revista Omnia, 20(3), pp. 121-135.
- Saito, K., Ogawa, S., Aihara, M., y Otawa, K. 2001. *Estimates of LAI for forest management in Okutama*. 22nd Asian Conference on Remote Sensing. Centre for Remote Imaging Sensing and Processing.
- Salas, J.G., 2012. *Determinación espacial de la recarga mediante el diseño e instalación de instrumentación en pozos de monitoreo y simulación de la infiltración en la zona vadosa*. Tesis doctor en Ciencias del Agua. México
- Schroeder, P. et al., 1994. *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model: engineering documentation for version 3.*, Washington: US EPA/600/R-94/168b.
- SEMARNAT. 2004. *Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño,*

construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 20 de octubre de 2004. México.

- SEMARNAT. 2009. Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME). Dirección General de Fomento Ambiental Urbano y Turístico. Dirección de Manejo Sustentable de Residuos Sólidos. México, p. 185.
- SEMARNAT. 2012. *Informe de la Situación del medio ambiente en México. En: Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental.* Edición 2012. Capítulo 7. Consultado el 10 de enero de 2019. Disponible en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/07_residuos/cap7_1.html
- Senent, J. 2012. *Predicción de lixiviado en vertederos de residuos sólidos urbanos en ambientes semiáridos. Aplicación del modelo HELP en el vertedero de puente álamo* (Murcia). Tesis doctoral. Universidad de Murcia. España.
- Shah, N., Nachabe, M. and Ross, M., 2007. *Extinction depth and evapotranspiration from ground water under selected land covers.* Ground Water, 45(3): 329-338
- Sivakumar, D., 2013. *Experimental and analytical model studies on leachate volumen computation from solid waste.* International Journal of environmental Science and Technology. 10(5), 903-9016
- SMN. Servicio Meteorológico Nacional. 2018. [En línea] <http://smn.cna.gob.mx/es/emas>
- Stahl K., Moore R.D., Floyer J.A., Asplin M.G. y McKendry I.G. 2006. Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperatura in a large región with complex topography and highly variable station density. Agricultural and Forest Meteorology, 139 (3-4), 224-226.
- Tatsi, A., Zouboulis, A. 2002. *A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece),* Advances in Environmental Research 6(3), 207-219
- Tchobanoglous, G., Thiesen, H. y Vigil, S., 1994. *Gestión integral de los residuos sólidos.* McGraw-Hill: Madrid
- Teegavarapu, R. S. V. y Chandramouli, V., 2005. *Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records.* Journal of Hydrology, 312: 191-206
- Torres, S., 2016. *Simulación de los procesos hidrodinámicos de advección dispersión y reacciones químicas de una pluma de lixiviado.* Tesis de Doctorado, Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México.
- Vadillo, I y Carrasco, F. 2005. *Estimación del volumen de lixiviado generado en el vertedero de residuos sólidos urbanos de La Mina mediante balance hídrico.* Geogaceta, 37: 139-142

- Vargas., M. 2009. *Modelo De Balance Hídrico Para La Estimación De Los Caudales De Lixiviados Generados En La Operación Del Relleno Sanitario Del Centro Industrial Del Sur - El Guacal, Heliconia – Antioquia*. Tesis Maestría en Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia
- Vázquez, R., Feyen, J. 2003. Effect of potential evapotranspiration estimates on effective parameters and performance of the MIKE SHE-code applied to a medium-size catchment. *Journal of Hydrology* 270: 309-327.
- Wang, Y. 2013. *Leachate management in the aftercare period of municipal waste landfills*. Department of Civil and Environmental Engineering. Tesis doctoral Universidad de Aalto. Finlandia
- Ya, X., Xiangshan, X., Lu, D., Changxin, N., Yuqiang, L., Qifei, H. 2018. *Long-term dynamics of leachate production, leakage from hazardous waste landfill sites and the impact on groundwater quality and human health*. *Waste Management*, 82:156-166.
- Yalcin, F. y Demirer, G.N., 2002. *Performance evaluation of landfills with the HELP (hydrologic evaluation of landfill performance) model: Izmit case study*. *Environmental Geology*, 42, pp. 793-799
- Yang, N., Damgaard, A., Kjeldsen, P., Shao, L. y He, P., 2015. *Quantification of regional leachate variance from municipal solid waste landfills in China*. *Waste Management*. Vol. 46, p. 362-372.
- Yuen, S., Wang, Q., Styles, J. y McMahon, T., 2001. *Water balance comparison between a dry and a wet landfill- a full-scale experiment*. *Journal of Hydrology*, pp. 29-48.
- Zornberg, J.G., Jernigan, B.L., Sanglerat, T.R., and Cooley, B.H. 1999. *Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125., pp. 583-594.

Anexo I

Parámetros y procedimiento para el cálculo del balance hídrico en sitios de disposición final

1. La ecuación básica está definida como: $Perc = P - ETR - RO - \Delta ST$
2. **Evapotranspiración potencial (PET)**: Estos valores son derivados a partir de la ecuación de Thornthwaite
3. **Precipitación (P)**: Valores mensuales promedio, a partir de la información histórica que se pueden obtener de las estaciones climatológicas de interés.
4. **Coefficiente de escurrimiento superficial (Cr/o)**: Se define estrictamente como la relación entre la tasa máxima de escurrimiento de un área y la tasa promedio de precipitación sobre esa misma área.
5. **Escurrimiento superficial (r/o)**: Este valor representa la cantidad de precipitación que escurre de la superficie del vertedero, antes de que se infiltre hacia la cobertura del suelo colocada en la parte superior del vertedero.
6. **Infiltración (I)**: Representa la cantidad de precipitación que ingresa en la capa de cobertura de suelo. Este valor es simplemente la diferencia entre la precipitación y el escurrimiento superficial ($I = P - r/o$).
7. **Infiltración menos la evapotranspiración potencial (I - PET)**: Esta magnitud permite determinar los periodos de exceso y deficiencia de humedad en la capa de suelo. Un valor negativo de I - PET indica las necesidades de agua requeridas en una zona potencialmente con vegetación. Un valor positivo de I - PET indica el exceso de agua que está disponible durante un intervalo de tiempo del año para recargar y percolar humedad. En muchos lugares hay únicamente un periodo de humedad y uno de estiaje. Por lo tanto, habrá solo un escenario de diferencia negativas consecutivas y uno positivas. En lugares con valores anuales positivos de I - PET, la humedad del suelo al final del periodo húmedo es siempre el valor máximo de capacidad de retención de humedad.
8. **Perdida de agua potencial acumulada (Σ Negativos (I-PET))**: Los valores negativos de I - PET representan la pérdida potencial de agua acumulada mes por

mes. En muchas áreas húmedas (aquellas en donde la suma de todos los valores de, $I - PET$, es positivo), el valor de la pérdida de agua potencial acumulada, con el cual inicia el acumulativo de valores negativos de $I - PET$ es cero. Dicho valor es asignado al último mes con valor positivo de $I - PET$. La razón principal de lo anterior es que la humedad del suelo al final de la estación húmeda se encontrará en su capacidad de campo. En el caso de zonas secas, (aquellas en donde la suma acumulativa de $I - PET$ es negativo), la humedad del suelo al final de la estación humedad estará por debajo de su capacidad de campo. Por lo tanto, es necesario encontrar un valor inicial de Σ Negativos ($I-PET$) con el cual iniciar el valor de negativos acumulados de $I - PET$. Esto se hace utilizando el método de Thornthwaite de aproximaciones sucesivas.

9. **Almacenamiento de humedad en el suelo (ST):** Este factor representa la humedad del suelo, o la humedad retenida en el suelo, después de que una cantidad dada de pérdida o ganancia de agua potencialmente acumulada haya ocurrido. Para áreas húmedas, el valor inicial es estimado en su capacidad de campo, multiplicando el agua disponible por unidad de profundidad del suelo y la profundidad de la zona de raíces. Este valor inicial de ST es asignado al último mes con valor positivo de $I - PET$, como por ejemplo el último mes de la estación húmeda. En áreas secas, como por ejemplo los Ángeles, California la humedad del suelo al final de la estación húmeda estará por debajo de su capacidad de campo. Por lo tanto, en este caso el valor inicial, así como los subsecuentes, valores de ST deberán ser determinados a partir de las tablas de retención de humedad del suelo adecuadas, utilizando los valores de Σ Negativos ($I-PET$), calculados como se describe en el punto anterior. Para determinar la humedad retenida en el suelo para cada mes, Thornthwaite desarrolló tablas de retención de humedad para varias capacidades de retención de agua. Después de que los valores mensuales de almacenamiento de humedad en el suelo para valores negativos de $I - PET$ han sido encontrados en las tablas respectivas, los valores positivos de $I -PET$, representan incrementos de humedad en el suelo que deben ser agregados a los valores mensuales de ST previos. Los valores de ST no pueden exceder el almacenamiento de humedad del suelo a su capacidad de campo. En ese sentido, cualquier exceso de $I-PET$ por encima de este máximo valor de ST se transformará en percolado.

10. **Cambio en el almacenamiento de humedad del suelo (ΔST):** Representa el cambio en la humedad del suelo mes a mes.
11. **Evapotranspiración Actual (AET):** Representa la cantidad actual de pérdida de agua durante un mes dado. En el caso de que la humedad del suelo sea despreciable, la tasa de evapotranspiración disminuirá por debajo de su tasa potencial, por lo tanto, resultará en un valor de AET menor que el correspondiente valor de PET. Para aquellos meses donde I - PET es positivo, la tasa de evapotranspiración no estará limitada por la humedad disponible y la AET será igual a la PET. Para aquellos meses donde I - PET es negativo, la tasa de evapotranspiración está limitada por la humedad disponible del suelo, y la $AET = PET + ((I - PET) - \Delta ST)$.

Calcular la evapotranspiración real/actual de la siguiente manera:

- a) meses húmedos: $I - PET \geq 0$; $AET = PET$
- b) meses secos: $I - PET < 0$; $AET = PET + (I - PET - \Delta ST)$

Nota: durante los meses en que el I - PET es negativo, la cantidad evapotranspirada es la cantidad potencialmente evapotranspirada más lo que de otra manera se agregaría al almacenamiento de humedad del suelo más lo disponible de la humedad del suelo previamente almacenada.

12. **Percolación (PERC):** Después de que el suelo alcance su máxima capacidad de almacenamiento de humedad, cualquier exceso de infiltración se transformará en percolado a través de la capa de cobertura, dirigiéndose hacia la masa de residuos subyacente. Por lo tanto, solo será posible una cantidad de percolado significativa durante aquellos meses donde la I exceda la PET (I - PET es positivo) y la humedad del suelo exceda su máximo. En muchas áreas húmedas, esto ocurrirá durante la temporada de lluvias y en el caso de áreas secas una percolación significativa nunca podría ocurrir.

Calcule la percolación (**PERC**) de la siguiente manera:

- a) Meses secos: $I - PET < 0$; $PERC = 0$
- b) Meses húmedos: $I - PET \geq 0$; $PERC = (I - PET - \Delta ST)$

Sume los valores de percolación para el año para obtener la producción total anual de lixiviados por unidad de área

$$PERC = P - AET - RO - \Delta ST$$

Procedimiento del WBM: Ejemplo sitio de Mexicaltzingo para el año húmedo

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Annual
Tm	14.2	13.6	13.3	11.8	12.3	14.0	15.6	17.4	17.3	16.1	16.6	15.9	
I	4.9	4.5	4.4	3.7	3.9	4.8	5.6	6.6	6.5	5.9	6.2	5.8	62.7
A	1.5												I
PET	53.6	50.3	48.7	40.8	43.4	52.5	61.6	72.4	71.8	64.6	67.6	63.4	
Pp	121.0	0.0	2.0	0.0	35.0	7.0	31.0	125.0	216.0	183.0	218.0	149.0	1087.0
Cro	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Ro	12.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	2.0	13.0	22.0	18.0	22.0	15.0	106.0
I	109.0	0.0	2.0	0.0	33.0	7.0	29.0	112.0	194.0	165.0	196.0	134.0	
I-PET	55.4	-50.3	-46.7	-40.8	-10.4	-45.5	-32.6	39.6	122.2	100.4	128.4	70.6	290.3
ACCWL*		-50.0	-97.0	-138.0	-148.0	-194.0	-227.0						
ST	100	60	37	24	22	14	10	49.6	100	100	100	100	
Δ ST	0.0	-40.0	-23.0	-13.0	-2.0	-8.0	-4.0	39.6	50.4	0.0	0.0	0.0	
AET	53.6	40.0	25.0	13.0	35.0	15.0	33.0	72.4	71.8	64.6	67.6	63.4	554.4
PERC	55.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.8	100.4	128.4	70.6	426.6

Anexo II

Información de entrada para el modelo WBM

Nota: Coeficiente de escurrimiento de 0.05 a 0.2 dependiendo de época y si tenía cobertura
Se asumió una capacidad de absorción del suelo de 100mm/m.

Almoloya del Río

		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	13.5	12.6	12	11	11.7	13.6	14.8	16.2	15.6	14.3	14.7	14.5	
	Pp (mm)	38.3	7.8	5.7	0	41.2	13.4	38.2	92	199.1	258.1	143.1	121.5	958.4
Año promedio	Tem (°C)	19.2	18.6	17.9	17.9	18	17.5	20.2	21.2	21.9	19.7	20.1	20.8	
	Pp (mm)	141	41	11	0	0	0	0	8	209	175	200	233	1018
Año seco	Tem (°C)	23.1	22.1	21.5	21.5	22.9	23.9	25.6	26.8	25.7	24.6	25.3	24.6	
	Pp (mm)	0	5	0	0	0	0	24	32	212	286	232	83	874

Calimaya

		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	13.6	12.8	12.3	11.5	11.7	12.9	15.6	16.1	15.8	14.1	14.3	13.8	
	Pp (mm)	110.0	0.0	3.0	0.0	48.0	13.0	25.0	169.0	216.0	217.0	246.0	164.0	1211.0
Año promedio	Tem (°C)	13.2	12.7	10.0	8.2	9.7	12.7	16.0	12.8	12.6	15.0	14.7	14.5	
	Pp (mm)	76.0	46.0	0.0	4.0	13.0	0.0	33.0	1.0	207.0	198.0	187.0	166.0	931.0
Año seco	Tem (°C)	12.9	11.6	10.7	10.0	12.0	14.5	16.1	17.4	15.4	15.1	14.5	13.9	
	Pp (mm)	0.0	3.0	0.0	1.0	0.0	0.0	51.0	78.0	149.0	238.0	172.0	58.0	750.0

Capulhuac y Metepec

		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	14.3	11.6	11.0	9.8	11.2	11.8	14.4	15.9	16.4	14.5	15.1	14.6	
	Pp (mm)	106.6	25.5	5.2	0.0	40.9	9.3	9.0	114.7	250.6	149.1	205.8	169.8	1086.5
Año promedio	Tem (°C)	13.1	11.3	10.7	11.1	11.6	12.4	14.4	15.2	15.9	15.8	14.8	14.9	
	Pp (mm)	70.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.0	26.0	210.0	164.0	155.0	149.0	841.0
Año seco	Tem (°C)	13.7	10.3	10.7	10.7	11.8	13.7	16.6	17.5	16.4	15.2	14.3	15.9	
	Pp (mm)	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	71.0	82.0	134.0	202.0	159.0	100.0	767.0

Mexicaltzingo

		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	14.2	13.6	13.3	11.8	12.3	14.0	15.6	17.4	17.3	16.1	16.6	15.9	
	Pp (mm)	121.0	0.0	2.0	0.0	35.0	7.0	31.0	125.0	216.0	183.0	218.0	149.0	1087.0
Año promedio	Tem (°C)	14.4	12.4	11.1	11.4	12.1	12.5	13.6	14.8	16.6	15.4	15.3	16.0	
	Pp (mm)	56.0	39.0	0.0	0.0	0.0	6.0	14.0	3.0	208.0	177.0	172.0	171.0	846.0
Año seco	Tem (°C)	13.9	11.2	10.7	10.4	12.2	14.1	16.4	18.1	17.3	15.7	16.1	15.1	
	Pp (mm)	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	54.0	62.0	171.0	248.0	172.0	80.0	791.0

San Antonio la Isla

		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	13.7	11.8	11.7	10.6	11.3	10.4	12.9	15.5	15.5	14.3	14.4	14.2	
	Pp (mm)	109.0	0.0	0.0	0.0	48.0	6.0	26.0	162.0	197.0	267.0	279.0	175.0	1269.0
Año promedio	Tem (°C)	13.3	11.4	10.8	10.5	11.0	12.0	12.8	14.0	14.8	15.0	14.4	14.6	
	Pp (mm)	75.0	37.0	7.0	0.0	0.0	0.0	18.0	3.0	205.0	188.0	187.0	213.0	933.0
Año seco	Tem (°C)	14.7	11.3	10.3	9.4	10.5	12.6	14.6	15.8	14.6	13.4	13.4	12.7	
	Pp (mm)	0.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	44.0	186.0	272.0	192.0	72.0	810.0

Xonacatlán

		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	12.0	11.5	12.1	11.7	12.5	13.0	14.9	14.8	14.8	13.1	13.3	12.7	
	Pp (mm)	124.8	45.8	9.6	9.8	25.2	6.5	14.2	6.6	197.1	330.9	177.4	310.1	1258.0
Año promedio	Tem (°C)	13.1	12.7	13.3	11.6	11.7	13.4	14.6	14.2	15.7	12.9	14.0	13.7	
	Pp (mm)	59.8	3.3	5.0	10.2	65.9	19.5	29.4	101.3	161.1	265.4	204.9	149.3	1075.1
Año seco	Tem (°C)	7.8	8.5	9.4	12.5	13.3	16.2	9.8	10.2	9.1	9.4	9.3	9.6	
	Pp (mm)	2.0	4.6	0.0	3.1	1.3	6.5	53.3	72.6	118.1	365.7	236.7	103.8	967.7

Zinacantepec

		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Anual
Año húmedo	Tem (°C)	13.5	12.6	12.0	11.0	11.7	13.6	14.8	16.2	15.6	14.3	14.7	14.5	
	Pp (mm)	38.3	7.8	5.7	0.0	41.2	13.4	38.2	92.0	199.1	258.1	143.1	121.5	958.4
Año promedio	Tem (°C)	13.5	12.6	12.0	11.0	11.7	13.6	14.8	16.2	15.6	14.3	14.7	14.5	
	Pp (mm)	109.1	36.9	7.2	1.9	12.3	0.0	20.5	3.4	192.4	176.6	127.5	125.4	813.2
Año seco	Tem (°C)	13.9	11.9	10.3	11.0	12.6	14.4	16.9	17.6	16.2	15.1	15.6	14.9	
	Pp (mm)	1.2	22.7	0.0	0.7	2.2	2.2	65.4	73.4	108.9	246.0	147.3	74.8	744.8

Anexo III

Información de entrada para el modelo HELP3

P= porosidad total, CC: capacidad de campo, PM: punto de marchitez y K_s: conductividad hidráulica.

Sitio	Almoloaya del Río						
Latitud	19.12						
Estación SMN	15295						
EMA	La providencia						
Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
45 (SN)	1	39-288	4.3	73	57	66	82
60*	2						
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m²)	Área (Ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	0.19 (SN)	75			
			0.45*				
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K_s (cm/s)
1	1 (percolación vertical)	60	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
2	1 (percolación vertical)	1300	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
	Pendiente superficial (%)	Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva			
	17 (SN)	36	1	82			
	17	36	2	76.2			

Sitio	Calimaya						
Latitud	19.2						
Estación SMN	15395						
EMA	La providencia						
Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
40	1	39-288	4.3	73	57	66	82
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m²)	Área (Ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	4.5	75			
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K_s (cm/s)
1	1 (percolación vertical) *	2000	18	0.5	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
	Pendiente superficial (%)	Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva			
	18	29	1	82.2			

Sitio Capulhuac
Latitud 19.25
Estación SMN 15266

EMA		La providencia					
Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
45	1	39-288	4.3	73	57	66	82
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m ²)	Área (Ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	2.2	75			
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K _s (cm/s)
1	1 (percolación vertical)	500	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
		Pendiente superficial (%)	Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva		
		14	36	1	81.9		

Sitio Mexicaltzingo
Latitud 19.21
Estación SMN 15056
EMA La providencia

EMA		La providencia					
Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
45	1	39-288	4.3	73	57	66	82
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m ²)	Área (Ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	2	75			
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K _s (cm/s)
1	1 (percolación vertical)	1800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
		Pendiente superficial (%)	Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva		
		18	29	1	82.2		

Sitio San Antonio la Isla
Latitud 19.14
Estación SMN 15373
EMA La providencia

Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
45	1	39-288	4.3	73	57	66	82
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m ²)	Área (Ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	9.6	75			
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K _s (cm/s)
1	1 (percolación vertical)	680	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
2	1 (percolación vertical)I	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
3	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
4	1 (percolación vertical)I	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
5	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
6	1 (percolación vertical)I	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
7	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
8	1 (percolación vertical)I	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
9	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
10	4 geomembrana	0.1	35	0	0	0	1.99x10 ⁻¹²
Pendiente superficial (%)		Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva			
26		54	1	81.8			

Sitio Xonacatlán
 Latitud 19.44
 Estación SMN 15057
 EMA Hacienda de la Y

Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
45	1	39-288	7.6	72	60	63	85
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m ²)	Área (Ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	5	75			
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K _s (cm/s)
1	1 (percolación vertical)	190	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
2	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
3	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
4	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
5	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
6	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
7	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
8	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
9	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
10	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
11	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
12	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
13	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
14	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
15	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
16	4 geomembrana	0.1	35	0	0	0	1.99x10 ⁻¹²
Pendiente superficial (%)		Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva			
35		33	1	82.4			

Sitio Zinacantepec
 Latitud 19.29
 Estación SMN 15089
 EMA ESIME Toluca

Profundidad de la zona evaporativa (cm)	Índice del área foliar	Día de inicio y fin de la temporada de crecimiento vegetativo	Velocidad del viento promedio anual (km/h)	Humedad relativa (%)			
				1ro	2do	3er	4to
45	1	39-288	5.1	72	55	60	77
Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Radiación solar (MJ/m ²)	Área (Ha)	Porcentaje de área con escurrimiento			
Diaria	Diaria	Diaria	4.36	75			
N. Capa	Tipo de capa	Profundidad (cm)	Textura	P (v/v)	CC (v/v)	PM (v/v)	K _s (cm/s)
1	1 (percolación vertical)	680	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
2	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
3	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
4	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
5	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
6	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
7	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
8	1 (percolación vertical)	30	3	0.457	0.083	0.033	3.10x10 ⁻³
9	1 (percolación vertical)	800	18	0.5019	0.17	0.11	1.29x10 ⁻³
10	4 geomembrana	0.15	35	0	0	0	1.99x10 ⁻¹²
Pendiente superficial (%)		Longitud de la pendiente (m)	Crecimiento vegetativo	Número de curva			
24		48	1	81.4			