**MANEJO INTEGRADO DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN EL ACUÍFERO HUAMANTLA-LIBRES ORIENTAL-PEROTE, PUE Y VER.**

Capítulo VI

Balance Integral de Agua

Contrato No. SGT-OCB-PUE-09-P-113-RF-I3

Contenido

[6 Capítulo IV. Balance Integral de Agua 1](#_Toc262469758)

[6.1 Balances de agua subterránea por zonas de diferente intensidad de explotación 1](#_Toc262469759)

[6.1.1 Balances de agua subterránea para el acuífero de Huamantla. 1](#_Toc262469760)

[6.1.1.1 Ecuación de balance. 2](#_Toc262469761)

[6.1.1.2 Recarga 3](#_Toc262469762)

[6.1.1.3 Descarga 7](#_Toc262469763)

[6.1.1.4 Cambio de almacenamiento (CVA) 9](#_Toc262469764)

[6.1.1.5 Coeficiente de almacenamiento (S) 9](#_Toc262469765)

[6.1.1.6 Balance de agua subterránea. 10](#_Toc262469766)

[6.1.2 Balances de agua subterránea para el acuífero de Libres-Oriental. 11](#_Toc262469767)

[6.1.2.1 Ecuación de balance. 11](#_Toc262469768)

[6.1.2.2 Recarga 12](#_Toc262469769)

[6.1.2.3 Descarga 16](#_Toc262469770)

[6.1.2.4 Cambio de almacenamiento (CVA) 21](#_Toc262469771)

[6.1.2.5 Coeficiente de almacenamiento (S) 21](#_Toc262469772)

[6.1.2.6 Balance de agua subterránea. 21](#_Toc262469773)

[6.1.3 Balances de agua subterránea para el acuífero de Perote-Zayaleta. 22](#_Toc262469774)

[6.1.3.1 Ecuación de balance. 23](#_Toc262469775)

[6.1.3.2 Recarga 24](#_Toc262469776)

[6.1.3.3 Descarga 27](#_Toc262469777)

[6.1.3.4 Cambio de almacenamiento (CVA) 29](#_Toc262469778)

[6.1.3.5 Coeficiente de almacenamiento (S) 29](#_Toc262469779)

[6.1.3.6 Balance de agua subterránea. 29](#_Toc262469780)

[6.2 Balance por microcuencas 31](#_Toc262469781)

[6.3 Balance en equilibrio 35](#_Toc262469782)

[6.3.1 Balance de Equilibrio para el acuífero Huamantla, Tlaxcala. 35](#_Toc262469783)

[6.3.2 Balance de Equilibrio para el acuífero Libres - Oriental, Puebla. 37](#_Toc262469784)

[6.3.3 Balance de Equilibrio para el acuífero Perote - Zayaleta, Veracruz. 39](#_Toc262469785)

[6.4 Balance REPDA 40](#_Toc262469786)

[6.4.1 Balance REPDA para el acuífero Huamantla, Tlaxcala. 41](#_Toc262469787)

[6.4.2 Balance REPDA para el acuífero Libres-Oriental, Puebla. 42](#_Toc262469788)

[6.4.3 Balance REPDA para el acuífero Perote-Zayaleta, Veracruz. 43](#_Toc262469789)

Índice de Tablas

[Tabla 6.1 Cálculo de las entradas horizontales de agua subterránea. 4](#_Toc262469790)

[Tabla 6.2 Cálculo de las salidas horizontales de agua subterránea. 7](#_Toc262469791)

[Tabla 6.3 Resumen de extracciones anuales en el periodo 1996-2008 por tipo de uso. 8](#_Toc262469792)

[Tabla 6.4 Balance de aguas subterráneas. 10](#_Toc262469793)

[Tabla 6.5 Cálculo de las entradas horizontales de agua subterránea. 13](#_Toc262469794)

[Tabla 6.6 Datos utilizados para el cálculo de descarga por evapotranspiración en 1996. 16](#_Toc262469795)

[Tabla 6.7 Datos utilizados para el cálculo de descarga por evapotranspiración en 2008. 17](#_Toc262469796)

[Tabla 6.8 Cálculo de las salidas horizontales de agua subterránea. 19](#_Toc262469797)

[Tabla 6.9 Resumen de extracciones anuales en el periodo 1996-2008 por tipo de uso. 20](#_Toc262469798)

[Tabla 6.10 Balance de aguas subterráneas. 22](#_Toc262469799)

[Tabla 6.11 Cálculo de las entradas horizontales de agua subterránea. 25](#_Toc262469800)

[Tabla 6.12 Resumen de extracciones anuales en el periodo 1996-2008 por tipo de uso. 28](#_Toc262469801)

[Tabla 6.13 Balance de aguas subterráneas. 30](#_Toc262469802)

[Tabla 6.14 Resumen de los parámetros involucrados en el balance hidroclimatológico de las diferentes microcuencas 34](#_Toc262469803)

[Tabla 6.15 Resumen de los balances hidroclimatológicos de las diferentes microcuencas 35](#_Toc262469804)

[Tabla 6.16 Balance de equilibrio para el acuífero de Huamantla, Tlaxcala 36](#_Toc262469805)

[Tabla 6.17 Balance de equilibrio para el acuífero Libres - Oriental, Puebla 38](#_Toc262469806)

[Tabla 6.18 Balance de equilibrio para el acuífero Perote - Zayaleta, Veracruz 40](#_Toc262469807)

[Tabla 6.19 Balance REPDA para el acuífero Huamantla, Tlaxcala 42](#_Toc262469808)

[Tabla 6.20 Balance REPDA para el acuífero Libres-Oriental, Puebla 43](#_Toc262469809)

[Tabla 6.21 Balance REPDA para el acuífero Perote-Zayaleta, Veracruz 44](#_Toc262469810)

Índice de Figuras

[Figura 6.1 Entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal del acuífero Huamantla 6](#_Toc262469811)

[Figura 6.2 Resumen de extracciones para el periodo 1996-2008 por uso destinado. 9](#_Toc262469812)

[Figura 6.3 Entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal del acuífero Libres-Oriental 15](#_Toc262469813)

[Figura 6.4 Porcentaje que se evapotranspira de acuerdo a la profundidad al nivel estático. 17](#_Toc262469814)

[Figura 6.5 Evapotranspiración del nivel estático en los años comprendidos dentro del periodo 1996-2008. 18](#_Toc262469815)

[Figura 6.6 Resumen de extracciones para el periodo 1996-2008 por uso destinado. 20](#_Toc262469816)

[Figura 6.7 Entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal del acuífero Perote-Zayaleta 26](#_Toc262469817)

[Figura 6.8 Resumen de extracciones para el periodo 1996-2008 por uso destinado. 28](#_Toc262469818)

[Figura 6.9 División en microcuencas para el análisis hidroclimatológico . 31](#_Toc262469819)

[Figura 6.10 Isoyetas generadas con datos promedio de estaciones climatológicas del periodo 1996-2008. 32](#_Toc262469820)

[Figura 6.11 Isotermas generadas con datos promedio de estaciones climatológicas del periodo 1996-2008. 33](#_Toc262469821)

[Figura 6.12 Usos de suelo. 33](#_Toc262469822)

# Capítulo IV. Balance Integral de Agua

## Balances de agua subterránea por zonas de diferente intensidad de explotación

A continuación se describe el balance de aguas subterráneas para cada uno de los tres acuíferos en estudio, dado que además cada uno presenta diferente intensidad en su explotación.

Antes de entrar en materia hay que tomar en cuenta que el volumen de agua susceptible de ser aprovechado de un acuífero, atendiendo al criterio de conservación del recurso, se reduce al de su media anual y a un volumen mayor si se piensa extraer agua a costa del almacenamiento sin inducir efectos perjudiciales. Lo anterior lleva implícita una distribución adecuada de las extracciones en el área ya que, una localización inadecuada de un grupo de aprovechamientos puede propiciar una sobre-explotación, a pesar de que solo se extraiga del acuífero un volumen semejante al de su recarga.

Por otro lado, el emplazamiento adecuado de las captaciones, evidentemente estará supeditado al mecanismo de recarga y descarga del sistema acuífero, por lo que su conocimiento previo a la planeación de la extracción a su máxima capacidad, es fundamental.

El valor de la recarga en un sistema acuífero, se estima mediante el planteamiento de un balance de agua subterránea, el cual permite ignorar la serie de fenómenos complejos que se establecen en la zona de aireación y trabajar con el volumen de agua que efectivamente ingresan al acuífero. Dicho balance está basado en la aplicación de la ecuación de conservación de masa y establece que en un periodo determinado, las entradas menos las salidas que ocurran en un sistema, son iguales al cambio de almacenamiento. Su aplicación, por lo tanto, requiere de un conocimiento de los volúmenes que ingresan y los que son evacuados en forma natural o artificial (inducida) del acuífero, así mismo, es necesario tener un conocimiento de los parámetros hidrodinámicos del mismo.

### Balances de agua subterránea para el acuífero de Huamantla.

El área del valle que se tomó en cuenta para el balance es de 495.1 km2 que corresponde a la superficie donde se ubican todos los aprovechamientos de agua subterránea; es decir, por debajo de la cota 2570 msnm. A partir de las configuraciones de elevación del nivel estático de los años 1996 y 2008, se trazó la red de flujo utilizada para el presente balance, la cual indica una dirección preferencial de norte-sur, con aportaciones horizontales de agua subterránea hacia el acuífero Libres-Oriental, Pue. El periodo de balance seleccionado fue de 12 años el cual abarca de 1996 al 2008.

#### Ecuación de balance.

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de almacenamiento…………………………(1)

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total en un periodo determinado, las salidas por la descarga total en el mismo periodo y el cambio de masa o cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica, es igual al volumen drenado en un determinado periodo por el coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico del acuífero.

En nuestro caso conocemos las salidas de agua subterránea que básicamente se efectúan por el bombeo y las salidas horizontales, también conocemos el volumen drenado en el periodo de 1996 a 2008 y el coeficiente de almacenamiento para el tipo de material que conforma el acuífero; por lo que únicamente queda como incógnita la recarga por lluvia o infiltración por precipitación en el Valle.

Más específicamente, la ecuación general queda como sigue:

**[Eh + Ip + I2 (Uso público urbano) + I3 (Usos agrícola + otros)] –**

**[Sh + Qbase + Manantiales + ETR + Extracción bombeo] = Vd S = DA** ………. (2)

donde:

Eh = Entradas horizontales de agua subterránea

Ip = Infiltración por precipitación

I2 = Recarga inducida por uso público urbano

I3 = Recarga inducida por uso agrícola

Sh = Salidas horizontales de agua subterránea hacía otros acuíferos

Qbase = Gasto base de aportación a ríos

ETR = Volumen Evapotranspirado

Vd = Volumen drenado

S = Coeficiente de almacenamiento

DA = cambio de almacenamiento

Despejando Ip de la expresión matemática anterior, tenemos:

**Ip = -**Eh - I2 (Uso público urbano) - I3 (Usos agrícola + otros) +

Sh + Qbase + Manantiales + ETR + Extracción bombeo+ DA ………………………(3)

#### Recarga

La recarga total está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida debida a la aplicación de agua, tanto de origen superficial como subterránea, derivada de las actividades humanas.

**Recarga natural**

La recarga natural de un acuífero está conformada tanto por la infiltración procedente de la precipitación como por las entradas horizontales de agua subterránea que provienen de acuíferos colindantes.

**Infiltración por precipitación en el Valle o zona de almacenamiento**

Como ya se mencionó ésta es la incógnita en nuestra ecuación de balance. La precipitación que se presenta dentro de los límites geográficos de este acuífero es mayor en las zonas montañosas y disminuye conforme se avanza hacia el valle, por lo que la infiltración y posterior recarga por lluvia que recibe el acuífero de Huamantla ocurre tanto en las zonas serranas (aunque éstas son tratadas en el balance como entradas por flujo subterráneo horizontal), como en toda el área del valle (zona de almacenamiento) ya que se trata de un acuífero libre; es importante resaltar, que la precipitación media anual en la zona del valle para un periodo de 12 años (1996-2008) resultó de 556.2 mm/año.

La recarga natural producto de la infiltración del agua de lluvia en la zona del valle (Área de almacenamiento y bombeo) se calculó en este informe, resultando de 466.9 hm3 para el periodo de 1996 a 2008 (12 años), el cálculo se efectuó de acuerdo a la expresión matemática 3; por lo que el promedio anual resulta de 38.9 hm3/año.

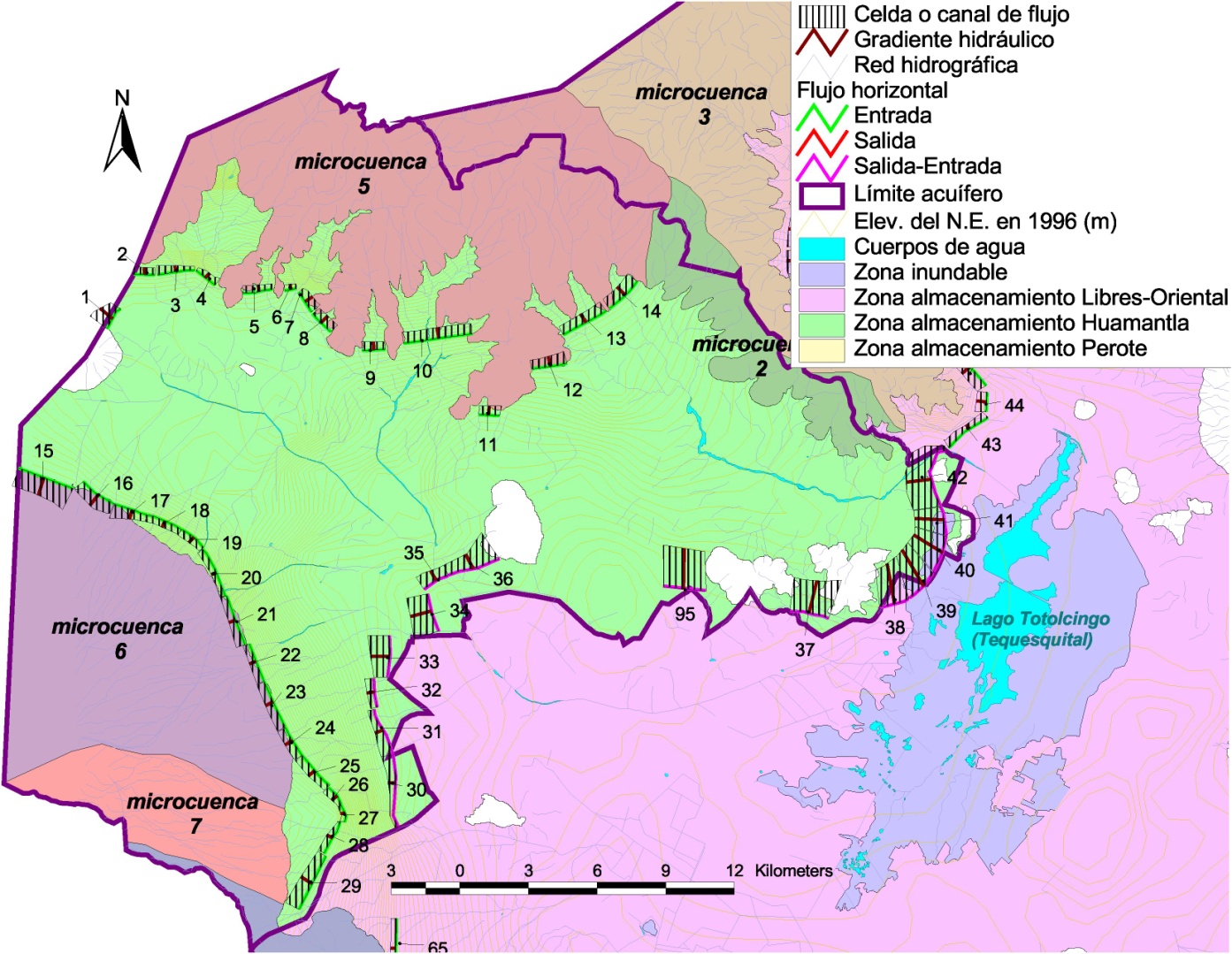
**Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)**

De acuerdo con la geología y la piezometría existentes, se verifican 30 celdas o canales de entrada por flujo subterráneo horizontal, de los cuales uno proviene del sistema acuífero Alto Atoyac el cual colinda con el de Huamantla; las 29 celdas restantes son aportaciones por flujo subterráneo horizontal de las sierras que rodean y alimentan al acuífero en estudio. El flujo subterráneo horizontal total que entra por estas sierras es de 18.7 hm³/año, mientras que el flujo subterráneo procedente del acuífero Alto Atoyac es de 0.6 hm³/año; por lo que el total de entradas horizontales suma 19.3 hm³/año. Los parámetros que intervienen en el análisis para cada una de las 30 celdas principales de entrada aparecen en la Tabla 6.1, mientras que en la se ilustra la ubicación de dichas celdas.

1. Cálculo de las entradas horizontales de agua subterránea.

| **Procede** | **Prof.**  **media**  **al N.E.**  **(m)** | **Esp.**  **medio**  **unidad**  **(m)** | **No.**  **Celda** | **Esp.**  **medio**  **saturado**  **(m)** | **K**  **(m/s)** | **T**  **(m2/s)** | **B**  **(m)** | **i** | **Q**  **(m3/s)** | **Eh**  **(hm3/año)** | **Eh**  **(hm3/periodo)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Alto**  **Atoyac** | 88 | 180 | 1 | 92 | 8.00E-05 | 0.0074 | 1018 | 0.0027 | 0.020 | 0.6 | 7.7 |
| **Microcuenca 5** | 95 | 180 | 2 | 85 | 9.00E-06 | 0.0008 | 803 | 0.0127 | 0.008 | 0.2 | 3.0 |
| 80 | 180 | 3 | 100 | 9.00E-06 | 0.0009 | 1772 | 0.0205 | 0.033 | 1.0 | 12.4 |
| 68 | 180 | 4 | 112 | 9.00E-06 | 0.0010 | 994 | 0.0211 | 0.021 | 0.7 | 8.0 |
| 46 | 150 | 5 | 104 | 9.00E-06 | 0.0009 | 1303 | 0.0137 | 0.017 | 0.5 | 6.3 |
| 40 | 150 | 6 | 110 | 9.00E-06 | 0.0010 | 572 | 0.0256 | 0.014 | 0.5 | 5.5 |
| 40 | 150 | 7 | 110 | 9.00E-06 | 0.0010 | 1114 | 0.0149 | 0.016 | 0.5 | 6.2 |
| 43 | 150 | 8 | 107 | 9.00E-06 | 0.0010 | 1145 | 0.0093 | 0.010 | 0.3 | 3.9 |
| 66 | 250 | 9 | 184 | 9.00E-06 | 0.0017 | 1031 | 0.0108 | 0.018 | 0.6 | 7.0 |
| 114 | 250 | 10 | 136 | 9.00E-06 | 0.0012 | 3020 | 0.0124 | 0.046 | 1.4 | 17.3 |
| 150 | 210 | 11 | 60 | 9.00E-06 | 0.0005 | 1724 | 0.0097 | 0.009 | 0.3 | 3.4 |
| 133 | 200 | 12 | 67 | 9.00E-06 | 0.0006 | 1548 | 0.0088 | 0.008 | 0.3 | 3.1 |
| 95 | 150 | 13 | 55 | 9.00E-06 | 0.0005 | 2266 | 0.0089 | 0.010 | 0.3 | 3.8 |
| 75 | 150 | 14 | 75 | 9.00E-06 | 0.0007 | 1758 | 0.0076 | 0.009 | 0.3 | 3.4 |
| **Microcuenca 6** | 129 | 200 | 15 | 71 | 4.90E-06 | 0.0003 | 2617 | 0.0049 | 0.004 | 0.1 | 1.7 |
| 130 | 200 | 16 | 70 | 4.90E-06 | 0.0003 | 1588 | 0.0066 | 0.004 | 0.1 | 1.4 |
| 130 | 170 | 17 | 40 | 4.90E-06 | 0.0002 | 1368 | 0.0142 | 0.004 | 0.1 | 1.4 |
| 114 | 170 | 18 | 56 | 4.90E-06 | 0.0003 | 1427 | 0.0195 | 0.008 | 0.2 | 2.9 |
| 104 | 160 | 19 | 56 | 4.90E-06 | 0.0003 | 1232 | 0.0183 | 0.006 | 0.2 | 2.3 |
| 111 | 250 | 20 | 139 | 4.90E-06 | 0.0007 | 2168 | 0.0260 | 0.038 | 1.2 | 14.5 |
| 114 | 200 | 21 | 86 | 4.90E-06 | 0.0004 | 2204 | 0.0257 | 0.024 | 0.8 | 9.0 |
| 105 | 220 | 22 | 115 | 4.90E-06 | 0.0006 | 1791 | 0.0199 | 0.020 | 0.6 | 7.6 |
| 95 | 220 | 23 | 125 | 4.90E-06 | 0.0006 | 2247 | 0.0159 | 0.022 | 0.7 | 8.3 |
| 84 | 220 | 24 | 136 | 4.90E-06 | 0.0007 | 1385 | 0.0155 | 0.014 | 0.5 | 5.4 |
| 72 | 220 | 25 | 148 | 4.90E-06 | 0.0007 | 1790 | 0.0159 | 0.021 | 0.7 | 7.8 |
| 58 | 200 | 26 | 142 | 4.90E-06 | 0.0007 | 973 | 0.0189 | 0.013 | 0.4 | 4.8 |
| 53 | 200 | 27 | 147 | 4.90E-06 | 0.0007 | 660 | 0.0326 | 0.015 | 0.5 | 5.9 |
| **Micro-cuenca**  **7** | 59 | 150 | 28 | 91 | 3.50E-05 | 0.0032 | 1535 | 0.0144 | 0.070 | 2.2 | 26.6 |
| 75 | 150 | 29 | 75 | 3.50E-05 | 0.0026 | 2569 | 0.0103 | 0.069 | 2.2 | 26.3 |
| Micro-  cuenca  4 |  |  | 1 |  |  |  |  |  |  | 1.3 | 15.1 |
|  |  |  | **Totales** | | | | | | **0.573** | **19.3** | **232.0** |

1. Entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal del acuífero Huamantla



**Recarga inducida**

El volumen de agua que anualmente retorna al acuífero como consecuencia del riego que se realiza en el área se calculó multiplicando al volumen excedente de agua superficial y subterránea destinada al riego (978.3 hm3/periodo 1996-2008), por un coeficiente de infiltración del 10% (I2), resultando un volumen de recarga de 48.9 hm3 para el periodo 1996-2008.

El 10% se explica de la siguiente forma: de acuerdo al tipo clima que se presenta en la zona de estudio el porcentaje de agua excedente (50% del volumen bruto utilizado) empleado en el riego que se pierde por infiltración es del orden del 10%, mientras que las pérdidas totales por evaporación y por colmatación de suelos suman el 90% restante del agua excedente de riego.

Al mismo tiempo, el uso público urbano origina una recarga al acuífero por pérdidas en redes de distribución, el cual resultó de 19% del agua extraída para el uso público urbano, lo cual representa 24.1 hm³ en el periodo 1996-2008, el cual se verifica principalmente en la localidad de Huamantla. Por lo tanto la recarga total inducida media anual urbana y agrícola es de 6.1 hm³/año.

#### Descarga

**Evapotranspiración**

Dentro del área de estudio no se presentaron niveles estáticos a menos de 10 m en el periodo de 1996 a 2008, por lo que la evapotranspiración es nula.

**Manantiales**

El gasto anual que sale por manantiales dentro de la zona de estudio es de 0.5 hm3/año, por lo que el volumen acumulado para el periodo 1996 a 2008 es de 6.0 hm3.

**Salidas por flujo subterráneo horizontal**

Existen 16 celdas de salida por flujo subterráneo horizontal hacia el sur y sureste del área de estudio aportando volúmenes de agua al acuífero de Libres-Oriental (figura 6.1). Los datos para calcular las salidas por flujo subterráneo horizontal en el periodo de 1996 a 2008 se presentan en la Tabla 6.2 y las celdas se presentan en la Figura 6.1. Siendo el volumen total de salidas de 156.9 hm³ en el periodo.

1. Cálculo de las salidas horizontales de agua subterránea.

| **Hacia** | **Prof.**  **Media al N.E.**  **(m)** | **Espesor**  **medio**  **unidad**  **(m)** | **No.**  **Celda** | **Espesor**  **medio**  **saturado**  **(m)** | **K**  **(m/s)** | **T**  **(m2/s)** | **B**  **(m)** | **i** | **Q**  **(m3/s)** | **Sh**  **(hm3/**  **año)** | **Sh**  **(hm3/**  **periodo)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Libres - Oriental | 71.000 | 308.000 | 30 | 200.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 3,117.000 | 0.012 | 0.105 | 3.303 | 39.634 |
| 70.000 | 344.000 | 31 | 250.000 | 1.400E-05 | 0.004 | 1,989.000 | 0.011 | 0.074 | 2.349 | 28.189 |
| 65.000 | 356.000 | 32 | 250.000 | 1.400E-05 | 0.004 | 1,132.000 | 0.012 | 0.047 | 1.474 | 17.692 |
| 48.000 | 296.000 | 33 | 230.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 1,829.000 | 0.005 | 0.028 | 0.873 | 10.475 |
| 41.000 | 222.000 | 34 | 181.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 1,829.000 | 0.004 | 0.019 | 0.614 | 7.366 |
| 45.000 | 210.000 | 35 | 165.000 | 1.400E-05 | 0.002 | 1,040.000 | 0.008 | 0.019 | 0.591 | 7.091 |
| 55.000 | 209.000 | 36 | 154.000 | 1.400E-05 | 0.002 | 2,389.000 | 0.006 | 0.029 | 0.910 | 10.915 |
| 14.000 | 150.000 | 37 | 136.000 | 1.400E-05 | 0.002 | 1,727.000 | 0.003 | 0.009 | 0.280 | 3.360 |
| 2.000 | 100.000 | 38 | 98.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,369.000 | 0.001 | 0.002 | 0.065 | 0.782 |
| 1.000 | 100.000 | 39 | 99.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,583.000 | 0.001 | 0.002 | 0.076 | 0.913 |
| 1.000 | 100.000 | 40 | 99.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,757.000 | 0.001 | 0.003 | 0.100 | 1.198 |
| 3.000 | 100.000 | 41 | 97.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,327.000 | 0.002 | 0.003 | 0.085 | 1.023 |
| 4.000 | 230.000 | 42 | 200.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 2,585.000 | 0.002 | 0.013 | 0.411 | 4.930 |
| 90.000 | 190.000 | 96 | 100.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,861.000 | 0.002 | 0.006 | 0.181 | 2.169 |
| 75.000 | 150.000 | 29 | 75.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 2,569.000 | 0.010 | 0.028 | 0.876 | 10.514 |
| 59.000 | 150.000 | 28 | 91.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,535.000 | 0.014 | 0.028 | 0.888 | 10.657 |
|  | **Totales** | | | | | | | | **0.415** | **13.076** | **156.909** |

El volumen total de agua que se transfiere del acuífero de Huamantla, Tla. al de Libres - Oriental, Pue. es de 13.076 hm³/año.

**Flujo base de ríos y arroyos perennes**

No existe flujo base del acuífero hacia ríos o arroyos ya que la hidrografía presente dentro del área de estudio es de carácter intermitente.

**Extracciones**

El volumen total extraído del acuífero a través del bombeo (B), para todos los usos resultó ser de 1121.4 hm3 durante el periodo de 1996 a 2008. Los datos de extracción para uso agrícola fueron obtenidos con superficies y padrón de cultivos para cada año, láminas netas de riego, eficiencia global promedio del riego y láminas brutas para cada cultivo. Para el uso público urbano, la extracción se cuantificó con consumos medios diarios y con los datos de población por año para todas las localidades que se ubican dentro de la poligonal del acuífero de Huamantla. La extracción para uso doméstico se cuantificó con los datos obtenidos en el censo (tiempos de operación y gastos instantáneos) Como no se cuenta con todos los datos históricos los volúmenes fueron afectados por una factor de crecimiento; los resultados anuales se presentan en la Tabla 6.3 y en la .

1. Resumen de extracciones anuales en el periodo 1996-2008 por tipo de uso.

| **Año** | **Público-urbano** | **uso agrícola** | **Uso industrial** | **uso pecuario** | **otros usos** | **Extracción por año** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **1996** | 7.12 | 61.98 | 0.77 | 0.163 | 0.0199 | 70.05 |
| **1997** | 7.48 | 64.18 | 0.81 | 0.172 | 0.0209 | 72.66 |
| **1998** | 7.85 | 66.45 | 0.85 | 0.180 | 0.0220 | 75.36 |
| **1999** | 8.24 | 68.81 | 0.89 | 0.189 | 0.0230 | 78.16 |
| **2000** | 8.66 | 71.26 | 0.94 | 0.199 | 0.0242 | 81.07 |
| **2001** | 9.09 | 73.79 | 0.98 | 0.209 | 0.0254 | 84.09 |
| **2002** | 9.54 | 76.41 | 1.03 | 0.219 | 0.0267 | 87.23 |
| **2003** | 10.02 | 79.12 | 1.09 | 0.230 | 0.0280 | 90.48 |
| **2004** | 10.52 | 81.93 | 1.14 | 0.241 | 0.0294 | 93.86 |
| **2005** | 11.05 | 82.59 | 1.20 | 0.253 | 0.0309 | 95.12 |
| **2006** | 11.60 | 83.26 | 1.26 | 0.266 | 0.0324 | 96.42 |
| **2007** | 12.18 | 83.93 | 1.32 | 0.279 | 0.0341 | 97.75 |
| **2008** | 12.79 | 84.60 | 1.39 | 0.293 | 0.0358 | 99.10 |
| Totales (hm3) | 126.14 | 978.30 | 13.67 | 2.89 | 0.35 | 1121.36 |
| Promedio anual | 9.70 | 75.25 | 1.05 | 0.22 | 0.03 | 86.26 |
| Extracción total en el periodo (hm3) | | | 1121.36 | | | |

1. Resumen de extracciones para el periodo 1996-2008 por uso destinado.

#### Cambio de almacenamiento (CVA)

Para el cálculo de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero en el intervalo 1996 a 2008, con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático; determinando que existe una variación negativa de los niveles piezométricos en este periodo de 12 años, lo cual representa un abatimiento piezométrico medio de 0.345 m/año, valor que multiplicado por al área de balance (495.1 km2), resulta un volumen drenado (Vd) de -2,049 hm3 en el periodo de 1996 a 2008, y aplicando un coeficiente de almacenamiento de 0.25, resulta un cambio de almacenamiento de -512.4 hm3 en el mismo periodo; por lo que el cambio de almacenamiento medio anual sería de -42.7 hm3/año.

En forma resumida, el balance de agua subterránea para el periodo de 1996 a 2008, se presenta en la Tabla 6.4, así como el promedio anual del periodo, calculado de acuerdo con la expresión matemática 3.

#### Coeficiente de almacenamiento (S)

El valor del coeficiente de almacenamiento del acuífero en la zona, no pudo ser defino mediante las pruebas de bombeo que se realizaron por no contar con pozos de observación; por otra parte el acuífero de Huamantla, Tla. es muy heterogéneo en cuanto a los materiales que lo conforman, por lo que es difícil decidir el coeficiente que se debe aplicar en la ecuación de balance; sin embargo dada sus características hidrogeológicas muy similares a otros acuíferos que se han estudio, como por ejemplo el de Soltepec, Tla. se decidió utilizar un coeficiente de almacenamiento del orden de 0.25

El coeficiente utilizado es congruente y característico de un acuífero no confinado, formados por material tanto granular de gran heterogeneidad, como fracturado.

#### Balance de agua subterránea.

El procedimiento directo para calcular la recarga vertical o también conocida como infiltración por precipitación (Ip) o recarga por lluvia, que recibe un acuífero y el valor del coeficiente de almacenamiento regional del mismo, es el planteamiento de la ecuación de balance en un intervalo de tiempo lo suficientemente largo como para abarcar años secos y años lluviosos (mínimo 10 años). En forma resumida, el balance de agua subterránea para el periodo de 1996 a 2008, se presenta en la Tabla 6.4, así como el promedio anual del periodo, calculado de acuerdo con la expresión matemática 3

1. Balance de aguas subterráneas.



### Balances de agua subterránea para el acuífero de Libres-Oriental.

El área del valle que se tomó en cuenta para el balance es de 2171.3 km2 que corresponde a la superficie donde se ubican todos los aprovechamientos de agua subterránea; es decir, por debajo de la cota 2570 msnm. A partir de las configuraciones de elevación del nivel estático de los años 1996 y 2008, se trazó la red de flujo utilizada para el presente balance, la cual indica una dirección preferencial SW-NE, con aportaciones horizontales de agua subterránea hacia los acuíferos Valle de Tecamachalco, Pue. y Perote-Zayaleta, Ver. El periodo de balance seleccionado fue de 12 años el cual abarca de 1996 al 2008.

#### Ecuación de balance.

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de almacenamiento…………………………(1)

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total en un periodo determinado, las salidas por la descarga total en el mismo periodo y el cambio de masa o cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica, es igual al volumen drenado en un determinado periodo, por el coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico del acuífero.

En nuestro caso conocemos las salidas de agua subterránea que básicamente se efectúan por el bombeo y las salidas horizontales, también conocemos el volumen drenado en el periodo de 1996 a 2008 y el coeficiente de almacenamiento para el tipo de material que conforma el acuífero; por lo que únicamente queda como incógnita la recarga por lluvia o infiltración por precipitación en el valle.

Más específicamente, la ecuación general queda como sigue:

**[Eh + Ip + I2 (Uso público urbano) + I3 (Usos agrícola + otros)] –**

**[Sh + Qbase + Manantiales + ETR + Extracción bombeo] = Vd S = DA** ………. (2)

donde:

Eh = Entradas horizontales de agua subterránea

Ip = Infiltración por precipitación

I2 = Recarga inducida por uso público urbano

I3 = Recarga inducida por uso agrícola

Sh = Salidas horizontales de agua subterránea hacía otros acuíferos

Qbase = Gasto base de aportación a ríos

ETR = Volumen Evapotranspirado

Vd = Volumen drenado

S = Coeficiente de almacenamiento

DA = cambio de almacenamiento

Despejando Ip de la expresión matemática anterior, tenemos:

**Ip = -**Eh - I2 (Uso público urbano) - I3 (Usos agrícola + otros) +

Sh + Qbase + Manantiales + ETR + Extracción bombeo+ DA ………………………(3)

#### Recarga

La recarga total está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida debida a la aplicación de agua, tanto de origen superficial como subterránea, derivada de las actividades humanas.

**Recarga natural**

La recarga natural de un acuífero está conformada tanto por la infiltración procedente de la precipitación como por las entradas horizontales de agua subterránea que provienen de acuíferos colindantes o de las sierras que lo circundan.

**Infiltración por precipitación en el Valle o zona de almacenamiento**

Como ya se mencionó ésta es la incógnita en nuestra ecuación de balance. La precipitación que se presenta dentro de los límites geográficos de este acuífero es mayor en las zonas montañosas y disminuye conforme se avanza hacia el valle, por lo que la infiltración y posterior recarga por lluvia que recibe el acuífero de Libres-Oriental ocurre tanto en las zonas serranas (aunque éstas son tratadas en el balance como entradas por flujo subterráneo horizontal), como en toda el área del valle (zona de almacenamiento o bombeo) ya que se trata de un acuífero libre; es importante resaltar, que la precipitación media anual en la zona del valle para un periodo de 12 años (1996-2008) resultó de 664.9 mm/año.

La recarga natural producto de la infiltración del agua de lluvia en la zona del valle (Área de almacenamiento y/o bombeo) se calculó en este informe, resultando de 2443.5 hm3 para el periodo de 1996 a 2008 (12 años), el cálculo se efectuó de acuerdo a la expresión matemática 3; por lo que el promedio anual resulta de 203.6 hm3/año.

**Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)**

De acuerdo con la geología y la piezometría existentes, se verifican 47 celdas o canales de entrada por flujo subterráneo horizontal, de los cuales 16 proviene del acuífero Huamantla el cual colinda con el de Libres – Oriental y de hecho forman parte del mismo sistema acuífero junto con el de Perote-Zayaleta; las 31 celdas restantes son aportaciones por flujo subterráneo horizontal de las sierras que rodean y alimentan al acuífero en estudio. El flujo subterráneo horizontal total que entra por estas sierras es de 78.78 hm³/año, mientras que el flujo subterráneo procedente del acuífero Huamantla es de 13.076 hm³/año; por lo que el total de entradas horizontales suma 91.857 hm³/año. Los parámetros que intervienen en el análisis para cada una de las 47 celdas principales de entrada aparecen en la Tabla 6.5, mientras que en la se ilustra la ubicación de dichas celdas.

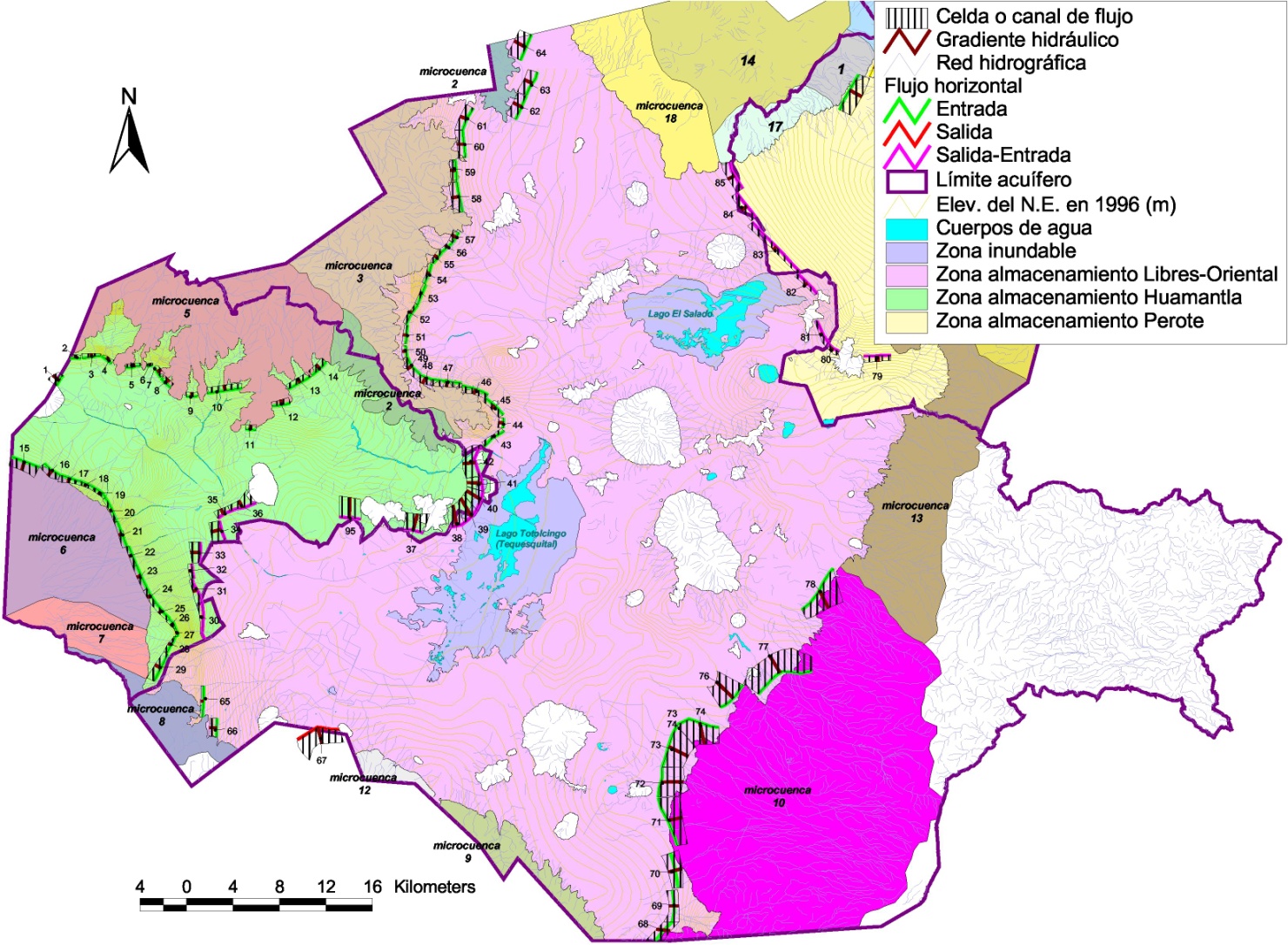
1. Cálculo de las entradas horizontales de agua subterránea.

| **Procede** | **Prof.**  **Media**  **al N.E.**  **(m)** | **Espesor**  **medio**  **unidad**  **(m)** | **No.**  **Celda** | **Espesor**  **medio**  **saturado**  **(m)** | **K**  **(m/s)** | **T**  **(m2/s)** | **B**  **(m)** | **i** | **Q**  **(m3/s)** | **Eh**  **(hm3/año)** | **Eh**  **(hm3/**  **periodo)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **PROCEDENTE DEL ACUÍFERO DE HUAMANTLA** | 71.000 | 308.000 | 30 | 200.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 3,117.000 | 0.012 | 0.105 | 3.303 | 39.634 |
| 70.000 | 344.000 | 31 | 250.000 | 1.400E-05 | 0.004 | 1,989.000 | 0.011 | 0.074 | 2.349 | 28.189 |
| 65.000 | 356.000 | 32 | 250.000 | 1.400E-05 | 0.004 | 1,132.000 | 0.012 | 0.047 | 1.474 | 17.692 |
| 48.000 | 296.000 | 33 | 230.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 1,829.000 | 0.005 | 0.028 | 0.873 | 10.475 |
| 41.000 | 222.000 | 34 | 181.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 1,829.000 | 0.004 | 0.019 | 0.614 | 7.366 |
| 45.000 | 210.000 | 35 | 165.000 | 1.400E-05 | 0.002 | 1,040.000 | 0.008 | 0.019 | 0.591 | 7.091 |
| 55.000 | 209.000 | 36 | 154.000 | 1.400E-05 | 0.002 | 2,389.000 | 0.006 | 0.029 | 0.910 | 10.915 |
| 14.000 | 150.000 | 37 | 136.000 | 1.400E-05 | 0.002 | 1,727.000 | 0.003 | 0.009 | 0.280 | 3.360 |
| 2.000 | 100.000 | 38 | 98.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,369.000 | 0.001 | 0.002 | 0.065 | 0.782 |
| 1.000 | 100.000 | 39 | 99.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,583.000 | 0.001 | 0.002 | 0.076 | 0.913 |
| 1.000 | 100.000 | 40 | 99.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,757.000 | 0.001 | 0.003 | 0.100 | 1.198 |
| 3.000 | 100.000 | 41 | 97.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,327.000 | 0.002 | 0.003 | 0.085 | 1.023 |
| 4.000 | 230.000 | 42 | 200.000 | 1.400E-05 | 0.003 | 2,585.000 | 0.002 | 0.013 | 0.411 | 4.930 |
| 90.000 | 190.000 | 96 | 100.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,861.000 | 0.002 | 0.006 | 0.181 | 2.169 |
| 75.000 | 150.000 | 29 | 75.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 2,569.000 | 0.010 | 0.028 | 0.876 | 10.514 |
| 59.000 | 150.000 | 28 | 91.000 | 1.400E-05 | 0.001 | 1,535.000 | 0.014 | 0.028 | 0.888 | 10.657 |

| **Procede** | **Prof.**  **Media**  **al N.E.**  **(m)** | **Espesor**  **medio**  **unidad**  **(m)** | **No.**  **Celda** | **Espesor**  **Medio**  **saturado**  **(m)** | **K**  **(m/s)** | **T**  **(m2/s)** | **B**  **(m)** | **i** | **Q**  **(m3/s)** | **Eh**  **(hm3/año)** | **Eh**  **(hm3/**  **periodo)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Microcuenca**  **3** | 6.000 | 237.000 | 43 | 231.000 | 4.00E-06 | 9.24E-04 | 2098 | 0.0169 | 0.033 | 1.033 | 12.398 |
| 6.000 | 198.000 | 44 | 192.000 | 4.00E-06 | 7.68E-04 | 974 | 0.0131 | 0.010 | 0.309 | 3.708 |
| 14.000 | 293.000 | 45 | 279.000 | 4.00E-06 | 1.12E-03 | 2188 | 0.0186 | 0.045 | 1.432 | 17.187 |
| 20.000 | 377.000 | 46 | 357.000 | 4.00E-06 | 1.43E-03 | 2552 | 0.0167 | 0.061 | 1.919 | 23.031 |
| 30.000 | 376.000 | 47 | 346.000 | 4.00E-06 | 1.38E-03 | 2681 | 0.0083 | 0.031 | 0.971 | 11.655 |
| 40.000 | 271.000 | 48 | 231.000 | 4.00E-06 | 9.24E-04 | 964 | 0.0065 | 0.006 | 0.183 | 2.191 |
| 45.000 | 245.000 | 49 | 200.000 | 4.00E-06 | 8.00E-04 | 2007 | 0.0090 | 0.014 | 0.456 | 5.468 |
| 47.000 | 242.000 | 50 | 195.000 | 4.00E-06 | 7.80E-04 | 1063 | 0.0102 | 0.008 | 0.267 | 3.200 |
| 46.000 | 214.000 | 51 | 168.000 | 4.00E-06 | 6.72E-04 | 1640 | 0.0124 | 0.014 | 0.431 | 5.172 |
| 44.000 | 200.000 | 52 | 156.000 | 4.00E-06 | 6.24E-04 | 1939 | 0.0251 | 0.030 | 0.958 | 11.493 |
| 40.000 | 200.000 | 53 | 160.000 | 4.00E-06 | 6.40E-04 | 1826 | 0.0274 | 0.032 | 1.010 | 12.118 |
| 47.000 | 150.000 | 54 | 103.000 | 4.00E-06 | 4.12E-04 | 1891 | 0.0208 | 0.016 | 0.511 | 6.133 |
| 38.000 | 150.000 | 55 | 112.000 | 4.00E-06 | 4.48E-04 | 1129 | 0.0164 | 0.008 | 0.262 | 3.139 |
| 30.000 | 150.000 | 56 | 120.000 | 4.00E-06 | 4.80E-04 | 1212 | 0.0133 | 0.008 | 0.244 | 2.928 |
| 32.000 | 150.000 | 57 | 118.000 | 4.00E-06 | 4.72E-04 | 1029 | 0.0088 | 0.004 | 0.135 | 1.617 |
| 62.000 | 180.000 | 58 | 118.000 | 4.00E-06 | 4.72E-04 | 2692 | 0.0082 | 0.010 | 0.329 | 3.943 |
| 69.000 | 180.000 | 59 | 111.000 | 4.00E-06 | 4.44E-04 | 1791 | 0.0076 | 0.006 | 0.191 | 2.287 |
| 70.000 | 150.000 | 60 | 80.000 | 4.00E-06 | 3.20E-04 | 2391 | 0.0066 | 0.005 | 0.159 | 1.911 |
| 70.000 | 150.000 | 61 | 80.000 | 4.00E-06 | 3.20E-04 | 2089 | 0.0061 | 0.004 | 0.129 | 1.543 |
| **Micro-cuenca**  **8** | 70.000 | 157.000 | 65 | 87.000 | 2.80E-05 | 2.44E-03 | 2726 | 0.0168 | 0.112 | 3.518 | 42.218 |
| 66.000 | 150.000 | 66 | 84.000 | 2.80E-05 | 2.35E-03 | 1601 | 0.0064 | 0.024 | 0.760 | 9.120 |
| **Microcuenca 10** | 112.000 | 220.000 | 68 | 108.000 | 2.07E-04 | 2.23E-02 | 2442 | 0.0034 | 0.185 | 5.844 | 70.130 |
| 121.000 | 300.000 | 69 | 179.000 | 2.07E-04 | 3.70E-02 | 2626 | 0.0047 | 0.457 | 14.399 | 172.784 |
| 118.000 | 260.000 | 70 | 142.000 | 2.07E-04 | 2.93E-02 | 3071 | 0.0032 | 0.288 | 9.095 | 109.138 |
| 98.000 | 260.000 | 71 | 162.000 | 2.07E-04 | 3.35E-02 | 4724 | 0.0016 | 0.253 | 7.980 | 95.764 |
| 79.000 | 200.000 | 72 | 121.000 | 2.07E-04 | 2.50E-02 | 2414 | 0.0010 | 0.060 | 1.904 | 22.844 |
| 90.000 | 241.000 | 73 | 151.000 | 2.07E-04 | 3.12E-02 | 3569 | 0.0011 | 0.123 | 3.864 | 46.363 |
| 98.000 | 230.000 | 74 | 132.000 | 2.07E-04 | 2.73E-02 | 1093 | 0.0010 | 0.030 | 0.940 | 11.284 |
| 107.000 | 230.000 | 76 | 123.000 | 2.07E-04 | 2.54E-02 | 2516 | 0.0010 | 0.064 | 2.017 | 24.203 |
| 115.000 | 230.000 | 77 | 115.000 | 2.07E-04 | 2.38E-02 | 5152 | 0.0011 | 0.135 | 4.248 | 50.971 |
| 101.000 | 170.000 | 78 | 69.000 | 2.07E-04 | 1.43E-02 | 4115 | 0.0011 | 0.065 | 2.036 | 24.427 |
| **Micro-**  **cuenca**  **18** |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 3.160 | 37.920 |
| **Micro-**  **cuenca**  **13** |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 8.090 | 97.080 |
|  | **Total** | | | | | | | | | **91.857** | **1,102.280** |

1. Entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal del acuífero Libres-Oriental



**Recarga inducida**

El volumen de agua que anualmente retorna al acuífero como consecuencia del riego que se realiza en el área se calculó multiplicando al volumen excedente de agua superficial y subterránea destinada al riego (1944.8 hm3/periodo 1996-2008), por un coeficiente de infiltración del 10% (I2), resultando un volumen de recarga de 97.36 hm3 para el periodo 1996-2008 y de 8.11 hm³ el promedio anual.

El 10% se explica de la siguiente forma: de acuerdo al tipo clima que se presenta en la zona de estudio el porcentaje de agua excedente (50% del volumen bruto utilizado) empleado en el riego que se pierde por infiltración es del orden del 10%, mientras que las pérdidas totales por evaporación y por colmatación de suelos suman el 90% restante del agua excedente de riego.

Al mismo tiempo, el uso público urbano origina una recarga al acuífero por pérdidas en redes de distribución, el cual resultó de 11% del agua extraída para el uso público urbano, lo cual representa 32.2 hm³ en el periodo 1996-2008, el cual se verifica principalmente en las localidades de Ciudad Serdán, Libres, Oriental y San Salvador El Seco, siendo el volumen medio anual de 2.7 hm³. Por lo tanto la recarga total inducida media anual es de 10.8 hm³/año.

#### Descarga

**Evapotranspiración del nivel estático**

Dentro del área de estudio y durante el periodo de 1996 al 2008 se presentaron niveles estáticos a menos de 10 m de profundidad, el cálculo realizado para el año de 1996 indica que dentro de un área de 652.3 Km2 se presentaba el nivel estático a menos de 10 metros de profundidad, por lo que esta área y para este año en particular era susceptible de presentar evapotranspiración; posteriormente para el año 2008 el área donde se presenta la profundidad al nivel estático a menos de 10 m se redujo a 626.8 km², resaltando que mientras en el año 1996 ocurrían profundidades del nivel estático a menos de 1 m; para el año 2008, estas profundidades eran mayores a 5 m. Esta reducción en el área y el aumento en la profundidad del nivel estático es consecuencia del desequilibrio natural que se ha roto, debido a que las salidas del sistema son mayores que las entradas; como consecuencia de ello las lagunas se han ido reduciendo en su extensión y en su tirante. Los datos para el cálculo de la evapotranspiración se presentan en las y .

El cálculo de la media ponderada de profundidad al nivel estático en 1996 y su área bajo la curva (plano de isobatas en 1996), dio como resultado una profundidad media al nivel estático de 5.641 m que de acuerdo a la ecuación de la gráfica de la Figura 6.4 se obtiene un porcentaje de evapotranspiración para 1996 correspondiente al 43.59% de la lámina media de evapotranspiración anual, la cual fue de 0.5028 m para el periodo de 1996 a 2008. Finalmente al multiplicar la lámina media de evapotranspiración anual por el porcentaje evapotranspirado y por la superficie total susceptible de evapotranspirar agua del subsuelo en el año de 1996, se obtiene un volumen de 142.99 hm3/año.

Por su parte al hacer estos mismos cálculos pero para el año 2008 se obtiene que la profundidad media al nivel estático es de 6.938, lo cual representa según la gráfica de la Figura 6.4 una evapotranspiración del 30.62% dato que al multiplicarlo por el área total donde el nivel estático se encuentra a menos de 10 m y por la lámina de evapotranspiración se obtiene un volumen de 96.49 hm³ para el 2008, lo cual es un volumen menor al resultante del año 1996.

1. Datos utilizados para el cálculo de descarga por evapotranspiración en 1996.

| **Prof al N.E.** | **% Evapotranspirado** | **Área (m)** |
| --- | --- | --- |
| 10 | 0.0% | 218,286,414.0 |
| 9 | 10.0% | 3,161,314.0 |
| 8 | 20.0% | 1,790,303.0 |
| 7 | 30.0% | 541,814.0 |
| 6 | 40.0% | 2,001,427.0 |
| 5 | 50.0% | 236,205,763.0 |
| 4 | 60.0% | 4,264,808.0 |
| 3 | 70.0% | 2,709,382.0 |
| 2 | 80.0% | 2,207,962.0 |
| 1 | 90.0% | 1,523,248.0 |
| 0 | 100.0% | 179,652,410.0 |
|  | Area total | 652,344,845 |

1. Datos utilizados para el cálculo de descarga por evapotranspiración en 2008.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Prof al N.E.** | **% Evapotranspirado** | **Área (m)** |
| 10 | 0.0% | 172,821,675.0 |
| 9 | 10.0% | 13,576,929.0 |
| 8 | 20.0% | 17,697,825.0 |
| 7 | 30.0% | 6,849,643.0 |
| 6 | 40.0% | 2,609,693.0 |
| 5 | 50.0% | 413,224,712.0 |
| 4 | 60.0% | 0.0 |
| 3 | 70.0% | 0.0 |
| 2 | 80.0% | 0.0 |
| 1 | 90.0% | 0.0 |
| 0 | 100.0% | 0.0 |
|  | Area total | 626,780,477 |

1. Porcentaje que se evapotranspira de acuerdo a la profundidad al nivel estático.



Si aplicamos una tasa gradual de reducción del volumen evapotranspirado a partir de 1996 y hasta llegar a volumen obtenido en 2008 se logra un volumen total evapotranspirado acumulado en el periodo de 1556.63 hm³, por lo que la media anual es de 129.72 hm³/año.

1. Evapotranspiración del nivel estático en los años comprendidos dentro del periodo 1996-2008.

**Descargas naturales**

**Manantiales**

El gasto anual que sale por manantiales dentro de la zona de estudio es de 0.75 hm3/año, por lo que el volumen acumulado para el periodo 1996 a 2008 es de 9.0 hm3.

**Salidas por flujo subterráneo horizontal**

Existen 8 celdas de salida por flujo subterráneo horizontal hacia el sur y este del área de estudio aportando volúmenes de agua a los acuíferos Valle de Tecamachalco, Pue. y Perote-Zayaleta, Ver. (Figura 6.1). Los datos para calcular las salidas por flujo subterráneo horizontal en el periodo de 1996 a 2008 se presentan en la Tabla 6.8 y las celdas se presentan en la Figura 6.1. Siendo el volumen total de salidas de 267.673 hm³ en el periodo de 1996 a 2008 y la media anual es de 22.3 hm³/año.

1. Cálculo de las salidas horizontales de agua subterránea.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Hacia** | **Prof.**  **Media**  **al N.E.**  **(m)** | **Espesor**  **medio**  **unidad**  **(m)** | **No.**  **Celda** | **Espesor**  **medio**  **saturado**  **(m)** | **K**  **(m/s)** | **T**  **(m2/s)** | **B**  **(m)** | **i** | **Q**  **(m3/s)** | **Sh**  **(hm3/**  **año)** | **Sh**  **(hm3/**  **periodo)** |
| Perote-Zayaleta | 64.0 | 200.0 | 79 | 136.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 2439 | 0.008 | 0.119 | 3.766 | 45.190 |
| 35.0 | 200.0 | 80 | 165.0 | 4.500E-05 | 0.007 | 1076 | 0.006 | 0.049 | 1.537 | 18.443 |
| 30.0 | 200.0 | 81 | 170.0 | 4.500E-05 | 0.008 | 2136 | 0.007 | 0.111 | 3.504 | 42.049 |
| 58.0 | 200.0 | 82 | 142.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 2282 | 0.007 | 0.095 | 2.989 | 35.869 |
| 68.0 | 200.0 | 83 | 132.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 5907 | 0.005 | 0.186 | 5.865 | 70.375 |
| 110.0 | 250.0 | 84 | 140.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 2574 | 0.003 | 0.055 | 1.739 | 20.865 |
| 140.0 | 250.0 | 85 | 110.0 | 4.500E-05 | 0.005 | 2559 | 0.003 | 0.039 | 1.238 | 14.860 |
| Valle  de  Tecamachalco | 35.0 | 140.0 | 67 | 105.0 | 1.000E-04 | 0.011 | 3876 | 0.001 | 0.053 | 1.668 | 20.022 |
|  | **Totales** | | | | | | | | **0.707** | **22.306** | **267.673** |

El volumen total de agua que se transfiere del acuífero de Libres-Oriental, Pue. al de valle de Tecamachalco, Pue. es de 1.668 hm³/año; mientras que al de Perote-Zayaleta, Ver. se transfiere un volumen medio anual de 20.638 hm³/año.

**Flujo base de ríos y arroyos perennes**

No existe flujo base del acuífero hacia ríos o arroyos ya que la hidrografía presente dentro del área de estudio es de carácter intermitente.

**Extracciones**

El volumen total extraído del acuífero a través del bombeo (B), para todos los usos resultó ser de 2260.91 hm3 durante el periodo de 1996 a 2008. Los datos de extracción para uso agrícola fueron obtenidos con superficies y padrón de cultivos para cada año, láminas netas de riego, eficiencia global promedio del riego y láminas brutas para cada cultivo. Para el uso público urbano, la extracción se cuantificó con consumos medios diarios y con los datos de población por año para todas las localidades que se ubican dentro de la poligonal del acuífero de Libres - Oriental. La extracción para uso doméstico se cuantificó con los datos obtenidos en el censo (tiempos de operación y gastos instantáneos) Como no se cuenta con todos los datos históricos los volúmenes fueron afectados por una factor de crecimiento; los resultados anuales se presentan en la Tabla 6.9 y en la .

1. Resumen de extracciones anuales en el periodo 1996-2008 por tipo de uso.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Año** | **Público-urbano** | **uso agrícola** | **Uso industrial** | **uso pecuario** | **otros usos** | **Extracción por año** |
| **1996** | 17.61 | 116.23 | 1.10 | 0.213 | 0.0003 | 135 |
| **1997** | 18.32 | 121.00 | 1.16 | 0.224 | 0.0003 | 141 |
| **1998** | 19.05 | 125.96 | 1.21 | 0.235 | 0.0003 | 146 |
| **1999** | 19.81 | 131.12 | 1.28 | 0.247 | 0.0003 | 152 |
| **2000** | 20.60 | 136.50 | 1.34 | 0.259 | 0.0004 | 159 |
| **2001** | 21.43 | 142.09 | 1.41 | 0.272 | 0.0004 | 165 |
| **2002** | 22.29 | 147.92 | 1.48 | 0.286 | 0.0004 | 172 |
| **2003** | 23.18 | 153.98 | 1.55 | 0.300 | 0.0004 | 179 |
| **2004** | 24.10 | 160.30 | 1.63 | 0.315 | 0.0004 | 186 |
| **2005** | 25.07 | 166.87 | 1.71 | 0.331 | 0.0005 | 194 |
| **2006** | 26.07 | 173.71 | 1.79 | 0.348 | 0.0005 | 202 |
| **2007** | 27.11 | 180.83 | 1.88 | 0.365 | 0.0005 | 210 |
| **2008** | 28.20 | 188.25 | 1.98 | 0.383 | 0.0005 | 219 |
| Totales (hm3) | 292.85 | 1944.76 | 19.52 | 3.78 | 0.01 | 2260.91 |
| Promedio anual | 22.53 | 149.60 | 1.50 | 0.29 | 0.00 | 173.92 |
| Extracción total en el periodo (hm3) | |  |  |  |  | 2260.91 |

1. Resumen de extracciones para el periodo 1996-2008 por uso destinado.

#### Cambio de almacenamiento (CVA)

Para el cálculo de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero en el intervalo 1996 a 2008, con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático; determinando que existe una variación negativa de los niveles piezométricos en este periodo de 12 años, lo cual representa un abatimiento piezométrico medio de 0.3215 m/año, valor que multiplicado por al área de balance (2171.3 km2), resulta un volumen drenado (Vd) de -8,377 hm3 en el periodo de 1996 a 2008, y aplicando un coeficiente de almacenamiento de 0.05, resulta un cambio de almacenamiento de -418.8 hm3 en el mismo periodo; por lo que el cambio de almacenamiento medio anual sería de -34.9 hm3/año.

En forma resumida, el balance de agua subterránea para el periodo de 1996 a 2008, se presenta en la Tabla 6.10, así como el promedio anual del periodo, calculado de acuerdo con la expresión matemática 3.

#### Coeficiente de almacenamiento (S)

El valor del coeficiente de almacenamiento del acuífero en la zona, no pudo ser defino mediante las pruebas de bombeo que se realizaron por no contar con pozos de observación; por otra parte el acuífero de Libres - Oriental es muy heterogéneo en cuanto a los materiales que lo conforman, por lo que es difícil decidir el coeficiente que se debe aplicar en la ecuación de balance; sin embargo dada sus características hidrogeológicas muy similares a otros acuíferos que se han estudio, se decidió utilizar un coeficiente de almacenamiento del orden de 0.05

El coeficiente utilizado es congruente y característico de un acuífero libre a semiconfinado, formado tanto por materiales granulares de gran heterogeneidad, como fracturado.; con la presencia de arcillas.

#### Balance de agua subterránea.

El procedimiento directo para calcular la recarga vertical o también conocida como infiltración por precipitación (Ip) o recarga por lluvia, que recibe un acuífero y el valor del coeficiente de almacenamiento regional del mismo, es el planteamiento de la ecuación de balance en un intervalo de tiempo lo suficientemente largo como para abarcar años secos y años lluviosos (mínimo 10 años). En forma resumida, el balance de agua subterránea para el periodo de 1996 a 2008, se presenta en la Tabla 6.10, así como el promedio anual del periodo, calculado de acuerdo con la expresión matemática 3

1. Balance de aguas subterráneas.



### Balances de agua subterránea para el acuífero de Perote-Zayaleta.

El área del valle que se tomó en cuenta para el balance de este acuífero es de 440.9 km2 que corresponde a la superficie donde se ubican todos los aprovechamientos de agua subterránea; es decir, por debajo de la cota 2570 msnm. A partir de las configuraciones de elevación del nivel estático de los años 1996 y 2008, se trazó la red de flujo utilizada para el presente balance, la cual indica una dirección preferencial SW-NE, con aportaciones horizontales de agua subterránea hacia el acuífero Martínez de la Torre-Nautla, Ver. El periodo de balance seleccionado fue de 12 años el cual abarca de 1996 al 2008.

#### Ecuación de balance.

La ecuación general de balance de acuerdo a la ley de la conservación de la masa es como sigue:

Entradas (E) – Salidas (S) = Cambio de almacenamiento…………………………(1)

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total en un periodo determinado, las salidas por la descarga total en el mismo periodo y el cambio de masa o cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica, es igual al volumen drenado en un determinado periodo por el coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico del acuífero.

En nuestro caso conocemos las salidas de agua subterránea por el bombeo, pero desconocemos o existe incertidumbre en las salidas horizontales, también conocemos el volumen drenado en el periodo de 1996 a 2008 y el coeficiente de almacenamiento para el tipo de material que conforma el acuífero; y conocemos también la infiltración por precipitación en el valle de Perote, Ver.

Más específicamente, la ecuación general queda como sigue:

**[Eh + Ip + I2 (Uso público urbano) + I3 (Usos agrícola + otros)] –**

**[Sh + Qbase + Manantiales + ETR + Extracción bombeo] = Vd S = DA** ………. (2)

donde:

Eh = Entradas horizontales de agua subterránea

Ip = Infiltración por precipitación

I2 = Recarga inducida por uso público urbano

I3 = Recarga inducida por uso agrícola

Sh = Salidas horizontales de agua subterránea hacía otros acuíferos

Qbase = Gasto base de aportación a ríos

ETR = Volumen Evapotranspirado

Vd = Volumen drenado

S = Coeficiente de almacenamiento

DA = cambio de almacenamiento

Despejando Sh de la expresión matemática anterior, tenemos:

**Sh =** -Ip-Eh - I2 (Uso público urbano) - I3 (Usos agrícola + otros) +

Qbase + Manantiales + ETR + Extracción bombeo+ DA ………………………(3)

#### Recarga

La recarga total está constituida por la recarga natural y la recarga incidental o inducida debida a la aplicación de agua, tanto de origen superficial como subterránea, derivada de las actividades humanas.

**Recarga natural**

La recarga natural de un acuífero está conformada tanto por la infiltración procedente de la precipitación como por las entradas horizontales de agua subterránea que provienen de acuíferos colindantes.

**Infiltración por precipitación en el Valle o zona de almacenamiento**

Como ya se mencionó, debido a que existe más incertidumbre en las salidas horizontales que en la infiltración por precipitación dejar a la primera como la incógnita dentro de la ecuación de balance, mientras que la segunda se calculó con base en la lámina de precipitación, el área de balance y el coeficiente de infiltración. La precipitación que se presenta dentro de los límites geográficos de este acuífero es mayor en las zonas montañosas y disminuye conforme se avanza hacia el valle, por lo que la infiltración y posterior recarga por lluvia que recibe el acuífero de Perote- Zayaleta ocurre tanto en las zonas serranas (aunque éstas son tratadas en el balance como entradas por flujo subterráneo horizontal), como en toda el área del valle (zona de almacenamiento) ya que se trata de un acuífero libre; es importante resaltar, que la precipitación media anual en la zona del valle para un periodo de 12 años (1996-2008) resultó de 899 mm/año, el área de balance fue de 440.9 km² y el coeficiente de infiltración aplicado fue de 0.2334, obtenido de dividir el volumen infiltrado medio anual entre el volumen anual de lluvia en la zona estudiada (balance hidroclimatológico).

La recarga por infiltración del agua de lluvia en la zona del valle (Área de almacenamiento y bombeo) resultó ser de 1110.2 hm³ para el periodo 1996-2008, por lo que la meda anual es 92.5 hm3/año.

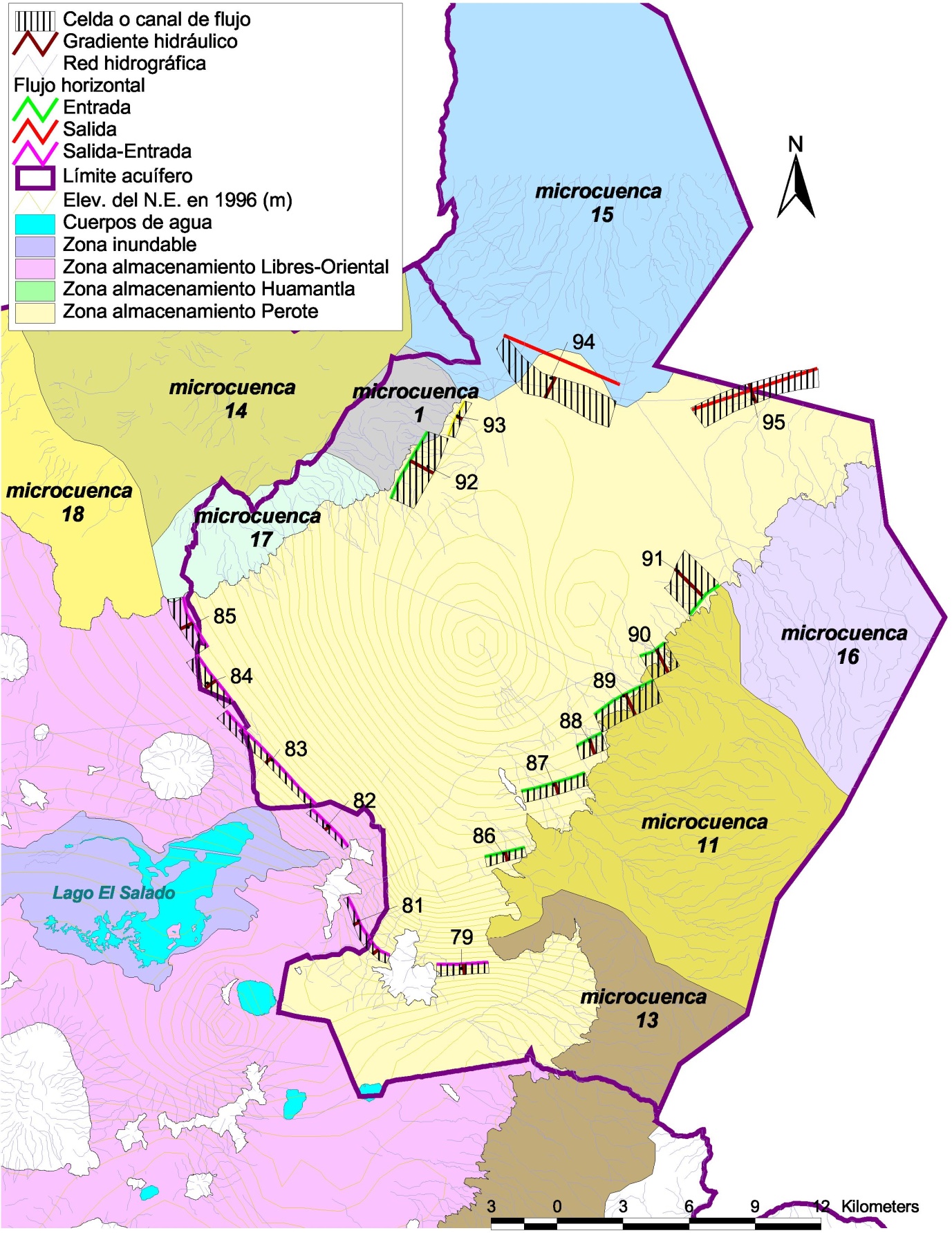
**Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)**

De acuerdo con la geología y la piezometría existentes, se verifican 16 celdas o canales de entrada por flujo subterráneo horizontal, de los cuales siete proviene del sistema acuífero Libres-Oriental el cual colinda con el de Perote-Zayaleta; las 9 celdas restantes son aportaciones por flujo subterráneo horizontal de las sierras que rodean y alimentan al acuífero en estudio. El flujo subterráneo horizontal total que entra por estas sierras es de 40.61 hm³/año, mientras que el flujo subterráneo procedente del acuífero Libres-Oriental es de 20.63 hm³/año; por lo que el total de entradas horizontales suma 61.25 hm³/año. Los parámetros que intervienen en el análisis para cada una de las 16 celdas principales de entrada aparecen en la Tabla 6.11, mientras que en la Figura 6.7se ilustra la ubicación de dichas celdas.

1. Cálculo de las entradas horizontales de agua subterránea.

| **Procede** | **Prof.**  **media**  **al N.E.**  **(m)** | **Esp.**  **medio**  **unidad**  **(m)** | **No.**  **Celda** | **Esp.**  **medio**  **saturado**  **(m)** | **K**  **(m/s)** | **T**  **(m2/s)** | **B**  **(m)** | **i** | **Q**  **(m3/s)** | **Eh**  **(hm3/año)** | **Eh**  **(hm3/periodo)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Acuífero**  **Libres –**  **Oriental** | 64.0 | 200.0 | 79 | 136.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 2,439.0 | 0.008 | 0.119 | 3.766 | 45.190 |
| 35.0 | 200.0 | 80 | 165.0 | 4.500E-05 | 0.007 | 1,076.0 | 0.006 | 0.049 | 1.537 | 18.443 |
| 30.0 | 200.0 | 81 | 170.0 | 4.500E-05 | 0.008 | 2,136.0 | 0.007 | 0.111 | 3.504 | 42.049 |
| 58.0 | 200.0 | 82 | 142.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 2,282.0 | 0.007 | 0.095 | 2.989 | 35.869 |
| 68.0 | 200.0 | 83 | 132.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 5,907.0 | 0.005 | 0.186 | 5.865 | 70.375 |
| 110.0 | 250.0 | 84 | 140.0 | 4.500E-05 | 0.006 | 2,574.0 | 0.003 | 0.055 | 1.739 | 20.865 |
| 140.0 | 250.0 | 85 | 110.0 | 4.500E-05 | 0.005 | 2,559.0 | 0.003 | 0.039 | 1.238 | 14.860 |
| **Microcuenca 11** | 95.0 | 200.0 | 86 | 105.0 | 2.350E-04 | 0.025 | 2205 | 0.005 | 0.250 | 7.893 | 94.713 |
| 107.0 | 200.0 | 87 | 93.0 | 2.350E-04 | 0.022 | 3002 | 0.004 | 0.236 | 7.449 | 89.382 |
| 114.0 | 200.0 | 88 | 86.0 | 2.350E-04 | 0.020 | 1254 | 0.003 | 0.068 | 2.158 | 25.895 |
| 121.0 | 200.0 | 89 | 79.0 | 2.350E-04 | 0.019 | 1913 | 0.002 | 0.067 | 2.128 | 25.536 |
| 130.0 | 200.0 | 90 | 70.0 | 2.350E-04 | 0.016 | 1301 | 0.002 | 0.036 | 1.147 | 13.768 |
| *145.0* | *200.0* | *91* | *55.0* | *2.350E-04* | *0.013* | *1924* | *0.001* | *0.022* | *0.706* | *8.470* |
| **Micro-**  **cuenca**  **1** | 138.0 | 200.0 | 92 | 62.0 | 4.600E-05 | 0.003 | 3480 | 0.002 | 0.017 | 0.532 | 6.385 |
| 138.0 | 200.0 | 93 | 62.0 | 4.600E-05 | 0.003 | 1746 | 0.007 | 0.035 | 1.099 | 13.191 |
| Micro-  cuenca  16 | 110.0 | 180.0 | 95 | 70.0 | 2.350E-04 | 0.016 | 5964 | 0.004 | 0.422 | 13.304 | 159.647 |
| Micro-  cuenca  13 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 2.988 | 35.856 |
| Micro-  cuenca  17 |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 1.208 | 14.502 |
|  |  |  | **Totales** | | | | | |  | **61.2503** | **734.9960** |

1. Entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal del acuífero Perote-Zayaleta



**Recarga inducida**

El volumen de agua que anualmente retorna al acuífero como consecuencia del riego que se realiza en el área se calculó multiplicando al volumen excedente de agua superficial y subterránea destinada al riego (119.5 hm3/periodo 1996-2008), por un coeficiente de infiltración del 10% (I2), resultando un volumen de recarga de 6.9 hm3 para el periodo 1996-2008 y de 0.58 hm³ el promedio anual.

El 10% se explica de la siguiente forma: de acuerdo al tipo clima que se presenta en la zona de estudio el porcentaje de agua excedente (50% del volumen bruto utilizado) empleado en el riego que se pierde por infiltración es del orden del 10%, mientras que las pérdidas totales por evaporación y por colmatación de suelos suman el 90% restante del agua excedente de riego.

Al mismo tiempo, el uso público urbano origina una recarga al acuífero por pérdidas en redes de distribución, el cual resultó de 5% del agua extraída para el uso público urbano, lo cual representa 24 hm³ en el periodo 1996-2008, el cual se verifica principalmente en la localidad de Perote; cabe resaltar que el volumen de agua que se utiliza para abastecer a la población es de origen superficial en su mayor parte. Por lo tanto la recarga total inducida media anual (agrícola + urbana) es de 2.58 hm³/año.

#### Descarga

**Evapotranspiración del nivel estático**

Dentro del área de estudio no se presentaron niveles estáticos a menos de 10 m en el periodo de 1996 a 2008, por lo que la evapotranspiración es nula.

**Manantiales**

No se tienen registrados volúmenes concesionados de manantiales que pudieran estar comprometidos..

**Salidas por flujo subterráneo horizontal**

Esta variable fue la incógnita dentro de la ecuación de balance, debido a que existe mucha incertidumbre con respecto a los datos piezométricos que se presentan en la salida hacia el acuífero colindante Martínez de la Torre – Nautla. Al resolver la ecuación de balance presentada en la expresión matemática 3 se obtuvo un volumen total de salida horizontal de 1797.2 hm³ en el periodo 1996-2008. El volumen total de agua que se transfiere del acuífero Perote-Zayaleta, Ver. al de Martínez de la Torre – Nautla, Ver. es de 149.8 hm³/año.

**Flujo base de ríos y arroyos perennes**

No existe flujo base del acuífero hacia ríos o arroyos ya que la hidrografía presente dentro del área de estudio es de carácter intermitente.

**Extracciones**

El volumen total extraído del acuífero a través del bombeo (B), para todos los usos resultó ser de 138.98 hm3 durante el periodo de 1996 a 2008. Los datos de extracción para uso agrícola fueron obtenidos con superficies y padrón de cultivos para cada año, láminas netas de riego, eficiencia global promedio del riego y láminas brutas para cada cultivo. Para el uso público-urbano, la extracción se cuantificó con consumos medios diarios y con los datos de población por año para todas las localidades que se ubican dentro de la poligonal del acuífero de Perote-Zayaleta. La extracción para uso doméstico se cuantificó con los datos obtenidos en el censo (tiempos de operación y gastos instantáneos) Como no se cuenta con todos los datos históricos los volúmenes fueron afectados por una factor de crecimiento; los resultados anuales se presentan en la Tabla 6.12 y en la .

1. Resumen de extracciones anuales en el periodo 1996-2008 por tipo de uso.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Año** | **Público-urbano** | **uso agrícola** | **Uso industrial** | **uso pecuario** | **otros usos** | **Extracción por año** |
| **1996** | 0.5109 | 7.4901 | 0.2502 | 0.3291 | 0.0391 | 8.6194 |
| **1997** | 0.5313 | 7.7743 | 0.2627 | 0.3455 | 0.0410 | 8.9549 |
| **1998** | 0.5525 | 8.0585 | 0.2758 | 0.3628 | 0.0431 | 9.2927 |
| **1999** | 0.5746 | 8.3426 | 0.2896 | 0.3810 | 0.0452 | 9.6331 |
| **2000** | 0.5976 | 8.6268 | 0.3041 | 0.4000 | 0.0475 | 9.9760 |
| **2001** | 0.6215 | 8.9109 | 0.3193 | 0.4200 | 0.0499 | 10.3216 |
| **2002** | 0.6464 | 9.1951 | 0.3353 | 0.4410 | 0.0524 | 10.6701 |
| **2003** | 0.6723 | 9.4792 | 0.3521 | 0.4631 | 0.0550 | 11.0216 |
| **2004** | 0.6991 | 9.7634 | 0.3697 | 0.4862 | 0.0577 | 11.3761 |
| **2005** | 0.7271 | 10.0475 | 0.3881 | 0.5105 | 0.0606 | 11.7339 |
| **2006** | 0.7562 | 10.3317 | 0.4075 | 0.5360 | 0.0636 | 12.0951 |
| **2007** | 0.7864 | 10.6158 | 0.4279 | 0.5628 | 0.0668 | 12.4599 |
| **2008** | 0.8179 | 10.9000 | 0.4493 | 0.5910 | 0.0702 | 12.8284 |
| Totales (hm3) | 8.49 | 119.54 | 4.43 | 5.83 | 0.69 | 138.98 |
| Promedio anual | 0.65 | 9.20 | 0.34 | 0.45 | 0.05 | 10.69 |
| Extracción total en el periodo (hm3) | |  |  |  |  | 138.98 |

1. Resumen de extracciones para el periodo 1996-2008 por uso destinado.

#### Cambio de almacenamiento (CVA)

Para el cálculo de este término se consideró la evolución piezométrica del acuífero en el intervalo 1996 a 2008, con base en la configuración de curvas de igual evolución del nivel estático; determinando que existe una variación negativa de los niveles piezométricos en este periodo de 12 años, lo cual representa un abatimiento piezométrico medio de 0.227 m/año, valor que multiplicado por al área de balance (440.9 km2), resulta un volumen drenado (Vd) de -1,201 hm3 en el periodo de 1996 a 2008, y aplicando un coeficiente de almacenamiento de 0.05, resulta un cambio de almacenamiento de -60.0 hm3 en el mismo periodo; por lo que el cambio de almacenamiento medio anual sería de -5.0 hm3/año.

En forma resumida, el balance de agua subterránea para el periodo de 1996 a 2008, se presenta en la Tabla 6.13, así como el promedio anual del periodo, calculado de acuerdo con la expresión matemática 3.

#### Coeficiente de almacenamiento (S)

El valor del coeficiente de almacenamiento del acuífero en la zona, no pudo ser defino mediante las pruebas de bombeo que se realizaron por no contar con pozos de observación; por otra parte el acuífero de Perote-Zayaleta, Ver. es muy heterogéneo en cuanto a los materiales que lo conforman, por lo que es difícil decidir el coeficiente que se debe aplicar en la ecuación de balance; sin embargo dada sus características hidrogeológicas muy similares a otros acuíferos que se han estudio se decidió utilizar un coeficiente de almacenamiento del orden de 0.05

El coeficiente utilizado es congruente y característico de un acuífero no confinado, formados por material tanto granular de gran heterogeneidad, como fracturado.

#### Balance de agua subterránea.

El procedimiento directo para calcular la recarga vertical o también conocida como infiltración por precipitación (Ip) o recarga por lluvia, que recibe un acuífero y el valor del coeficiente de almacenamiento regional del mismo, es el planteamiento de la ecuación de balance en un intervalo de tiempo lo suficientemente largo como para abarcar años secos y años lluviosos (mínimo 10 años). En forma resumida, el balance de agua subterránea para el periodo de 1996 a 2008, se presenta en la Tabla 6.4, así como el promedio anual del periodo, calculado de acuerdo con la expresión matemática 3

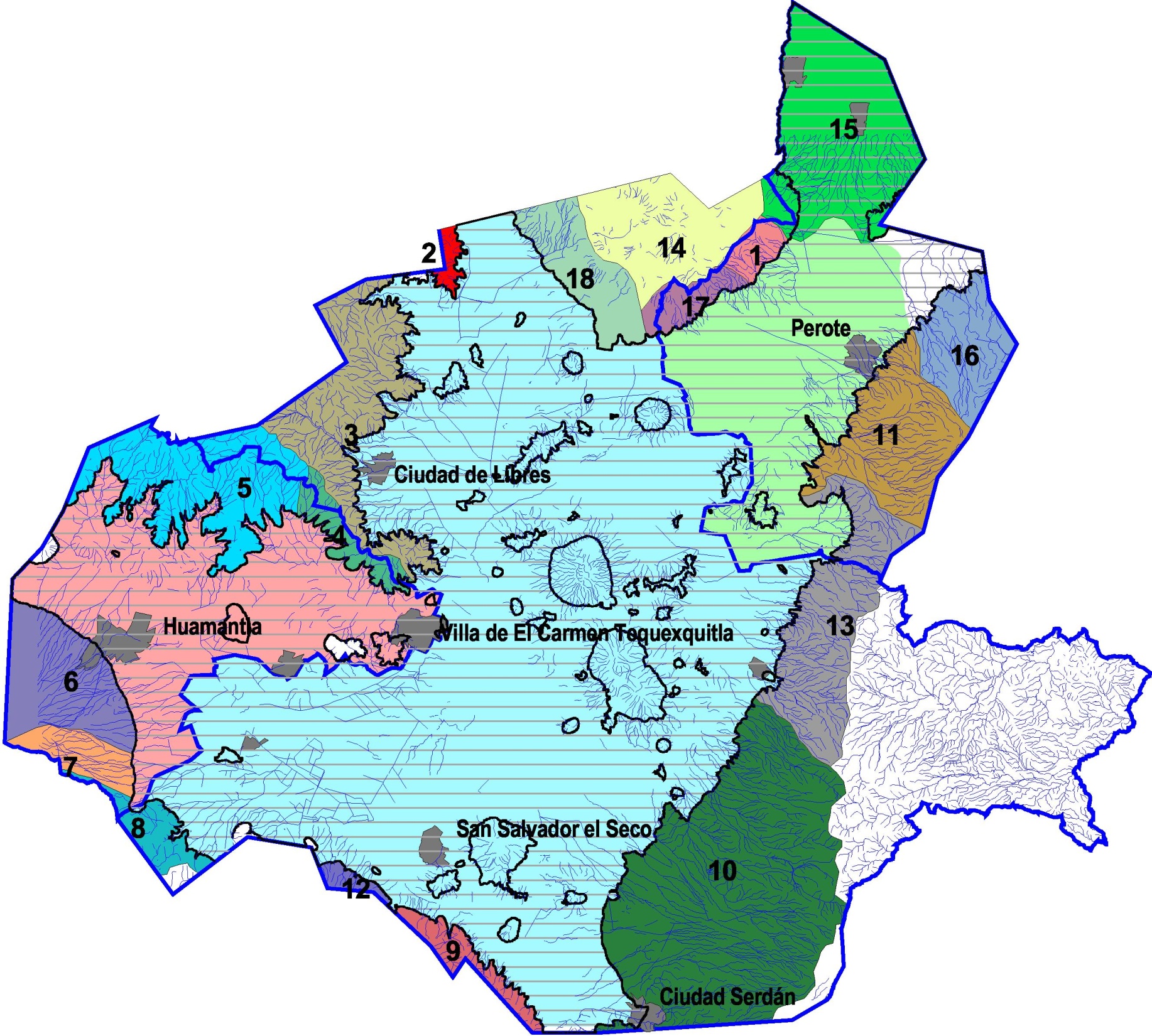
1. Balance de aguas subterráneas.



## Balance por microcuencas

El área que engloba a las poligonales de los tres acuíferos en estudio, fue dividida para efectos de balance hidroclimatológico en 21 zonas (Figura 6.9), 18 de ellas se ubican en las zonas de recarga del acuífero (zonas montañosas) y las tres restantes vienen a ser las tres zonas de almacenamiento de los tres acuíferos en estudio (zonas de valle).

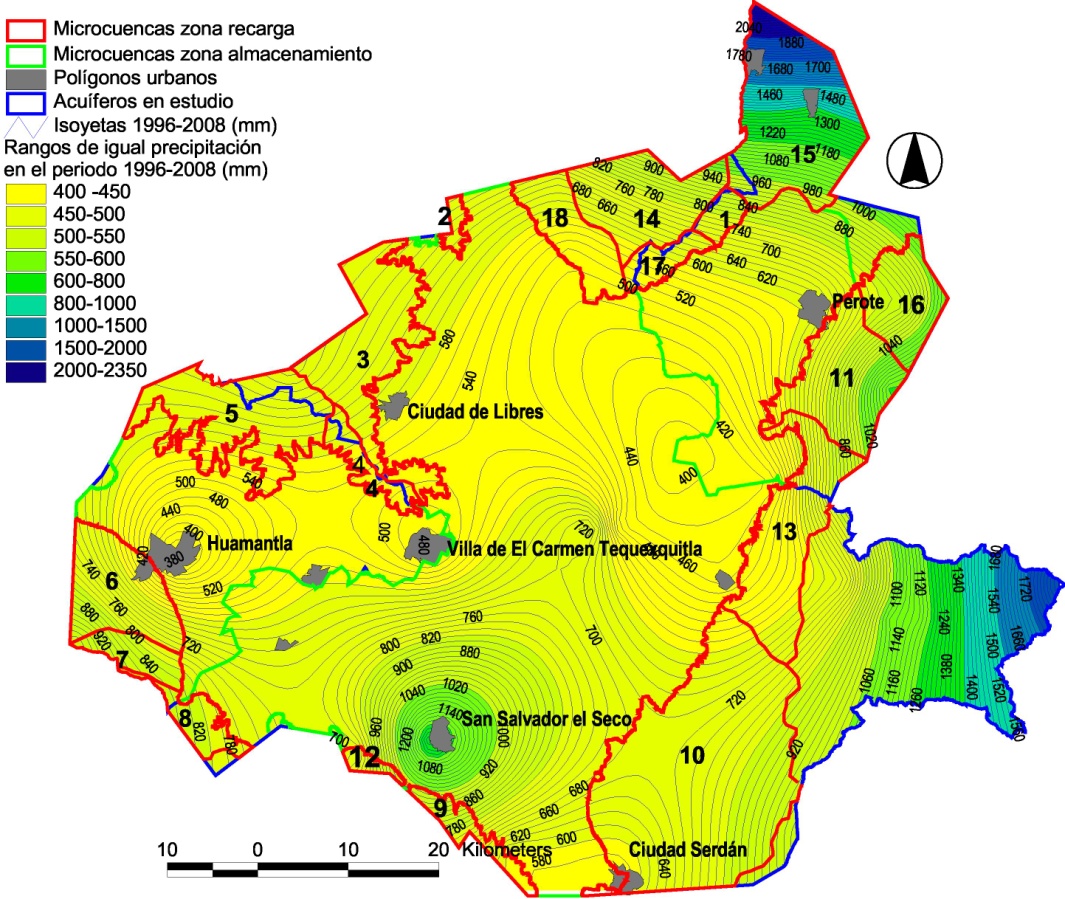
1. División en microcuencas para el análisis hidroclimatológico .



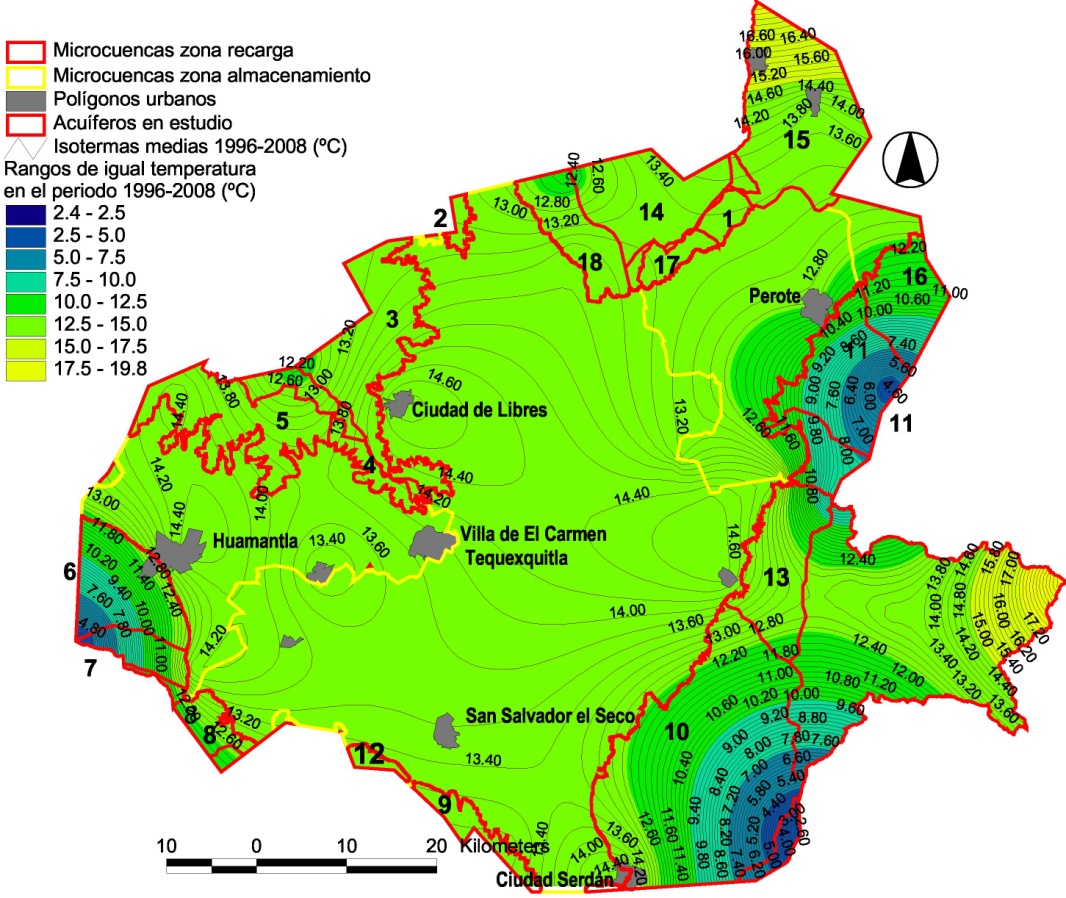
Es importante mencionar que de las 18 zonas (microcuencas) analizadas, 3 de ellas no aportan agua al acuífero en estudio por infiltración (microcuencas 2, 9 y 12), ya que los materiales que afloran corresponden a calizas y que al infiltrarse el agua en este material recargan al acuífero calcáreo pero no al acuífero granular; aunque por otra parte si tienen relevancia en el balance global ya que el escurrimiento que se produce en estas microcuencas al final va a parar al valle en donde una parte se infiltra, otra se almacena y otra se evapora; por otra parte, la microcuenca 14 no aporta agua al sistema ni superficial, ni subterráneamente hablando, ya que esta microcuenca forma parte de la Caldera de los Humeros, que es el sitio a donde va a parar a última instancia el agua precipitada en esta microcuenca. Finalmente, la microcuenca 15 también se encuentra fuera del sistema acuífero analizado, ya que el agua escurrida y la infiltrada va a parar a la poligonal del acuífero Martínez de la Torre – Nautla, en el Estado de Veracruz. Existe una microcuenca más, que de hecho no fue ni siquiera numerada, ni tomada en cuenta, ya que desde un principio se estableció que no existe comunicación hidráulica entre esta zona y el sistema acuífero en estudio, ni superficial, ni subterráneamente, esta zona se localiza al oriente de las microcuencas 10 y 13.

Se calculó la precipitación media anual y la temperatura media para cada una de las microcuencas y para el periodo 1996 a 2008; utilizando para ello los métodos de isotermas y de isoyetas ( y ); posteriormente con estos datos y utilizando la fórmula de Coutagne se calculó la evapotranspiración que se verifica en cada una de las microcuencas. Para el cálculo del escurrimiento fue necesario primeramente calcular el porcentaje de los diferentes usos de suelo que se presentan en cada microcuenca de las zonas serranas (Figura 6.12), ya que en el valle no se presenta escurrimiento, puesto que es una cuenca endorréica.

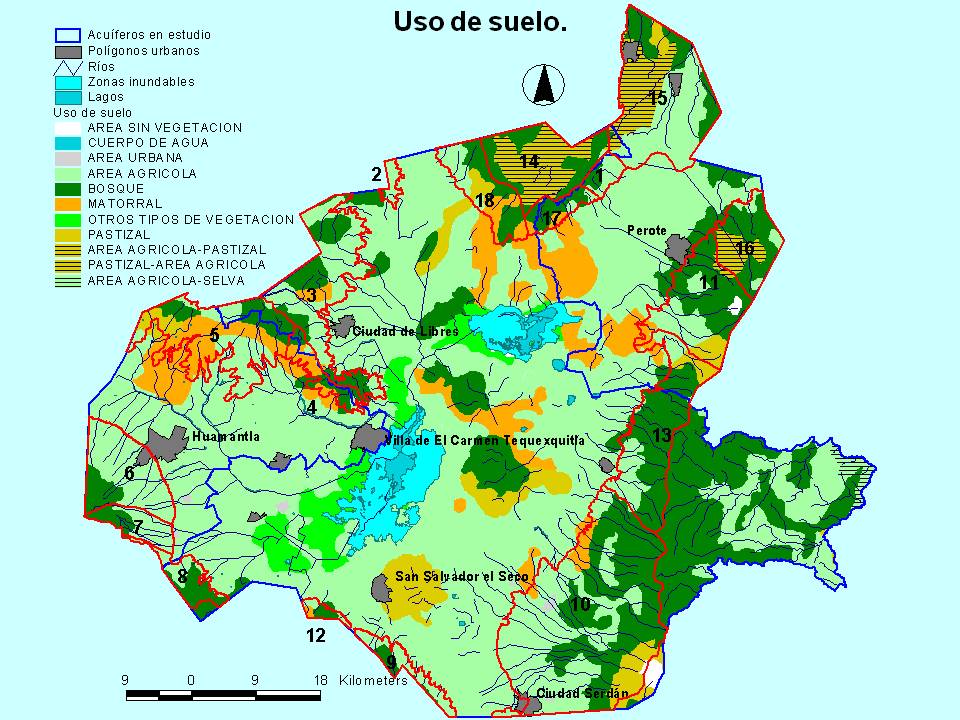
1. Isoyetas generadas con datos promedio de estaciones climatológicas del periodo 1996-2008.



1. Isotermas generadas con datos promedio de estaciones climatológicas del periodo 1996-2008.



1. Usos de suelo.



Una vez que se obtuvo el porcentaje que representa cada uso de suelo dentro de cada microcuenca, y el dato de la precipitación media en cada microcuenca se pudo calcular el escurrimiento virgen en cada zona de recarga. Por su parte el almacenamiento solo se registra en la zona de Libres – Oriental, la cual se calculó multiplicando la superficie de cuerpos de agua perenes por una lámina de 1 m. Finalmente, la infiltración fue el parámetro a calcular en la ecuación de balance hidroclimatológico, la cual dice que lo que se precipita es igual a la suma de lo que se evapotranspira más lo que escurre, más los que se almacena, más lo que se infiltra; como conocemos todas las variables excepto la infiltración, esta se despeja de la ecuación quedando como incógnita. Los parámetros climatológicos que intervienen en el balance se muestran en la , mientras que los balances se resumen en la .

1. Resumen de los parámetros involucrados en el balance hidroclimatológico de las diferentes microcuencas



1. Resumen de los balances hidroclimatológicos de las diferentes microcuencas



## Balance en equilibrio

El balance de equilibrio consiste en realizar un balance en el que la descarga total del sistema igualen a la recarga total del mismo, a través de la implementación de acciones que reduzcan la demanda. Este balance se considerará como un estado de referencia para establecer metas sobre la estabilización del acuífero. A continuación se presenta el balance de equilibrio para cada uno de los acuíferos en estudio.

### Balance de Equilibrio para el acuífero Huamantla, Tlaxcala.

En la tabla siguiente se presenta el desglose para lograr el equilibrio entre las entradas y salidas de agua en este sistema. Si se mantiene la recarga natural media anual, calculada y descrita en el balance de aguas subterráneas de este acuífero (59.7 hm³/año), descrito en capítulo precedente, se tiene entonces que al disminuir las extracciones por bombeo, el nivel del agua tendría una recuperación promedio de 4.14 m en un periodo de 12 años, esta recuperación incrementaría el espesor saturado en las salidas hacia el acuífero de Libres – Oriental, lo que a su vez incrementaría el volumen de las salidas horizontales, con respecto al promedio obtenido en el balance de 1996 al 2008 en 300 000 m³, ya que este volumen en conjunto sería de 13.4 hm³. La recarga inducida por retornos agrícolas también se vería afectada, al disminuir la extracción para el uso agrícola de 81.53 hm³/año a 36.24 hm³/año, (la reducción sería del 60%), esta reducción en la recarga inducida por el riego pasaría de 4.08 hm³/año a 1.81 hm³/año. Al efectuar en el balance las adecuaciones en la extracción en el uso agrícola y en las salidas horizontales se logra el equilibrio en el cambio de almacenamiento, es decir se logra igualar las salidas con las entradas.

1. Balance de equilibrio para el acuífero de Huamantla, Tlaxcala



### Balance de Equilibrio para el acuífero Libres - Oriental, Puebla.

En la tabla siguiente se presenta el desglose para lograr el equilibrio entre las entradas y salidas de agua en este sistema acuífero. Si se mantiene la recarga natural por lluvia media anual, calculada y descrita en el balance de aguas subterráneas de este acuífero en el periodo 1996-2008 (205.1 hm³/año), descrito en capítulo anterior, y por otro lado se incrementa el volumen de la entrada por flujo subterráneo horizontal procedente del acuífero de Huamantla con respecto a la que se obtuvo del periodo 1996-2008, se tiene entonces que la recarga natural total sería de 297.3 hm³/año (en el periodo 1996-2008 era de 296.9 hm³/año); por otro lado al disminuir las extracciones por bombeo, el nivel del agua tendría una recuperación promedio de 3.85 m en un periodo de 12 años (32 cm/año), esta recuperación del nivel estático incrementaría el espesor saturado en las salidas hacia el acuífero de Perote-Zayaleta y hacia el acuífero de Tecamachalco, lo que a su vez incrementaría el volumen de éstas salidas por flujo subterráneo horizontal, con respecto al promedio obtenido en el balance de 1996 al 2008 en 600 000 m³, ya que este volumen en conjunto sería de 22.9 hm³/año (en el periodo 1996-2008 era de 22.3 hm³/año). La recarga inducida por retornos agrícolas también se vería afectada, ya que al disminuir la extracción para el uso agrícola de 162.06 hm³/año a 123.66 hm³/año, (la reducción sería del 20%), la recarga inducida por el riego pasaría de 8.11 hm³/año a 6.19 hm³/año. Otro fenómeno que se produce al disminuir la extracción es el aumento en la evapotranspiración del nivel estático, debido a que al recuperarse éste, en las zonas más someras se incrementaría el área susceptible de ser evapotranspirada, lográndose volúmenes evapotranspirados similares a los que se tenían en el año de 1999 (131 hm³/año)

Al efectuar en el balance las adecuaciones en la extracción en el uso agrícola, en la evapotranspiración y en las entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal se logra el equilibrio en el cambio de almacenamiento, es decir se logra igualar las salidas con las entradas.

1. Balance de equilibrio para el acuífero Libres - Oriental, Puebla



### Balance de Equilibrio para el acuífero Perote - Zayaleta, Veracruz.

En la tabla siguiente se presenta el desglose para lograr el equilibrio entre las entradas y salidas de agua en este sistema acuífero. Si se mantiene la recarga natural por lluvia media anual, calculada y descrita en el balance de aguas subterráneas para este acuífero en el periodo 1996-2008 (92.5 hm³/año), descrito en un capítulo anterior, y por otro lado se incrementa el volumen de la entrada por flujo subterráneo horizontal procedente del acuífero Libres - Oriental con respecto a la que se obtuvo del periodo 1996-2008, se tiene entonces que la recarga natural total sería de 154.3 hm³/año (en el periodo 1996-2008 era de 153.8 hm³/año); esta recuperación en la entrada por flujo subterráneo procedente del acuífero contiguo, provocaría que el nivel del agua sufriera una recuperación, lo que a su vez incrementaría el espesor saturado en las salidas hacia el acuífero de Martínez de la Torre – Náutla y causaría el aumento en el volumen de éstas salidas por flujo subterráneo horizontal, con respecto al promedio obtenido en el balance de 1996 al 2008 en 4.4 hm³/año, siendo este volumen por tanto, de 143.4 hm³/año (en el periodo 1996-2008 era de 147.8 hm³/año). La recarga inducida por retornos agrícolas no se vería afectada, ya que no sufriría cambios la extracción para el uso agrícola. Al efectuar en el balance las adecuaciones en las entradas y salidas por flujo subterráneo horizontal se logra el equilibrio en el cambio de almacenamiento, es decir se logra igualar las salidas con las entradas, sin necesidad de disminuir las extracciones.

1. Balance de equilibrio para el acuífero Perote - Zayaleta, Veracruz



## Balance REPDA

Uno de los problemas más claros en la administración de las aguas subterráneas del acuífero, es la discrepancia entre los volúmenes concesionados y los volúmenes realmente aprovechados. Los volúmenes concesionados tanto a las localidades como a las áreas agrícolas, son definitivamente menores que los que actualmente se estima se encuentran en uso; pues para el uso agrícola (principal uso), se observa que las superficies de riego reportadas por SAGARPA, demandan en suma, volúmenes mayores a los que se tienen concesionados.

La magnitud de esta diferencia es de gran relevancia y es congruente con el abatimiento general que se observa en todas las áreas del acuífero. Es la causa de fondo de una sobreexplotación que administrativamente no se encuentra claramente expresada.

Ante estas circunstancias, el balance REPDA de los acuíferos en estudio tiene como objetivo, analizar el impacto en cada uno de ellos en el caso de que los usuarios regularizados administrativamente, pretendan ejercer o ajustarse a sus derechos de extracción concesionados y/o asignados.

A continuación se presentan los balances de agua subterránea, en donde se ha sustituido la extracción real por el volumen concesionado.

### Balance REPDA para el acuífero Huamantla, Tlaxcala.

Actualmente la extracción real es de 99.1 hm³/año; si se ajustara la extracción al volumen concesionado de este acuífero (53.40 hm³/año), manteniendo la misma recarga natural en 59.7 hm³/año; en principio la recarga inducida por el uso agrícola sufriría una reducción como consecuencia de la disminución en la extracción de agua subterránea para riego del orden de 1.92 hm³/año, al pasar de 4.08 a 2.15 hm³/año; por otro lado, las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el acuífero de Libres-Oriental se mantendrían sin cambio en 13.1 hm³/año; mientras que el cambio de almacenamiento sería de -4.2 hm³/año. El nivel estático sufriría un abatimiento medio anual de 3.73 cm/año (prácticamente se estabilizaría). En el balance obtenido para el periodo 1996-2008 el cambio de almacenamiento indica que actualmente es de -42.7 hm³/año, si ajustamos la extracción al volumen concesionado entonces este cambio de almacenamiento se reduce a -4.2 hm³/año, es decir el cambio de almacenamiento sería 10 veces menor al que se registra actualmente.

1. Balance REPDA para el acuífero Huamantla, Tlaxcala



### Balance REPDA para el acuífero Libres-Oriental, Puebla.

Actualmente la extracción real en este acuífero es de 218.8 hm³/año; si se ajustara la extracción al volumen concesionado de este acuífero (171.6 hm³/año), manteniendo la misma recarga natural en 296.9 hm³/año; en principio la recarga inducida por el uso agrícola sufriría una reducción como consecuencia de la disminución en la extracción de agua subterránea para riego del orden de 700,000 m³/año, al pasar de 8.1 a 7.4 hm³/año; por otro lado, las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia los acuíferos de Perote-Zayaleta y Tecamachalco, se mantendrían sin cambios en 22.3 hm³/año, al igual que el volumen evapotranspirado en 129.7 hm³/año; mientras que el cambio de almacenamiento sería de -19.35 hm³/año. El nivel estático sufriría un abatimiento medio anual de 17.8 cm/año. En el balance obtenido para el periodo 1996-2008 el cambio de almacenamiento es de -34.9 hm³/año, si ajustamos la extracción al volumen concesionado entonces este cambio de almacenamiento se reduce a -19.35 hm³/año, es decir el cambio de almacenamiento sería 55.4% menor al que se registra actualmente.

1. Balance REPDA para el acuífero Libres-Oriental, Puebla



### Balance REPDA para el acuífero Perote-Zayaleta, Veracruz.

Actualmente la extracción real en este acuífero es inferior al volumen total que se tiene asignado (real 11.6 hm³/año); si los usuarios hicieran uso de sus volúmenes concesionados (22.31 hm³/año), manteniendo la misma recarga natural en 153.8 hm³/año; en principio la recarga inducida por el uso agrícola sufriría un aumento como consecuencia de incrementar la extracción de agua subterránea para riego del orden de 540,000 m³/año, al pasar de 0.58 a 1.12 hm³/año; por otro lado, las salidas por flujo subterráneo horizontal hacia el acuífero de Martínez de la Torre-Náutla, se mantendría sin cambios en 147.81 hm³/año; mientras que el cambio de almacenamiento sería de -15.22 hm³/año. El nivel estático sufriría un abatimiento medio anual del orden de 69.0 cm/año. En el balance obtenido para el periodo 1996-2008 el cambio de almacenamiento era de -5.0 hm³/año, si ajustamos la extracción al volumen concesionado entonces este cambio de almacenamiento se incrementa a -15.22 hm³/año, es decir el cambio de almacenamiento sería tres veces mayor al que se registra actualmente.

1. Balance REPDA para el acuífero Perote-Zayaleta, Veracruz

