



**SUBDIRECCIÓN GENERAL TÉCNICA**

**GERENCIA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**ACTUALIZACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE  
AGUA EN EL ACUÍFERO VALLE DE JUÁREZ (0833) ESTADO  
DE CHIHUAHUA**

CIUDAD DE MÉXICO, 2024

## Contenido

<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
Antecedentes.....	2
1.1 Localización .....	2
1.2 Situación administrativa del acuífero .....	4
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD .....</b>	<b>4</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>8</b>
3.1 Provincia fisiográfica .....	8
3.2 Clima .....	8
3.3 Hidrografía.....	9
3.4 Geomorfología.....	9
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
4.1 Estratigrafía .....	12
4.2 Geología estructural .....	15
4.3 Geología del subsuelo.....	16
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
5.1 Tipo de acuífero.....	18
5.2 Parámetros hidráulicos .....	19
5.3 Piezometría.....	19
5.4 Comportamiento hidráulico.....	19
5.4.1 Profundidad al nivel estático.....	20
5.4.2 Elevación del nivel estático.....	21
5.4.3 Evolución del nivel estático .....	22
5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea .....	23
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA .....</b>	<b>23</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>24</b>
7.1 Entradas.....	24
7.1.1 Recarga natural (Rn).....	25
7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....	26
7.1.3 Retorno por riego (Rr) .....	27
7.1.4 Entradas por pérdidas en sistemas de agua potable y alcantarillado (Rap).....	29
7.2 Salida.....	29
7.2.1 Bombeo (B).....	29
7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh) .....	29
7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ ) .....	29
<b>8. DISPONIBILIDAD .....</b>	<b>31</b>
8.1 Recarga total media anual (R).....	31
8.2 Descarga natural comprometida (DNC).....	31
8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS) .....	31
8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DMA) .....	32
<b>9. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>33</b>

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) y su Reglamento contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, en el caso de las aguas subterráneas esto debe ser por acuífero, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la “NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, gobiernos estatales y municipales y de la CONAGUA.

La NOM establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas la realización de un balance de las mismas donde se defina de manera precisa la recarga, de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen de extracción de aguas subterráneas.

Los resultados técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información, se especifique claramente el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar.

La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, transparentar la administración del recurso, planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

### **1.1 Localización**

El acuífero Valle de Juárez, definido con la clave 0833 por la Comisión Nacional del Agua, se localiza en la porción norte del estado de Chihuahua. Abarca una superficie de 3,386 km<sup>2</sup>, se ubica dentro de los paralelos 30° 50' y 31° 48' de latitud norte, y entre los meridianos 105° 37' y 106° 38' de longitud oeste (Figura 1).

Colinda al norte y este con la frontera internacional que limita a México de los Estados Unidos de América, al oeste con los acuíferos Conejos-Médanos y Samalayuca, y hacia el sur con los acuíferos Laguna de Patos, El Cuarenta y Valle del Peso.

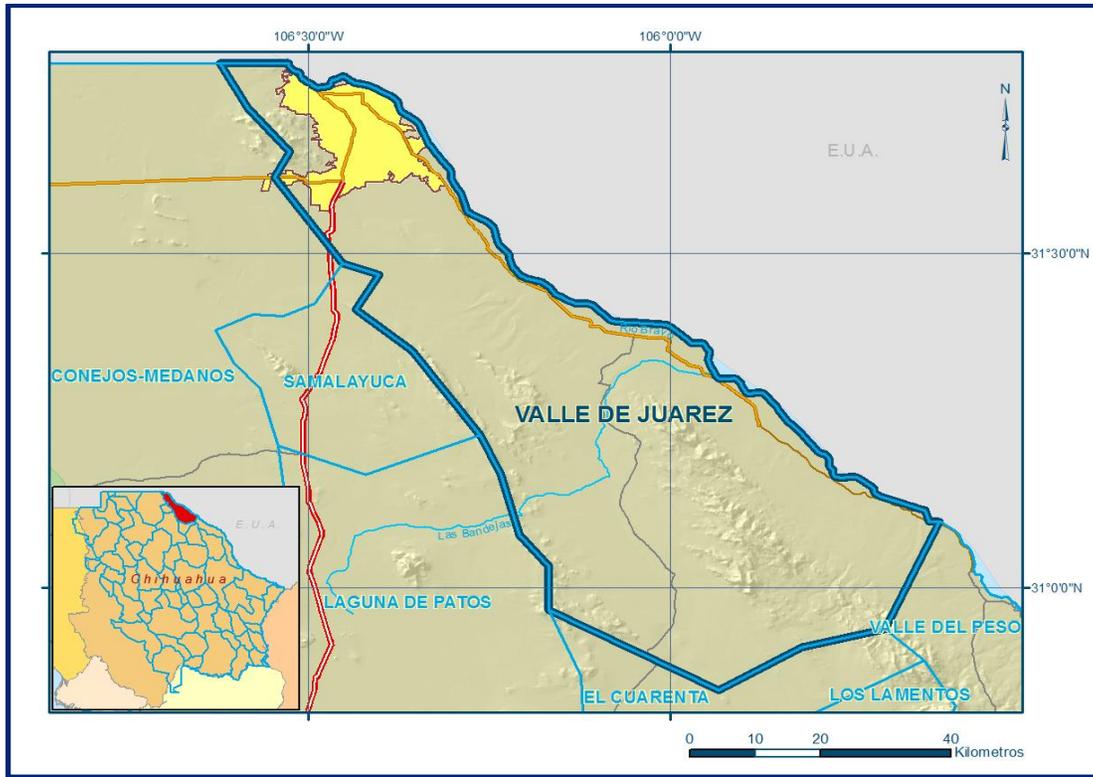


Figura 1. Localización del acuífero

Geopolíticamente comprende totalmente el municipio Praxedis G. Guerrero y parcialmente Juárez y Guadalupe. La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero

ACUIFERO 0833 VALLE DE JUAREZ							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	105	37	39.9	31	5	54.7	
2	105	42	9.9	30	56	14.1	
3	105	49	55	30	54	33.9	
4	105	56	0.2	30	50	45.0	
5	106	10	5.1	30	57	56.8	
6	106	10	3.9	31	1	51.7	
7	106	12	31.8	31	4	43.3	
8	106	14	2.8	31	10	10.3	
9	106	15	45.7	31	13	39.7	
10	106	21	23.0	31	21	12.5	
11	106	26	7.3	31	24	58.3	
12	106	24	9.7	31	28	4.8	
13	106	27	11.4	31	29	6.6	
14	106	32	49.7	31	36	48.6	
15	106	31	33.1	31	39	5.4	
16	106	35	3.0	31	43	1.7	
17	106	37	21.3	31	47	2.3	DEL 17 AL 1POR EL LIMITE INTERNACIONAL
1	105	37	39.9	31	5	54.7	

## **1.2 Situación administrativa del acuífero**

El acuífero Valle de Juárez pertenece al Organismo de Cuenca VI "Río Bravo". Con el propósito de regular y controlar las extracciones de agua subterránea en el acuífero, parte de su territorio se encuentra sujeto a las disposiciones del *"Decreto que establece la veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo al sureste de Ciudad Juárez, Chih."*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de Marzo de 1952. Este decreto es de tipo III que permiten extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros.

Una pequeña región del extremo norte y la porción sur del acuífero, se encuentran sin veda de agua subterránea

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 1.

El usuario principal es el organismo operador de agua potable para el abastecimiento de Ciudad Juárez (Junta Municipal de Agua y Saneamiento JMAS). El acuífero forma parte del Consejo de Cuenca Río Bravo. En su territorio se localiza el Distrito de Riego 009 "Valle de Juárez".

## **2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD**

**DIGITAL MODEL FOR SIMULATED EFFECTS OF GROUND-WATER PUMPING IN THE HUECO BOLSON, EL PASO AREA, TEXAS, NEW MEXICO, AND MEXICO.** U.S. Geological Survey, 1976. Es un modelo numérico de dos capas del Bolsón del Hueco que fue desarrollado para simular los cambios en los niveles del agua para predecir la respuesta del sistema ante diferentes políticas de explotación del agua subterránea. Incluye una parte de la actual zona urbana y solo una pequeña área de la zona agrícola, en la porción mexicana del Bolsón del Hueco.

Aporta una idea clara del funcionamiento del sistema hidrológico y de la posición original del nivel estático en estado estacionario, lo cual permite establecer y comparar los rangos de los parámetros hidráulicos del acuífero en la porción de la zona urbana de Ciudad Juárez y del Bajo Valle de Juárez, sobre todo en la porción del acuífero aluvial. El modelo mostró que el 60 % del agua proviene del almacenamiento del acuífero del bolsón (capa 2 del modelo) y 28 % del aluvión (capa 1 del modelo).

**GROUNDWATER DEVELOPMENT IN THE EL PASO REGION, TEXAS, WITH EMPHASIS ON THE RESOURCES OF THE LOWER EL PASO VALLEY.**

Texas Development of Water Resources, 1980. La investigación del Valle Bajo se inició a solicitud del USBR, con el propósito de determinar la ocurrencia, disponibilidad, cantidad y calidad del agua subterránea en el Valle Bajo de El Paso, para asesorar a diferentes dependencias en determinar las áreas más favorables para el futuro desarrollo y aprovechamiento del agua subterránea para uso agrícola, como un suplemento al suministro de agua del Río Bravo.

El estudio analizó el comportamiento de la calidad del agua subterránea en el acuífero somero, en la franja que se ha denominado Aluvión Río Grande, donde se ubican las mejores tierras para la agricultura. Define la calidad del agua subterránea en sentido horizontal y vertical, asociándola con la calidad de los suelos, ya que éstos han reducido, en algunas zonas, su capacidad productiva, debido al riego con aguas de alto contenido salino.

**DIAGNÓSTICO DE EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA ZONA URBANA DE CIUDAD JUÁREZ, CHIHUAHUA.** Realizado por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS) en 1995. Realiza un análisis de la evolución de los niveles piezométricos del acuífero de la zona urbana y la primera Unidad del Distrito de Riego, con el propósito de definir el modelo conceptual de funcionamiento y grado de explotación para identificar deficiencias en la información para construir un modelo de simulación matemática del flujo subterráneo. La información y conclusiones derivadas de este diagnóstico, permitió tener una idea clara de lo que se puede encontrar en el área, dado que el “**Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de la Red de Observación del Acuífero de Cd. Juárez, Chih, (1996).**”, representa la continuación de este trabajo. Dicho modelo considera todo el acuífero, a diferencia del estudio realizado por la JMAS que únicamente toma en cuenta la evolución del nivel estático en el área correspondiente a la zona urbana y Primera Unidad del Distrito de Riego 009.

**ACTUALIZACIÓN DE MEDICIONES PIEZOMÉTRICAS DEL ACUÍFERO REACTIVADO EN 1996 EN EL VALLE DE JUÁREZ, CHIHUAHUA.** Realizado por la empresa COPEI Ingeniería, S. A. de C.V., en 1999. Su objetivo fue actualizar la información piezométrica, definir la evolución del nivel estático y su ritmo de abatimiento. Elabora configuraciones del nivel estático para el periodo 1997-1999. Concluye que la explotación intensiva del agua subterránea, principalmente en el área urbana de Ciudad Juárez, ha propiciado un cambio en la dirección natural del flujo, por lo que el Río Bravo ha dejado de ser un dren natural para convertirse en una importante fuente de recarga.

**HYDROCHEMICAL EVOLUTION OF SODIUM-SULFATE AND SODIUM-CHLORIDE GROUNDWATER BENEATH THE NORTHERN CHIHUAHUA DESERT, TRANS-PECOS, TEXAS, USA.** (Hydrology Journal, volumen 5, número 2, 1997)

El documento hace un análisis de la evolución química del agua desde un punto de vista regional, tomando en cuenta el paso del agua subterránea por la zona no saturada y por las diferentes unidades hidrogeológicas por las que circula, analizando la interacción agua-roca y las variables antropogénicas. Los resultados documentan dos posibles patrones de evolución hidrogeoquímica para las aguas subterráneas en zonas áridas.

Si la recarga procede de lluvia, pueden ocurrir cambios significativos en la zona no saturada, el intercambio iónico puede ser tan importante como las reacciones de disolución-precipitación para determinar la composición del agua subterránea y las reacciones agua-mineral son las que finalmente controlan la composición del agua subterránea.

Si la recarga es por retornos de agua de riego que ya contienen apreciables cantidades de solutos, las reacciones agua-mineral son menos importantes que la composición del agua de riego para determinar la composición química del agua.

Sus conclusiones permiten tener un mejor entendimiento sobre los sistemas de flujo regional y local para definir con mayor claridad el modelo conceptual de funcionamiento del sistema y a explicar los cambios de la calidad del agua en distancias pequeñas, así como conocer con un alto grado de certeza del tipo de agua que puede estar presente en zonas donde localmente aún no se cuenta con información.

**MODELO MATEMÁTICO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ACUÍFERO DE LA ZONA URBANA DE CIUDAD JUÁREZ, CHIH.** Elaborado por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS), en 1998. Este modelo cubre la zona urbana de Ciudad Juárez y la primera unidad del Distrito de Riego 009.

Su propósito fue construir esta herramienta técnica para evaluar la situación geohidrológica actual y el probable comportamiento a futuro del acuífero, para definir políticas óptimas de explotación.

Propone el cierre gradual de 30 pozos ubicados en la zona centro de la ciudad, que contienen agua de mala calidad, y el intercambio de agua superficial del río Bravo por agua tratada para el Distrito de Riego.

**ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA EN LA ZONA DE TERRAZAS.** Elaborado por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS), en 2000. El estudio delimitó una zona de aproximadamente 100 km<sup>2</sup> con condiciones favorables para la realización de perforaciones exploratorias, con el propósito de identificar sitios para el emplazamiento de una fuente alterna para el abastecimiento de agua potable de nuevos desarrollos habitacionales. Se definieron las unidades geoelectricas del subsuelo a partir de la interpretación de sondeos eléctricos verticales realizados.

**ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO EN LA CUENCA DEL ARROYO LAS BANDEJAS.** Elaborado por la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez (JMAS), en 2003. Mediante la ejecución de sondeos eléctricos verticales (SEV's), recorridos de piezometría, muestreo de agua en pozos y verificación geológica, se realizó una evaluación geohidrológica de la zona con el propósito de evaluar su potencial para el abastecimiento de agua potable para Ciudad Juárez. Los resultados de análisis físicoquímicos indican concentraciones fuera de norma para el flúor, hierro, sodio, sulfatos y sales disueltas. Las altas concentraciones de fierro se asocian a la disolución del material del ademe y las de sulfato a la presencia de yeso en la zona.

Con base en las configuraciones del nivel estático identifica cuatro zonas de recarga en el acuífero, correspondientes al área entre los arroyos La Boquilla y La Máquina, al sur de la Sierra Presidio, la Sierra San Ignacio y la Sierra La Amargosa. Las salidas subterráneas se ubican entre la parte norte de la sierra San Ignacio y al sur de la Sierra Guadalupe.

**ACTUALIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA DEL ACUÍFERO VALLE DE JUÁREZ, CHIHUAHUA.** Realizado por la Universidad de Chihuahua, en convenio con la CONAGUA en 2008. El objetivo de este estudio fue actualizar el conocimiento de las condiciones geohidrológicas del acuífero para determinar la disponibilidad de agua subterránea así como evaluar las causas de interés y utilidad pública generadas por las condiciones de explotación. Mediante la realización de actividades de campo que incluyeron censo, hidrometría, piezometría, ejecución de pruebas de bombeo, nivelación de brocales de pozos y reconocimientos geológicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga total media anual.

Este estudio fue la base para la elaboración del presente documento, por lo que sus conclusiones y resultados se analizan en los apartados correspondientes.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia fisiográfica**

De acuerdo a la clasificación de Provincias Fisiográficas realizada por E. Raisz, (1964), la zona se localiza en la porción centro occidental de la Provincia Cuencas y Sierras, la cual está limitada al oriente por la Sierra Madre Oriental, al sur por las Sierras Transversales y al occidente por la Sierra Madre Occidental.

La Provincia Fisiográfica de Cuencas y Sierras, se caracteriza por ser una extensa zona desértica en la que emergen grandes bloques montañosos, constituidos principalmente de rocas sedimentarias marinas de edad cretácica separados por amplias llanuras que al paso del tiempo, durante el Paleógeno y Cuaternario, han sido rellenadas por depósitos aluviales, fluviales y lacustres conformando las cuencas endorréicas conocidas en el norte del país como “bolsones” típicos de esta provincia. Estas regiones se caracterizan por su escasa pendiente y por presentar, en la mayoría de los casos, una laguna en su porción central, que en la mayoría de los casos son temporales.

Localmente los rasgos topográficos más importantes son el valle del Río Bravo, denominado localmente Valle de Juárez, y las sierras aisladas, angostas y alargadas que presentan una orientación preferencial noroeste-sureste. Entre ellas destacan las sierras de Juárez, El Presidio, Guadalupe, La Esperanza y San Ignacio, las cuales en general presentan un flanco escarpado y el otro con pendientes muy fuertes, seguido de una zona de transición constituida por lomeríos suaves que desaparecen hacia su proximidad con el río, donde se forma la planicie aluvial del río Bravo.

#### **3.2 Clima**

De acuerdo a la clasificación de climas realizada por Köppen y modificada por Enriqueta García (1964) para las condiciones de la República Mexicana, el clima de la región es muy seco o desértico y se clasifica por su humedad y temperatura como BWkx'(e'), templado con verano cálido.

De acuerdo con los registros de estación climatológica Juárez, que cuenta con información desde el año 1957, la temperatura media anual de la región es de 18.2° C, con valores extremos de 7.5 y 28.4° C, en los meses de enero y julio respectivamente.

El historial de precipitaciones registradas desde el año 1957 muestra ciclos con precipitaciones significativas, arriba del promedio, cada 9 o 10 años.

Sin embargo, la precipitación promedio anual es de 265.3 mm, las cuales se registran principalmente durante los meses de julio a septiembre. Para variable los registros con los que se cuentan no son tan amplios, ya que datan de 1999 a la fecha. Con ellos fue posible determinar que su valor promedio anual es del orden de los 2218 mm.

### **3.3 Hidrografía**

De acuerdo con la clasificación de Regiones Hidrológicas de la Comisión Nacional del Agua, la zona se encuentra en la Región Hidrológica RH 24 "Río Bravo", subregión hidrológica Río Conchos, dentro de la cuenca Río Bravo-Ciudad Juárez. Esta región hidrológica tiene como principal corriente precisamente el Río Bravo, del cual toma su nombre. Se trata de una corriente de régimen perenne que fluye de noroeste a sureste, limitando el área en su porción norte; así mismo, desde Ciudad Juárez, Chihuahua, hasta su desembocadura en el Golfo de México, en la ciudad de Matamoros, Tamaulipas., es frontera internacional entre México y Estados Unidos de América.

La zona no cuenta con estructura hidráulica para el almacenamiento de las corrientes superficiales, sin embargo, aguas arriba sobre río Bravo en territorio norteamericano, la Presa El Elefante cobra significativa importancia, ya que regula totalmente sus escurrimientos. Dentro del área que comprende el acuífero se cuenta con importantes obras hidráulicas para los usos público-urbano y agrícola, constituidas por una gran cantidad de pozos; extensas redes de distribución de agua potable y alcantarillado, en el área urbana de Ciudad Juárez; así como canales y acequias para el riego en las unidades del distrito de riego.

### **3.4 Geomorfología**

De acuerdo al comportamiento de las diferentes rocas ante los agentes atmosféricos y a sus formas adoptadas ante los procesos de intemperismo y erosión, se diferenciaron cuatro unidades geomorfológicas: Sierras Plegadas, Lomeríos, Planicie Ondulada y Planicie Aluvial.

**Sierras Plegadas.**- Se denominó con este nombre al conjunto de sierras constituidas por rocas sedimentarias del Cretácico que presentan formas alargadas, escarpadas, muy esbeltas y de fuertes pendientes, entre las cuales se han desarrollado largos y angostos valles intermontanos siguiendo el patrón estructural marcado por éstas y por su fallamiento.

Tanto los valles como las montañas presentan un alineamiento en sentido NW-SE. Esta unidad tiene elevaciones que alcanzan los 1,800 msnm y en la zona está representada por la Sierra de Juárez.

**Lomeríos.-** Esta morfología se asoció a conglomerados, depósitos de pie de monte (abanicos aluviales) y en menor proporción con un área de arenas eólicas que se localizan en la porción central del acuífero. Los lomeríos se localizan principalmente en los flancos orientales de la Sierra de Juárez. Las elevaciones en esta unidad oscilan entre 1,120 msnm y 1,300 msnm.

**Planicie Ondulada.-** Se asignó este nombre al relieve formado por una conjunto de dunas fijas, constituidas por arenas finas, bien clasificadas, producto de la intensa actividad eólica que ha actuado sobre las rocas preexistentes imprimiendo al relieve una forma ondulada.

**Planicie Aluvial.-** Como planicie aluvial se definió a la parte topográficamente más baja del valle, de pendiente muy suave, constituida por los depósitos aluviales y fluviales que conforman la planicie o valle del Río Bravo, integrada por gravas, arenas, limos y arcillas. Esta geoforma se localiza en una franja angosta en ambos márgenes del Río Bravo que varía entre 9 y 11.5 km de ancho, con un promedio de 9.5 km.

Con base en las características geomorfológicas presentes como son su alto grado de intemperismo y erosión; su relieve generalmente suave presentando extensas áreas planas o semiplanas con meandros abandonados o paleocanales, excepto en las sierras donde se han excavado profundos cañones; y un patrón de drenaje controlado principalmente por el fracturamiento, la pendiente, la litología y permeabilidad de los materiales en los que se desarrolla; se le puede ubicar en una etapa de madurez.

#### **4. GEOLOGÍA**

La geología regional abarca unidades litológicas principalmente de origen sedimentario y en menor proporción volcánico, cuyo rango estratigráfico abarca del Mesozoico hasta el Cenozoico, comprendidas dentro del terreno tectonoestratigráfico Chihuahua (Figura 2).

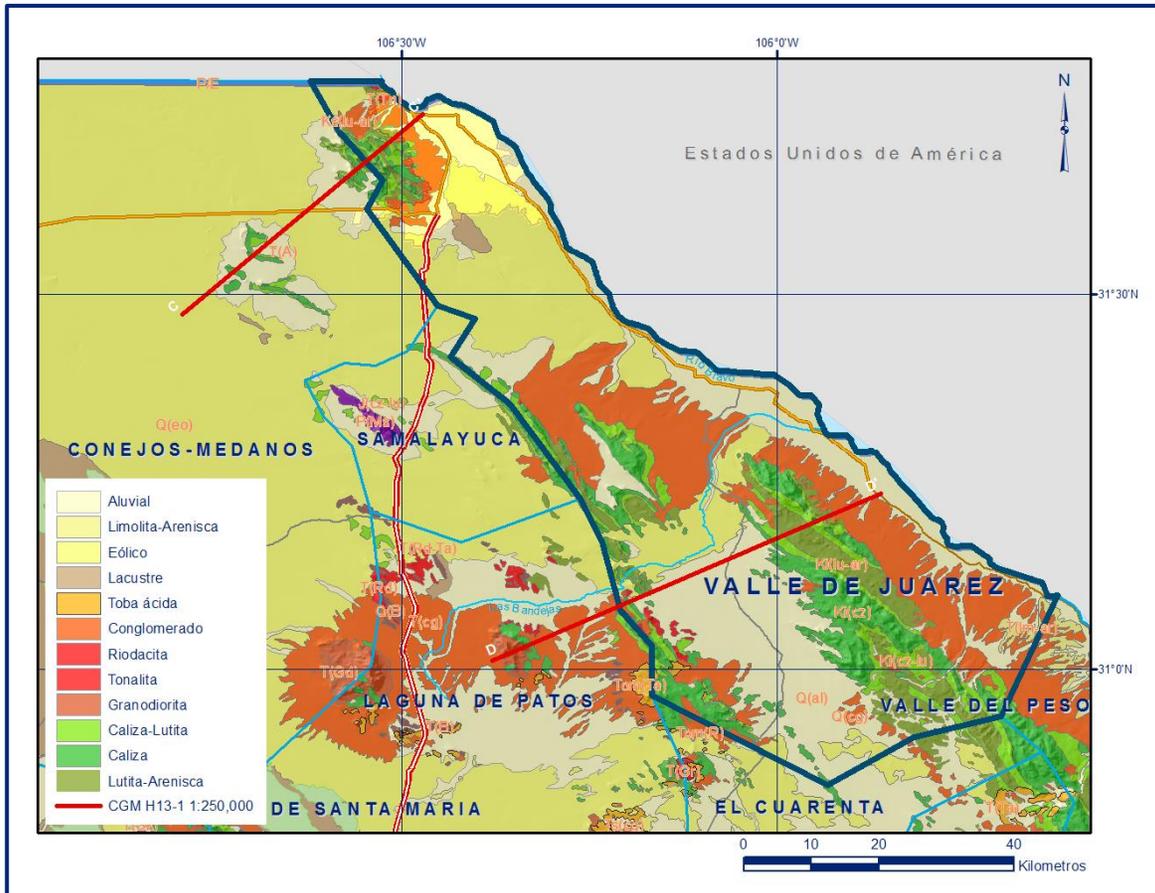


Figura 2. Geología general del acuífero

Las rocas más antiguas son de tipo sedimentario y de origen marino y corresponden a las formaciones Navarrete-Las Vigas, Cuchillo y Grupo Aurora, las cuales fueron depositadas en la Cuenca Chihuahua, durante el Cretácico Inferior y están representadas por lutitas-areniscas, calizas arcillosas y biógenas y calizas, respectivamente.

Cubren discordantemente esta secuencia derrames riodacíticos y riolíticos, así como depósitos piroclásticos de composición ácida, asociados al emplazamiento de dos cuerpos intrusivos de composición granítica y granodiorítica, pertenecientes todos al Oligoceno. El Mioceno está representado por derrames basálticos, los cuales sobreyacen discordantemente las secuencias anteriores.

Finalmente, la secuencia es cubierta de manera discordante por depósitos semiconsolidados y no consolidados pertenecientes al periodo Neógeno Superior-Cuaternario, constituidos por conglomerados polimícticos, limos y arenas, depósitos lacustres y eólicos.

## **4.1 Estratigrafía**

### **Cretácico Inferior**

#### **Formación Navarrete-Las Vigas**

Se define como una secuencia calcáreo-arcillosa con anhidritas y yesos en su base. Esta unidad se distribuye ampliamente en el área, hacia el este se localiza en las sierras San Ignacio y La Amargosa y en la porción oeste en las sierras Guadalupe, Cerro El Manochico y Sierra Presidio; sus afloramientos corresponden en gran parte con los ejes de los anticlinales. Otros afloramientos menores se ubican al sur del Rancho El Centro y al sur del Rancho El Recuerdo, ambos localizados en la porción sur del área.

Se presenta como una secuencia de areniscas y lutitas, alternando con horizontes carbonatados y anhidritas en su base. La cima de la unidad está representada por areniscas de cuarzo fino a medio, en estratos de espesor medio, con estratificación cruzada y de coloración rojiza.

Presenta intercalaciones de calizas ligeramente arenosas y lutitas con madera fósil. El espesor aproximado para esta unidad es de 600 m y su relación estratigráfica con la Formación Cuchillo es concordante.

#### **Formación Cuchillo**

Secuencia de calizas arcillosas con intercalaciones de lutitas, areniscas calcáreas, evaporitas y calizas biógenas, cuyo contenido arenoso se amplía hacia la Sierra San Ignacio, donde se emplea el término Formación Porvenir. Zwansiger (1986) dividió esta Formación en tres unidades formacionales denominadas La Virgen, Cupido y Peña; en este documento se agrupan con el nombre de Formación Cuchillo.

Aflora en las porciones oriental y occidental en los flancos de los plegamientos que afectan las sierras San Ignacio, La Amargosa, Guadalupe, Presidio y en los cerros El Manochico y Los Indios. Hacia el suroeste de la Sierra de Presidio esta unidad aflora como un paquete evaporítico, que corresponde a la unidad formacional La Virgen, constituido por una secuencia evaporítica blanca y amarillenta de aspecto sacaroide, de estructura masiva, con escasas intercalaciones de margas anhidríticas que gradúan a caliza arcillo-arenosa de color crema, con calizas que contienen impresiones fósiles de algas.

Esta unidad está cubierta por calcarenitas con fósiles de bivalvos y contenido bioclástico, así como calcarenitas de oolitas con fracturas de anhidrita. Corona esta secuencia una caliza arcillosa color gris oscuro con amonitas, miliólidos y bioclastos, intercaladas con lutitas calcáreas gris oscuro, de estructura físil y deleznable. Esta misma unidad aflora en el flanco noroeste de la Sierra San Ignacio como una secuencia de calizas arcillosas intercaladas con lutitas calcáreas y estratos arenosos; hacia el sureste de esta Sierra existe un afloramiento de yeso de 10 metros de espesor correlacionable con esta unidad. El espesor de la Formación Cuchillo oscila entre los 250 y 800 metros y su relación estratigráfica con el Grupo Aurora es concordante.

### **Grupo Aurora**

Lo constituyen las formaciones Coyame, Benigno, Walnut y Edwards. Es la unidad de mayor afloramiento en el área. La base de esta secuencia está formada por calizas, en ocasiones arcillosas, de color café con collomiellas; en su parte media se compone de calizas ligeramente arcillosas de orbitolinas, seguidas de una secuencia de calizas arcillosas gris oscuro a negro, con ocasionales horizontes arenosos color gris de grano fino. La cima de este Grupo está representada por un potente cuerpo de calizas de estratos gruesos a masivos con caprínidos y toucasias.

El máximo espesor que presenta la totalidad de las formaciones que conforman este grupo es de 980 m.

### **Paleógeno-Neógeno**

#### **Riodacita, Riolita**

Rocas volcánicas que presentan texturas variables, desde porfídicas hasta fluidales. Su distribución se restringe a la Sierra Presidio y al oeste del cerro El Venado, en las porciones este y sureste, fuera del área que comprende el acuífero. Litológicamente consiste de una roca color rosa claro con un ligero tono rojizo, con escasos cristales de biotita y feldespato; microscópicamente presenta textura microcristalina constituida por ortoclasa, cuarzo, plagioclasas y piroxenos. Su espesor promedio es de 300 m. Su presencia se asocia a procesos volcánicos derivados del fallamiento ocasionado por el proceso distensivo Basin and Range.

#### **Toba Riolítica**

Conjunto de tobas de composición predominantemente ácida, líticas, vítreas y pumicíticas, de color café claro con tonalidades naranja y rosa, en muestra fresca, y rosa claro y amarillo ocre al intemperismo. Se presenta como una unidad masiva, con escaso fracturamiento.

Afloran en los flancos de la Sierra Presidio, al sur de la misma y al oeste del Rancho El Cuarenta, fuera del área que comprende el acuífero. El espesor promedio de esta unidad es de 150 metros y sobreyace discordantemente a una unidad de andesitas oligocénicas.

### **Basalto**

Se refiere a derrames basálticos de color gris claro y oscuro, con textura afanítica o porfídica y estructura vesicular. Microscópicamente se describe como una roca holocristalina, intergranular, con matriz traquítica, compuesta por plagioclasas, olivinos y piroxenos. Aflora al suroeste de la Sierra Presidio, en dirección este del Rancho El Lucero, fuera del acuífero. Subyacen a sedimentos eólicos y aluviales cuaternarios.

### **Conglomerado**

Paquete de conglomerados resultado de la intemperización de rocas ígneas y sedimentarias que afloran en los flancos de prácticamente todas las sierras y está constituido por fragmentos angulosos y subredondeados de caliza, areniscas y lutitas, principalmente hacia la porción noroeste del área, aunque también contiene fragmentos de rocas ígneas como ignimbrita, basaltos e intrusivos hacia la porción oeste de la cuenca del Arroyo Las Bandejas, donde existe una mayor presencia de estas rocas. Los fragmentos están empacados en una matriz limo-arenosa principalmente, aunque también pueden presentarse con cementante calcáreo.

### **Cuaternario**

#### **Lacustre**

Esta unidad se localiza en la porción sur del área, dentro de las lagunas El Cuarenta y Las Flores en la cuenca del arroyo Bandejas, y El Barreal, ubicada al sur de la zona urbana de Ciudad Juárez. Se describe como un paquete de arenas finas, limos y arcillas, que no presentan compactación y cementación, con intercalaciones de carbonatos, originados a partir de los depósitos y desecados por evaporación. Su espesor varía desde algunos decímetros hasta 12 m, medidos en parte central de la laguna El Barreal.

#### **Eólico**

Sus exposiciones se localizan en la parte oeste-noroeste, hacia la parte sur del cerro El Manochico y porción norte de la Sierra San Antonio, al sur de la misma, al sur de la Sierra El Presidio.

Son sedimentos del tamaño de las arenas finas que forman dunas transportadas por la acción del viento, o bien fijas alrededor de arbustos, como el mezquite, como las que se presentan en extensas zonas al sur y suroeste de Ciudad Juárez.

### **Aluvial**

Su contenido varía entre limos, arenas, arcillas y gravas; hacia el pie de las sierras, donde la velocidad de las corrientes intermitentes es mayor y aumenta el contenido de gravas y boleos, disminuyendo el tamaño de los clastos drásticamente hacia las planicies, donde predominan los materiales finos. Las gravas se componen de calizas, areniscas, tobas riolíticas y basaltos, con diferentes grados de redondez.

### **Conglomerado**

Se localiza en la parte sur de las sierras La Amargosa y al sur de los cerros ubicados al oeste del Rancho El Cuarenta. Se trata de depósitos proluviales y coluviales con predominio en tamaño de gravas y arenas, subangulosos, pobremente cementados y compactados. Los clastos varían su composición de rocas sedimentarias como calizas y lutitas a rocas ígneas como tobas y granodioritas de una sierra a otra. Cubren discordantemente a las secuencias cretácica y terciaria.

## **4.2 Geología estructural**

Esta área estuvo sujeta a diferentes movimientos orogénicos, epirogénicos y tafrogénicos. Aparentemente el sistema Ouachita se prolongó en Chihuahua y afectó a las rocas paleozoicas ya formadas, aunque es más fácil pensar que fue en el Sistema Apalachiano en el que se plegaron y se levantaron gran parte de las rocas al final del Pérmico y principios del Triásico, ya que no existen testigos de este sistema ni del Jurásico Inferior y Medio.

Aparentemente no hay duda de la formación del Geosinclinal Paleozoico especialmente en el Pérmico-Carbonífero, que sirvió como roca base al gran Geosinclinal Mexicano que inició su formación en el Jurásico Superior y continuó hasta el Cretácico Superior (COREMI).

En el Paleógeno toda la columna sedimentaria fue plegada y afallada por la Orogenia Laramide, la cual actuó en un sistema de fuerzas unilaterales, uniformes y paralelas con una dirección SW-NE, originando una alternancia de estructuras anticlinales y sinclinales paralelos, intensamente plegados, asimétricos con su plano axial recostado hacia el NE y sus ejes orientados NW-SE. Al finalizar el plegamiento se inició una serie de fallas transcurrentes de escaso desplazamiento horizontal SW-NE.

Las principales deformaciones que se presentan en el área son asociadas a fases de comprensión y distensión, generando pliegues y fallamientos normales; estas estructuras se asocian a la orogenia Laramide (finales del Cretácico) y al periodo extensional Basin and Range (Mioceno).

Posteriormente a la Orogenia Laramide, en el Neógeno, se desarrolló un sistema de basculamiento en bloques de basamento, que fue acompañado por un levantamiento regional afectando a toda la columna sedimentaria con un sistema de fallas normales, algunas veces acompañado de actividad ígnea. El basculamiento en bloques o movimiento tafrogénico está representado en la superficie por sierras y cuencas (bolsones).

### **4.3 Geología del subsuelo**

La vasta información de los cortes litológicos de los pozos y de registros eléctricos realizados en la región, permiten definir que el acuífero regional está constituido, en su parte superior, por materiales clásticos conformados por abanicos aluviales, sedimentos eólicos y aluviales depositados en el bolsón.

Subyaciendo a esta unidad, se presenta un medio fracturado constituido por rocas sedimentarias kársticas e ígneas extrusivas que en superficie funcionan como rocas transmisoras, permitiendo la infiltración a través de fallas y fracturas hacia las unidades topográficamente más bajas (figura 3). Ambas unidades están separadas en la llanura aluvial por una capa arcillosa de espesor variable que ocasiona el artesianismo.

El medio granular gana espesor de manera abrupta debido a la falla normal localizada en el flanco este de la Sierra de Juárez.

De acuerdo con un pozo perforado en la porción estadounidense del bolsón, el espesor máximo de estos depósitos es de 2 743 m (Meyer, 1976).

La mayor parte de los pozos de uso agrícola se emplazan solo en los depósitos del aluvión y raramente rebasan los 100 m de profundidad, mientras que los pozos que abastecen de agua potable a Ciudad Juárez extraen agua principalmente de los depósitos de Bolsón y tienen profundidades promedio de 250 m. Los sedimentos del Aluvión Río Grande tienen espesores que varían de 40 a 100 m y se compone de materiales con granulometría que varía de gravas a arcillas y arenas; dispuestos en estratos irregulares de espesores variables, cuya litología cambia gradualmente tanto lateral como verticalmente, existiendo una predominancia de las gravas y arenas.

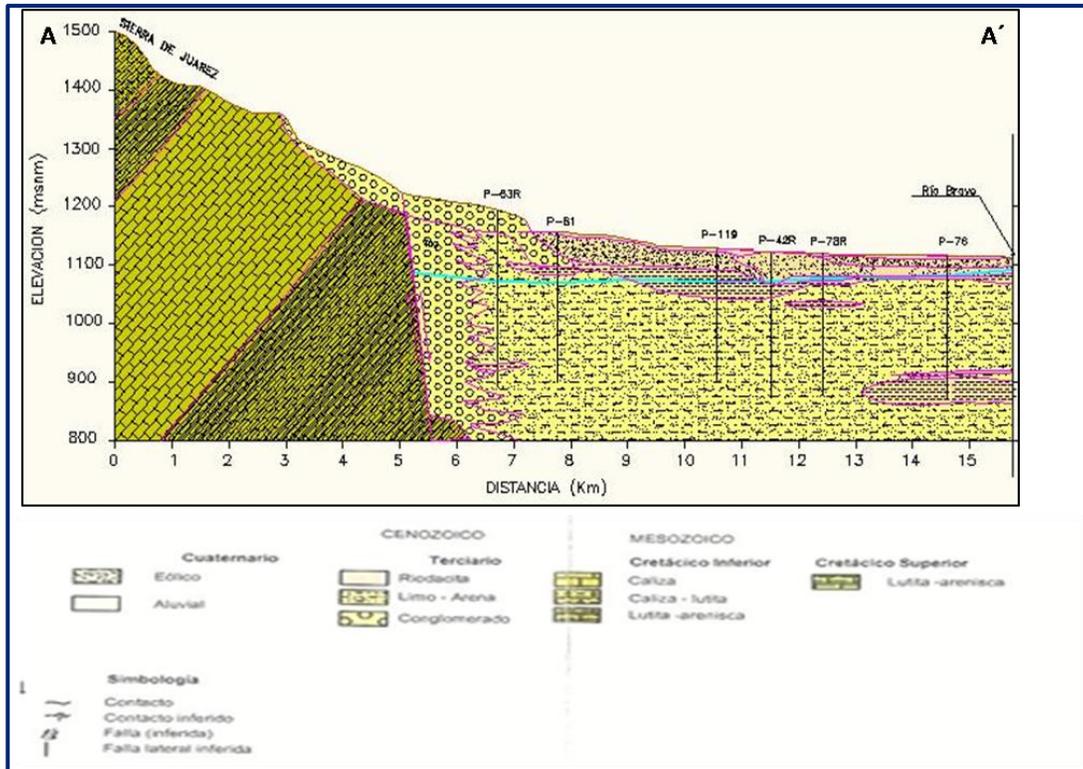


Figura 3. Sección geológica esquemática transversal

Los Depósitos de Bolsón, de acuerdo con la información proporcionada por pozos ubicados a lo largo del valle, varían lateralmente en su granulometría, predominando las arenas, limos y arcillas.

Existe una tendencia a aumentar el contenido de arcilla desde el valle agrícola hacia la zona de las sierras de Presidio, Guadalupe y San Ignacio, lo cual se refleja en la disminución de gastos de extracción de los pozos perforados en esas zonas, aunque la calidad del agua, por el contrario, tiende a mejorar sustancialmente.

Regionalmente el acuífero está alojado en los sedimentos que se fueron depositando en la depresión formada por un sistema de fallas normales, donde los bloques caídos propiciaron la conformación de una depresión (graben) y los bloques levantados (horsts) son las actuales sierras que limitan la cuenca del río Bravo.

La geometría del acuífero está determinada por el sistema de fallamiento, el espesor de los depósitos es mayor al centro de la depresión y menores hacia las estribaciones de las sierras que la delimitan, teniendo como eje el río Bravo. En la porción estadounidense del Bolsón del Huevo, las perforaciones exploratorias han determinado que el espesor máximo de los sedimentos es del orden de los 2700 m.

Sin embargo, en la porción mexicana solo se han perforado pozos hasta 500 m de profundidad, sin tocar el basamento rocoso. Las rocas fracturadas de las sierras que bordean al acuífero son en general transmisoras del agua de recarga que fluye hacia los sedimentos de los depósitos que rellenaron el bolsón.

## **5. HIDROGEOLOGÍA**

### **5.1 Tipo de acuífero**

El acuífero es de tipo **libre** y está constituido, en su parte superior, por materiales clásticos conformados por abanicos aluviales, sedimentos eólicos y aluviales, depositados tanto en la planicie aluvial del río Bravo como en el bolsón.

Subyaciendo a esta unidad, se presenta un medio fracturado constituido por rocas sedimentarias kársticas e ígneas extrusivas que en superficie funcionan como rocas transmisoras, permitiendo la infiltración a través de fallas y fracturas, hacia las unidades topográficamente más bajas.

Hacia la porción sur del acuífero, en la tercera unidad del Distrito de Riego, donde el espesor de los depósitos es mayor, ambas unidades están separadas en la llanura aluvial por una capa arcillosa de espesor variable que provoca condiciones locales de confinamiento y la presencia de artesianismo.

El medio granular está conformado por los sedimentos aluviales del río Bravo, los depósitos de bolsón que subyacen a los aluviales, así como los conglomerados y sedimentos eólicos.

Los depósitos de bolsón, por su posición respecto a las demás unidades hidroestratigráficas, funcionan como unidad receptora y almacenadora de agua, y forma el acuífero más importante de la zona, ya que de él se abastecen los centros urbanos de Ciudad Juárez, Chihuahua y El Paso Texas. Esta unidad forma al denominado acuífero del Bolsón del Hueco que es compartido entre México y Estados Unidos de América.

El medio fracturado está integrado por la secuencia de rocas sedimentarias marinas del Cretácico Inferior, representadas por las formaciones Cuchillo, Benigno y Lágrima, así como las rocas volcánicas de menor importancia debido a que en superficie sus afloramientos son de escasa magnitud. Sin embargo, se debe considerar su presencia en la conexión entre el Bolsón del Hueco y La Mesilla en el área del puerto Anapra, entre la sierra de Juárez y las montañas Franklin.

## **5.2 Parámetros hidráulicos**

Para la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero se recopiló la información de 40 pruebas de bombeo

Adicionalmente, como parte del estudio de actualización realizado en el año 2008, se ejecutaron 10 pruebas, cuya duración varió de 17 a 29 hr, interpretar tanto métodos convencionales (Theis, Cooper y Jacob) como por el método alternativo (modelo numérico de Rathod and Rushton).

De acuerdo con los resultados de la interpretación y los valores obtenidos de las pruebas recopiladas, se puede establecer que los valores de transmisividad varían de 72 a 1448 m<sup>2</sup>/d. La variación de la transmisividad sigue un patrón de comportamiento bien definido: los valores más altos se registran en la porción noroeste de la zona, disminuyendo gradualmente hacia el sureste, en cuyo extremo se encuentran los valores más bajos.

Con respecto a la conductividad hidráulica los valores oscilan entre 0.1 y 28.5 m/día. En la zona urbana su valor promedio es de 7.4 m/día; en el resto del valle los valores fluctúan entre 0.12 y 9.64 m/día con un valor promedio de 3.2 m/día. En el valle de Bandejas se presenta un valor medio de 9 m/día.

Por lo que respecta al coeficiente de almacenamiento S, para la zona urbana su valor promedio es 0.00044 y para el resto del valle 0.00063. El valor del rendimiento específico varía de 0.12 a 0.26, con promedio de 0.15.

## **5.3 Piezometría**

Existe información piezométrica recaba de estudios previos desde.

Para el registro de las variaciones en el nivel del agua subterránea se definió una red de monitoreo piezométrico conformada por 100 pozos, que cubren la mayor parte del Valle de Juárez. La mitad de ellos contaban ya con una nivelación de brocal, mientras que para el resto de los pozos fue necesario llevar a cabo su nivelación.

## **5.4 Comportamiento hidráulico**

Aunque existe información piezométrica para la elaboración de las configuraciones del nivel estático para diferentes años, en el presente documento únicamente se describe el comportamiento mostrado en el 2008.

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

De acuerdo con la configuración de la profundidad al nivel estático para el año 2008, mostrada en la figura 4, los valores registrados varían desde algunos metros hasta 145 m. Los valores someros se registran en la porción suroriental del acuífero, en las inmediaciones del río Bravo, por efecto de la topografía; en tanto que los más profundos se presentan en la zona de terrazas y al oeste del área urbana de Ciudad Juárez.

En la zona urbana de Ciudad Juárez, se registran profundidades del nivel del agua que oscilan entre 40 y 100 m. En el resto del valle las profundidades al nivel del agua en los pozos varían de 20 a 60 m. En el valle del arroyo Bandejas las profundidades varían entre 40 y 100 m.

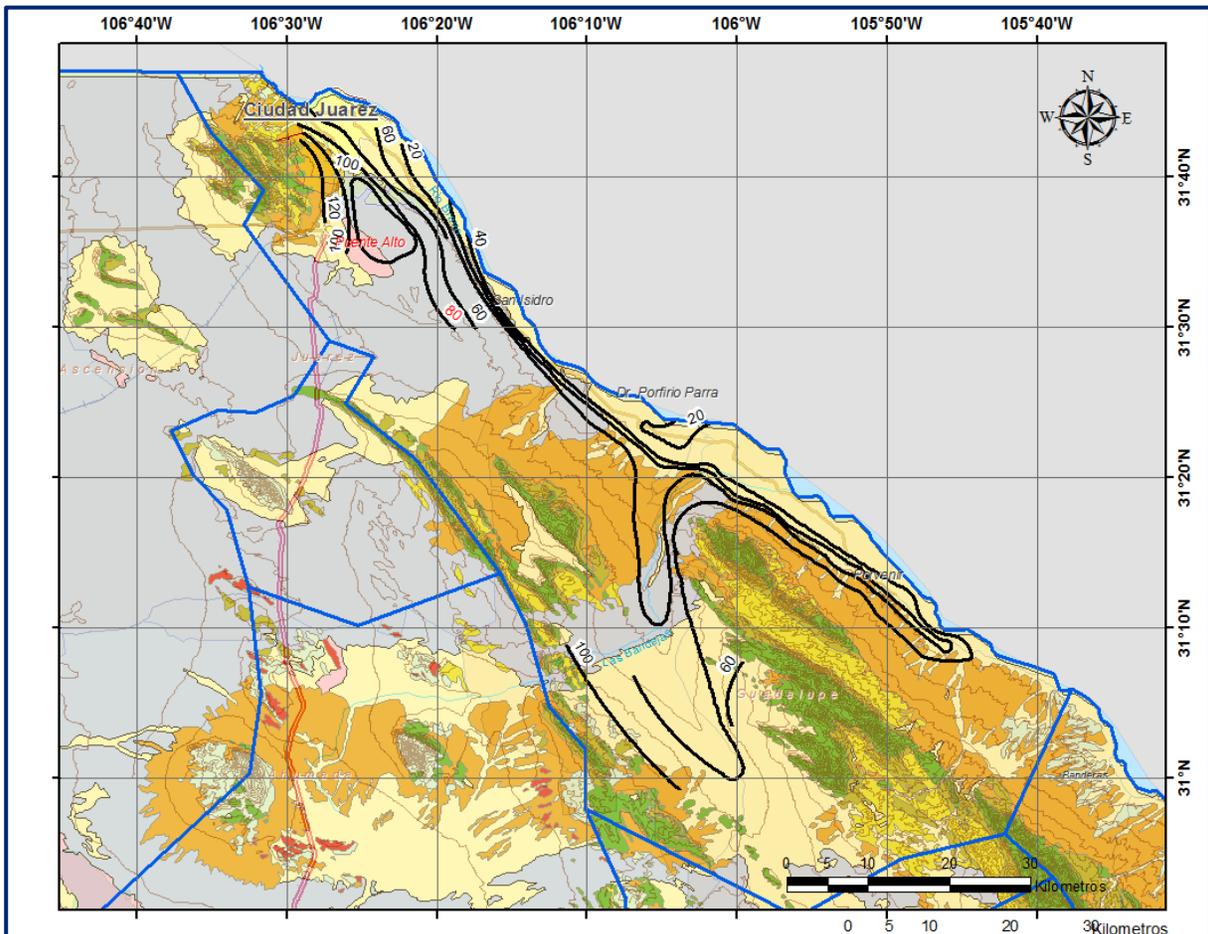


Figura 4. Profundidad al nivel estático en m (2008)

### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Con respecto a la elevación del nivel estático, al igual que la profundidad, muestra claramente el reflejo de la topografía para la mayor parte del acuífero, con excepción en la zona urbana de Ciudad Juárez. Los valores de elevación varían de 1,070 a 1,150 msnm (figura 5). Para el valle del arroyo Bandejas los valores de elevación varían de 1,200 a 1,340 msnm, por efecto de la topografía.

En la porción norte del acuífero, donde se localiza la zona urbana de Ciudad Juárez, la intensiva extracción que se realiza desde hace varias décadas ha provocado el descenso progresivo de los niveles del agua subterránea debido a la concentración de pozos municipales. Esto ha ocasionado un extenso cono de abatimiento que no sólo ha interceptado el flujo subterráneo que en condiciones naturales se dirigía hacia el río Bravo, sino que ahora induce desde él (figura 5).

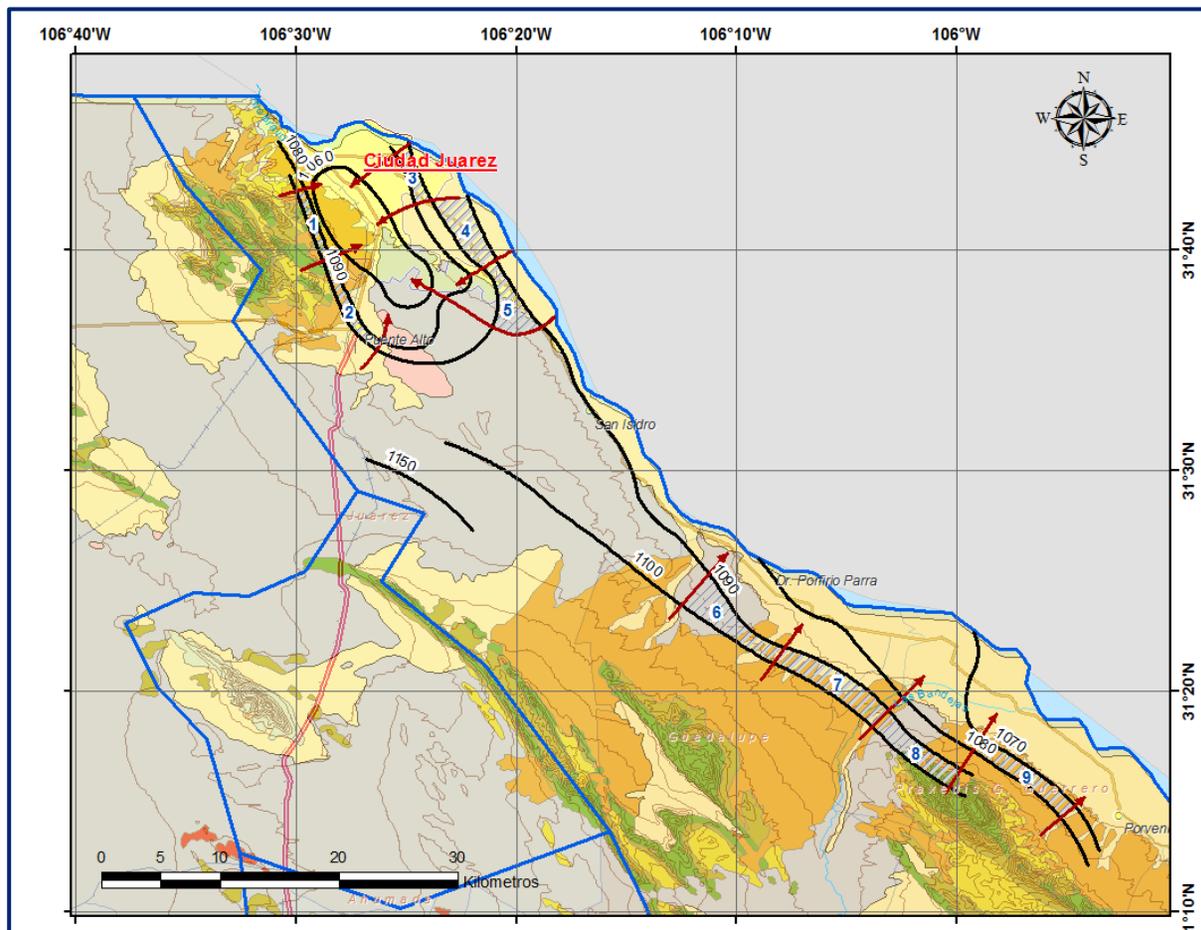


Figura 5. Elevación del nivel estático en msnm (2008)

### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Para la configuración de la evolución del nivel estático se tomó en cuenta el periodo comprendido entre 1990 y 2008, dado que para estos años se tiene el mayor registro piezométrico. De la figura 6 se puede observar que los descensos registrados en este periodo varía de 5 a 45 m, lo que representa un ritmo anual de abatimiento de 0.3 a 2.5 m, en la zona urbana y en la primera unidad del distrito de riego, por efecto de la concentración del bombeo para uso público-urbano y la reducción de la extracción con fines agrícolas en el área invadida por la mancha urbana.

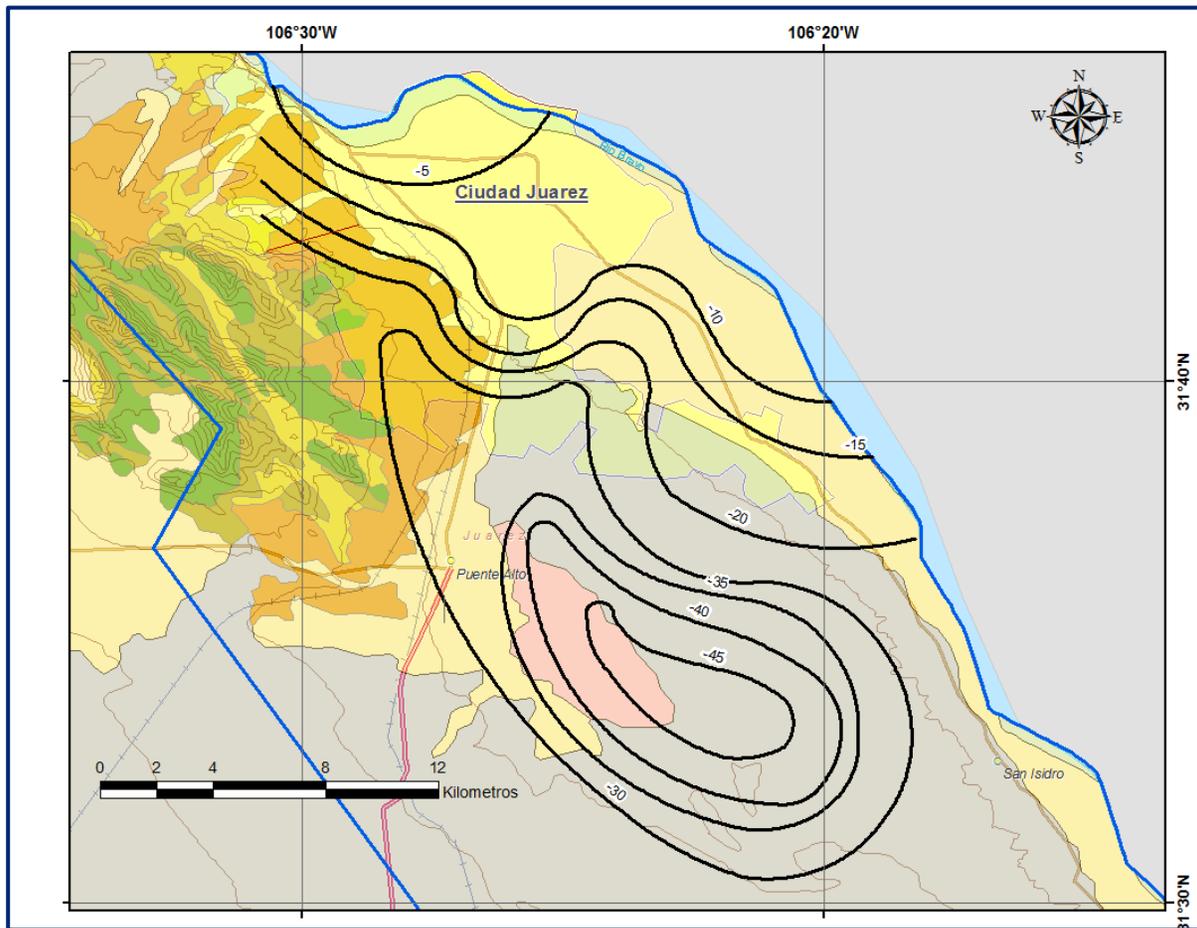


Figura 6. Evolución del nivel estático en m (1990-2008)

La extracción de agua subterránea sigue siendo de magnitud mayor que el volumen renovable del acuífero. El abatimiento también ha sido provocado por la concentración de pozos en la zona urbana de la ciudad de El Paso, Texas (EUA), cuyos efectos se han propagado a territorio mexicano. Por el contrario, en la segunda y tercera unidad del distrito de riego, los niveles freáticos se han mantenido estables y en algunas áreas han manifestado ligero ascenso, debido a los excedentes de riego agrícola.

## **5.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea**

Considerando la capacidad de disolución del agua subterránea, que en su circulación a través de un medio poroso constituido por materiales con cierto grado de solubilidad incrementa su contenido de minerales disueltos, es posible asociar las trayectorias de flujo con el incremento de salinidad del agua, correspondiendo las zonas de menor concentración iónica a las de recarga y las mayores a las de descarga.

La salinidad del agua subterránea varía dentro de un rango muy amplio: el acuífero aluvial contiene agua dulce a salobre y está contaminado en su parte superior por el retorno de excedentes de riego y de aguas residuales; los depósitos de bolsón que lo subyacen contienen agua de alta salinidad de origen natural

En forma general, se puede observar que las concentraciones de sólidos totales disueltos (STD) varían de 400 a 800 ppm para la mayor parte del acuífero. En el resto del acuífero las concentraciones varían de 1,200 a valores mayores de 3,000 ppm, por efecto de la salinidad natural de los depósitos de bolsón y del incremento originado por los excedentes del riego agrícola en la mayor parte de la segunda y tercera unidad del distrito de riego.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA**

De acuerdo con los resultados del último censo realizado en el 2008, se registró la existencia de un total de 640 aprovechamientos del agua subterránea, todos ellos pozos.

De ellos, 330 se encuentran actualmente activos y los 310 restantes se consideran inactivos por diferentes causas (clausurados, abandonados o fuera de operación).

De los pozos activos, de acuerdo con su uso, 198 (60%) se destinan al abastecimiento de agua potable de Ciudad Juárez, 114 (34.5%) para uso agrícola y los 18 restantes (5.5%) para uso doméstico-abrevadero

El volumen de extracción estimado asciende a **171.8 hm<sup>3</sup> anuales**, de los cuales 162 hm<sup>3</sup> (94.2%) se destinan al abastecimiento de agua potable de Ciudad Juárez, 3.7 hm<sup>3</sup> (2.2 %) para uso agrícola, 4.9 más (2.9%) para uso industrial y los 1.2 hm<sup>3</sup> restantes (0.7%) para satisfacer las necesidades del uso doméstico-abrevadero.

## **7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El balance de agua subterránea se planteó para el periodo únicamente para el año 2008, aunque para estimar el cambio de almacenamiento se consideró en periodo 1990-2008, en una superficie de **1,283** km<sup>2</sup>, que corresponde a la zona donde se cuenta con información piezométrica y en la que se localiza la gran mayoría de los aprovechamientos subterráneos.

La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga) y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero en el periodo de tiempo establecido.

La ecuación general de balance, de acuerdo a la ley de la conservación de masa se expresa como:

$$\text{Entradas (E)} - \text{Salidas (S)} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

Aplicando esta ecuación al estudio del acuífero, las entradas quedan representadas por la recarga total, las salidas por la descarga total y el cambio de masa por el cambio de almacenamiento de un acuífero:

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento}$$

### **7.1 Entradas**

Las entradas están integradas por la recarga natural (Rv) que se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita directamente sobre el valle y a lo largo de los escurrimientos, y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo (Eh).

De manera inducida, la infiltración de los excedentes del riego agrícola (Rr) proveniente de aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas residuales constituye otra fuente de recarga al acuífero.

Este volumen más el de las entradas por pérdidas en sistemas de agua potable y alcantarillado (Rap) que también se incorporan al sistema acuífero, integran el componente de recarga inducida (Ri).

### 7.1.1 Recarga natural (Rn)

En las regiones áridas y semiáridas los dos principales mecanismos de recarga natural se producen a través de la infiltración a lo largo de los cauces de los escurrimientos superficiales y la recarga de frente de montaña. En la provincia fisiográfica de Sierras y Cuencas, la recarga de frente de montaña tiene dos componentes: el flujo subterráneo que proviene de las sierras que delimitan el valle, a través de fracturas y/o conductos de disolución, que se dirige hacia los sedimentos que rellenan la cuenca; y la infiltración en los cinturones de piedemonte.

A su vez, en estos últimos la recarga se efectúa por medio de la infiltración que se produce a lo largo de los arroyos que drenan las sierras y también de manera difusa.

Aunque el valor de precipitación de 265.3 mm anuales invalida la aplicación de métodos empíricos (Turc, Coutagne) para estimar la evapotranspiración real, que permita a su vez el cálculo de la infiltración a través de un balance hidrometeorológico, en este tipo de condiciones climáticas la recarga difusa por infiltración y percolación de las escasas lluvias en la superficie del valle tiende a ser nula. En la zona la recarga del acuífero que se efectúa en los piedemonte ocurre principalmente a lo largo del cauce de los efímeros escurrimientos de los arroyos que drenan las sierras.

Es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Debido a que se tiene información para calcular el cambio de almacenamiento ( $\Delta V$ ), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$Rn + Eh + Rr + Rap - Sh - B = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

**Rv:** Recarga Vertical

**Eh:** Entradas por flujo horizontal

**Rr:** Retorno por riego

**Rap:** Recarga por pérdidas en sistemas de agua potable y alcantarillado

**Sh:** Salidas por flujo horizontal

**B:** Bombeo

**$\Delta V(S)$ :** Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = Sh + B \pm \Delta V(S) - Eh - Rr - Rap \quad (2)$$

### 7.1.2 Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, para posteriormente recargar al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación.

La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para el año 2008 (figura 5). De acuerdo con la ecuación de Darcy para medios porosos, tenemos que:

$$Q = V \cdot A$$

Considerando una sección, con una longitud (B) y ancho (a), con una diferencia de alturas de ( $\Delta h$ ). El área de la sección quedará definida por:

$$A = B \cdot a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K \cdot i$$

Donde:

**K**= Coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.

**i** = Gradiente hidráulico ( $\Delta h / \Delta L$ )  $\Delta h$  y  $\Delta L$  son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

Sustituyendo en la ecuación de continuidad tenemos que:

$$Q = B \cdot a \cdot K \cdot i$$

Ya que la transmisividad  $T = K \cdot a$ , la ecuación queda reducida a:

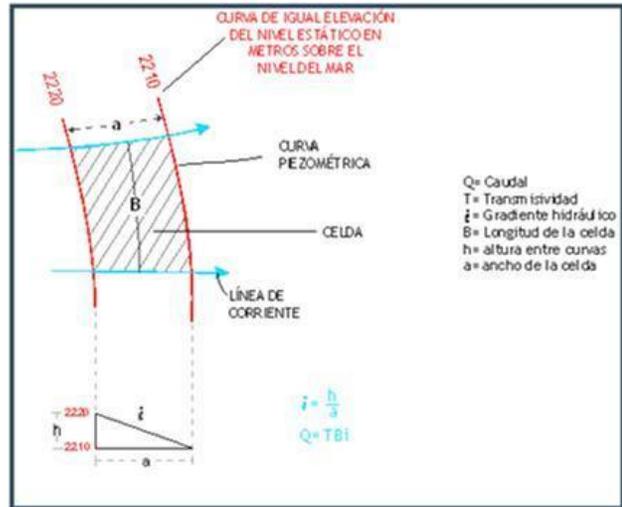
$$Q = T \cdot B \cdot i$$

Donde:

**T** = Transmisividad en m<sup>2</sup> /s.

**B**= Longitud de la celda en m.

**i** = Gradiente Hidráulico, en m.



De la configuración de elevación se seleccionaron canales o celdas de flujo y se aplicó la ley de Darcy para calcular el caudal “Q” que recarga al acuífero. La recarga total por flujo horizontal es la suma de los caudales de cada uno de los canales establecidos. En la tabla 2 se puede observar que para las celdas identificadas se presenta un flujo de entrada de **36.5 hm<sup>3</sup>/año**.

Tabla 2. Cálculo de entradas subterráneas

CANAL	LONGITUD B (m)	ANCHO a (m)	$h_2-h_1$	Gradiente i	T	CAUDAL Q	VOLUMEN
			(m)		(m <sup>2</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(hm <sup>3</sup> /año)
E1	6500	1000	10	0.0100	0.0005	0.0325	1.0
E2	8800	8550	10	0.0012	0.0005	0.0051	0.2
E3	5600	2500	10	0.0040	0.0080	0.1792	5.7
E4	6000	2000	10	0.0050	0.0140	0.4200	13.3
E5	6600	2300	10	0.0043	0.0140	0.4017	12.7
E6	9200	2100	10	0.0048	0.0005	0.0219	0.7
E7	9400	1550	10	0.0065	0.0005	0.0303	1.0
E8	7700	1100	10	0.0091	0.0005	0.0350	1.1
E9	7500	1300	10	0.0077	0.0005	0.0288	0.9
<b>Total entradas</b>						<b>36.5</b>	

Los valores de T fueron obtenidos de la interpretación de las pruebas de bombeo realizadas en estudios previos, incluido el realizado en el 2008.

### 7.1.3 Retorno por riego (Rr)

Existe un volumen de agua adicional al necesario para el desarrollo de los cultivos que es aplicado en la zona agrícola. Parte de este volumen escurre por el sistema de drenaje y otra se infiltra y llega a formar parte del acuífero.

De acuerdo con Jacob Bear (1979), la percolación profunda por excedente de riego se considera del 20 al 40% del agua aplicada.

En Valle de Juárez existe una zona agrícola cuya superficie aproximada es de 12,508 ha, determinadas mediante el procesamiento de imagen de satélite, que difiere del área de 11,049 ha reportadas por el DR 009 para el ciclo agrícola 2007-2008, que se localiza en la frontera oriental del acuífero que a su vez es frontera con Estados Unidos. Los cultivos principales son algodón (29%), trigo (29%), alfalfa (20%), sorgo (12%) y otros (10%). El uso consuntivo promedio ( $\overline{UC}$ ) se calculó como:

$$\overline{UC} = \frac{\sum_1^3 A_i UC_i}{\sum_1^3 A_i}$$

donde  $A_i$  y  $UC_i$  son el área y el uso consuntivo del cultivo  $i$ . La estimación del uso consuntivo por cultivo se realizó mediante la fórmula de Blaney-Criddle modificada por Phelan (Aguilera y Martínez, 1996). Si  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  para el algodón, trigo, alfalfa, sorgo, frutales y otros, respectivamente, se tiene:

$$\begin{aligned} UC &= \frac{(3627ha \times 888.83 mm) + (3627ha \times 423.72) + (2502ha \times 1401.83mm) + (1501ha \times 557.01mm) + (2054ha \times 1533.82mm) + (1001ha \times 481.6mm)}{12508ha} \\ &= \mathbf{797 \text{ mm}} \end{aligned}$$

Por el método de balance hídrico, la recarga por retorno de riego ( $R_r$ ), se calcula como:

$$R_r = P + L_r - \overline{UC}$$

en donde  $L_r$  es la lámina de riego aplicada, la cual se obtiene como el cociente del uso agrícola (131  $hm^3/año$ , que incluye agua subterránea, agua superficial del río Bravo y agua residual CONAGUA, DR 009,) y la superficie regada (12,508 ha), arrojando un valor de 1047 mm. De esta manera:

$$R_r = \mathbf{265.3 + 1047 - 797 = 515.3 \text{ mm}}$$

Esta lámina representa un volumen de **64.4  $hm^3/año$** , que equivale al 49% del volumen aplicado para uso agrícola.

Esto debido a las prácticas agrícolas de riego por inundación y porque en la zona agrícola se localizan las profundidades al nivel estático más someras.

#### **7.1.4 Entradas por pérdidas en sistemas de agua potable y alcantarillado (Rap)**

De acuerdo con los aforos de la Dirección Técnica de la JMAS, de los 159.6 hm<sup>3</sup> ingresados a la red solo se generan alrededor de 111.7 hm<sup>3</sup> de agua residual (70 %), debido al incremento en el número de plantas de tratamiento y sobre todo por las fugas en la red de agua potable que según estudio denominado "Estudio de fugas en la red de agua potable en Ciudad Juárez, JMAS" son del orden de 17%.

Si consideramos que en un 80% del volumen de fugas se logra infiltrar al acuífero, entonces la recarga por infiltración de fugas en red de agua potable y alcantarillado es de **21.7 hm<sup>3</sup>**.

### **7.2 Salida**

La descarga del acuífero ocurre principalmente por bombeo (B).

#### **7.2.1 Bombeo (B)**

Este componente corresponde a la extracción total por bombeo de agua subterránea que se realiza para los diferentes usos en el área de balance. Como se mencionó en el apartado de censo e hidrometría, su valor es de **171.8 hm<sup>3</sup>/año**.

#### **7.2.2 Salidas por flujo subterráneo horizontal (Sh)**

Aunque la tendencia general del flujo subterráneo en la porción sur del acuífero es hacia el cauce del río Bravo, la falta de apoyo piezométrico impidió la estimación de este componente.

Por lo tanto, se considera que **Sh = 0**.

### **7.3 Cambio de almacenamiento ( $\Delta VS$ )**

Para la estimación del cambio de almacenamiento se tomó en cuenta la configuración de la evolución del nivel estático 1990-2008 mostrada en la figura 6. Con base en ella y tomando en cuenta un valor promedio de rendimiento específico  $S_y$  de 0.15 se determinó la variación del almacenamiento mediante la siguiente expresión:

$$\Delta VS = S * A * h$$

Donde:

**$\Delta VS$ :** Cambio de almacenamiento en el período analizado

**S:** Coeficiente de almacenamiento promedio de la zona de balance

**A:** Área entre curvas de igual evolución del nivel estático (km<sup>2</sup>)

**h:** Valor medio de la variación piezométrica en el período (m)

Como consecuencia de la explotación intensiva del recurso para abastecimiento de agua potable, la posición del nivel piezométrico ha descendido, propiciando una variación negativa del almacenamiento. El promedio anual de abatimiento en el periodo analizado es de 0.25 m; si consideramos el área de balance es de 1,225 km<sup>2</sup> y el valor del rendimiento específico de 0.15, el cambio de almacenamiento resultante es:

$$\otimes VS = 0.15 (1,225 \text{ km}^2) (- 0.25 \text{ m}) = - 45.9$$

$$\otimes VS = - 45.9 \text{ hm}^3 / \text{año}$$

### **Solución a la ecuación de balance**

Una vez calculadas las componentes de la ecuación de balance, procedemos a evaluar la recarga vertical por lluvia e infiltraciones, mediante la expresión (2), que fue establecida con anterioridad:

$$\mathbf{Rn = Sh + B \pm \Delta V(S) - Eh - Rr - Rap} \quad \mathbf{(2)}$$

Sustituyendo cada una de las componentes de la ecuación de balance evaluadas:

$$Rn = 0.0 + 171.8 - 45.9 - 36.5 - 64.4 - 21.7$$

$$\mathbf{Rn = 3.3 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

De esta manera, la recarga total media anual (R) está definida por la suma de las componentes de recarga.

$$\mathbf{R = Rn + Eh + Rr + Rap}$$

$$R = 3.3 + 36.5 + 64.4 + 21.7$$

$$\mathbf{R = 125.9 \text{ hm}^3 \text{ anuales}}$$

## 8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas, se aplica el procedimiento establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que establece la Metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas, menciona que la disponibilidad se determina por medio de la expresión siguiente:

$$DAS = R - DNCOM - VCAS \quad (3)$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea

Rt = Recarga total media anual

DNCOM = Descarga natural comprometida.

VCAS = Volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA

### 8.1 Recarga total media anual (R)

La recarga total media anual que recibe el acuífero (R), corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso su valor es **125.9 hm<sup>3</sup>/año**, de los cuales 39.8 corresponden a la recarga natural por lluvia y los 86.1 hm<sup>3</sup> a la recarga inducida.

### 8.2 Descarga natural comprometida (DNC)

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes, sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso se considera que no existen descargas naturales comprometidas, por lo que **DNC = 0.0**

### 8.3 Volumen de extracción de agua subterránea (VEAS)

La extracción de aguas subterráneas se determina sumando los volúmenes anuales de agua asignados o concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), los volúmenes de agua que se encuentren en proceso de registro y titulación y, en su caso, los volúmenes de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica, todos ellos referidos a una fecha de corte específica.

En el caso de los acuíferos en zonas de libre alumbramiento, la extracción de aguas subterráneas será equivalente a la suma de los volúmenes de agua estimados con base en los estudios técnicos, que sean efectivamente extraídos, aunque no hayan sido titulados ni registrados, y en su caso, los volúmenes de agua concesionados de la parte vedada del mismo acuífero.

Para este acuífero el volumen de extracción de aguas subterráneas es de **199,233,071 m<sup>3</sup> anuales**, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua, a la fecha de corte del **30 de diciembre de 2022**.

#### **8.4 Disponibilidad de aguas subterráneas (DMA)**

La disponibilidad de aguas subterráneas constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas. Conforme a la metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPGA.

Por lo tanto la disponibilidad de aguas subterráneas, de acuerdo a la expresión (3), es:

$$\begin{aligned} \mathbf{DAS} &= \mathbf{R - DNCOM - VCAS} \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{125.9 - 0.0 - 199.233071} \\ \mathbf{DAS} &= \mathbf{-73.333071 \text{ hm}^3/\text{año}.} \end{aligned}$$

El resultado indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de **73,333,071 m<sup>3</sup> anuales**.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

Comisión Nacional del Agua, 2008. Actualización Geohidrológica del Acuífero Valle de Juárez, Chihuahua. Realizado por la Universidad de Chihuahua, en convenio con la CONAGUA.