



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA.

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**“METODOLOGÍA PARA DESARROLLAR BALANCES DE
AGUAS SUBTERRÁNEAS: CASO ESTUDIO ACUÍFERO
ALLENDE-PIEDRAS NEGRAS COAHUILA”**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA URBANA

P R E S E N T A:

ING. IVÁN AGUILAR GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESINA: DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ ESPRIÚ

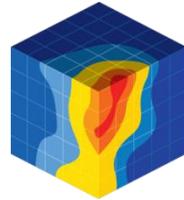
MÉXICO D.F.

AGOSTO 2013

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA.....	5
1.2. OBJETIVO.....	6
1.3. LOCALIZACIÓN, EXTENSIÓN Y LÍMITES DEL AREA DE BALANCE (AB).....	6
1.4. CLIMA.....	8
1.5. HIDROGRAFÍA.....	9
1.5.1. Precipitación.....	11
1.6. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA.....	16
1.6.1. Geomorfología.....	17
1.6.2. Estratigrafía.....	17
1.6.3. Geología Estructural.....	23
1.6.4. Hidrogeología del acuífero Allende-Piedras Negras Coahuila.....	24
2. MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE.....	26
3. MÉTODOS Y MATERIALES.....	28
3.1. ÁREA DE BALANCE.....	28
3.2. BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA (2002-2006).....	30
3.2.1. CÁLCULO DE ENTRADAS (EH) Y SALIDAS (SH) POR FLUJO SUBTERRÁNEO.....	32
3.2.2. RECARGA VERTICAL (Rv o IP).....	33
3.2.3. RETORNOS POR RIEGO (Rr).....	33
3.2.4. RECARGA ARTIFICIAL (Ra).....	34
3.2.5. EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (B).....	35
3.2.6. DESCARGA A MANANTIALES. (Dm).....	35
3.2.7. ANÁLISIS PARA DETERMINAR LA DIFERENCIA DE NIVELES DEL ACUÍFERO LIBRE 2002-2006 (ΔH).....	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
4.1. DIRECCIÓN DE FUJO SUBTERRÁNEO Y PIEZOMETRIAS.....	38
4.2. CÁLCULO DE ENTRADAS (EH) POR FLUJO SUBTERRÁNEO.....	39
4.3. RECARGA VERTICAL (Rv o IP).....	43
4.4. RETORNOS POR RIEGO (Rr).....	44

4.5.	RECARGA ARTIFICIAL (R_a).....	44
4.6.	CÁLCULO DE SALIDAS (SH) POR FLUJO SUBTERRÁNEO.....	45
4.7.	EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (B).	46
4.8.	DESCARGA A MANANTIALES (D_m).-flujo local-.....	47
4.9.	VARIACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO (ΔH).....	48
4.10.	ESCENARIOS DE GESTIÓN.....	52
4.10.1.	SIN RECARGA ARTIFICIAL (R_A).....	52
4.10.2.	CON RECARGA ARTIFICIAL (R_A) Y AUMENTANDO EL BOMBEO (B).....	52
5.	CONCLUSIONES.....	54
6.	REFERENCIAS CITADAS.....	55



The
HYDRO
geology
Group
FACULTY OF ENGINEERING
U N A M



CONTRIBUCIÓN DEL GRUPO DE HIDROGEOLOGÍA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

Este documento representa la **treceava** tesis del Grupo de Hidrogeología de la Facultad de Ingeniería (UNAM) como parte de su contribución científica y de formación de recursos humanos especializados en la evaluación de acuíferos.

1. INTRODUCCIÓN.

Una de las estimaciones más aceptadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es que poco más del 97% del volumen de agua existente en nuestro planeta es agua salada y está contenida en océanos y mares; mientras que apenas algo menos del 3% es agua dulce o de baja salinidad.

Del volumen total de agua dulce, estimado en unos 38 millones de kilómetros cúbicos, poco más del 75% está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos y cursos de agua superficial (lagos y ríos) (CONAGUA WebMaster, 2011).

El subsuelo mexicano aloja gran número de acuíferos fuentes de agua que funcionan a la vez como vasos de almacenamiento, redes de acueductos y plantas de tratamiento naturales. Se han definido 653 acuíferos para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (CONAGUA, Atlas del Agua en México, 2012).

Algunos atributos que el agua subterránea presenta por naturaleza y que le confieren ciertas ventajas, son:

- menores pérdidas por evaporación.
- menor exposición a la contaminación.
- disponibilidad menos afectada por las variaciones climáticas.
- amplia distribución espacial.
- razonables calidades geoquímicas para consumo humano.

La importancia de conocer la disponibilidad de aguas subterránea es mayor en países como México con extensas regiones áridas, donde el subsuelo suele ser la principal fuente permanente de agua.

Para calcular la disponibilidad de aguas subterráneas se debe realizar un balance de las mismas, donde se define de manera precisa la recarga de los acuíferos para deducir los volúmenes que demandan los ecosistemas y los usuarios para su explotación.

El valor de la disponibilidad servirá para fines de administración del recurso, para la construcción de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, en los proyectos de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, y en estrategias para resolver los casos de explotación intensiva y la resolución de conflictos entre los usuarios del acuífero.

1.1. ANTECEDENTES Y PROBLEMÁTICA.

La Ley de Aguas Nacionales (LAN, 1° de Diciembre 1992 vigente) 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-2000 “Norma Oficial Mexicana que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.

La NOM-011 establece para el cálculo de la disponibilidad de aguas subterráneas el desarrollo de un balance hídrico donde se defina de manera precisa la recarga, para deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y el volumen concesionado vigente en el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

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.

A partir de la década de los setenta, ha aumentado de manera significativa el número de acuíferos sobreexplotados. Al 31 de diciembre de 2010 existen 101 acuíferos explotados. De los acuíferos sobreexplotados se extrae aproximadamente el 49% del agua subterránea para todos los usos. Un acuífero se considera sobreexplotado o no, en función de la relación extracción/recarga (CONAGUA, Atlas del Agua en México, 2012).

En el estado de Coahuila, donde se desarrolla la presente tesina, se encuentran 4 acuíferos con explotación intensiva:

Clave	Nombre	Estado
0509	La Paila	Coahuila
0511	Región Manzanera-Zapaliname	Coahuila
0523	Principal-Región Lagunera	Coahuila
0525	Las Delicias	Coahuila

1.2. OBJETIVO.

Desarrollar una metodología que permita evaluar el grado de explotación de un acuífero por medio de un balance de aguas subterráneas, analizando el balance del acuífero Allende Piedras Negras, que representa uno de los acuíferos más importantes de Coahuila. Para ello, se procesarán datos de niveles de pozos para configurar mapas potenciométricos de diferentes años, hidrometrías de bombeo, cálculo de parámetros hidráulicos, variables climatológicas, entre otros muchos.

Además se determinará por medio de un balance de aguas subterráneas, el grado de explotación de este acuífero, explotación sostenible, explotación intensiva, o en equilibrio, con miras a diseñar adecuados escenarios de gestión hídrica.

1.3. LOCALIZACIÓN, EXTENSIÓN Y LÍMITES DEL AREA DE BALANCE (AB).

El acuífero Allende-Piedras Negras, definido con la clave 0501 en el Sistema de Localización Geográfica (SILOG) de la CONAGUA, se localiza en la porción nororiental del Estado de Coahuila Abarca una superficie de 12,961 km² (límites administrativos), entre las coordenadas 27°45'-29°00' de latitud norte, y 100°00'-102°15' de longitud oeste. Tiene una altitud promedio de 800 msnm en su parte poniente que corresponde a la Sierra del Burro, mientras que en la planicie va de una altitud de 200 msnm, en la zona cercana al Río Bravo, a 390 msnm a la altura del poblado de Allende.

Colinda dentro del estado de Coahuila, con los acuíferos Región Carbonífera al sur, Palestina y Cerro Colorado-La partida al norte, al oeste con Serranía del Burro y Región Carbonífera; al este su límite natural es al Río Bravo (Figura 1.1)

Pertenece al Organismo de Cuenca VI Río Bravo y es jurisdicción territorial de la Dirección Local Coahuila. El 8 de Julio del 2010 fue publicado en el Diario Oficial de la Federación una disponibilidad pública de 18.6750 millones de metros cúbicos (Mm³).

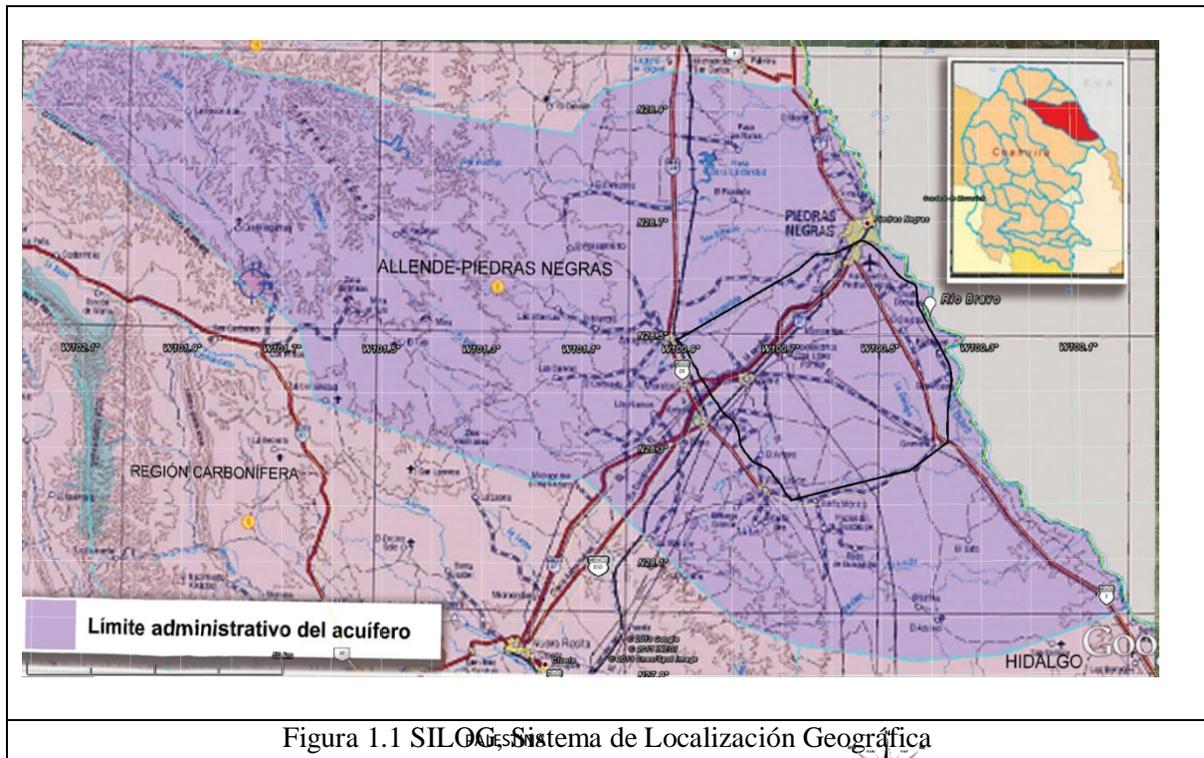


Figura 1.1 SILOG Sistema de Localización Geográfica

Geopolíticamente comprende totalmente los municipios de Allende, Nava, Morelos y Piedras Negras, y parcialmente Jiménez, Guerrero, Múzquiz, Villa Unión y Zaragoza.

1.4. CLIMA.

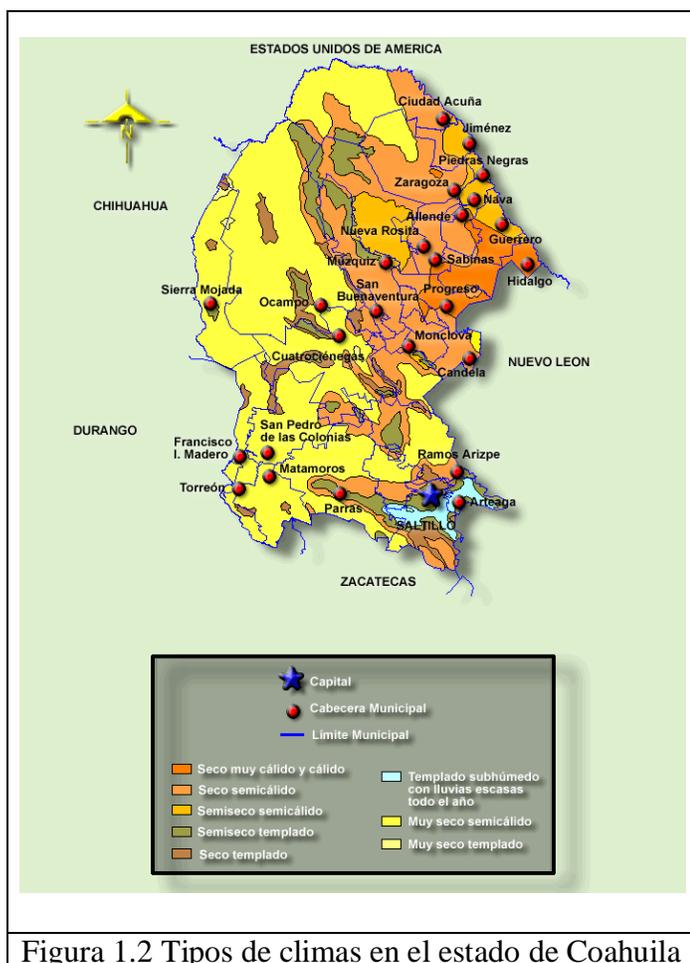
El estado de Coahuila está situado, en su mayor parte, en el oriente de una gran área climática denominada como Desierto de Chihuahua, o Desierto del Norte de México. Esta se caracteriza por poseer climas continentales, secos y muy secos, que van desde los semicálidos, predominantes en los bolsones coahuilenses, hasta los templados de las partes más altas y las más septentrionales.

Tres son las áreas en las que se puede dividir al estado por sus climas de un modo general; el occidente se caracteriza por tener un clima muy seco, el centro y sur en donde se asocian climas desde los muy secos y secos semicálidos de sus bolsones y valles, hasta los semisecos templados y templados subhúmedos de las cumbres serranas, con predominancia de climas secos, por último el noreste donde el clima es semiseco y seco (figura 1.2).

En la zona comprendida por los municipios de Allende, Guerrero, Morelos, Nava, Piedras Negras, Villa Unión y Zaragoza en donde se localiza el área de estudio, la temperatura media anual es de 20 a 22 °C, con excepción del extremo noreste, en particular en las laderas de la Serranía del Burro, en donde disminuye a 18 °C.

Los climas predominantes dentro del área de estudio son:

Semiseco semicálido. Este se localiza en la zona este de la región, con una altitud de 200 msnm, con lluvias escasas todo el año. Abarca desde Piedras Negras hasta el sureste de Villa Acuña, presentando su máxima precipitación en el mes de septiembre y su máxima temperatura en los meses de julio y agosto con 30 °C.



Seco cálido. Se localiza en la zona este de la región a una altitud de 400 msnm, con lluvias en verano. Abarca desde el norte de Ciudad Allende hasta Villa Acuña. Presenta su máxima precipitación en el mes de septiembre y su máxima temperatura en el mes de julio con 29 °C.

Seco semicálido. Se localiza en la zona oeste de la región con una altitud de 600 a 1,200 msnm, con lluvias en verano y presencia de canícula. Abarca desde el río San Antonio hasta la Serranía del Burro. Presenta su máxima precipitación en el mes de septiembre y su máxima temperatura en el mes de julio con 28 °C.

De acuerdo con los datos de las estaciones climatológicas 05-042 y 05-002 ubicadas en los poblados de Zaragoza y Allende, la temperatura media registrada en el Atlas del INEGI es de 20.7° y 21.1°C respectivamente. Las variaciones climatológicas varían según la altitud de la región. En el caso de la temperatura media anual, se considera que su valor promedio es 21°C. En la figura 1.3. se definen isoyetas establecidas por el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), delimitando diferentes tipos de sequía en 2010 dentro del área de balance, que van desde sequías moderadas a extremas.

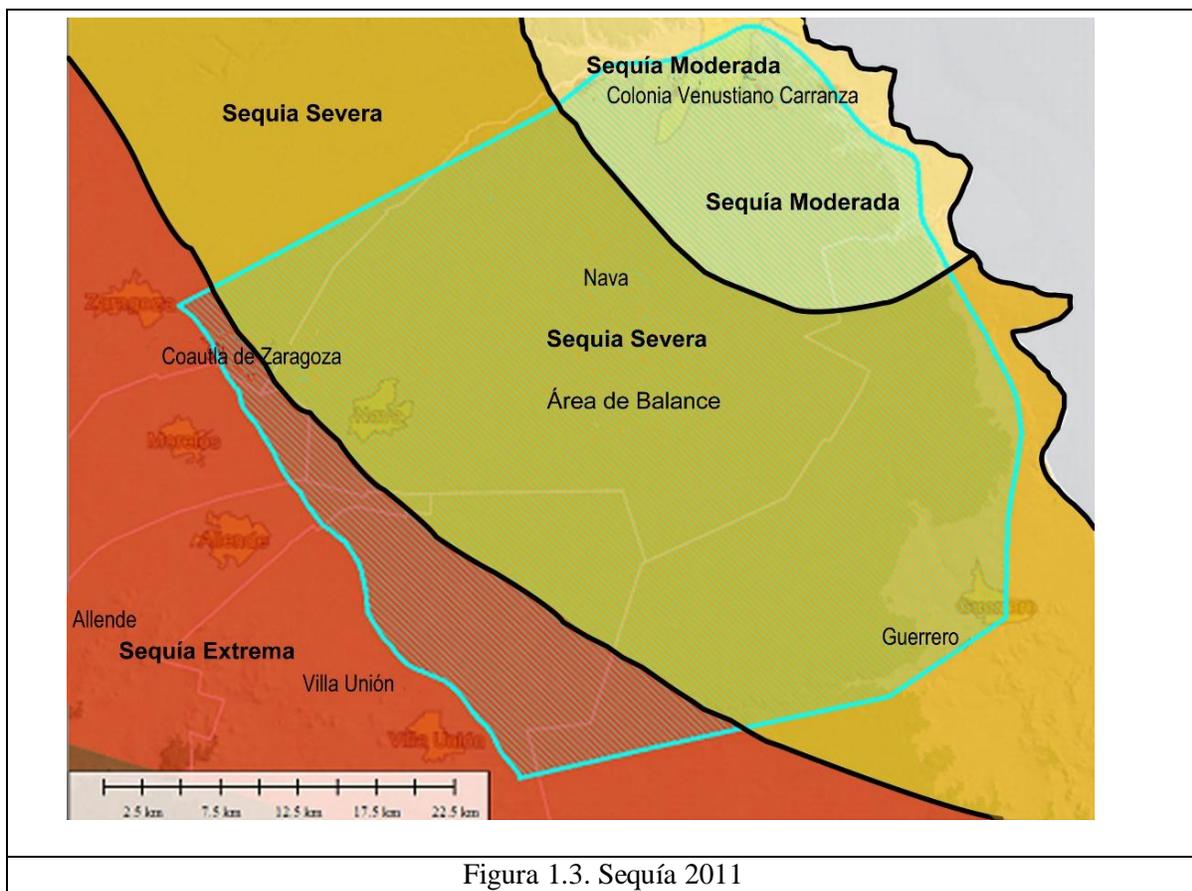


Figura 1.3. Sequía 2011

1.5. HIDROGRAFÍA.

El área de balance se ubica dentro de la Región Hidrológica RH24, “Bravo Conchos” (231,516.77 km²), entre dos subcuencas de diferentes cuencas. En la tabla 1.2 y 1.3 se muestran las propiedades de las cuencas y subcuencas en la zona de balance.

Tabla 1.2 Cuencas que integran a la Región Hidrológica

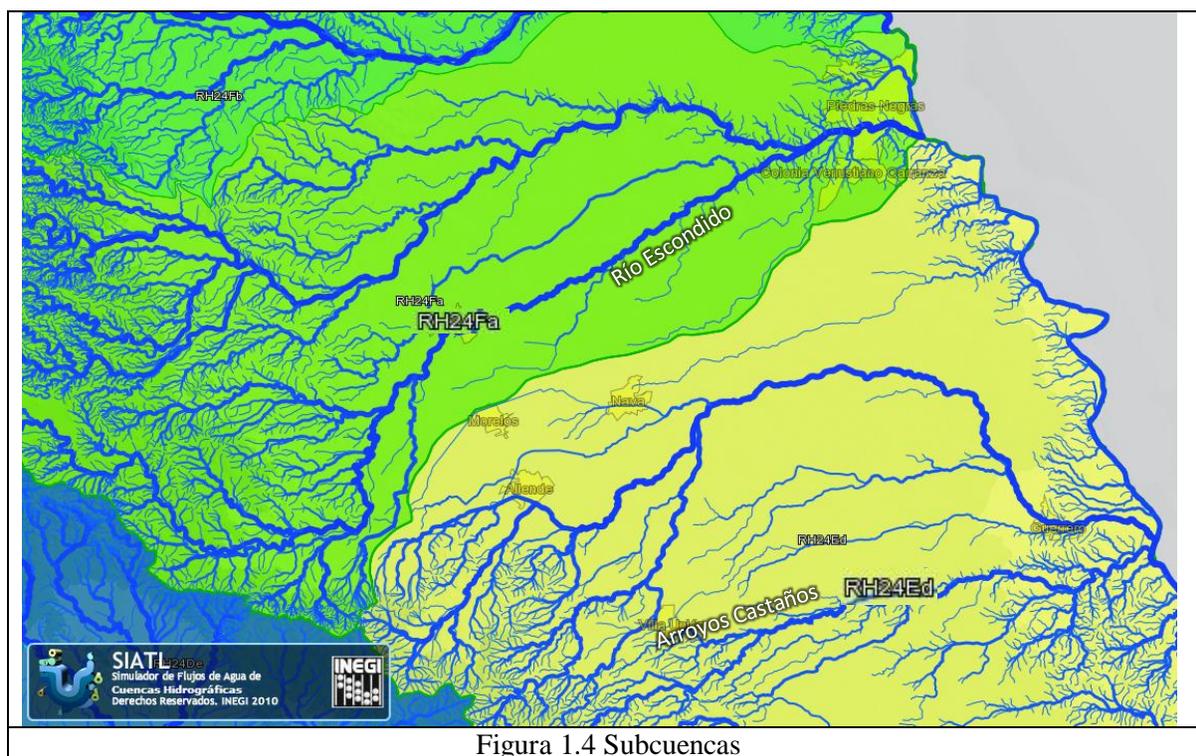
Cuenca 1		Cuenca 2	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Identificador	96	Identificador	96
Clave Región Hidrológica	RH24	Clave Región Hidrológica	RH24
Nombre de la Región Hidrológica	Bravo Conchos	Nombre de la Región Hidrológica	Bravo Conchos
Clave Cuenca	E	Clave Cuenca	F
Nombre Cuenca	R.Bravo-Nuevo Laredo	Nombre Cuenca	R.Bravo-Piedras Negras
Área (km ²)	9539.98	Área (km ²)	9673.41
Perímetro (km)	827.16	Perímetro (km)	498.33

Tabla 1.3 Propiedades de las Subcuencas en la zona de balance.

Subcuenca 1		Subcuenca 2	
Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Identificador en Base de Datos	814	Identificador en Base de Datos	820
Clave de subcuenca compuesta	RH24Ed	Clave de subcuenca compuesta	RH24Fa
Clave de Región Hidrográfica	RH24	Clave de Región Hidrográfica	RH24
Nombre de Región Hidrográfica	BRAVO CONCHOS	Nombre de Región Hidrográfica	BRAVO CONCHOS
Clave de Cuenca	E	Clave de Cuenca	F
Clave de Cuenca Compuesta	E	Clave de Cuenca Compuesta	F
Nombre de Cuenca	R. BRAVO - NUEVO LAREDO	Nombre de Cuenca	R. BRAVO - PIEDRAS NEGRAS
Clave de Subcuenca	d	Clave de Subcuenca	a
Nombre de Subcuenca	R. Bravo - A. del Amole	Nombre de Subcuenca	R. Bravo - A. San Antonio
Tipo de Subcuenca	EXORREICA	Tipo de Subcuenca	EXORREICA
Lugar a donde drena (principal)	RH24Ec R. Bravo - A. Saladito	Lugar a donde drena (principal)	RH24Ed R. Bravo - A. del Amole
Total de Descargas (drenaje principal)	1	Total de Descargas (drenaje principal)	1
Perímetro (km)	338.81	Perímetro (km)	326.29
Área (km ²)	4251.45	Área (km ²)	3172.39
Densidad de Drenaje	1.25	Densidad de Drenaje	1.46
Coefficiente de Compacidad	1.47	Coefficiente de Compacidad	1.63
Longitud Promedio de flujo superficial de la Subcuenca (km)	0.20	Longitud Promedio de flujo superficial de la Subcuenca (km)	0.17
Elevación Máxima en la Subcuenca (m)	740	Elevación Máxima en la Subcuenca (m)	1060
Elevación Mínima en la Subcuenca (m)	160	Elevación Mínima en la Subcuenca (m)	200
Pendiente Media de la Subcuenca (%)	3.18	Pendiente Media de la Subcuenca (%)	5.86
Elevación Máxima en Corriente Principal (m)	579	Elevación Máxima en Corriente Principal (m)	903

Elevación Mínima en Corriente Principal (m)	160	Elevación Mínima en Corriente Principal (m)	208
Longitud de Corriente Principal (m)	140925	Longitud de Corriente Principal (m)	142136
Pendiente de Corriente Principal (%)	0.30	Pendiente de Corriente Principal (%)	0.49
Sinuosidad de Corriente Principal	1.54	Sinuosidad de Corriente Principal	1.52

La zona de balance está conformada por las subcuencas de los ríos Arroyos Castaños y Escondido, el primero con un caudal perenne promedio de 2.0 m³/s y de 4.0 m³/s para el Río Escondido (Figura 1.4).



A continuación, se hace una breve descripción de las condiciones de precipitación y evaporación con base en la información disponible obtenida a partir de las estaciones climatológicas que se encuentran localizadas dentro del área de estudio.

1.5.1. Precipitación

Dentro de las subcuencas las lluvias se presentan principalmente en el período comprendido entre los meses de mayo a octubre mientras que el período de estiaje se presenta de noviembre a abril, siendo enero el mes más seco (media mensual 1960-2006).

Para obtener el valor de la precipitación en el área de balance se recopiló información de 6 estaciones climatológicas. En la tabla 1.4 se presenta una relación con la ubicación de dichas estaciones, así como el número de años con los que se cuenta con información, el periodo sustraído y el valor de precipitación media anual obtenida en cada una de ellas (Servicio Meteorológico Nacional, 2013).

Tabla 1.4 Relación de estaciones climatológicas

No. Est.	NOMBRE	MUNICIPIO	LAT	LON	Período	Años	Hp media anual (mm)
5002	ALLENDE (SMN)	ALLENDE	28.33	-100.83	1960-2006	45	452.78
5025	PIEDRAS NEGRAS (OBS)	PIEDRAS NEGRAS	28.70	-100.52	1960-2006	15	471.45
5030	PRESA VENUSTIANO CARRANZA	JUAREZ	27.52	-100.62	1960-2006	45	378.96
5033	SABINAS (DGE)	SABINAS	27.85	-101.12	1960-2006	43	470.31
5045	JUAREZ	JUAREZ	27.61	-100.73	1960-2006	47	339.12
5186	CABECERAS	JIMENEZ	29.04	-101.08	1960-2006	27	564.62
Hp: altura de lluvia		No. Est. : Número de estación climatológica asignada por SMN					
LAT: Latitud		LON: Longitud					

Con la información obtenida, se tomaron las estaciones anteriores por estar dentro del área de balance y tener los datos del periodo que va de 1960 a 2006, obteniéndose la precipitación media mensual de cada año mostrado en la tabla 1.5.

Tabla 1.5. Precipitación media mensual en el área de balance.

No. Est.	NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Hp anual (mm)
5002	ALLENDE (SMN)	11.64	14.34	18.12	35.80	68.74	51.51	43.63	53.59	73.34	46.28	21.48	14.30	452.78
5025	PIEDRAS NEGRAS (OBS)	13.95	14.78	35.18	41.67	49.87	49.48	43.46	47.95	63.23	71.66	27.78	12.44	471.45
5030	PRESA VENUSTIANO CARRANZA	13.92	16.41	14.80	26.48	54.55	47.08	27.38	41.29	70.51	35.76	15.81	14.96	378.96
5033	SABINAS (DGE)	11.80	15.76	17.51	32.24	64.25	63.36	48.49	58.05	83.09	45.84	18.78	11.15	470.31
5045	JUAREZ	12.07	13.97	12.43	32.36	48.32	42.91	18.73	26.47	69.70	33.68	14.80	13.67	339.12
5186	CABECERAS	11.28	21.27	25.44	40.30	51.13	70.86	45.52	86.79	105.8	65.81	25.07	15.41	564.62
	Media (19060-2006)	12.44	16.09	20.58	34.81	56.14	54.20	37.87	52.35	77.60	49.84	20.62	13.66	446.21

La tabla expone que la lluvia media anual para el período común considerado es de 446.2 mm. La figura 1.5 presenta la distribución de la precipitación media mensual para el periodo de 1960-2006, datos que fueron tomados de las seis estaciones consideradas. De igual forma, para conocer la distribución de la lluvia a través del periodo de años

mencionado, se tomaron los datos de las seis estaciones seleccionadas. En la figura 1.6 se muestra la variación de la precipitación anual.

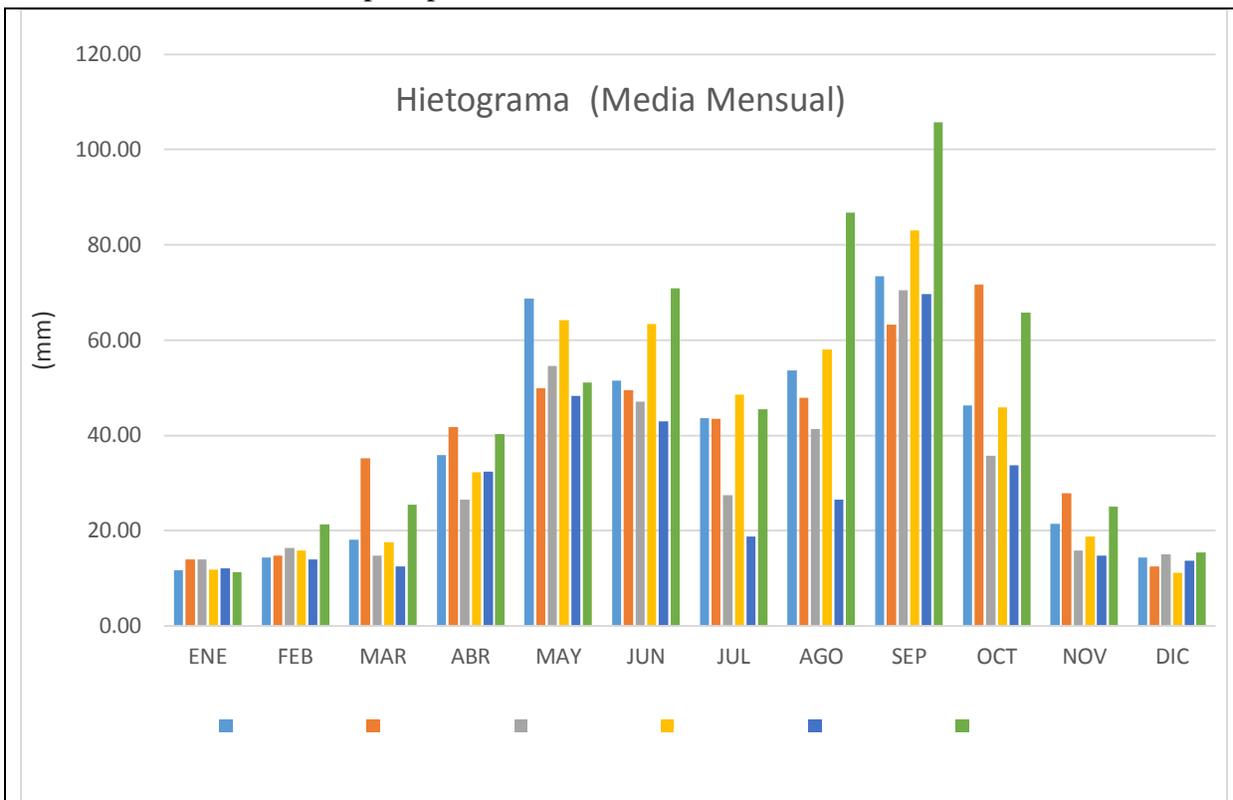


Figura 1.5 Variación de la precipitación media mensual (SMN: Servicio Meteorológico Nacional).

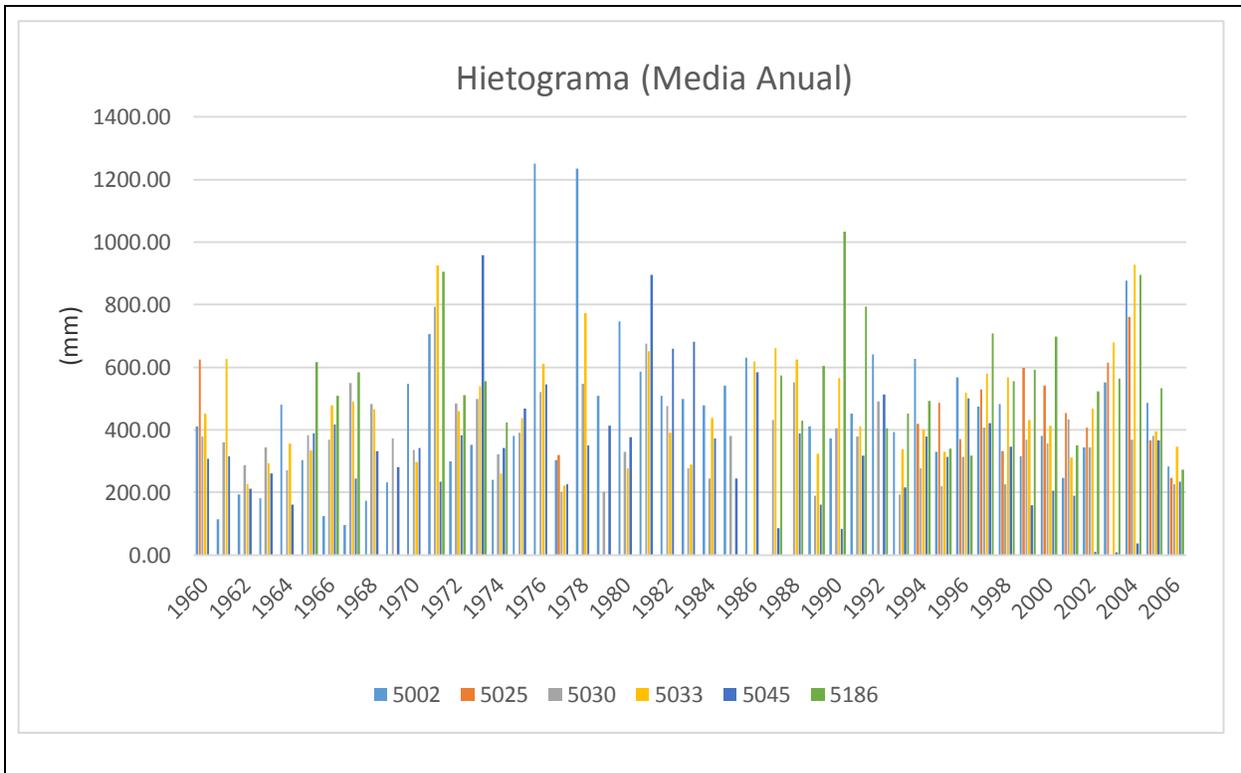


Figura 1.6 Variación de la precipitación anual acumulada para el periodo 1960-2006
 Con ayuda del programa Surfer (interpolación lineal) y el método de las curvas isoyetas se obtuvo el valor de lluvia media en el área de balance figura 1.7. En la tabla 1.6 se muestra la lluvia media calculada por dicho método.

Media Anual = 446.21 mm



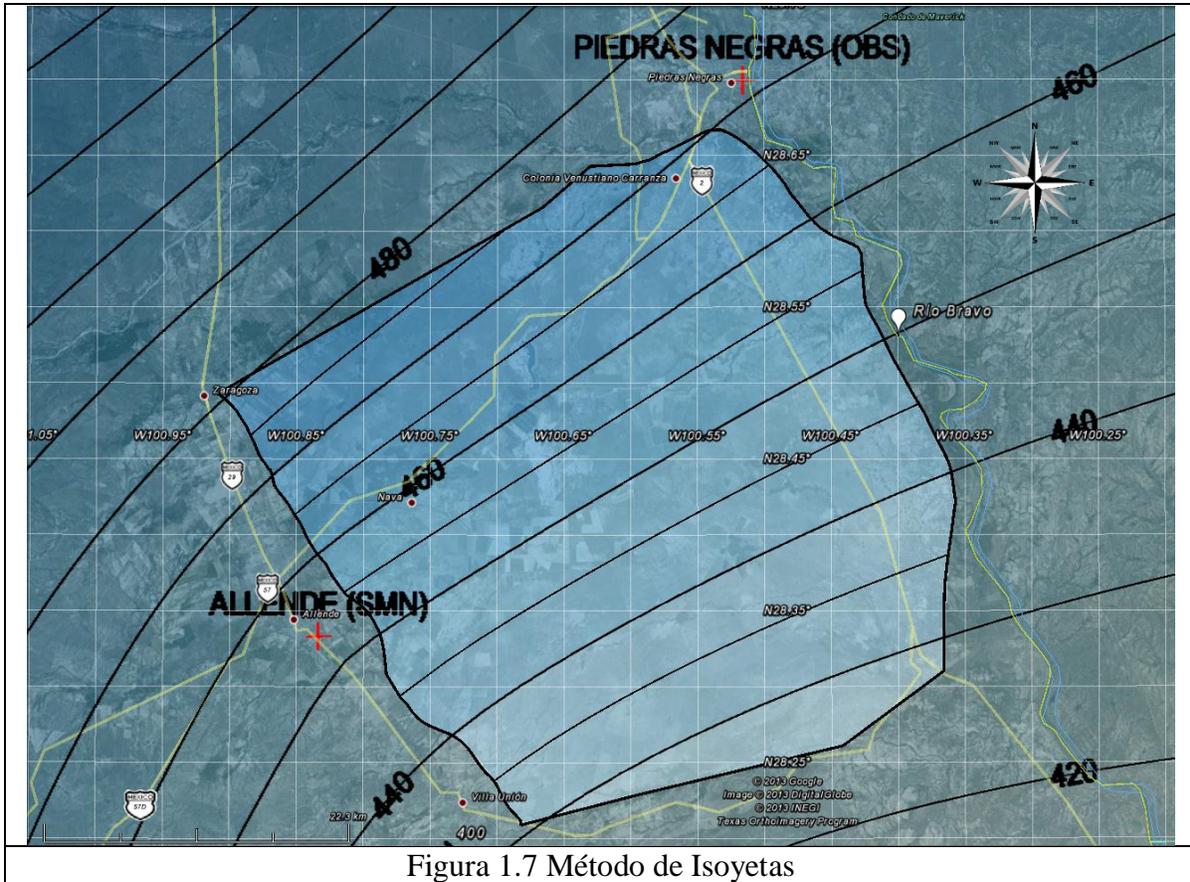


Figura 1.7 Método de Isoyetas

La evaporación potencial promedio anual varía de 1746 mm registrada en la estación Allende, a 1816 mm en la estación Observatorio de Piedras Negras.

Tabla 1.6. Cálculo de la lámina de precipitación (método de isoyetas).

Lámina de precipitación promedio (1950-1960)				
	Área km ²	Lámina de precipitación (mm)	Volumen (Mm ³)	Lamina promedio (mm)
A1	0.68	480	20.40	
A2	41.83			
A3	123.64	460	131.85	
A4	162.98			
A5	174.53	440	159.47	
A6	187.89			
A7	191.41	420	164.82	
A8	201.01			
A9	206.12	410	164.06	
A10	194.03			
A11	176.76	400	109.14	
A12	96.10			
Total	1757.00		749.75	428.03

Con la finalidad de verificar la evolución de la lámina de precipitación a través de los años, también se consultó el mapa de isoyetas que se muestran en la figura 1.8, con los cuales se pudo calcular la lámina de precipitación promedio para el periodo de 1921 – 1975.

En la tabla 1.7 se presenta el cálculo de lámina de lluvia del caso anteriormente mencionado, en donde se observa cómo la precipitación promedio anual es de 475mm, con lo cual se demuestra que a pesar de las variaciones anuales, la lámina de precipitación dentro del área de estudio no ha tenido cambios significativos manteniéndose ésta entre los 428 y los 475 mm.

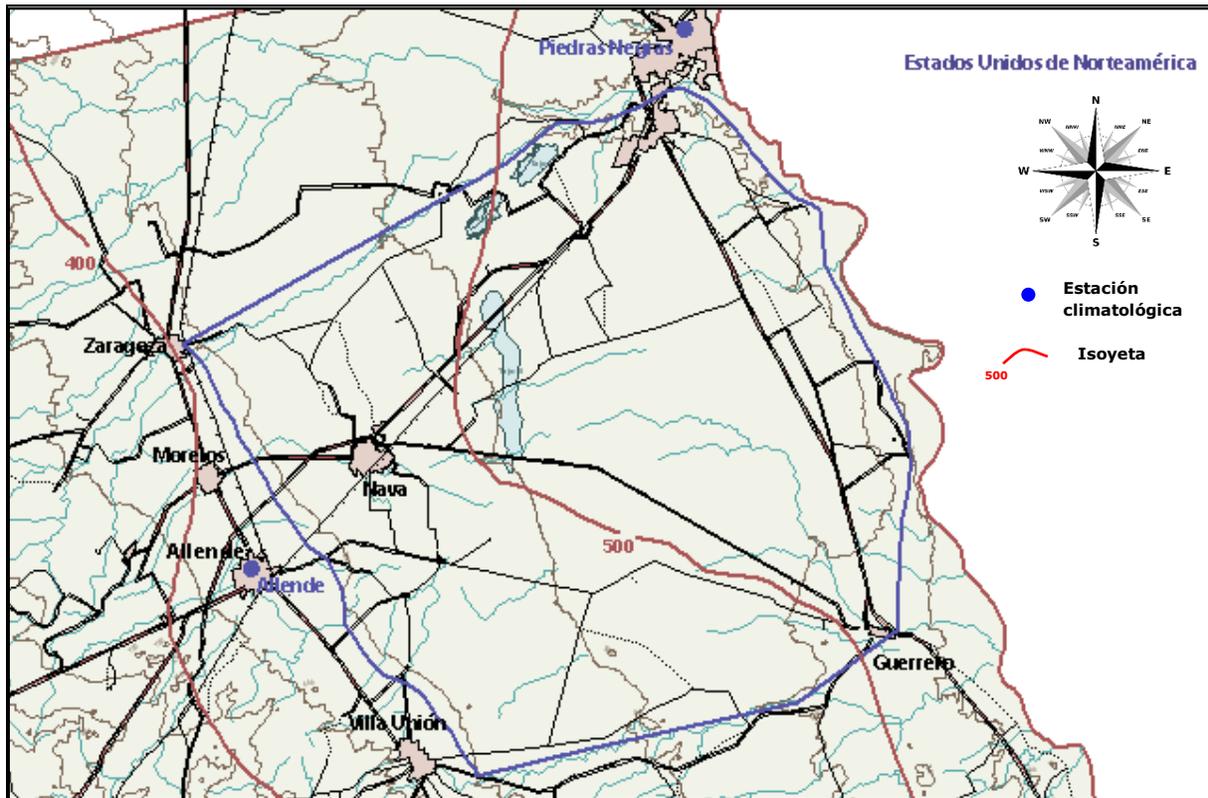


Figura 1.8. Mapa de isoyetas datos (1921-1975)
Fuente: Atlas Nacional del Medio Físico (SPP).

Tabla 1.7. Cálculo de la lámina de precipitación (método de isoyetas)

Lámina de precipitación promedio (1921-1975)				
	Area (Km ²)	Lámina Precipitación (mm)	Volumen (Mm ³)	Lámina promedio (mm)
A1	834.22	450	375.40	
A2	865.78	500	432.89	
Total	1,700		808.29	475

1.6. GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

En el límite poniente de este acuífero se encuentra la Sierra del Burro que está constituida por un gran levantamiento de calizas que dan origen a un anticlinante en forma de domo, ligeramente elíptico, con buzamineto estructural y topográfico hacia el sureste.

La composición geológica de la zona, está constituida por rocas sedimentarias marinas del Cretácico Superior (que sobreyacen a calizas del Cretácico Inferior) en la zona de la Sierra del Burro y hacia la planicie de Allende-Piedras Negras está cubierta por conglomerado y aluviones del Terciario y Cuaternario, que forman el acuífero estudiado.

En la figura 1.10 se muestra la geología regional obtenida de la cartografía del INEGI. Donde se observan rocas arrecifales de la Formación Salmon Peak (Ksp) del Cretácico Inferior y las rocas del Cretácico Superior (Ks) correspondientes a las formaciones Del Río, Buda, Eagle Ford y Austin, entre otras.

1.6.1. Geomorfología

La región está constituida por una llanura aluvial ligeramente inclinada al noreste, entre las cotas topográficas de 600 msnm en su parte más alta y aproximadamente 200msnm en el cauce del Río Bravo. En el poniente se encuentran las estribaciones de la Sierra del Burro, manifestadas geomorfológicamente por lomeríos de formas suaves, redondeados. La planicie es disectada por ríos y arroyos, en su mayoría intermitentes, que provienen de la Sierra del Burro al poniente y circulan en dirección al oriente para desembocar en el Río Bravo.

1.6.2. Estratigrafía.

Cretácico Inferior

Formación Glen Rose. Hill (1891, p.504) nombró como Formación Glen Rose a los afloramientos de calizas resistentes y margas suaves, presentes a lo largo del cauce del Río Paluxy, cerca del poblado Glen Rose, Texas. En la Sierra del Burro, aflora de manera incompleta en el Cañón del Cíbolo, en el Complejo la Cueva y en el cauce del Río Bravo. En el cañón del Cíbolo consiste de las cuatro unidades litoestratigráficas siguientes (de cima a base):

1. 60 m de estratos delgados a medianos de calizas con braquiópodos y miliólidos.
2. 60 m de estratos delgados a medianos de margas, calizas arcillosas y calizas con cristales de marcasita y radiolarios.
3. 168 m de estratos medianos de calizas con abundantes inclusiones de marcasita y radiolarios, intercaladas con calizas con cavidades cilíndricas perpendiculares a los planos de estratificación y rellenos de aragonita.

4. 45 m de estratos medios a gruesos de caliza con abundante piritita y radiolarios, alternando con calizas arcillosas conteniendo Caprínidos, Ostreidos, etc.

Su límite inferior no aflora, no así su límite superior con la Formación Walnut, el cual es muy claro y se expresa topográficamente por un cambio de pendiente muy marcado. En el Cañón del Cíbolo aflora el límite superior, el cual es fácilmente reconocible pues la secuencia litológica descrita cambia a margas con abundante *Exogira* sp., *Gryphaea* sp y braquiópodos.

Formación Telephone Canyon (Walnut). El nombre de ésta formación fue dado por Hill (1891) para referirse a una secuencia de arcillas amarillentas, calizas laminadas y coquinas que cubren transicionalmente a la Formación Glen Rose en Walnut Spring, Texas; Smith (1970, p. 38) describe esta unidad como Formación Telephone Canyon.

En el área estudiada, la Formación Walnut aflora en el cañón que forma el cauce del Río Bravo y en el Complejo de La Cueva, donde se encuentra cubierto parcialmente por aluvi3n. Está constituida por dos unidades con un espesor total de 102 m. La unidad inferior consiste de 35 m de estratos medianos de calizas con caprínidos y ostreidos; la unidad superior consiste de 67 m de margas con abundantes *Exogyra* sp, *Turritella* sp., y braquiópodos muy bien preservados.

Dado que ésta unidad conforma un paquete de litología relativamente blanda, encajonada entre las formaciones Glen Rose y Edwards, la Formación Walnut es fácilmente reconocible en el campo ya que topográficamente forma un cambio de pendiente entre las formaciones Edwards y Glen Rose.

En el Cañón del Cíbolo sus límites son fácilmente reconocibles por que existen cambios en el carácter litológico de las formaciones encajonantes. Con la formación suprayacente el cambio es transicional hacia los potentes estratos calcáreos de la Formación Edwards. Su límite inferior es un cambio transicional hacia las calizas micríticas de la Formación Glen Rose.

Complejo Arrecifal del Burro. El nombre de esta unidad fue usado por los geólogos de PEMEX para incluir los sedimentos calcáreos de tipo arrecifal que afloran en la porción central de la Serranía del Burro. Smith (1970, p. 43) la describe como Formación Devils River. Aflora en una franja con orientación NE-SW en la porción central y suroriental del área estudiada y consiste de un paquete de calizas fosilíferas en estratos muy potentes. Sus límites superior e inferior son fácilmente reconocibles pues se encuentra encajonada entre formaciones blandas que forman pendientes suaves (Formaciones Walnut y Del Río). Sus límites laterales no están bien definidos, pues se trata de un cambio gradual de las facies de las Formaciones Edwards, Kiamichi y Georgetown hacia el Complejo Arrecifal del Burro.

Se distinguen tres formaciones dentro de este Complejo, las cuales son de abajo hacia arriba, formaciones West Nueces, Mcknigth y Salmon Peak.

Formación West Nueces. Consiste en calizas de textura media (wackestone) que hacia su base presenta estructura nodular. Se encuentra sobreyaciendo las margas y calizas de la Formación Telephone Canyon y subyaciendo las calizas de la Formación McKnight. Presenta amplios afloramientos en el flanco este de la Sierra del Burro.

Tiene amplio desarrollo en la Serranía El Burro y se considera una continuación de la Formación Devil River inferior, hacia el este, pero adelgazándose en forma de cuña, ya dentro del ambiente de una gran laguna. El espesor varía entre 183 m en el oeste y 46 m hacia el este.

Formación Mcknight. Está constituida por calizas oscuras en capas delgadas, evaporitas y brechas de colapso. Se encuentra sobreyaciendo las calizas de la Formación West Nueces y subyaciendo las calizas de la Formación Salmon Peak.

Esta formación tiene su principal superficie expuesta hacia el sur y sureste del anticlinal de la Serranía El Burro. En esta época las condiciones de circulación en la laguna se restringieron notablemente, por lo cual la Cuenca de Maverick estuvo prácticamente cerrada.

Su máximo espesor es de 151 m que presenta en el flanco sureste del anticlinal El Burro, en donde está compuesta de calcarenitas y calizas fosilíferas con nódulos de pedernal intercalados, se observan pseudomorfs de cristales de sal, indicativo de formación de evaporitas.

Grupo Washita. Se encuentra constituido por las formaciones Salmon Peak, Del Río y Buda las que se describen a continuación.

Formación Salmon Peak. Se han agrupado bajo éste nombre a calizas arcillosas con nódulos de pedernal e inclusiones de marcasita en estratos potentes. Aflora en forma de cordón circundando a la Sierra del Burro. Forma la parte superior del Complejo Arrecifal del Burro. Sus límites superior e inferior son transicionales, pero fácilmente reconocibles en el campo, pues ésta unidad en general contrasta con las unidades que la encajonan. Litológicamente, su límite inferior es transicional sobre la Formación Kiamichi; en tanto que su límite superior es un cambio gradual de las calizas en estratos potentes de la Formación Salmon Peak, hacia la secuencia de sedimentos clásticos y calcáreos de la Formación del Río.

Su espesor es variable con un promedio de 245 m determinado en la Cuenca de Maverick. Los primeros 145 m a partir de su base, están conformados por lodolita calcárea a caliza wackestone con globigerina, presentándose nódulos de pedernal en la cima. Los restantes 100 m constan de calcarenitas con fragmentos de conchas. Dentro de la Cuenca de Maverick, al oeste de la zona, la parte superior de la Salmon Peak se adelgaza hacia el este, desapareciendo por la aparición de la formación arrecifal Devil River.

Formación Devil River Superior. Se trata de un borde arrecifal que separa facies de plataforma en la Cuenca de Maverick y las de mar abierto al oeste y al sur. Su espesor total varía de 490 m y 670 m de norte a sur en el norte de Coahuila y al oeste de la zona. En el subsuelo se clava, al sur-suroeste de la Serranía El Burro, norte de Múzquiz, lomerío de Peyotes, continuando 70 km al norte de Laredo, Texas, en su conexión con la Formación Stuart City

Formación Del Río. Fue originalmente descrita por Hill y Vaughan (1898). Su localidad tipo se encuentra en la Ciudad de Del Río, Tex. y consiste de 60 m de lutitas fosilíferas. Aflora esporádicamente en la porción nor-oriental de la Serranía del Burro, en los flancos del Sinclinal del Abanico y en el Complejo La Cueva; consiste de lutitas, areniscas, margas y yesos con abundantes nódulos de pirita y marcasita. Sus límites superior e inferior son transicionales, pero fácilmente reconocibles ya que se encuentra encajonada entre formaciones más resistentes por lo que presenta formas de pendiente suave.

Aflora en la Serranía El Burro y aparece por su poco espesor como una cinta angosta en contacto con la Formación Buda suprayacente. Su litología es dominante de lutitas fosilíferas con nódulos de pirita, alcanza un espesor máximo de 124 m en el centro de la parte oriental de la Cuenca de Maverick. En el pozo El Refugio, Coahuila, tiene 40 m de espesor, pero en el Remolino, 22 km al norte de El Refugio es reportado como de 50 m. Con la aparición de la Formación Del Río llegaron a su fin, a escala regional, las calizas de borde arrecifal y de plataforma en el norte de México y en Texas al sur. Un levantamiento regional noroeste norte, al final de Salmon Peak, provocó la sedimentación de vastas cantidades de materiales terrígenos para dar a la formación de arcilla del Río.

La mayor parte de las formaciones calcáreas antes descritas, tienen cierto grado de comunicación hidráulica y forman un potente acuífero regional Kárstico, confinado por estratos poco permeables del Cretácico Superior. En este acuífero se han perforado decenas de pozos de uso industrial, de tipo surgente, que otorga entre 200 y 400 l/s/pozo

Cretácico Superior

Formación Buda. Fue descrita por Hill (1900) en Shoal Creek, Austin Texas, como una unidad consistente de estratos medianos de margas y calizas con Budaiceras y Exogyra

ponderosa. Dentro de la Sierra del Burro, aflora en el Rancho El Abanico, Rancho Valencia, Complejo La Cueva y en Rancho Nuevo. Está constituida por 30 m de estratos medianos de calizas con foraminíferos y margas con braquiópodos y nódulos de pirita. Su límite es reconocible topográficamente pues constituye un cambio litológico con la Formación del Río, que presenta formas de lomeríos. Su límite superior es transicional con la Formación Boquillas y difícil de reconocer en el campo, pues no existe contraste entre sus litologías.

Formación Eagle Ford. Corresponde a lutitas de color oscuro, intercaladas con calizas arcillosas en estratos delgados. Aflora en una delgada banda al pie de la Sierra del Burro. Su potencia en el barreno de CFE, Zaragoza No. 1 es de 100 m, pero en la zona El Refugio tiene más de 130 m para el barreno No. 8 y más de 160 m para el No. 7. Por otro lado, el Pozo Coconal No.1 de PEMEX reporta 178 m.

Formación Austin. Esta formada por caliza de color gris claro, en estratos de tamaño medio, con intercalaciones de lutitas calcáreas. Aflora en el denominado Lomerío de Peyotes que corresponde a un anticlinal, continuación del buzamiento sureste del anticlinal de la Sierra del Burro. El barreno Zaragoza No. 2 de CFE reporta 300 m de espesor y 313 m en el Coconal No. 1 de PEMEX.

Formación Upson. Está constituida por lutitas y limolitas en capas delgadas a laminares, ocasionalmente presenta capas calcáreas de estratificación mediana. Aflora en los ejidos La Maroma y Maravillas. Su espesor varía entre 300 y 450 m; sin embargo en el pozo Coconal No. 1 de PEMEX se reporta 122 m. Su depósito se asocia a facies de prodelta de un sistema desarrollado durante el Cretácico superior.

Formación San Miguel. Su litología está conformada por areniscas de grano fino a medio de estratificación mediana; presentan huellas de pelecípodos, así como intercalaciones de limolita. Aflora en las márgenes del Río Escondido y ejido La Maroma. Su espesor es variable, entre 20 y 40 m, y se depositó en un ambiente de frente deltaico.

Formación Olmos. Compuesta de lutitas, limolitas de estratificación delgada, con algunas intercalaciones de areniscas; presenta estructuras de carga, rizaduras de corriente, restos de raíces, plantas fósiles y en la base mantos de carbón, que constituye el yacimiento de la Cuenca Fuentes Río Escondido, actualmente en explotación.

No hay muchos afloramientos de esta formación; sin embargo se le conoce ampliamente debido a la exploración y evaluación de las reservas de carbón que explota MICARE (Minera Carbonífera Río Escondido), tanto en minas subterráneas como a cielo abierto. Su espesor varía entre 150 y 200 m y de acuerdo con sus características, el ambiente de

depósito corresponde a una planicie de inundación y pantanos, asociados a una planicie deltaica.

Formación Escondido. Se trata de una secuencia de lutitas y areniscas calcáreas, con abundantes fósiles, estratificación cruzada, huellas de oleaje, entre otras estructuras. Sus afloramientos se restringen a Villa de Fuentes, Arroyo Castaños y en ambos márgenes del Río Bravo. El espesor de esta unidad varía entre 120 y 180 m, su ambiente de depósito corresponde al de una plataforma interdeltaica.

Estas formaciones margosas y arcillosas, forman un acuitardo poco permeable, que separa hidráulicamente el acuífero confinado calcáreo, del acuífero granular (libre), objeto de estudio en la presente tesina.

Paleogeno - Neogeno

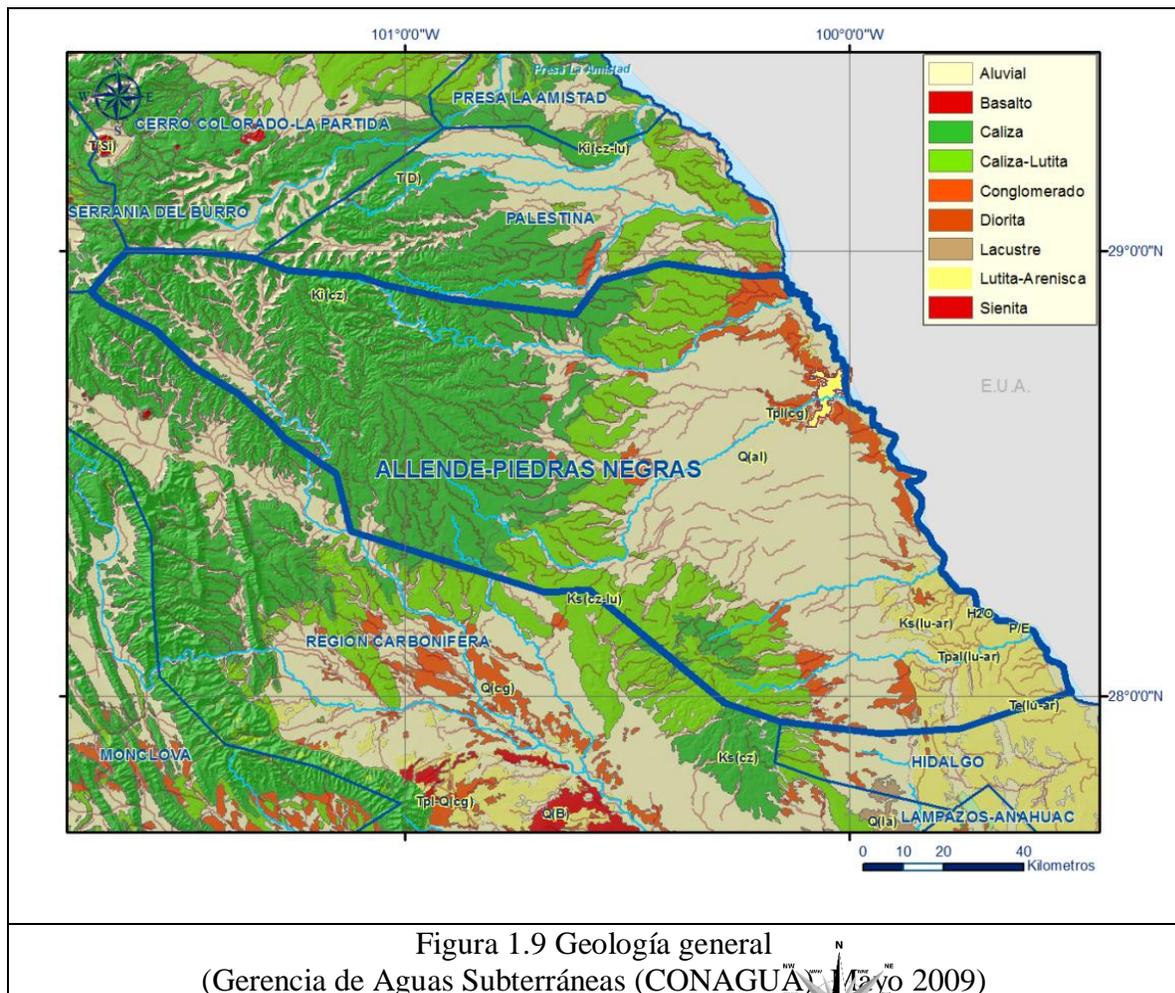
Formación Conglomerado Sabinas-Reynosa. En la planicie de Allende-Piedras Negras y descansando discordantemente sobre los sedimentos calcáreos del Cretácico Superior, se encuentra la denominada Formación Sabinas-Reynosa. Se compone básicamente de un conglomerado semiconsolidado a consolidado, de clastos calcáreos semirredondeados, mal clasificados, de tamaño variable desde gravas hasta guijarros, empacados en un cementante calcáreo, presentando una capa de caliche hacia la cima. El conglomerado generalmente no sobrepasa los 15 m de espesor y en conjunto con el caliche la formación puede alcanzar un espesor de 40 m. La empresa MICARE (1999) reporta con base en información de barrenos exploratorios tres subunidades, denominadas de base a cima, conglomerado, caliche arenoso y caliche arcilloso, este último con distribución muy irregular.

Su origen se interpreta como el producto de la erosión sobre las porciones de terreno topográficamente elevadas, conocidas como la Serranía El Burro y lomerío Peyotes. La existencia de paleocanales que ubiquen rellenos aluviales de antiguos cauces en algunas zonas de la planicie, es explicable en atención a que las corrientes importantes conocidas (Arroyo Las Vacas, Río San Diego, Río San Rodrigo y Río Escondido) son recientes, sin poder afirmar o negar que provengan de un drenaje hereditario. Se le ha asignado una edad correspondiente al Mioceno–Plioceno.

Aluvión Cuaternario. En la planicie de Allende-Piedras Negras, los materiales que constituyen el subsuelo se encuentran cubiertos por una delgada capa de 2 a 6 m de espesor, de material aluvial cuaternario, conformada por depósitos de grava poco compactos, con predominio de rocas ígneas extrusivas, mal clasificadas y semirredondeadas, con fragmentos de pedernal lechoso y esporádicos clastos calcáreos. Estos depósitos coronan discordantemente algunos lomeríos a lo largo de la margen derecha del Río Bravo. Los

clastos presentan imbricación mostrando un sentido de corriente, similar a la actual del mencionado río.

Otro tipo de estos depósitos aluviales son clastos principalmente calcáreos en matriz arenosa, ligeramente cementados por calcita, que rellenan las partes bajas del terreno. La granulometría, espesor y distribución varían mucho, conforme al área de exposición.



1.6.3. Geología Estructural.

La estructura predominante es un anticlinorio, orientado noroeste a sureste en la serranía El Burro y lomerío Peyotes, formada como consecuencia de la Orogenia Laramide durante el Cretácico Superior al Terciario Inferior. Los anticlinales de Agua Verde y Chupaderos, ubicados al noroeste del acuífero, son ondulaciones estructurales asociadas a dicho anticlinorio. La Sierra del Burro tiene forma cóncava con flancos suaves, cuyos echados son del orden de 3° a 5°. El eje del anticlinal parte del centro-oeste de la sierra, en dirección al

sureste, para buzar al poniente de Allende. Al sureste de esta sierra se encuentra otro anticlinal conocido como Lomerío de Peyotes, en el que afloran calizas de la Formación Austin del Cretácico Superior. Tiene flancos de suave pendiente y la dirección de su eje es NW-SE. Otros anticlinales de menor magnitud se encuentran en los alrededores y se muestran en la figura 1.10. A pesar de lo tendido de los plegamientos de la serranía El Burro y lomerío Peyotes, sus buzamientos propician la existencia de zonas fracturadas.

Cabe mencionar que en el flanco occidental del Anticlinal El Burro, existe una falla importante que anuncia un desplazamiento vertical o salto de alrededor de 1250 m con el bloque caído hacia el este. Se trata de una falla normal originada como consecuencia del relajamiento de la deformación Laramide. Esta falla se conoce con el nombre de El Cedral y tiene importancia geohidrológica, ya que aparentemente constituye una barrera al flujo subterráneo y forma el límite sur del acuífero. En anticlinorio El Burro-Peyotes ha estado expuesto desde el Mioceno y gran parte del rejuvenecimiento de cavernosidad para las calizas del subsuelo se debe al efecto propicio de las aguas meteóricas durante este lapso de tiempo bajo condiciones sub-aeriales.

Por otra parte, MICARE (1999) señala, basándose en imágenes Landsat, que el Río Bravo está controlado por un sistema de fallas y fracturas orientadas Norte-Sur y Este-Oeste e indica que en el subsuelo existe un sistema de fallas escalonadas de bajo desplazamiento, de hasta 30 m, orientadas principalmente en dirección NW-SE.

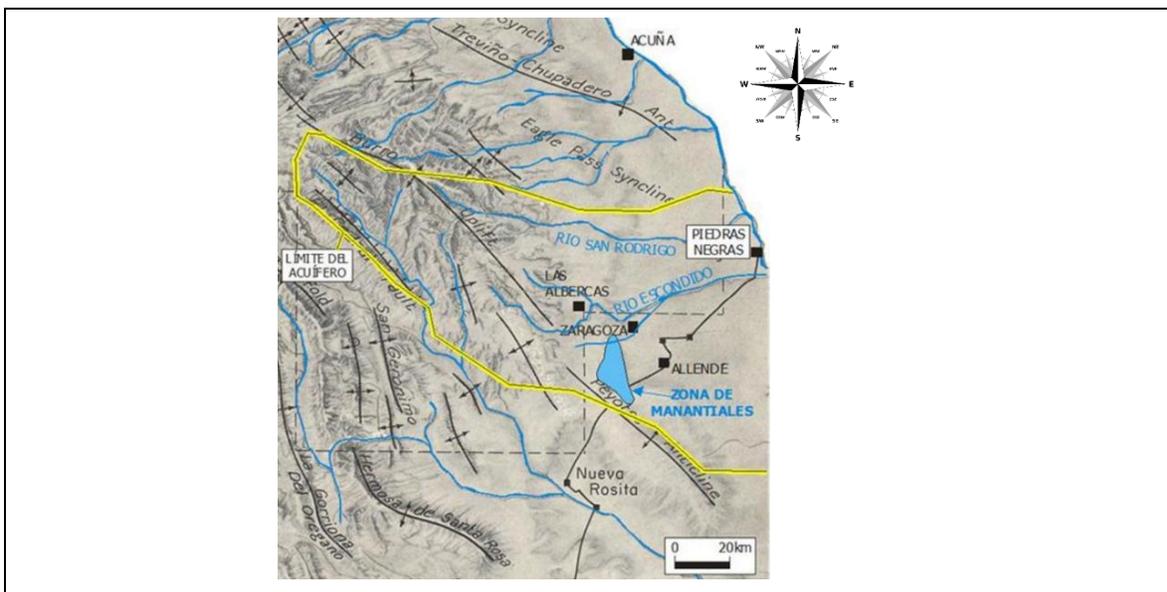


Figura 1.10 Geología estructural
(Gerencia de Aguas Subterráneas (CONAGUA), Mayo 2009)

1.6.4. Hidrogeología del acuífero Allende-Piedras Negras Coahuila

Para ilustrar de manera simplificada la distribución de las rocas en el subsuelo que dan origen al funcionamiento hidrogeológico, en la figura 1.11 se muestra un croquis de una sección geológica regional donde se observa el levantamiento anticlinal que forma la Sierra del Burro, el cual presenta flancos de suave pendiente. En la figura 1.11 se plasman los acuíferos que dan origen a los manantiales de flujo regional y local.

La sierra se puede describir como la mitad de una “gran cebolla”, cuyas capas en la parte superior de la sierra, han sido cortadas por erosión en donde se presenta la zona de recarga del acuífero confinado (Kárstico) por la precipitación que fluye a través de las fracturas de la Formación Salmon Peak. El núcleo corresponde a las rocas permeables del Cretácico Inferior (Ki) las cuales dan origen al acuífero confinado por sus múltiples fracturas y cavernas que recargan al acuífero, alojándolo en las formaciones del Cretácico Inferior, mientras que la porción externa forma una banda anular. En los cañones de la sierra y en el plano geológico, es notable el afloramiento de las capas inferiores o de la parte baja del Cretácico Inferior, algunas de ellas por su poco espesor y posición casi horizontal, semejan curvas de nivel.

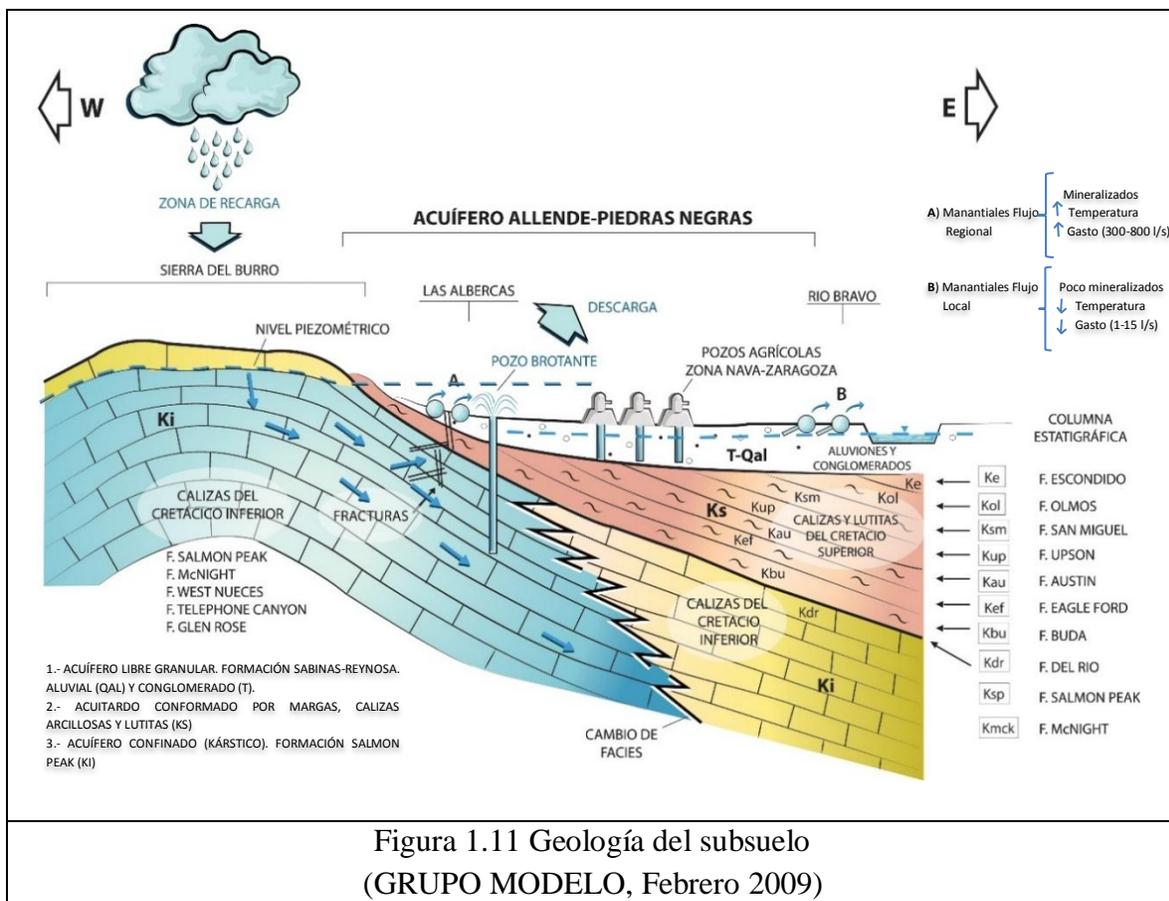
Afloran rocas calizas del Cretácico Inferior correspondientes a las unidades McKnight y Salmon Peak, que forman el flanco oriente de la Sierra del Burro. Estas, al igual que el resto de las formaciones cretácicas, presentan una inclinación de entre 3° y 5° en dirección al oriente.

Rodeando a las formaciones mencionadas, se encuentran unidades del Cretácico Superior (Ks) conocidas como Del Río, Buda, Eagle Ford y Austin. Estas formaciones dan origen a lomeríos, elevaciones topográficas menores y al acuitardo poco permeable (margas, calizas arcillosas y lutitas), mientras que entre El Remolino, El Bambilete, Las Albercas y su prolongación al sur hasta el Río Escondido, se encuentra un valle alargado provocado por la erosión de la Formación Del Río, la cual está constituida por lutitas calcáreas que son más fáciles de erosionar que las calizas. Esto da origen a una morfología que permite identificar claramente el límite entre las rocas del Cretácico Inferior (hacia el poniente de El Remolino y Las Albercas), de las rocas del Cretácico Superior (al oriente del valle entre los mismos poblados mencionados).

Hacia la parte central y oriente de la zona, donde se ubican los poblados de Zaragoza, Morelos, Nava y Allende, se extiende una planicie que se continúa hasta el Río Bravo, la cual está formada por materiales granulares del Terciario (Conglomerado Sabinas-Reynosa (Tpl)), cubiertos por una capa de aluvión Cuaternario (Q). Destaca el Conglomerado Sabinas-Reynosa, el cual constituye un importante acuífero libre que es explotado para uso agrícola e industrial objeto de esta tesina.

En la parte surponiente de los poblados de Zaragoza, Morelos, Nava y Allende, se encuentran importantes manantiales mineralizados de flujo regional el cual asciende a la superficie con elevadas temperaturas a través de las fracturas presentes en las formaciones, descargando en los manantiales entre 300-800 l/s. En esta misma zona se localizan pozos surgentes perforados hasta el acuífero confinado

En la parte nororiente paralela al Río Bravo, emergen manantiales poco mineralizados de flujo local el cual asciende a la superficie con bajas temperaturas a través de las fracturas del Conglomerado Sabinas-Reynosa, descargando en los manantiales entre 1-15 l/s. Dentro del conglomerado existen pozos poco profundos de los cuales se extrae el líquido para uso agrícola e industrial.



2. MARCO TEÓRICO.

2.1. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE.

El balance hídrico no es más que la aplicación del principio de la conservación de masa (Ecuación de la Continuidad) a una cierta región definida por unas determinadas condiciones de contorno. En esta región, que tiene un volumen conocido, y durante un cierto período de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual al cambio de agua en almacenamiento en ese volumen, todo ello medido en masa, aunque puede y suele realizarse en volumen si las densidades pueden considerarse constantes.

Se pueden establecer balances generales, que incluyan las aguas superficiales y subterráneas, y balances parciales; de solo aguas superficiales, de un acuífero, del agua del suelo, de una porción del sistema, etc. En cualquier caso debe considerarse que si las entradas superan las salidas existe una acumulación (aumento de almacenamiento) y lo contrario si las salidas superan a las entradas. El balance general de un acuífero se puede escribir con los diferentes términos expresados en las mismas unidades, como:

- Infiltración en el terreno procedente de la precipitación (IP o Rv)+
- +Infiltración procedente de aguas superficiales (ríos y lagos) (IR)+
- +Entradas subterráneas por límites (Eh)+
- +Entradas subterráneas de otros acuíferos (Q_e)+
- +Recarga artificial (Ra) –
- Descarga de agua subterránea a los cauces (DR) –
- Evapotranspiración de agua del terreno (ET) –
- Salida de agua subterránea por los límites (Sh) –
- Salida de agua subterránea a otros acuíferos (Q_s) –
- Salida de agua subterránea en manantiales (Dm) –
- Extracción de agua subterránea (bombeo) (B) =
- ± Variación en el almacenamiento (final-inicial) (Δh)

Que puede escribirse como:

$$\sum_{i=1}^n E - \sum_{i=1}^n S = \pm \Delta V$$

(Ecuación General de un balance de masas)

$$\underbrace{(IP + IR + Eh + Q_e + Ra)}_{\text{Entradas}} - \underbrace{(DR + ET + Sh + Q_s + Dm + B)}_{\text{Salidas}} = \pm \Delta h \quad (\text{ec.2.1})$$

Los términos Eh, Q_e, Sh, Q_s, se pueden calcular si se conocen las transmisividades, los gradientes piezométricos y la longitud del contorno afectado aplicando la Ley de Darcy.

Los términos IR, DR y Dm se deduce a partir de aforos en ríos y manantiales; no obstante, la parte correspondiente a la recarga y descarga en los cauces no siempre es de fácil evaluación a veces menores que el margen de error de los aforos, o de los términos del balance de aguas superficiales. IR y DR se puede estimar a partir de métodos hidrodinámicos (permeabilidad y gradientes). IP es el valor de la pluviometría menos el escurrimiento superficial menos la evaporación en superficie menos la retención superficial, ET depende del tipo de terreno, vegetación y estado de humedad del suelo (Custodio, 1976).

3. MÉTODOS Y MATERIALES.

En este capítulo se estipula la metodología que se usó para determinar el balance en el área caso estudio acuífero Allende-Piedras Negras en el estado de Coahuila. Se definen los criterios tomados que determinan cada incógnita de la ecuación de balance.

3.1. ÁREA DE BALANCE

La elección de los límites de la región en la cual se efectuará el balance puede simplificar mucho los términos de entrada y salida; por ello conviene tomar límites que correspondan a zonas impermeables (estancas) o poco permeables a divisorias de aguas superficiales y/o subterráneas (no hay flujo a través de ellas), líneas de costa u orillas de ríos o lagos (nivel constante), así como aquellos que correspondan a zonas uniformes en lo que respecta a la pluviometría, vegetación, características del terreno, variaciones de niveles, etc. (Custodio, 1976)

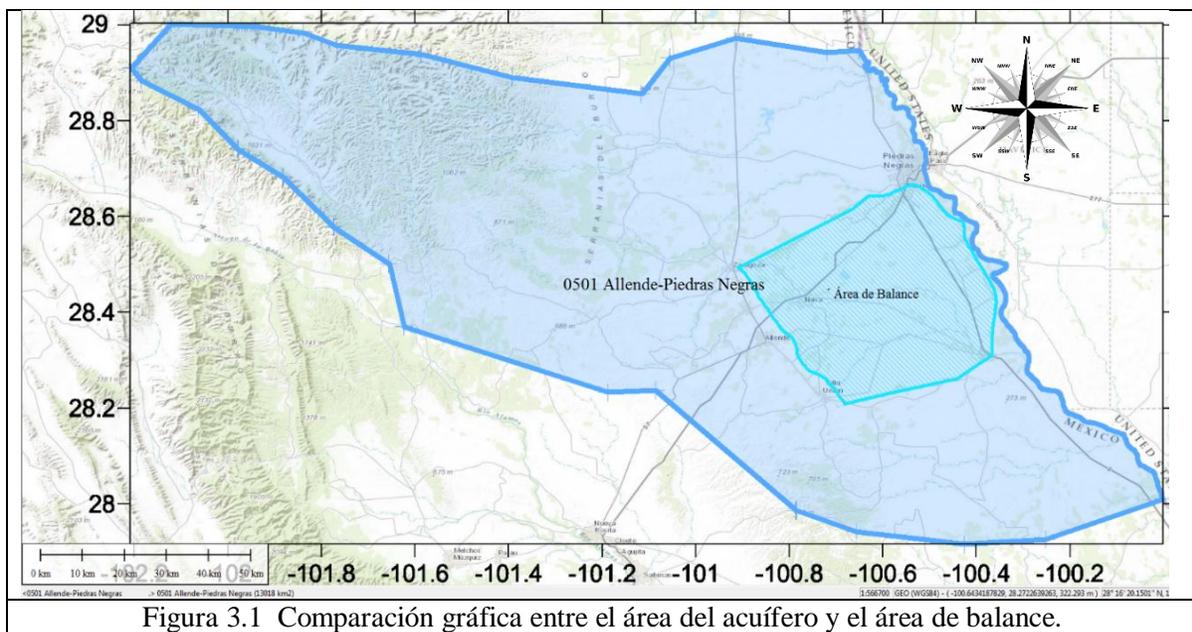
El área de balance se seleccionó tomando como base criterios geográficos, geológicos e hidrogeológicos. Primeramente, el área se acotó de manera gruesa considerando la extensión superficial del acuífero libre (Conglomerado Sabinas-Reynosa), y algunos límites geográficos, tales como el río Escondido al norte, el río Castaños al sur, el río Bravo al este y la Serranía El Burro al oeste.

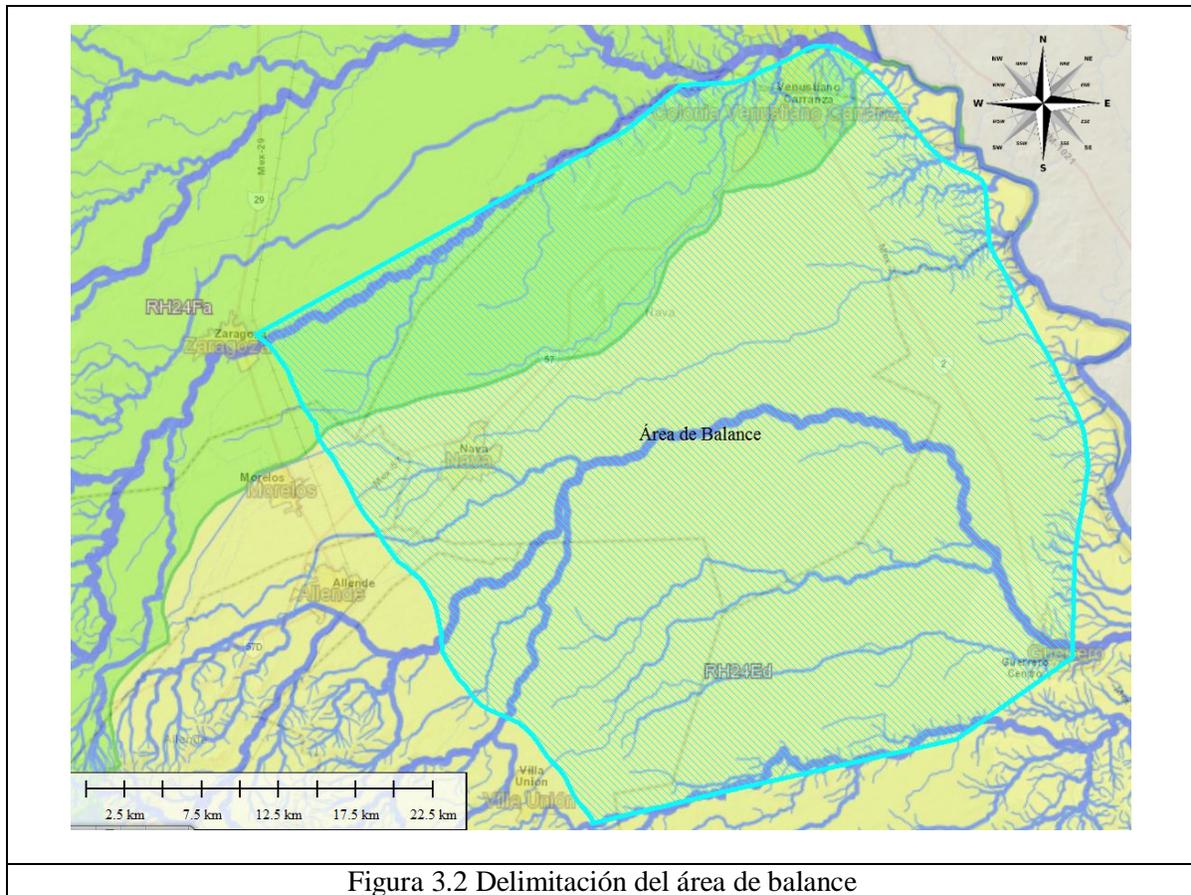
Tomando como base los anteriores límites, se analizaron diversos atributos hidrogeológicos para afinar el área de balance. Por ejemplo, se determinó que en el límite occidental, el conglomerado se acuña cerca del contacto con las calizas Cretácicas de la Formación Austin, lo que ocasiona una notable disminución en la potencia del conglomerado, y por ende, una disminución en el espesor saturado del acuífero. Por tanto se consideró pertinente desplazar el límite occidental hasta una zona donde se estimara un espesor saturado mínimo de 10 m, con objeto de evaluar adecuadamente las entradas subterráneas en ese sector.

Por otra parte, el límite oriental se ajustó con base en la distribución espacial de los pozos existentes con lo que se cuenta con información piezométrica tanto del 2002 como del 2006.

Con estos antecedentes, se estableció un área de balance para el período 2002-2006, de 1,757 km² lo que representa un 13.5% del acuífero Allende-Piedras Negras, acotada por la CNA en 12,961 km².

De modo ilustrativo se presenta en la figura 3.1 la comparación gráfica entre el área del acuífero y el área de balance. Adicionalmente la figura 3.2 muestra con mayor detalle la delimitación del área de balance.





3.2. BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA (2002-2006).

Consistió en evaluar y cuantificar las componentes hídricas que influyen en el almacenamiento en una porción del acuífero Allende-Piedras Negras (0501) para un determinado lapso de tiempo. El esquema de funcionamiento del balance geohidrológico se dividió en 3 componentes: (1) entradas de agua, (2) salidas de agua y (3) variación (o cambio) en el volumen almacenado que acontecieron en un espacio y tiempo específico. Para ello, fue necesario conocer las componentes dominantes que intervienen en el área de estudio, para plantear la ecuación de balance, que es una representación matemática de la interacción de los términos que influyen de manera directa en el almacenamiento de un acuífero.

La identificación y valoración de los términos que intervienen en el balance de aguas subterráneas se realizaron a partir de la zonificación del área y la información disponible, que fueron definidas según sus características particulares, en relación con sus

componentes de recarga y descarga de cada una de ellas. Los términos tomados en cuenta se detallan en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Términos que intervienen en el balance

Entradas	Salidas
1. Entrada subterránea (Eh)	1. Salida subterránea (Sh)
2. Recarga vertical (Rv)	2. Bombeo y extracciones de agua subterránea (B)
3. Recarga artificial (Ra)	3. Descarga natural de agua subterránea a manantiales (Dm)
4. Retorno de agua por riego (Rr)	

De manera que la ecuación puede ajustarse de la siguiente forma:

$$\sum_{i=1}^{n=4} E - \sum_{i=1}^{n=3} S = \pm \Delta V \dots (\text{ec. 3.1}), \text{ o bien de manera desglosada:}$$

$$(Eh + Rv + Rr + Ra) - (Sh + B + Dm) = \pm \Delta V \dots (\text{ec. 3.2})$$

Donde las entradas totales al sistema están constituidas por: (1) entradas por flujo subterráneo a través del límite occidental del área de balance provenientes de la Sierra del Burro (Eh). (2) recarga vertical (Rv), o bien, cantidad de agua de lluvia infiltrada al acuífero (Ip). (3) recarga artificial (Ra) llevadas a cabo por MICARE y CFE, y (4) retornos de agua por actividades de riego en zona agrícolas (Rr).

$$Rv = Ip \dots (\text{ec. 3.3})$$

A su vez, las salidas totales del sistema están constituidas por: (1) salidas por flujo subterráneo a través del límite oriental del área de balance siendo este el flujo base del Río Bravo en el límite oriental del área de balance (Sh). (2) bombeo y extracciones de agua subterránea (B) generadas por los principales usuarios, y (3) descarga natural de agua subterránea a manantiales (flujo local).

$\pm \Delta V$ es el cambio o variación del almacenamiento en un período analizado (en este caso 2002-2006), estimada en función del producto del área de balance (Ab), el valor medio de la variación piezométrica en el período y el rendimiento específico promedio de la zona de balance el cual lo define la litología ($0.05 \leq Sy \leq 0.15$) concretado de la siguiente forma (ec. 3.4).

$$\pm \Delta V = \pm (Ab)(\Delta h)(Sy) \dots (\text{ec. 3.4})$$

De la ecuación planteada, el único término desconocido es la recarga vertical (Rv), siendo la incógnita por determinar, ya que el resto de los términos es posible estimarlos, por lo que el planteamiento final queda de la siguiente manera:

$$Rv = Ip = \pm \Delta V + Sh + B + Dm - Eh - Ra - Rr \dots (\text{ec. 3.5})$$

Una vez identificados los términos, se realizó la valoración de cada uno de ellos, a partir de las metodologías correspondientes, tales como la caracterización de redes de flujo para la cuantificación de caudales subterráneos, la hidrometría subterránea y el cambio en el almacenamiento. A continuación se describirá la metodología y materiales que se llevaron a cabo en la ejecución del balance de aguas subterráneas del acuífero libre granular (conglomerado Sabinas-Reynosa) de Allende-Piedras Negras, Coahuila.

El balance como fue mencionado se efectuó en una superficie de 1757 km², tomando los pozos que se encuentran dentro y aledaños a esta. Para la conformación de las líneas equipotenciales se recabó la información de la posición geográfica, nivel estático y la cota del terreno de 157 pozos para el 2002 y 51 pozos para 2006 existentes en esos años, obteniendo la carga hidráulica de los pozos en el Plano con la diferencia del nivel estático y la cota del terreno.

3.2.1. CÁLCULO DE ENTRADAS (EH) Y SALIDAS (SH) POR FLUJO SUBTERRÁNEO.

Se cuantificó con la ley de Darcy el caudal “*Q*” que pasa por cada celda o canal de flujo el cual entra el área de balance (entre las equipotenciales 340-330) así como el que sale (entre las equipotenciales 240-230) de cada celda. Se asociaron los términos de la figura 3.3 con los medidos de cada celda que aportan los valores para la solución de la ecuación. La recarga total por flujo horizontal entrante es la suma de los caudales de cada uno de los conductos establecidos.

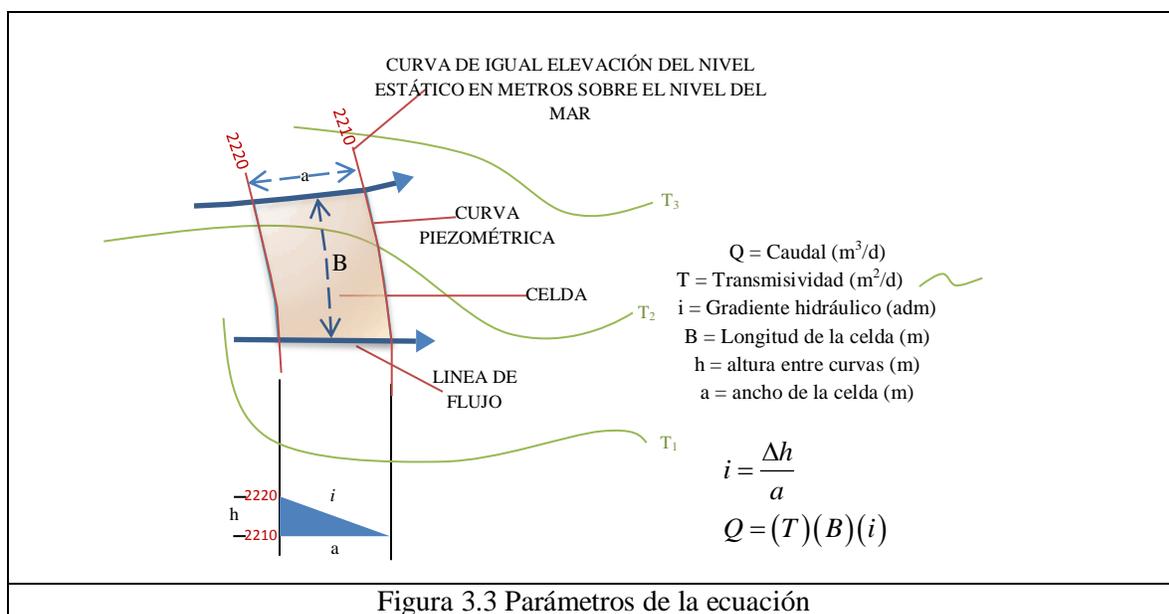


Figura 3.3 Parámetros de la ecuación

El caudal subterráneo que sale del área de balance se dirige particularmente al Río Bravo y Río Escondido y se estimó a partir de las configuraciones de la elevación del nivel estático y red de flujo subterráneo para el 2002 y 2006, siguiendo la misma metodología explicada anteriormente. Estos caudales, representan por ende, los flujos bases de los ríos.

3.2.2. RECARGA VERTICAL (R_v o IP).

La recarga vertical representa únicamente la infiltración por agua de lluvia, lo que constituye la incógnita de la ecuación de balance. Sin embargo es evidente que la recarga vertical está en función de la cantidad de la precipitación que se registre en el período de balance. Como se detalló en el capítulo de Hidrografía de la presente tesina, la interpretación de los datos de precipitación determinaron que el período de balance representa un período húmedo, con excepción de 2002 y 2006, donde se determinaron anomalías negativas indicativas de años secos (bajo la media de 428). Pese a ello, 3 años del período indican un período húmedo, por lo que se estima una recarga vertical alta. Tomando en consideración el análisis de la información existente, se estima un orden de magnitud de la recarga vertical equivalente del 5 al 10% de la precipitación promedio en la zona de proyecto (Hernández-Espriú, 2012, comunicación personal). Por tanto, si la precipitación media es de aproximadamente 428 mm, la lámina esperada de recarga vertical del acuífero, deberá ser del orden de 21 a 43 mm/año, considerando un valor uniformemente repartido en el área de balance.

3.2.3. RETORNOS POR RIEGO (R_r).

De acuerdo con la información analizada, CFE (2002) caracterizó fundamentalmente cinco zonas de riego en la zona de estudio, dedicadas a diferentes tipos de cultivos, las cuales fueron denotadas como zonas de cultivo de los manantiales: Allende, Sabino, San Esteban, Morelos y Nava. Durante los trabajos de campo, La CFE, determinó el volumen de agua que ingresaba a cada zona por km^2 , y también determinó que del volumen de agua que ingresa a cada zona de cultivo, solamente el 10% se infiltra al subsuelo (por la cubierta elíptica superior), lo cual fue definido con base en consideraciones sobre la precipitación, evaporación potencial, deficiencia de humedad y uso consuntivo del suelo cultivado.

Con estos datos, se calcularon los retornos por riego, obteniendo primeramente el caudal que ingresa a cada zona de cultivo multiplicando el área de cultivo contenida en el área de balance por el caudal que ingresa a cada sector cultivado por km^2 . Posteriormente, se aplicó un coeficiente de infiltración de 0.1 al caudal que ingresa a cada zona de cultivo, y se obtuvo el caudal que se infiltra al subsuelo en cada sector cultivado. Por lo tanto la suma del caudal de infiltración en cada zona de cultivo representa una recarga al acuífero libre

Por lo tanto, la recarga artificial por cada año del período de balance, constituyó meramente un dato proporcionado por MICARE, incluido en el balance como una entrada importante de agua al sistema acuífero.

Adicionalmente la CFE en su estudio de modelación (2002), menciona que parte del agua de uso industrial utilizada por la CFE en sus plantas Carboeléctricas I y II es retornada al acuífero por medio de la implementación de un estanque de enfriamiento, que aporta al acuífero alrededor de 100 l/s, por lo que dicho caudal de inyección fue tomado en cuenta como parte del término de recarga artificial.

3.2.5. EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (B).

Los datos de bombeo y extracciones tal como se detallan en el capítulo de Hidrometría del presente informe, se calcularon para tres usuarios principales: (1) agricultores y pecuarios cuyo caudal utilizado fue el calculado por CFE en su censo de aprovechamientos (1995); (2) el achique (conjunto de pozos que abaten el nivel freático para trabajar en seco) de MICARE, cuyos datos fueron proporcionados por la propia minera, y (3) CFE, cuyo caudal utilizado fue el relativo a la concesión de CFE especificada en el REPDA.

Los datos de bombeo se separaron por año, de modo que se pudo utilizar la suma de los bombeos por cada año del período de balance (2002, 2003, 2004, 2005 y 2006).

3.2.6. DESCARGA A MANANTIALES. (Dm)

Los manantiales existentes en la región se dividen en 2 grupos. El primero y más importante que corresponde a vertedores de demasías del gran receptáculo de agua subterránea que constituye el acuífero en rocas calizas de la Sierra del Burro en donde se encuentran los 12 manantiales principales.

Estos manantiales se localizan al poniente de las poblaciones de Zaragoza, Morelos y Nava y, al sur y oeste de Villa Unión los cuales no se encuentran dentro del área de balance y no pertenecen al acuífero libre (Se derivan de un flujo regional en el acuífero Kárstico).

Existen 6 grandes manantiales en la zona de Nava-Allende los cuales son:

Manantial las Ánimas,	Manantial Cabeceras,
Manantial El Sabino,	Manantial Morelos (Las Corrientes),
Manantial Nava (El Pesebre),	Manantial Allende.

En la zona de Villa Unión existen 6 manantiales que, en comparación con los anteriores, son de menor caudal. Corresponden a los siguientes:

Manantial Santa Mónica	Manantial agua potable Villa Unión
------------------------	------------------------------------

Manantial Ciénega Grande
Manantial Hacienda de Guadalupe

Manantial Parque de La Luz
Manantial Santa Ana

El segundo grupo está constituido por manantiales localizados en el sector oriental del área de balance, en las cercanías del río Bravo (flujo local). La determinación de la descarga de agua subterránea se determinó en campo por medio de mediciones de aforo en secciones levantadas con molinete y flujómetro por la empresa COPEI (2006).

Para la estimación del término “ D_m ”, se tomaron en cuenta los siguientes manantiales que quedan dentro del área de balance: Santo Domingo, Ojito Blanco (Gro 1), Guerrero (Gro 2), Olivares, San Ramón, Los Rodríguez 1, San José 1 y San Vicente 1.

El cálculo de la descarga total se realizó sumando los caudales de todos los manantiales para 2002 y 2006. Posteriormente se calculó la media del caudal total y se dividió entre los 5 años del período de balance, para estimar el promedio línea de la descarga de agua subterránea a los manantiales por año.

3.2.7. ANÁLISIS PARA DETERMINAR LA DIFERENCIA DE NIVELES DEL ACUÍFERO LIBRE 2002-2006 (ΔH).

En aquellos balances donde es posible cuantificar todos los términos ΔV se obtiene directamente de restar la suma de las entradas menos la suma de las salidas. Sin embargo en la gran mayoría de las ocasiones cuando la recarga vertical constituye la incógnita de la ecuación, ΔV suele calcularse con base en la ecuación 3.6.

Partiendo de que el volumen almacenado cuantifica el volumen de agua perdido o agregado a la zona en estudio el cual matemáticamente se puede relacionar el área de balance, la recuperación o abatimiento del nivel regional de la zona y el coeficiente de almacenamiento en la zona con la ecuación 3.6.

$$\pm\Delta V = (Ab) (\Delta h) (Sy) \dots \text{(ec. 3.6), donde:}$$

Ab: Área de balance. Δh : Recuperación o abatimiento del nivel regional del acuífero.

Sy: Coeficiente de almacenamiento. Charles Willard Fedder (storativity), estimó el valor en acuíferos libres de 0.02 a 0.30, denominado rendimiento específico (Specific Storage, Sy).

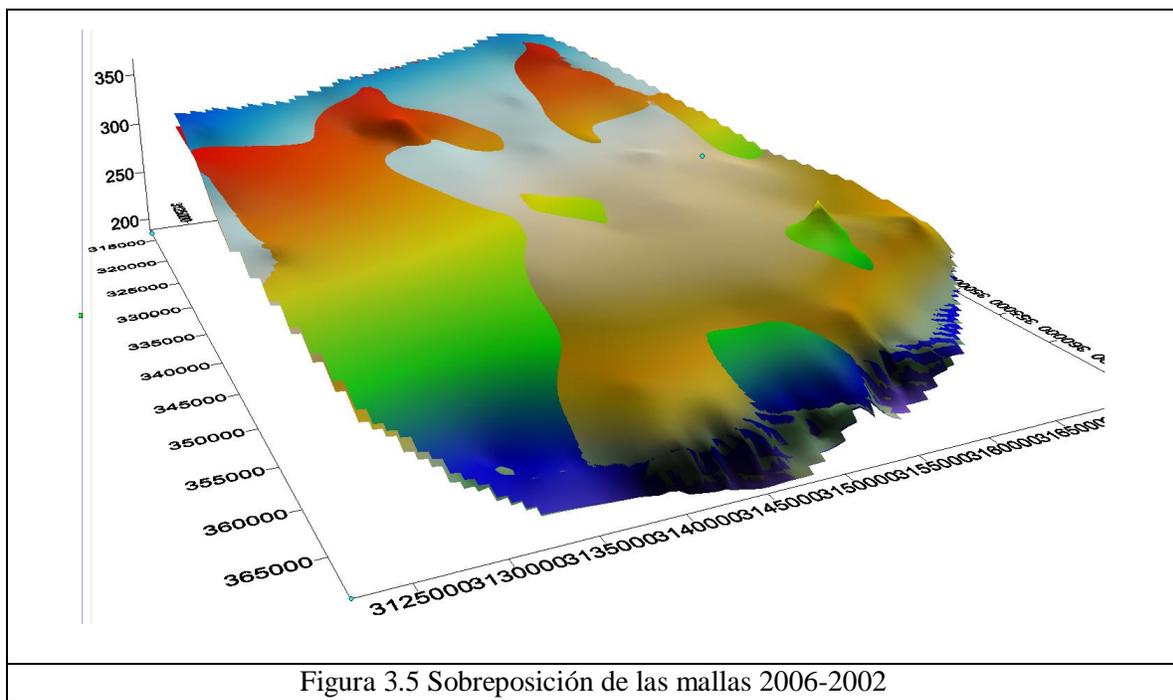
ΔV = Variación en el almacenamiento.

El valor del rendimiento específico se retomó del valor promedio de Sy de diferentes autores citados en este trabajo, derivado de pruebas de bombeo, que resulta de $Sy = 0.07 = 7\%$ (CFE, 2002). El significado hidrogeológico del término Sy corresponde al volumen de

agua que cede una columna de acuífero (de base unitaria y altura equivalente al espesor saturado) cuando el nivel freático desciende una unidad, este es igual a la porosidad eficaz (ϕ_{EF}).

Δh es un término complicado de cuantificar, debido a que durante cierto tiempo, los niveles regionales no se abaten o se recuperan de manera homogénea, sino que existen comportamientos locales del nivel que generan que en algunos sectores la carga hidráulica disminuya y en otros aumente dependiendo de las características locales hidráulicas del acuífero y las condiciones locales de extracción y recarga. Considerando lo anterior, se optó por calcular de manera directa el término, para multiplicar el volumen ganado o perdido durante el período de balance, por S_y .

Al contar con las dos configuraciones potenciométricas de 2002 y 2006, se calculó el volumen entre éstas dos sobreponiendo las mallas del año más cercano al más lejano (2006-2002 representado en la figura 3.5) utilizando el comando malla/volumen (grid/volume) del Software Surfer. Este comando devolvió el volumen global, los volúmenes de corte y relleno(ΔV), áreas planas entre otros que existe entre las dos mallas.



Hay que tener cuidado al generar este comando de volumen, ya que se debe de contar con la misma cantidad de filas y columnas en cada malla (grid) así como el espaciamiento en x y y .

Surfer calcula la diferencia de carga hidráulica de las dos superficies para cada celda de la malla, y posteriormente, realiza una integración doble para calcular, por medio de la multiplicación de la diferencia de cargas y el área en cada celda de la malla, la sumatoria total de los diferenciales de volumen de cada celda. Esto quiere decir que Surfer realiza el cálculo de la diferencia global entre cargas hidráulicas entre ambas superficies, multiplicada por el área total del balance, y por tanto, calcula la diferencia de volumen de agua entre las dos configuraciones o bien, $Ab*\Delta h$.

Por último, ΔV (Tabla 4.9) se obtiene de multiplicar el término (arrojado por Surfer) por S_y (7%). Esto implica que del volumen calculado ($Ab*\Delta h$) el acuífero es capaz de ceder solamente un 7% a través del drenado físico de los poros del conglomerado, aspecto controlado por la porosidad efectiva del medio (ϕ_{EF}) siendo entonces $\phi_{EF} \approx S_y$ en un acuífero libre para obtener el volumen incorporado que el acuífero ha ganado o perdido durante el período de balance.

Finalmente se despejó el término Δh de la ecuación 3.6 y se sustituyeron los términos conocidos de la ecuación.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

A continuación se describen los resultados del balance hidrogeológico del acuífero libre de Allende-Piedras Negras, para el período 2002-2006.

4.1. DIRECCIÓN DE FUJO SUBTERRÁNEO Y PIEZOMETRIAS.

La figura 4.1 fue georeferenciada a partir de coordenadas WGS84 UTM (Universal Transverse Mercator) 14N que va de 312,000 a 368,000 en las abscisas y de 3,120,000 a 3,173,000 en el eje de las ordenadas.

La dirección del flujo subterráneo viene generalmente del suroeste (SW) y se desplaza hacia tres direcciones diferentes, en el área superior (de los 3,150,000 hacia arriba) el flujo viene del oeste cambiando paulatinamente su rumbo hacia la parte norte del área de balance, en el área media (entre los 3,150,000 y 3,140,000) el flujo se dirige de poniente a oriente y en el área inferior (por debajo de los 3,140,000) hacia el noroeste modificando su sentido de manera gradual hacia el suroeste. Los niveles piezométricos están orientados de suroeste a noroeste con una elevación que oscila entre los 220 msnm y 350 msnm. Entre los 270 y 280 msnm la isopieza se extiende en una amplia zona de balance mientras que las que se encuentran cercanas al Río Bravo tienden a reducirse.

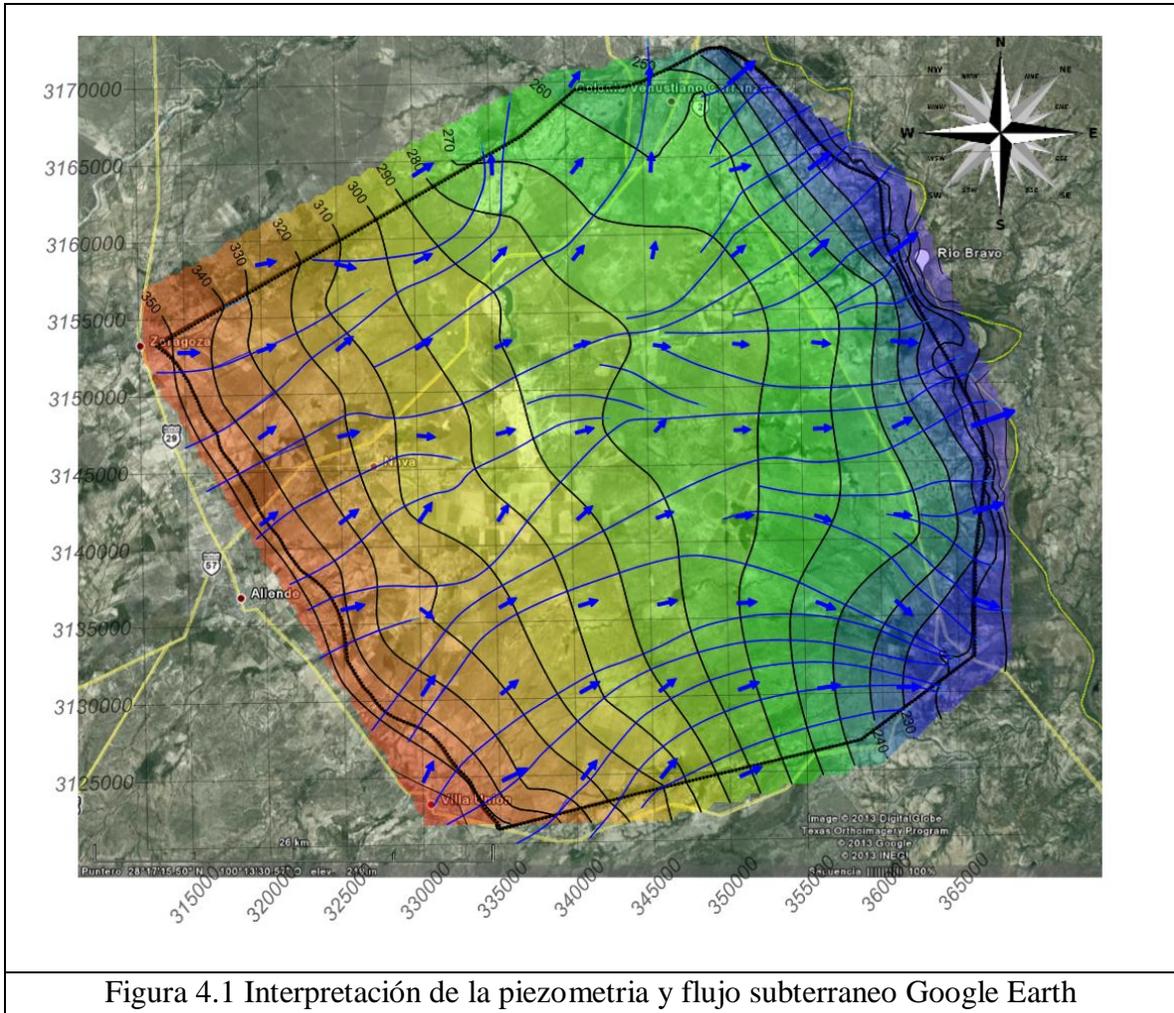
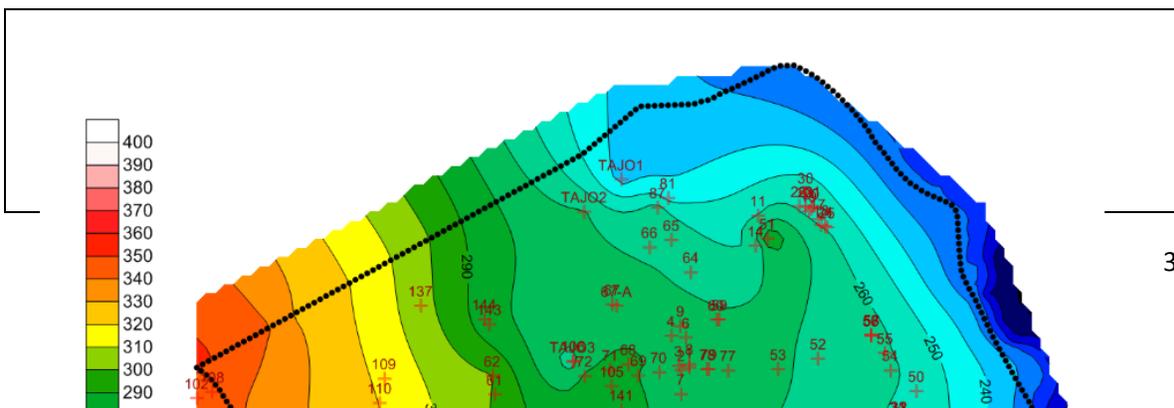


Figura 4.1 Interpretación de la piezometria y flujo subterráneo Google Earth
 4.2. CÁLCULO DE ENTRADAS (EH) POR FLUJO SUBTERRÁNEO.

Con ayuda del programa Surfer se generó una malla (grid) para cada año (2002,2006) creada con la posición geográfica de cada pozo (UTM) y la elevación del nivel estático mediante el método de Kriging el cual usa una interpolación de modelos de elevación digital. Dicho método provee, a partir de una muestra de puntos, ya sea regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida (FAO, 2013). Con las mallas (grids) de los dos años se crearon contornos para identificar las líneas equipotenciales (isoyetas) que establecen la elevación del nivel estático dentro el área de balance (Figura 4.1, 4.2).



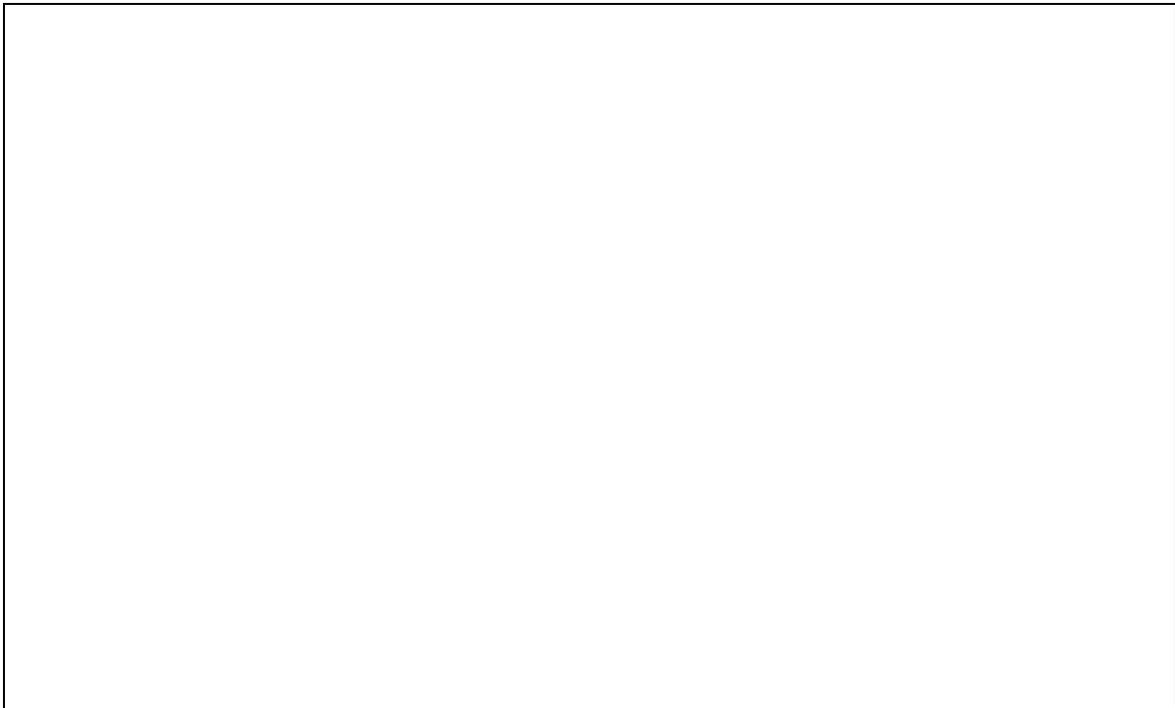


Figura 4.1 Elevación del nivel estático 2002 (SURFER)

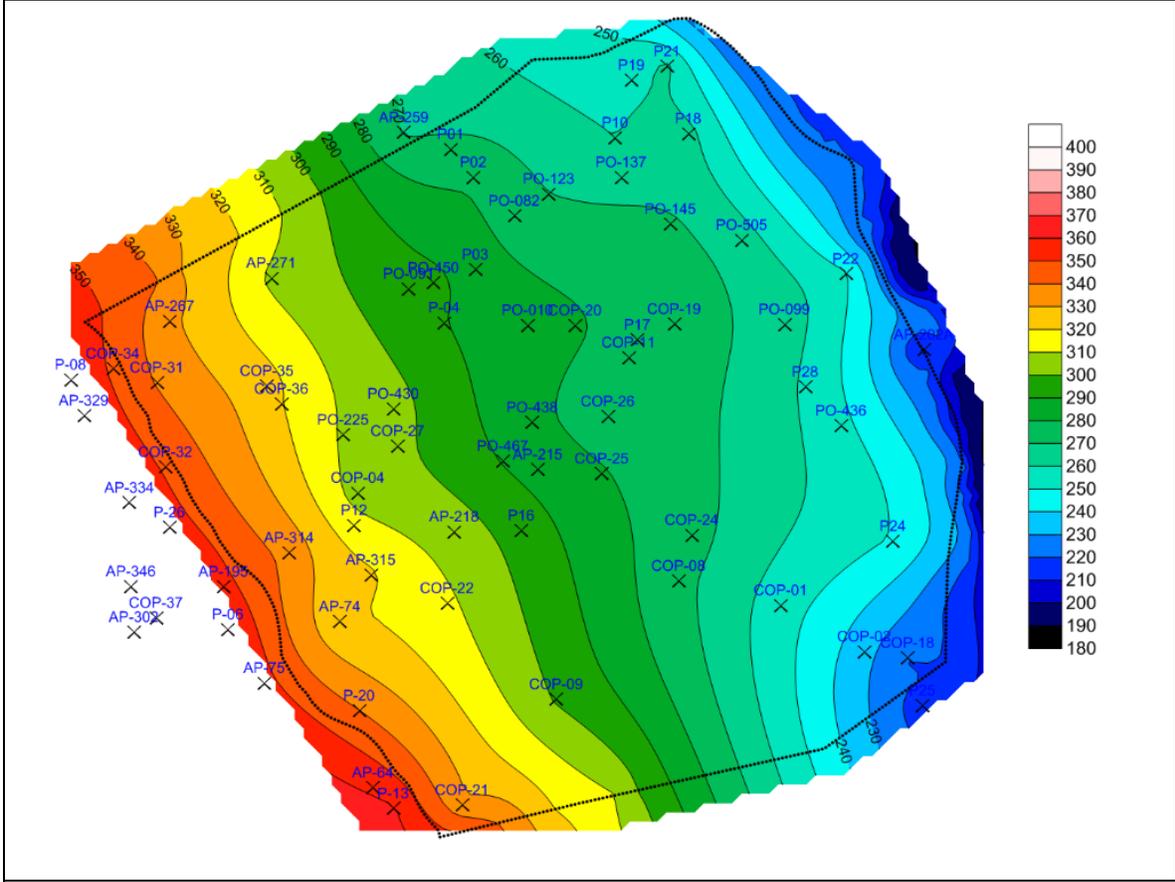
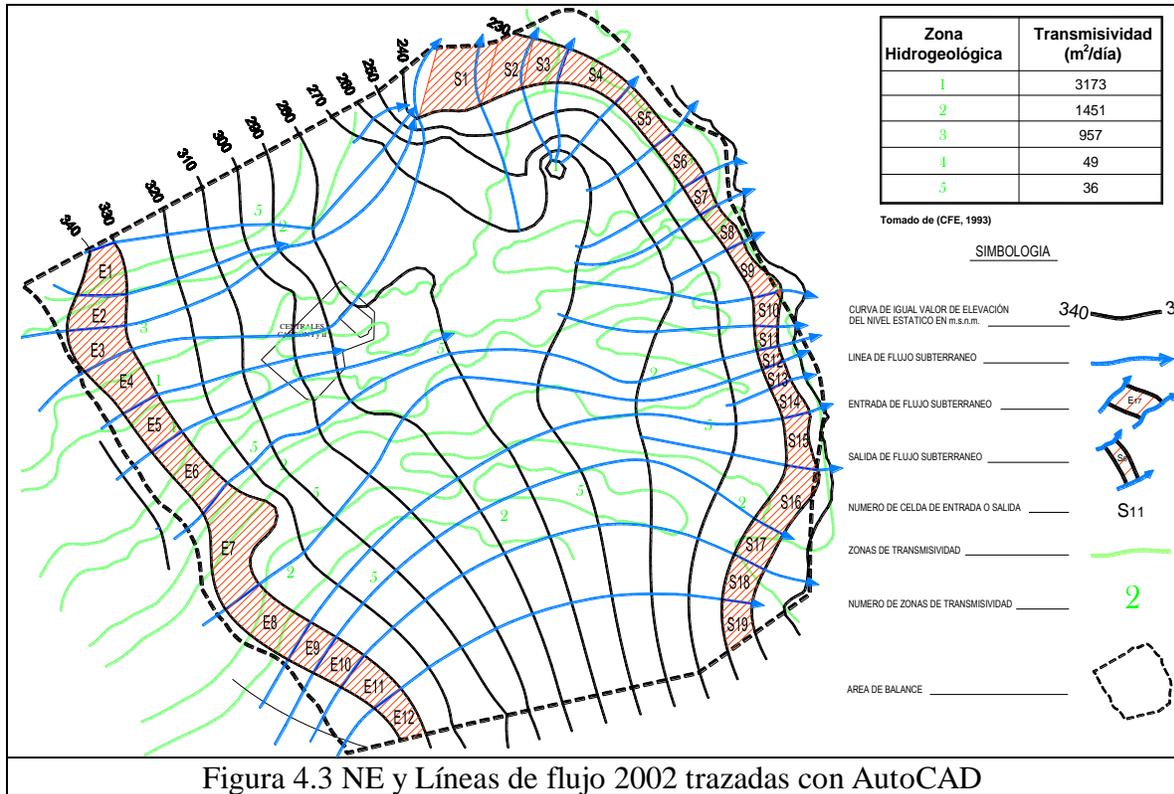


Figura 4.2 Elevación del nivel estático 2006 (SURFER)

Conseguidas las líneas equipotenciales se trazaron líneas perpendiculares a ellas (utilizando programa CAD), las cuales representan la red del flujo subterráneo del acuífero libre para esos dos años y se georeferenció el plano de transmisividad (T) 2002 de CFE para conocer su valor en todas las celdas (Figuras 4.3, 4.4). Se establecieron celdas de entrada y salida del área de balance. Partiendo de la red de flujo, se calculó el caudal que pasa subterráneamente para cada celda o canal de flujo denotado a partir de isopiezas o curvas equipotenciales y líneas de flujo (GRUPO MODELO, Febrero 2009).



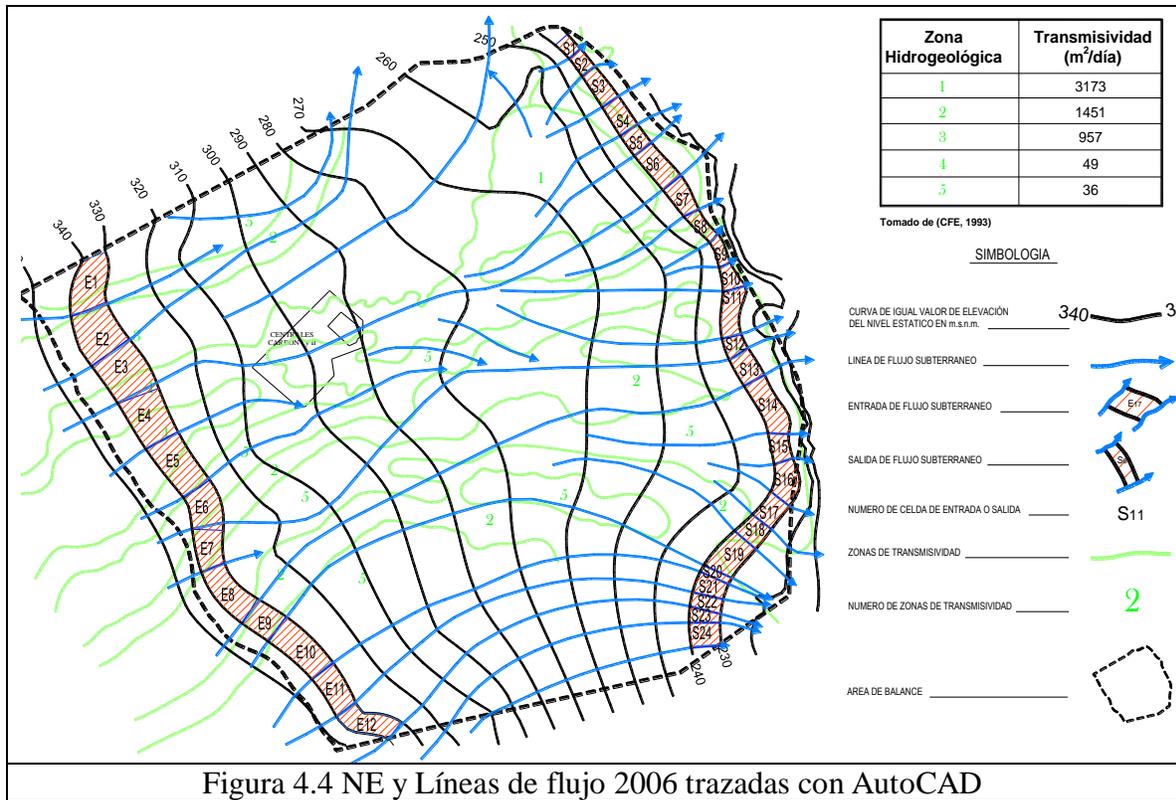


Figura 4.4 NE y Líneas de flujo 2006 trazadas con AutoCAD

Las entradas subterráneas se definieron con base en las configuraciones de la red de flujo subterráneo para el 2002 y 2006. En el sector occidental del área de balance se generaron celdas similares a un cuadrado, los cuales se numeraron para mayor facilidad (E1, E2 ,,). En la figura 4.3 se aprecian las entradas subterráneas para 2002 mientras que en la figura 4.4 se aprecian las entradas subterráneas para 2006. Se retomaron los parámetros hidráulicos determinados por la CFE (1993), por lo que se superpusieron las zonas de transmisividad (T) a la configuración de las celdas de entrada, de manera que se aplicaron las 5 zonas de T a las distintas celdas de entrada usando la ley de Darcy. En la tabla 4.1 se muestran los resultados de la cuantificación del caudal subterráneo de entrada para el 2002, mientras que en la tabla 4.2 se muestran los resultados de la cuantificación del caudal subterráneo de entrada referente al 2006 expresados en Mm³/año.

Tabla 4.1 Cálculo del caudal de entrada por flujo subterráneo 2002.

Celda	Equi-1	Equi-2	L (m)	i	B (m)	T (m ² /día)	Q (m ³ /d)
E1	340	330	1719.83	0.0058	3110.89	743.5	13448.70
E2	340	330	3354.39	0.0030	2545.97	957	7263.61
E3	340	330	3945.72	0.0025	3090.24	957	7495.12
E4	340	330	3528.40	0.0028	3849.99	2065	22532.10
E5	340	330	2648.86	0.0038	3246.11	49	600.48
E6	340	330	2468.69	0.0041	5432.37	1086	23897.54
E7	340	330	2660.77	0.0038	6768.85	743.5	18914.19
E8	340	330	2836.18	0.0035	5461.71	743.5	14317.78
E9	340	330	2964.27	0.0034	1915.79	36	232.67
E10	340	330	2876.84	0.0035	2106.45	36	263.60
E11	340	330	2661.54	0.0038	2656.25	36	359.28
E12	340	330	2233.54	0.0045	2824.67	36	455.28
						suma	109780.36
						Mm ³ /año	40.07

Tabla 4.2 Cálculo del caudal de entrada por flujo subterráneo 2006

Celda	Gradiente				B (m)	T (m ² /día)	Q (m ³ /d)
	Equi-1	Equi-2	L (m)	i			
E1	340	330	1685.32	0.0059	4081.36	743.5	18005.37
E2	340	330	2639.42	0.0038	3785.14	957	13724.17
E3	340	330	3208.96	0.0031	3156.93	2065	20315.13
E4	340	330	3008.07	0.0033	3720.13	1611	19923.48
E5	340	330	2518.91	0.0040	4275.50	1611	27344.54
E6	340	330	2177.65	0.0046	2295.26	36	379.44
E7	340	330	2134.38	0.0047	3082.03	1451	20952.26
E8	340	330	1727.48	0.0058	4601.76	36	958.99
E9	340	330	2018.58	0.0050	2192.08	1451	15757.13
E10	340	330	2118.15	0.0047	4004.01	36	680.52
E11	340	330	1868.64	0.0054	3110.69	36	599.28
E12	340	330	1602.93	0.0062	4087.50	36	918.01
						suma	139558.33
						Mm ³ /año	50.94

Promedio anual de entradas subterráneas:
de balance:

$$(40.07 + 50.94) / 2 = 45.505 \text{ Mm}^3/\text{año}$$

Entradas subterráneas en el período

$$45.505 * 5 = 227.525 \text{ Mm}^3 / 5 \text{ años}$$

4.3. RECARGA VERTICAL (Rv o IP).

La recarga vertical es uno de los términos que mayor incertidumbre implica su cálculo. Se evaluó al final una vez que se contó con la información para calcular el cambio del almacenamiento (ΔV), así como las entradas y salidas por flujo subterráneo, su valor será despejado de la ecuación de balance:

$$R_v + R_r + R_a + E_h - B - S_h - D_m = \pm \Delta V \dots \dots (1) \text{ (ec 3.2)}$$

Donde:

- Rv: Recarga Vertical
- Rr: Recarga por retornos de riego
- Ra: Recarga artificial
- Eh: Entradas por flujo subterráneo horizontal
- B: Bombeo
- Sh: Salidas por flujo subterráneo horizontal
- Dm: Descarga a través de manantiales.
- (ΔV): Cambio de almacenamiento.

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$Rv = +B + Sh + Dm \pm \Delta V - Eh - Ra - Rr \dots \dots \dots (2) \text{ (ec. 3.5)}$$

se consiguió el valor estimado en $Mm^3/año$ para el balance.

4.4. RETORNOS POR RIEGO (Rr).

Este componente de recarga debido a la infiltración de los excedentes del riego agrícola, se estimó en una superficie de 193.33 km^2 de las 5 zonas de cultivo (tabla 4.3) obtenidas a través de imágenes de satélite, las cuales se multiplicaron por su respectivo caudal que ingresa al cultivo por km^2 y por un coeficiente de infiltración de 0.10, tomando en cuenta la presencia de caliche y en menor grado arcillas en la capa superficial del suelo. Con esto se obtuvo un volumen de infiltración por retornos por riego de $6.23 \text{ Mm}^3/año$.

Tabla 4.3 Resultados de retornos por riego (2002).

Zona de Cultivo	Dentro de Área de Balance (km^2)	Fuera de Área de Balance (km^2)	Total acumulado (km^2)	Caudal que ingresa al cultivo por km^2 (m^3/d)	Caudal que ingresa al área de cultivo (m^3/d)	Coefficiente de infiltración	Lamina de recarga ($\text{m}^3/\text{día}$)
Manantial Sabino	26.75	16.25	43	518.40	13867.65	0.10	1386.77
Manantial Morelos	2.75	30.25	33	1728.00	4745.97	0.10	474.60
Manantial Nava	103.00	0.00	103	864.00	88992.00	0.10	8899.20
Manantial Allende	60.83	31.17	92	1036.80	63068.01	0.10	6306.80
Manantial San Esteban	0.00	6.00	6	777.60	0.00	0.10	0.00
	193.33	83.67	277.00			Retornos Totales de agua por riego (2002)	17067.36
						($\text{Mm}^3/año$)	6.23
						($\text{Mm}^3/5 \text{ año}$)	31.15

Retornos por riego en todo el período de balance: $6.23 * 5 \text{ años} = 31.15 \text{ Mm}^3 / 5 \text{ años}$

4.5. RECARGA ARTIFICIAL (Ra).

La recarga artificial fue obtenida de los diferentes estudios que se le han realizado a este acuífero, dentro de los que destacan los hechos por compañías como MICARE (a través de los estanques de recarga donde infiltra el agua extraída por el achique en los tajos de explotación de carbón) y CFE. Dentro de los que resaltan los obtenidos por MICARE concentrarse en la misma área de estudio obteniendo un volumen promedio anual de recarga artificial de 54.10 Mm³/año.

Tabla 4.4 Caudales de recarga artificial.

Año		Caudal de recarga artificial (Mm ³ /año)
2006		47.04
2005		82.18
2004		81.36
2003		25.83
2002	MICARE	30.95
	CFE	3.15
Total en el período	(Mm ³ /5 años)	270.51
	(Mm ³ /años)	54.102

Datos proporcionados por MICARE y CFE

4.6. CÁLCULO DE SALIDAS (SH) POR FLUJO SUBTERRÁNEO.

Las salidas subterráneas fueron calculadas de la misma manera como se evaluaron las entradas subterráneas, a partir de las configuraciones de la elevación del nivel estático (NE) presentado en las figuras 3.3 y 3.4. Siendo los valores estimados de 30.86 Mm³/año para 2002 y 25.79 Mm³/año para 2006, tal como se muestran en las tablas 4.5 y 4.6.

Este caudal de salida representa el flujo base del Río Bravo, lo que implica que el río es ganador y está hidráulicamente conectado con el acuífero.

Tabla 4.5 Cálculo del caudal de salida por flujo subterráneo 2002

Celda	Gradiente				B (m)	T (m ² /día)	Q (m ³ /d)
	Equi-1	Equi-2	L (m)	i			
S1	240	230	4983.76	0.0020	4344.46	957	8342.39
S2	240	230	4538.03	0.0022	3027.61	957	6384.75
S3	240	230	3467.48	0.0029	2395.06	957	6610.20
S4	240	230	2438.62	0.0041	4200.95	36	620.16
S5	240	230	1601.48	0.0062	3968.59	36	892.11
S6	240	230	1523.76	0.0066	3405.27	36	804.52
S7	240	230	1667.96	0.0060	2154.28	36	464.96
S8	240	230	1344.81	0.0074	2972.62	36	795.76
S9	240	230	1273.67	0.0079	3714.90	36	1050.01
S10	240	230	2014.34	0.0050	1901.56	36	339.84
S11	240	230	1578.74	0.0063	1685.48	36	384.34
S12	240	230	1481.28	0.0068	1332.56	36	323.85
S13	240	230	1521.33	0.0066	1439.25	36	340.58
S14	240	230	1510.67	0.0066	2163.71	36	515.63
S15	240	230	1852.34	0.0054	3197.31	36	621.39
S16	240	230	2165.68	0.0046	4248.43	36	706.21
S17	240	230	2211.71	0.0045	2785.97	743.5	9365.44
S18	240	230	2282.69	0.0044	3174.25	1451	20177.28
S19	240	230	2037.98	0.0049	3624.45	1451	25805.31
						suma	84544.74
						Mm ³ /año	30.86

Tabla 4.6 Cálculo del caudal de salida por flujo subterráneo 2006

Celda	Gradiente				B (m)	T (m ² /día)	Q (m ³ /d)
	Equi-1	Equi-2	L (m)	i			
S1	240	230	1133.59	0.0088	1363.84	36	433.12
S2	240	230	1044.70	0.0096	1536.47	36	529.46
S3	240	230	1134.50	0.0088	2546.93	36	808.19
S4	240	230	1360.84	0.0073	2348.61	36	621.31
S5	240	230	1455.75	0.0069	1703.19	36	421.19
S6	240	230	1496.14	0.0067	3064.93	36	737.48
S7	240	230	1611.02	0.0062	2348.24	36	524.74
S8	240	230	1151.05	0.0087	2544.97	49	1083.39
S9	240	230	845.28	0.0118	1848.45	36	787.25
S10	240	230	845.82	0.0118	1712.90	36	729.05
S11	240	230	1559.82	0.0064	3308.63	36	763.62
S12	240	230	1358.78	0.0074	1558.53	36	412.92
S13	240	230	1531.81	0.0065	2104.54	36	494.60
S14	240	230	1642.94	0.0061	3690.01	36	808.55
S15	240	230	1435.47	0.0070	2226.55	36	558.39
S16	240	230	1357.92	0.0074	1944.90	36	515.62
S17	240	230	1656.60	0.0060	2043.60	36	444.10
S18	240	230	1642.02	0.0061	1688.48	743.5	7645.37
S19	240	230	1945.88	0.0051	3200.50	743.5	12228.79
S20	240	230	2120.15	0.0047	509.82	1451	3489.16
S21	240	230	2136.82	0.0047	1533.76	1451	10414.98
S22	240	230	2163.61	0.0046	1003.24	1451	6728.09
S23	240	230	2176.33	0.0046	1137.00	1451	7580.62
S24	240	230	2137.14	0.0047	1752.60	1451	11899.22
						suma	70659.23
						Mm ³ /año	25.79

Promedio anual de entradas subterráneas: Entradas subterráneas en el período de balance:

$$(30.86 + 25.79) / 2 = 28.325 \text{ Mm}^3/\text{año} \quad 28.325 * 5 = 141.625 \text{ Mm}^3/5 \text{ años}$$

4.7. EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA (B).

Los datos de extracción de agua subterránea utilizados para el balance, se muestran en la tabla 4.7

Tabla 4.7 Extracción de agua subterránea.

Años	CFE (Mm ³)	MICARE achique	Agrícola y pecuario (Mm ³)	Suma por año
2002	28.67	31.54	29.6	89.81
2003	28.67	26.12	29.6	84.39
2004	28.67	82.53	29.6	140.8
2005	27.41	84.02	29.6	141.03
2006	27.41	48.39	29.6	105.4
BOMBEO TOTAL EN EL PERÍODO Mm ³ / 5 años				561.43
PROMEDIO DE BOMBEO POR AÑO Mm ³ /año				112.286

4.8. DESCARGA A MANANTIALES (Dm).-flujo local-

El segundo grupo que corresponde a manantiales que drenan al acuífero de la planicie Allende-Piedras Negras ubicados en la figura 4.5, forman una franja paralela al Río Bravo en la que se representa su localización de los manantiales dentro del área de balance con sus respectivos caudales promedio aforados por la CFE y COPEI recopilados en la tabla 4.8.

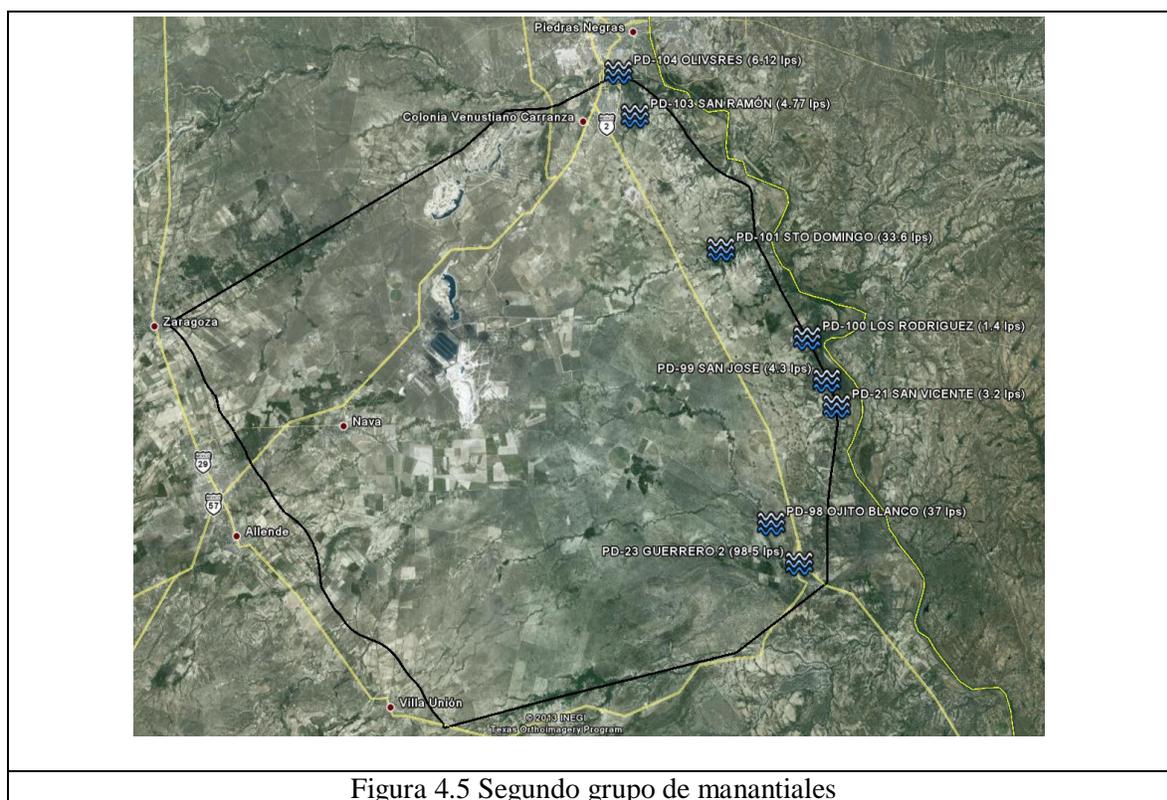


Figura 4.5 Segundo grupo de manantiales

Tabla 4.8 Descarga de Manantiales

Manantial	Caudal aforado (COPEI, 2007)		Caudal aforado (CFE, 2002)	
	Lps	Mm ³ /año	Lps	Mm ³ /año
Santo Domingo	33.60	1.06	11.50	0.36
Ojito Blanco (Gro 1)	37.00	1.17	46.50	1.47
Guerrero (Gro 2)	98.50	3.11	13.30	0.42
Olivares	6.12	0.19	Sin dato	Sin dato
San Ramón	4.77	0.15	Sin dato	Sin dato
Los Rodríguez 1	1.40	0.04	Sin dato	Sin dato
San José 1	4.30	0.14	Sin dato	Sin dato
San Vicente 1	3.20	0.10	Seco	

Caudal total por año	188.89	5.96	71.30	2.25
		Promedio anual Mm ³ /año		4.10
		Mm ³ /5 años		20.51

4.9. VARIACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO (ΔH).

Tabla 4.9 Reporte del cálculo de la variación en el almacenamiento del acuífero

Volume Computations	
Upper Surface	
Grid File Name:	C:\Users\IVAN AG\Desktop\TESINA GEOH\Piezometría 2006\Pozos N.E. 20062.grd
Grid Size:	91 rows x 100 columns
X Minimum:	313168
X Maximum:	368961.0522
X Spacing:	563.56618383838
Y Minimum:	3121901.273
Y Maximum:	3172506.044
Y Spacing:	562.27523333334
Z Minimum:	180.05240898194
Z Maximum:	397.87258306341
Lower Surface	
Grid File Name:	C:\Users\IVAN AG\Desktop\TESINA GEOH\Piezometría 2002\Area de Balance2.grd
Grid Size:	91 rows x 100 columns
X Minimum:	313168
X Maximum:	368961.0522
X Spacing:	563.56618383838
Y Minimum:	3121901.273
Y Maximum:	3172506.044
Y Spacing:	562.27523333334
Z Minimum:	180.74758005351
Z Maximum:	391.84224923881
Volumes	
Z Scale Factor:	1
Total Volumes by:	

Trapezoidal Rule:	5315135338.3871
Simpson's Rule:	5312754483.9016
Simpson's 3/8 Rule:	5313925196.407
Cut & Fill Volumes	
Positive Volume [Cut]:	8494340691.1446
Negative Volume [Fill]:	3179486573.1421
Net Volume [Cut-Fill] $A_b \cdot \Delta h$:	5314854118.0025 m ³
Areas	
Planar Areas	
Positive Planar Area [Cut]:	1739466124.6719
Negative Planar Area [Fill]:	1083928505.3001
Blanked Planar Area:	0
Total Planar Area:	2823394629.9721
Surface Areas	
Positive Surface Area [Cut]:	1739469949.5087
Negative Surface Area [Fill]:	1083930716.5997

Aplicando un rendimiento específico de 0.07, la variación en el almacenamiento es de:

$$\pm \Delta V = A_b \cdot \Delta h \cdot S_y = +372.04 \text{ Mm}^3$$

Esto implica un volumen incorporado al acuífero en los 5 años del período de 372.04 Mm³, lo que constituye un aumento aproximado en el volumen del acuífero de 74.41 Mm³/año.

Dado que ΔV implica un aumento de volumen en el acuífero es posible estimar la recuperación que ha tenido el acuífero durante el período de balance (Δh), despejando Δh de la ecuación (ec. 3.6) tal como sigue:

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{A_b \cdot S_y} \dots (4.1), \text{ es decir:}$$

$$\Delta h = \frac{372.04 \times 10^6 \text{ m}^3}{1757 \times 10^6 (0.07)} \Rightarrow \Delta h = 3.03 \text{ m}$$

Esto conlleva una recuperación del nivel freático en el período de balance de 3.03 m (a nivel regional), o bien, una tasa de recuperación lineal de 0.61 m/año.

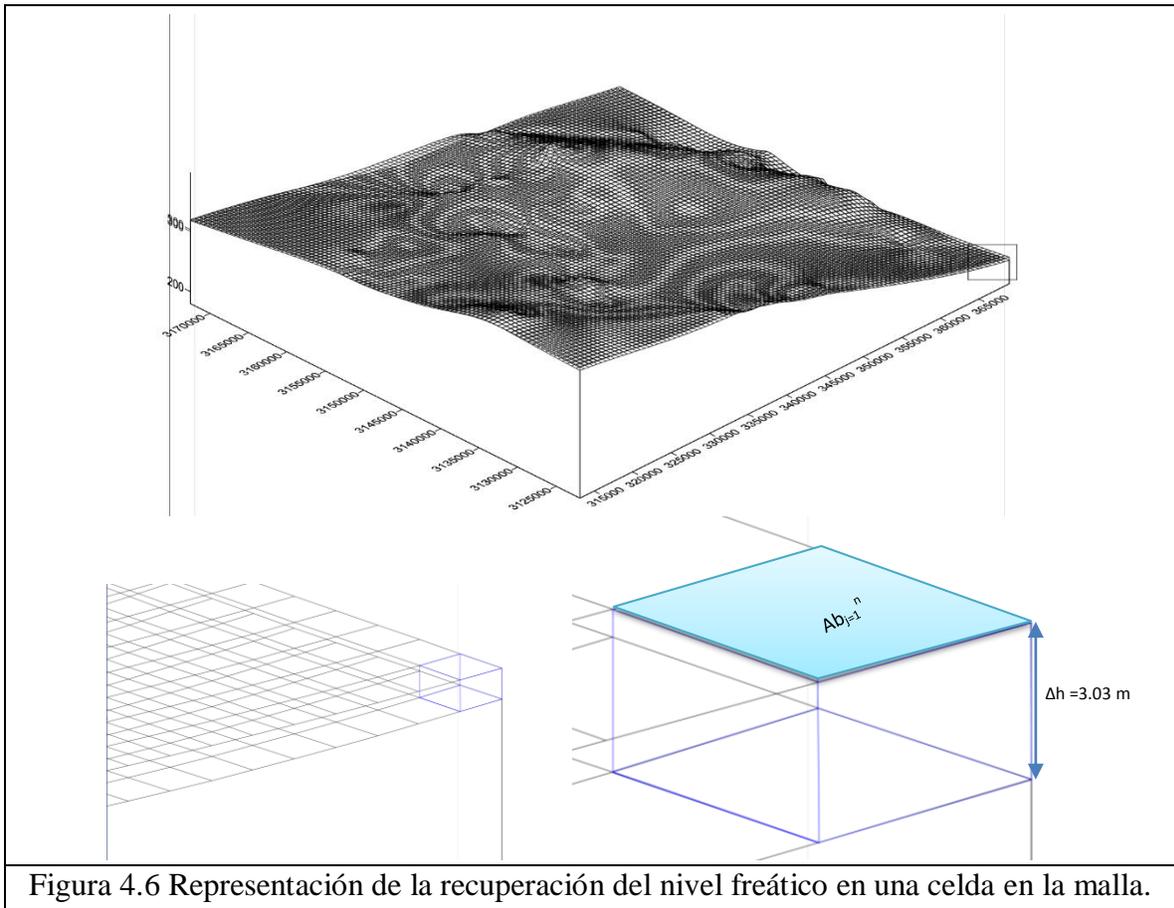


Figura 4.6 Representación de la recuperación del nivel freático en una celda en la malla.

Tabla 4.10 Diferencia de niveles (2002-2006)

Incógnitas	Valor	Unidades
Δh	3.03	m
S_y	0.07	
Área de balance	1,756,632,408.53	m^2
ΔV	372,039,788.26	(m^3)
	372.04	$Mm^3/5$ años

Estimación de la recarga vertical (R_v)

La recarga vertical para todo el período (5 años) o la infiltración de agua de lluvia se calculó con base en la ecuación (3.4) detallada a continuación:

$$Rv = +B + Sh + Dm \pm \Delta V(S) - Eh - Ra - Rr \dots (3.4)$$

Sustituyendo valores (en $Mm^3/5$ años):

$$Rv = Ip = 561.43 + 141.62 + 20.51 + 372.04 - 227.52 - 270.51 - 31.15$$

$Rv = 566.43 Mm^3/5$ años, es decir:

$$Rv = 113.29 Mm^3/año$$

La tabla 4.11 resume los resultados obtenidos en el balance de aguas subterráneas:

Tabla 4.11 Resultado de los términos del balance

Término del balance	Cuantificación para todo el período ($Mm^3/5$ años)	Promedio anual de cada término ($Mm^3/año$)
ENTRADAS		
Eh	227.52	45.50
Rr	31.15	6.23
Ra	270.51	54.10
Rv	566.43	113.29
Entradas totales	1095.61	219.12
SALIDAS		
Sh	141.62	28.32
B	561.43	112.29
Dm	20.51	4.10
Salidas totales	723.57	144.71
VARIACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO		
Δv	372.04	74.41
Δh	3.03	0.61

Determinada la recarga vertical ($113.29 Mm^3/año$) se calculó la lámina de agua que se infiltra dentro del área de balance despejando h de la ecuación 4.2 resultando una recarga de $65 mm/año$ lo que equivale aproximadamente a un coeficiente de infiltración del 15% respecto a la precipitación promedio anual de $428 mm$.

$$V = h(A) \quad (ec.4.2)$$

$$h = \frac{V}{A} = \frac{Rv}{Ab} = \frac{113.29 \times 10^6 m^3 / año}{1757 \times 10^6 m^2} = 0.065 m/año$$

$$h = \left(0.065 \frac{m}{año} \right) \left(\frac{1000 mm}{m} \right) = 65 mm/año$$

$$C.I = \frac{65 mm (100\%)}{428 mm} = 15\%$$

4.10. ESCENARIOS DE GESTIÓN.

Con la información recabada a través de los cálculos anteriores, se propusieron dos escenarios que se pueden dar variando la recarga artificial y bombeo o desatendiendo el funcionamiento de estos.

4.10.1. SIN RECARGA ARTIFICIAL (R_A).

Este acuífero libre es de los pocos que cuentan con una recarga artificial, por ello se propuso este escenario, ya que las compañías responsables de esta recarga pueden dejar de hacerlo en cualquier instante (MICARE, CFE).

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.12. Resultados de los términos del balance (Sin recarga artificial).

Término del balance	Cuantificación para todo el período ($Mm^3/5$ años)	Promedio anual de cada término ($Mm^3/año$)
ENTRADAS		
Es	227.52	45.50
Rr	31.15	6.23
Ra	0.00	0.00
Rv	566.43	113.29
Entradas totales	825.10	165.02
SALIDAS		
Sh	141.62	28.32
B	561.43	112.29
Dm	20.51	4.10
Salidas totales	723.57	144.71
VARIACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO		
Δv	101.53	20.31
Δh	0.83	0.17

Se puede observar en la tabla 4.12 que la variación en el almacenamiento se redujo un 27% afectando la recuperación del nivel freático en el período de balance de 0.83 m (a nivel regional), o bien, una tasa de recuperación lineal de 0.17 m/año.

4.10.2. CON RECARGA ARTIFICIAL (R_A) Y AUMENTANDO EL BOMBEO (B).

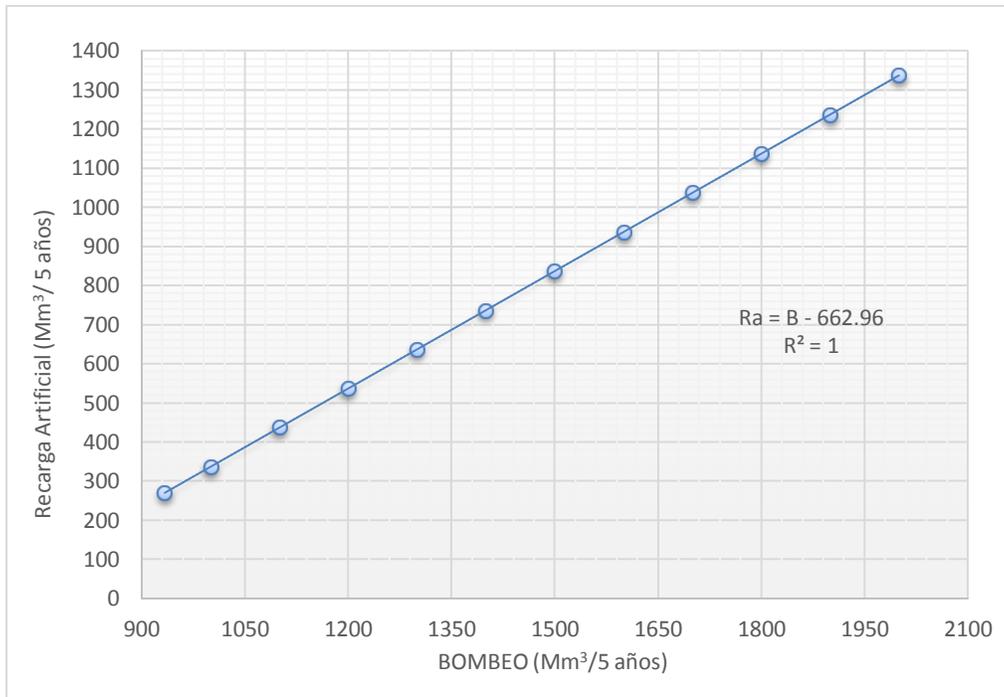
Con la finalidad de identificar el instante en que el acuífero libre se encuentra en equilibrio, se calculó el valor máximo de extracción que permite éste.

Tabla 4.13. Resultados de los términos del balance (con recarga y aumentando el bombeo)

Término del balance	Cuantificación para todo el período (Mm ³ /5 años)	Promedio anual de cada término (Mm ³ /año)
ENTRADAS		
Es	227.52	45.50
Rr	31.15	6.23
Ra	270.51	54.10
Rv	566.43	113.29
Entradas totales	1095.61	219.12
SALIDAS		
Sh	141.62	28.32
B	933.47	186.69
Dm	20.51	4.10
Salidas totales	1095.61	219.12
VARIACIÓN EN EL ALMACENAMIENTO		
Δv	0.00	0.00
Δh	0.00	0.00

Se puede notar en la tabla 4.13 que la variación en el almacenamiento es cero ya que la ecuación de balance se encuentra en equilibrio, debido a que la extracción fue aumentada en un 66.28% del valor registrado en el periodo 2002-2006 (561.43Mm³/5 años) lo que significa que es posible extraer 74.42 Mm³/ año y concesionar nuevos pozos. Si se sobrepasa el volumen anterior se deberá aumentar la recarga artificial como se muestra en la gráfica 4.1 con el fin de que el acuífero libre no registre una explotación intensiva.

Grafica 4.1. Relación Bombeo- Recarga Artificial



5. CONCLUSIONES.

En el país se ha dispuesto la NOM-0011-CONAGUA-2000 para establecer el reordenamiento de los acuíferos, su disponibilidad para otorgar nuevas concesiones y establecer políticas de gestión hídrica tales como son la veda del acuífero, o implementar técnicas para su recarga.

En el marco geológico la formación de la estratigrafía que delimitan o constituyen los acuíferos es fundamental conocerla para cuantificar su recarga, flujo subterráneo, superficial. En general en el caso estudio del acuífero libre Allende-Piedras Negras, a éste lo constituye rocas sedimentarias constituidas por aluviones y conglomerados que reposa sobre formaciones de roca caliza del cretácico superior e inferior.

Esta metodología es rápida y ha sido aceptada por diferentes empresas las cuales han seguido esta serie de pasos para estimar un balance si se tiene la información requerida de cada término de la ecuación registrada por diferentes organismos operadores o encargados de su gestión.

Es de suma importancia conocer los valores que determinan la porosidad, permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, transmisividad a través de pruebas de bombeo (ecuación de Theis simplificada por Jacob Cooper), ya que estos parámetros en la ecuación definen en su mayoría el flujo, velocidad y fuerzas que provocan el movimiento del agua subterránea.

Existen varias formas de establecer un balance o el flujo subterráneo, ya sea llevando a cabo ésta metodología o utilizar diferentes modelos matemáticos, computacionales (MODFLOW, FEFLOW) que nos lleven a un valor cada vez más aproximado.

Con esta metodología se han realizado balances en toda la república mexicana por empresas consultoras con la finalidad de llegar a establecer políticas, leyes, mapas de veda que protejan a los acuíferos que conforman al país ayudando a que los organismos operadores tengan una mejor gestión e información en la explotación de los recursos hídricos subterráneos.

6. REFERENCIAS CITADAS.

Benitez, A. (1963). *Captación de aguas subterráneas*. Madrid: DOSSAT.

C.W.Fetter. (2001). *Applied Hydrogeology*. New Jersey: Prentice Hall.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios, Dirección General de Bibliotecas. (1994). *REGLAMENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES*. México. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/REGLAMENTO%20DE%20LA%20LEY%20DE%20AGUAS%20NACIONALES.pdf>

CONAGUA. (2007). *Localizador REPGA de aguas nacionales, zonas federales y descargas de aguas residuales*. Obtenido de <http://sigaims.conagua.gob.mx/Website/Localizador/viewer.htm>.

CONAGUA. (2012). *Atlas del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA WebMaster. (11 de Noviembre de 2011). *AGUA SUBTERRÁNEA*. Obtenido de <http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=62&n3=62>

Custodio, E. (1976). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Omega.

FAO. (2013). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/docrep/003/x8763s/x8763s0a.htm>.

Gerencia de Aguas Subterráneas (CONAGUA). (Mayo 2009). *Determinación de la Disponibilidad de agua en el acuífero 0501 Allende-Piedras Negras Coahuila*. México: Comisión Nacional del Agua.

GRUPO MODELO. (Febrero 2009). *Estudio Técnico para determinar la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero (501) Allende-Piedras Negras Coah.* Querétaro, Qro.: Lesser y Asociados S.A de C.V.

- Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM;. (1995-2009). *LEY DE AGUAS NACIONALES* .
Obtenido de <http://info4.juridicas.unam.mx/ijure/fed/15/7.htm?s=>
- Leyva Suárez , E. (Mayo 2010). *Acuíferos Semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al Acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México*. México D.F.: UNAM, Tesis de Maestría.
- MINERA CARBONÍFERA RÍO ESCONDIDO. (2006). *Balance geohidrológico del acuífero Allende-Piedras Negras, Coahuila*. COPEI Ingeniería, S.A. de C.V.
- Servicio Meteorológico Nacional. (11 de 04 de 2013). *Mapa Coahuila Precipitación 24 hrs*.
Obtenido de <http://smn.cna.gob.mx/emas/>
- Sociedad Geológica Mexicana . (Febrero de 2011). *Simposio Las Ciencias de la Tierra en el Estudio del Agua Subterránea*. Obtenido de
<http://www.sociedadgeologica.org.mx/pdfs/03%20DisponibilidadAguaSubterranea.pdf>.
- UNIÓN, D. D. (1992). *CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN, Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentario*. México.