

***Actualización de la disponibilidad media anual  
de agua en el acuífero Cuchujaqui (2643),  
Estado de Sonora***

*Publicada en el Diario Oficial de la Federación  
20 de abril de 2015*

## Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea

Publicada en el diario oficial de la federación el 20 de Abril de 2015

El artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), señala que para el otorgamiento de una concesión o asignación, debe tomarse en cuenta la disponibilidad media anual del agua, que se revisará al menos cada tres años; sujetándose a lo dispuesto por la LAN y su reglamento.

Del resultado de estudios técnicos recientes, se concluyó que existe una modificación en la disponibilidad de agua subterránea, debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado y/o descarga natural comprometida; por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual de agua.

La actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea publicada en este documento corresponde a una fecha de corte en el **Registro Público de Derechos de Agua al 30 de junio de 2014.**

CLAVE	ACUÍFERO	R	DNCOM	VCAS	VEXTET	DAS	DÉFICIT
		CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES					
ESTADO DE SONORA							
2643	CUCHUJAQUI	49.7	19.5	4.728880	2.5	25.471120	0.000000

R: recarga media anual; DNCOM: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado de agua subterránea; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea. Las definiciones de estos términos son las contenidas en los numerales “3” y “4” de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015.



*Comisión Nacional del Agua*

**Subdirección General Técnica**

*Gerencia de Aguas Subterráneas*

**Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos**

**DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN  
EL ACUÍFERO CUCHUJAQUI (2643), ESTADO DE  
SONORA**

# DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO CUCUJAQUI, ESTADO DE SONORA.

## CONTENIDO

	Página
<b>1. GENERALIDADES.....</b>	<b>2</b>
1.1. Localización.....	2
1.2. Situación administrativa del acuífero.....	5
<b>2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD.....</b>	<b>6</b>
<b>3. FISIOGRAFÍA.....</b>	<b>7</b>
3.1. Provincia fisiográfica.....	7
3.2. Clima.....	7
3.3. Hidrografía.....	8
3.4. Geomorfología.....	8
<b>4. GEOLOGÍA.....</b>	<b>9</b>
4.1. Estratigrafía.....	10
4.2. Geología estructural.....	14
4.3. Geología del subsuelo.....	14
<b>5. HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
5.1. Tipo de acuífero.....	16
5.2. Parámetros hidráulicos.....	17
5.3. Piezometría.....	19
5.4. Comportamiento hidráulico.....	19
5.4.1. Profundidad al nivel estático.....	19
5.4.2. Elevación del nivel estático.....	20
5.4.3. Evolución del nivel estático.....	20
5.5. Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea.....	21
<b>6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS E HIDROMETRÍA.....</b>	<b>22</b>
<b>7. BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>22</b>
7.1. Salidas.....	24
7.1.1. Flujo subterráneo horizontal.....	24
7.1.2. Evapotranspiración.....	25
7.1.3. Bombeo.....	26
7.2. Cambio de almacenamiento.....	26
7.3. Entradas.....	27
7.3.1. Flujo subterráneo horizontal.....	27
7.3.2. Recarga total.....	27
<b>8. DISPONIBILIDAD.....</b>	<b>27</b>
8.1. Recarga total media anual.....	29
8.2. Descarga natural comprometida.....	29
8.4. Volumen concesionado de aguas subterráneas.....	29
8.5. Disponibilidad de aguas subterráneas.....	29
<b>9. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>30</b>

## **1. GENERALIDADES**

### **Antecedentes**

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento (LAN) contemplan que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) debe publicar en el Diario Oficial de la Federación (DOF), la disponibilidad de las aguas nacionales, por acuífero en el caso de las aguas subterráneas, de acuerdo con los estudios técnicos correspondientes y conforme a los lineamientos que considera la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 que establece el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas provenientes de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, organismos de los gobiernos de los estados y municipios, y de la CONAGUA.

El método que establece la NOM indica que para calcular la disponibilidad de aguas subterráneas deberá de realizarse un balance de las mismas, donde se defina de manera precisa la recarga de los acuíferos, y de ésta deducir los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el Registro Público de Derechos del Agua (REPD).

El cálculo de la disponibilidad obtenida permitirá una mejor administración del recurso hídrico subterráneo ya que el otorgamiento de nuevas concesiones sólo podrá efectuarse en acuíferos con disponibilidad de agua subterránea. Los datos técnicos que se publiquen deberán estar respaldados por un documento en el que se sintetice la información necesaria, en donde quede claramente especificado el balance de aguas subterráneas y la disponibilidad de agua subterránea susceptible de concesionar, considerando los volúmenes comprometidos con otros acuíferos, la demanda de los ecosistemas y los usuarios registrados con derechos vigentes en el REPD. La publicación de la disponibilidad servirá de sustento legal para fines de administración del recurso, para la autorización de nuevos aprovechamientos de agua subterránea, para los planes de desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento, y en las estrategias para resolver los casos de sobreexplotación de acuíferos y la resolución de conflictos entre usuarios.

### **1.1. LOCALIZACION**

El área administrativa del acuífero Cuchujaqui, se localiza en la porción Sur del Estado de Sonora (Figura No. 1), dentro de la Región Noroeste de la Comisión Nacional del Agua, con clave 2643. Limita al norte con el acuífero San Bernardo y Valle del Mayo, al sur y oriente con el acuífero Río Fuerte y al poniente con el Fuerte-Mayo.

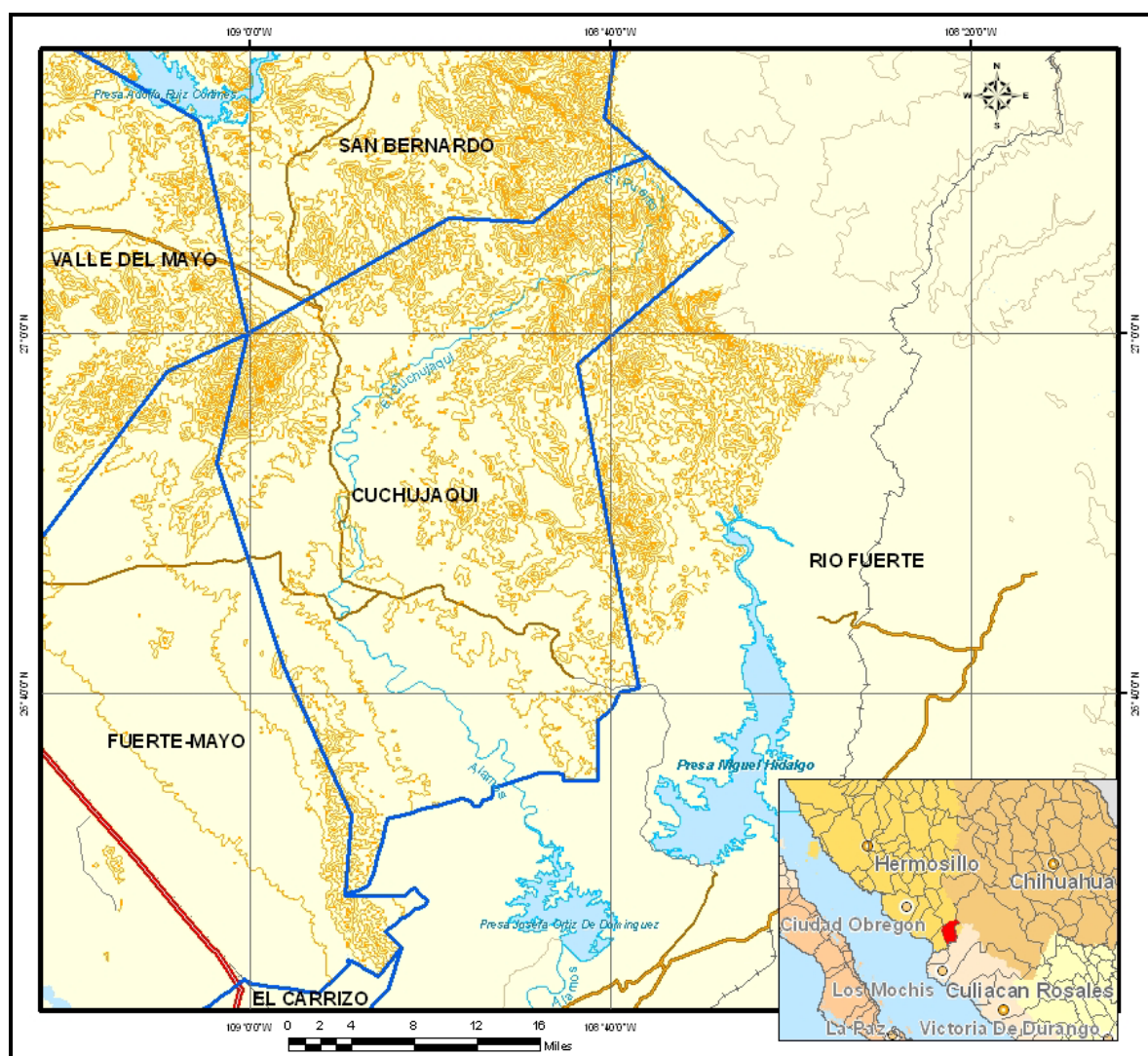


Figura No. 1. Localización del acuífero Cuchujaqui.

La poligonal simplificada que delimita el acuífero se encuentra definida por 12 vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla No. 1.

ACUIFERO 2643 CUCHUJAQUI							
VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	108	33	13.3	27	5	38.2	
2	108	41	51.9	26	58	19.2	
3	108	38	26.2	26	40	21.0	DEL 3 AL 4 POR LA LINEA DE BAJAMAR A LO LARGO DE LA COSTA
4	108	54	42.4	26	28	49.0	
5	108	54	21.6	26	33	15.1	
6	108	58	6.8	26	41	30.6	
7	109	1	52.0	26	52	51.9	
8	109	0	6.2	27	0	2.1	
9	108	48	59.6	27	6	26.1	
10	108	44	19.0	27	6	13.9	
11	108	41	15.8	27	8	35.3	
12	108	37	56.9	27	9	51.9	
1	108	33	13.3	27	5	38.2	

Tabla No. 1. Vértices del polígono del acuífero Cuchujaqui

Queda comprendido dentro de la cuenca con una superficie del orden de los 1933.34 km<sup>2</sup>.

La zona cuenta con vías de comunicación de caminos de terracería y solo un tramo de carretera pavimentada de 50 km de Alamos a Navojoa, Sonora.

El acuífero se localiza dentro de los límites del municipio Álamos (figura No. 2).

En la región la población se concentra principalmente en la cabecera del Municipio y en poblados dispersos en la Cuenca. El censo de población y vivienda del INEGI (2000), reporta una población del orden de los 25,000 habitantes para el municipio de Álamos.

En los últimos 10 años la población del municipio ha mostrado un decremento debido al fuerte éxodo de los jóvenes a otras entidades debido a la falta de fuentes de empleo. Así mismo, las superficies de cultivos de temporal tales como el ajonjolí, sorgo y forrajes han decaído debido a lo prolongado de la sequía.

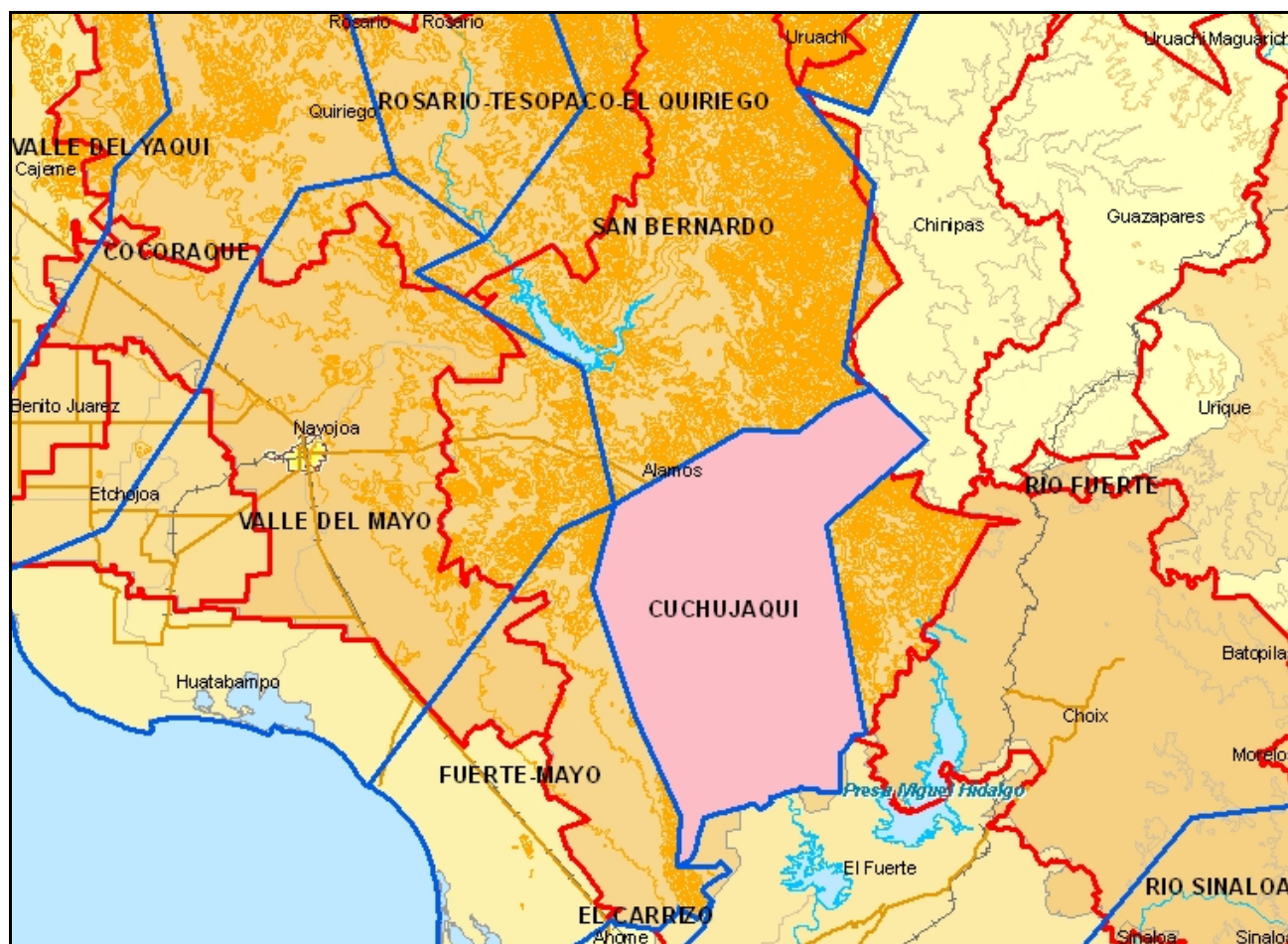


Figura No. 2. Localización de Municipios dentro del área del acuífero.

## 1.2 SITUACION ADMINISTRATIVA DEL ACUIFERO

Para evitar y controlar el incremento de las extracciones de agua subterránea, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (actualmente Comisión Nacional del Agua), ha decretado a través del tiempo una serie de Vedas para la explotación de este recurso, las cuales involucran la mayor parte del territorio sonorense. Dentro de los límites del acuífero existe la veda Distrito de Riego Fuerte Sonora y Sinaloa, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de agosto de 1956, la cual abarca parcialmente al acuífero.

El Decreto menciona que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en una zona cuyos límites se especifican en el decreto, excepto cuando se trate de usos doméstico, a partir de la fecha en que este Decreto se publicó en el Diario Oficial de la Federación, nadie podrá efectuar nuevos alumbramientos de aguas del subsuelo en la zona vedada, ni modificar los existentes, sin previo permiso escrito de la Comisión del Río Fuerte, la que sólo lo expedirá en los casos en que los estudios correspondientes se deduzca que no causaran los daños que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse.

Tanto las obras existentes como las nuevas que se autoricen quedarán sujetas a los reglamentos que para las extracciones dicte la Comisión del Río Fuerte, de acuerdo con los estudios que se efectúen en la inteligencia de que los aprovechamientos correspondientes deberán sujetarse también a las siguientes normas:

- a. Tanto las obras existentes como las nuevas que se autoricen, quedarán sujetas a las disposiciones que dicte la Comisión del Río Fuerte, para regular y controlar el mejor aprovechamiento de las aguas del subsuelo y evitar la salinidad.
- b. Para la debida aplicación del presente decreto, los permisos para los nuevos alumbramientos serán tramitados ante la Comisión del Río Fuerte y se resolverán y controlarán de acuerdo con el estudio geohidrológico individual correspondiente.
- c. De autorizarse la obra de alumbramiento, como resultado de dicho estudio, los trabajos respectivos que al efecto se realicen se sujetarán a los plazos y especificaciones que señale la Comisión del Río Fuerte, siendo motivo de cancelación del permiso, la infracción a dichos plazos y especificaciones.
- d. Si debido a la extracción de agua del subsuelo se afectarán las reservas hidráulicas subterráneas, porque las extracciones sean mayores que las recuperaciones, la Comisión del Río Fuerte procederá en los términos del artículo 9º de la ley de materia, reglamentará todos los aprovechamientos existentes.

En la figura No. 3, se presenta el límite de las zona de veda correspondientes al acuífero 2643 Cuchujaqui, Sonora.



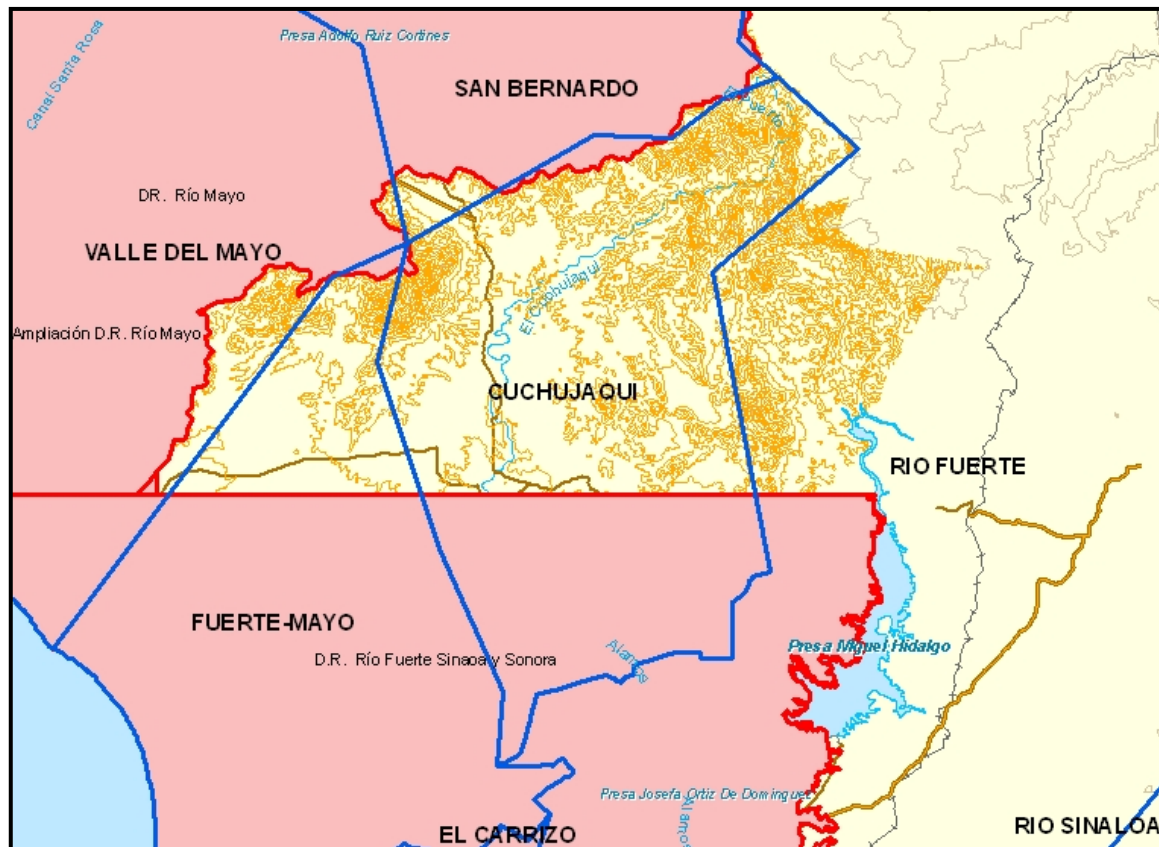


Figura No. 3. Límites de las zonas de veda dentro del acuífero

No existen decretos de reserva o reglamentos dentro de los límites del acuífero. La Ley Federal de Derechos (Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales), 2005, ubica al municipio de Álamos dentro de la zona de disponibilidad 6.

Como organización de usuarios, solamente existe la Alianza Sonorense por el Agua A.C., instalada el 12 de octubre de 2000.

## 2. ESTUDIOS TÉCNICOS REALIZADOS CON ANTERIORIDAD

**Minera Corner Bay, S. A. de C. V. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuchujaqui Alamos, estado de Sonora, México. Febrero del 2005.**

Los resultados del estudio arrojaron la siguiente información: (1) Desde el punto de vista geológico, las unidades más favorables para el almacenamiento y extracción del agua subterránea se ubican a lo largo de los cauces y terrazas, representadas por las unidades geohidrológicas aluvial y terrazas fluviales. (2) La información arrojada por los sondeos eléctricos verticales indican espesores favorables promedio del orden de los 60 m para los medios aluvial y terrazas. (3) El volumen de agua subterránea que sale de la cuenca se estimó por el método de redes de flujo en 19.5 hm<sup>3</sup> anuales. (4) La calidad del agua subterránea se ubica por debajo de los índices contemplados en las normas oficiales, para los distintos usos.

### **3. FISIOGRAFÍA**

#### **3.1 Provincia Fisiográfica**

El área del acuífero, se encuentra ubicada en la porción sur del Estado de Sonora. Fisiográficamente, según Raisz (1964), queda comprendida en la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, el área que ocupa esta provincia fisiográfica, fue elevada durante el periodo Terciario Medio y Superior, formando un Altiplano el cual fue flanqueado en ambos lados por sierras paralelas. La mayor parte de la región está cubierta por lavas, con intercalaciones de materiales clásticos. Pertenece también a la Subprovincia Planicie de Lava.

En la Planicie de Lava las montañas son alargadas con orientación noroeste-sureste y con altitudes que varían de 500 a 2,300 msnm.

#### **3.2 Clima**

El clima en la región es cálido a semihúmedo, con inviernos rigurosos, alcanzando temperaturas bajas en las partes topográficas altas entre 0 y 20° C en invierno; durante el verano entre 30 y 40° C, en las partes topográficamente bajas se experimenta un calor excesivo. Las lluvias son de carácter torrencial hasta fines de octubre; en los meses de invierno, de diciembre a marzo, predominan las lloviznas de baja intensidad localmente llamadas equipatas.

La Clasificación Climatológica según Thornthwaite es: EdA'a. Provincia de humedad E árida, vegetación desierto. Humedad deficiente todas las estaciones. Provincia de temperatura A' tropical.

La flora es típica de climas cálidos y semihúmedos, donde predominan los matorrales, del tipo xerófitas, algunas de las especies más predominantes son: cactus Hariota salicornnoides, choya Opuntia choya, nopal Opuntia sp, uña de gato Prosopis graggy, garambullo Lephoceres schott, palo verde Cercidium microphullum, pochote ceiba acuminata, palma Ucca sp; existen además otras especies muy comunes como son: chalate, brasil, sabino, palo pinto, mauto, torote blanco, torote prieto, jumete chicura, cabeza de viejo, hongos y enredaderas.

#### **Temperatura media anual**

Los datos de temperatura corresponden a la estación climatológica Alamos, cuyas coordenadas son 27° 02' de latitud norte y 108° 56' longitud oeste. Con el registro de datos, se tiene una temperatura media anual de 21.7° C.

#### **Precipitación media anual**

La precipitación media anual en el Estado varía gradualmente de menos de 100 mm, en el área del Desierto de Altar a más de 800 mm en la Sierra Madre Occidental. Los meses más lluviosos son julio y agosto, con un 85 a 90 % y los más secos son abril y mayo, con 10 a 15 %.

En la Llanura Costera del Pacífico, el trazo de las isoyetas es paralelo a la línea de costa, solo que la proximidad de la sierra propicia el cambio de manera drástica (200 a 700 mm). Para efectos de este estudio se seleccionó la isoyeta de 600 mm, dado que atraviesa por el centro la Cuenca del Cuchujaqui.

### **3.3 Hidrografía**

La red hidrográfica pertenece a la vertiente occidental. El patrón de drenaje que predomina es subparalelo y dendrítico con diversos grados de integración y densidad; la compone la corriente intermitente del Río Cuchujaqui y el arroyo Güirocoba.

La Cuenca del Río Cuchujaqui drena hacia el sur, es decir, hacia el Estado de Sinaloa, se ubica en la Región Hidrológica No. 10, con pendiente general fuerte.

De la red hidrográfica de esta parte de la entidad, sobresale el arroyo Álamos, que recorre 88 kilómetros desde el noreste de la localidad del mismo nombre hasta el vaso de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, ubicada en el norte del Estado de Sinaloa. En su trayectoria mantiene una pendiente media de 0.004, con dirección general norte-sur, recibiendo como tributarios por la margen izquierda los escurrimientos de los arroyos Cuchujaqui y Güirocoba (Manojaqui).

La única estación hidrométrica de la región es la de Cazanate, localizada en el arroyo Álamos, 7 kilómetros aguas arriba de la presa Josefa Ortiz de Domínguez, dicha estación reporta un volumen medio anual de 107.5 millones de metros cúbicos.

### **3.4 Geomorfología**

La Sierra Madre Occidental está formada por una extensa meseta volcánica afectada por grabens y fallas normales que la privan, sobre todo en los flancos, de su apariencia homogénea y pseudohorizontal. El borde oriental de la sierra varía gradualmente hacia la Provincia de Cuencas y Sierras de Chihuahua, en tanto que el borde occidental constituye una terminación abrupta con fallas normales de grandes desplazamientos y zonas de profundas barrancas.

Compuesta por dos importantes secuencias ígneas, cuyo contacto marca un periodo intermedio de calma volcánica. La secuencia más antigua la forman rocas volcánicas, principalmente intermedias, y cuerpos ígneos. La más reciente está integrada por ignimbritas riolíticas y riodacíticas en posición generalmente horizontal, o ligeramente inclinada.

El complejo volcánico inferior posee una forma dominante de derrames y unidades piroclásticas de composición andesítica, pero también cuenta con intercalaciones de ignimbritas silíceas. Este complejo inferior contrasta en gran medida con el superior, por su carácter ligeramente deformado e intensamente afallado y alterado.

#### 4. GEOLOGÍA

Las unidades litológicas que afloran en la cuenca del Cuchujaqui son tipo sedimentario, ígneo y metamórfico, comprenden un rango de edad que varía del Precámbrico al Reciente, como se observa en la figura No. 4.

Al Precámbrico pertenecen las rocas del Complejo Sonobari, las cuales son consideradas como parte del basamento (Rodríguez y Córdoba, 1977, y de De Cserna y Kent, 1961); consiste en una secuencia de rocas afectadas por metamorfismo regional, tales como gneis, gneis anfibolítico, pegmatita y migmatita con biotita y epidota; la secuencia se presenta intrusionada y deformada por diques y cuerpos pegmatíticos. Los afloramientos dentro de la cuenca se restringen a la porción sur.

Del Paleozoico son las unidades de esquisto de clorita, pizarra- filita y caliza-lutita, que corresponden a una secuencia calcáreo-detritica de origen marino y de ambiente nerítico y batial afectada por diversos grados de metamorfismo e intrusionada por cuerpos de gabro y gneis, este último derivado de granodiorita. Pertenecen al sur de la faja del Geosinclinal Cordillerano (Rodríguez y Córdoba, 1977). Sus afloramientos se ubican en las inmediaciones del poblado de Tojibampo.

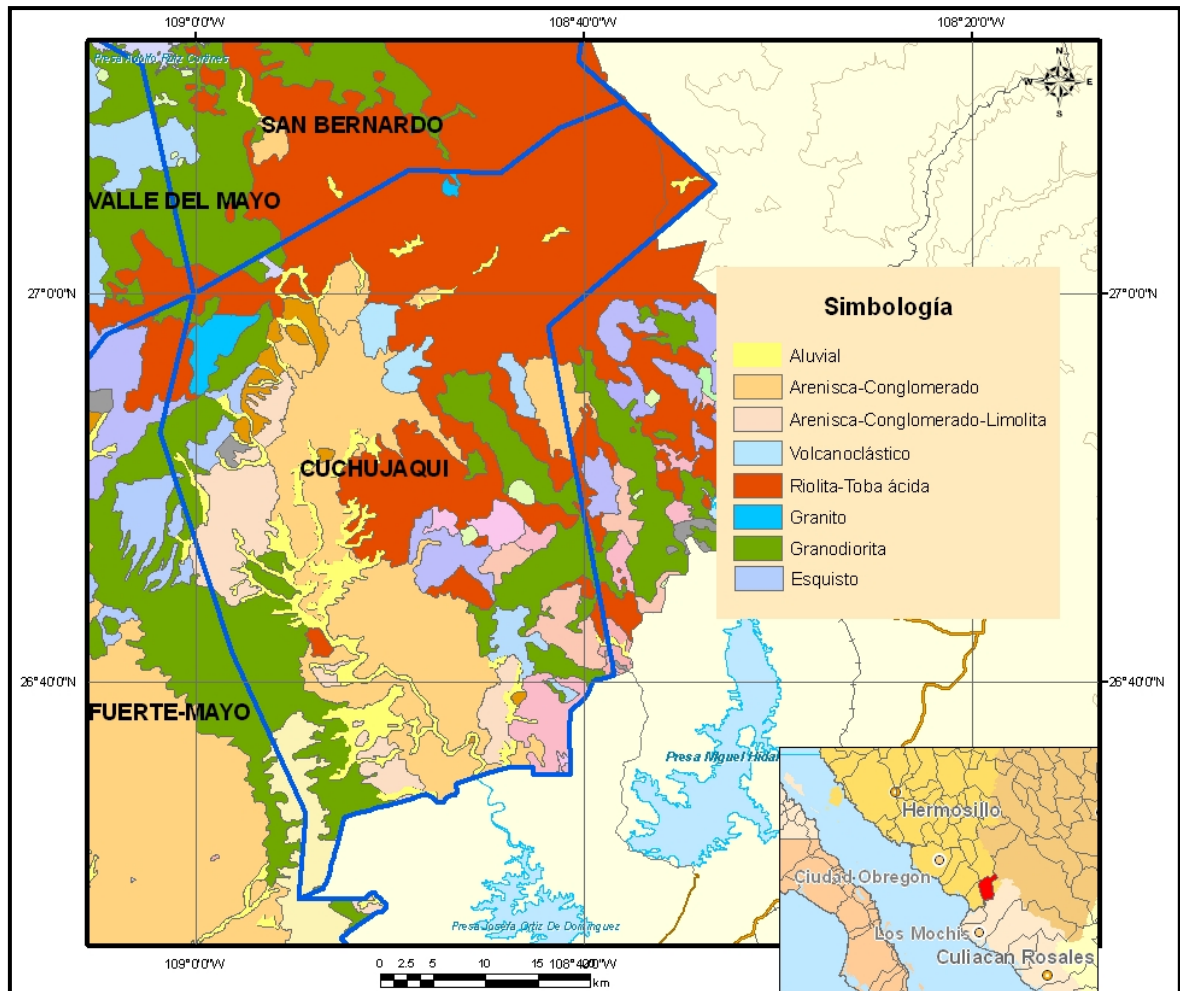
El Mesozoico se caracteriza por su litología heterogénea conformada por un conjunto volcanosedimentario y sedimentario afectado por diferentes tipos de metamorfismo. Las unidades del Jurásico son: roca metavolcánica, derivada de lavas y material piroclástico de composición intermedia y básica, afectada por metamorfismo regional (Rodríguez y Córdoba, 1977); volcanosedimentarias, con metamorfismo cataclástico y alteración hidrotermal, de la misma edad son las lutitas-areniscas y cuarcitas con metamorfismo incipiente y dinámico, que se correlacionan por su semejanza litológica y estructural a las formaciones Arrayanes, Santa Clara y Coyotes, del Grupo Barranca (Alencaster, 1961). En algunos lugares sobreyacen en discordancia erosional, a rocas del Paleozoico y subyacen a depósitos calcáreos y pelíticos del Cretácico inferior, de ambiente nerítico, con diverso grado de metamorfismo (Rodríguez y Córdoba, 1977).

A fines de la era Mesozoica e inicios de la Cenozoica se emplazaron cuerpos plutónicos e hipabisales de granito, microgranito, granodiorita, diorita, hornblendita, diques aplíticos y pórfidos andesíticos, pertenecientes al Batolito de Sinaloa, que intrusaron a las secuencias mencionadas.

La era Cenozoica se inicia con derrames andesíticos acompañados de material piroclástico de composición intermedia que subyace a eventos volcánicos de composición ácida. A fines del Cenozoico, durante los periodos Mioceno y Plioceno los eventos volcánicos son de composición intermedia y básica.

Durante el Cuaternario se depositaron sedimentos detríticos continentales en las depresiones tectónicas.

Finalmente, en el Reciente, se depositaron clásticos gruesos, medianos y finos de origen aluvial, eólico y lacustre. (Fries 1962).



**Figura No. 4. Mapa Geológico**

#### 4.1 Estratigrafía

Las relaciones estratigráficas entre las diferentes unidades litológicas se describen a continuación con base en su origen.

##### Rocas ígneas intrusivas.

##### Granodiorita K (Gd)

La unidad de granodiorita contiene cuerpos de granito y troncos de monzonita, originados por diferenciación magmática, constituye parte del Batolito de Sonora y Sinaloa. La granodiorita tiene como minerales esenciales cuarzo, oligoclasa, andesina y microclina; y como accesorios hornblenda, esfena, apatito y zircón.

Presenta una textura holocristalina con variación equigranular, estructura compacta, y formas redondeadas debido al intemperismo, en las partes mas elevadas. El granito corresponde a un tronco con incipiente metamorfismo, es de color blanco y rosado con tonalidades negras, sus minerales esenciales son cuarzo, microclina y oligoclasa, y los

accesorios son muscovita, biotita, apatito y zircón; su textura es holocristalina equigranular, estructura compacta fanerítica y rasgos de alteración hidrotermal. Es poco resistente a la erosión, por lo que forman lomeríos y planicies onduladas. Se les ha asignado una edad del Cretácico tardío al Oligoceno por varios autores (King, 1939; De Cserna, 1962; Salas y Clark, 1975 y Gastil y Krummenacher, 1977).

#### Microgranito T (Microgranito)

De acuerdo a Sir Nockolds (1978) se le puede denominar como pórfido de cuarzo, granítico y porfidita. Su composición mineralógica es: cuarzo, ortoclasa, oligoclasa y andesina como esenciales; los accesorios son biotita, zircón, apatito y los secundarios pirita y sericita; su textura es holocristalina equigranular alotriomórfica y la estructura es compacta. Forma crestones con dirección noreste, que se encuentran cubiertos en parte por rocas volcánicas de composición ácida del Oligoceno-Mioceno. Su expresión morfológica corresponde a sierras altas con picos y escarpes.

#### Rocas ígneas extrusivas.

##### Riolita-Toba Ácida Tom (R-Ta)

La forma una secuencia irregular de riolita fluidal y esferulítica, ignimbrita, toba riolítica y brecha volcánica ácida. La riolita fluidal es de color rojizo con estructura compacta y textura microcristalina; la riolita esferulítica de color rosa a gris con intemperismo ocre; la ignimbrita es de color gris con textura fluidal y textura microcristalina; contiene en su composición minerales de cuarzo, sanidino, oligoclasa, biotita, clorita, apatito y zircón. La toba y la brecha son rosadas, de textura merocristalina; estructura compacta porfídica. La primera tiene minerales de cuarzo, oligoclasa, andesina, sanidino, biotita y hematita; la segunda esta formada por fragmentos angulosos de rocas volcánicas ácidas e intermedias englobados en una matriz areno-tobácea. Su morfología es de sierras y mesetas disectadas y sobreyacen discordantemente a rocas intrusivas, volcánicas y a rocas más antiguas.

Su edad se correlacionó con los eventos de actividad ignimbrítica ocurridos en la parte superior del Oligoceno (Mc Dowell y Clabaugh, 1979).

##### Toba Ácida-Brecha Volcánica Ácida Tom (Ta-Bva)

Secuencia compuesta por una alternancia rítmica de toba, toba brechoide y brecha volcánica con escasos derrames riolíticos; en ciertos niveles se encuentran areniscas cuarzo feldespáticas de grano fino a medio. La toba presenta una textura merocristalina piroclástica, tiene esferulitas rellenas de cuarzo y está formada por cuarzo, sanidino, oligoclasa, andesina, biotita, hematita y magnetita. La toba brechoide es rica en fenocristales de biotita, líticos de andesita y fragmentos de pómez; la matriz es criptocristalina a vítrea. La brecha tiene fragmentos angulosos de riolita, andesita y material piroclástico. La riolita es de color rosa que intemperiza a café, tiene textura porfídica con fenocristales de oligoclasa y cuarzo; hacia la base de la secuencia generalmente se encuentran vitrófidos que separan a esta unidad de las rocas intermedias que subyace; forma topografía de mesetas cortadas por profundos cañones.

Su edad se determina por correlación con las rocas del sistema Sierra Madre Occidental; constituye las manifestaciones que cubren a las Sierras de Piamonte en Sinaloa y Sonora.

### Rocas sedimentarias.

#### Caliza Ki (cz)

Caliza de ambiente nerítico con textura variable de packstone a wackestone que hacia la base cambia a mudstone; sus estratos varían de medianos a gruesos y su color de gris a gris rojizo; los restos fósiles que contiene son foraminíferos, radiolarios y ostrácodos; formando lomeríos aislados sobre el intrusivo y rocas metamórficas; sobreyace en contacto tectónico a rocas verdes (pertenecientes al arco del Jurásico), semicubiertas por areniscas continentales rojizas de grano medio, que a su vez subyacen a calizas bituminosas fósiles de color gris oscuro, de estratos medianos y masivos.

#### Conglomerado Ts (cg)

Formado por depósitos continentales constituidos por conglomerados y arenas conglomeráticas en menor cantidad, bien clasificados, poco compactos y con cementante calcáreo; sus cantos son redondeados y subredondeados, sus fragmentos provienen de rocas volcánicas y en ocasiones de rocas ígneas intrusivas; su color es blanco y amarillo claro con tonos rojizos y negros. La matriz contiene arena, limo y arcilla. Estos depósitos constituyen las evidencias de antiguos abanicos aluviales y coluviales que se desarrollaron en el pie de monte. Su morfología es de planicie ondulada y lomerío de pendiente suave. Su edad se correlaciona con los clásticos continentales de la Formación Báucarit del Terciario superior (Dumble, 1900 y King, 1939).

#### Arenisca-Conglomerado Tm (ar-cg)

Unidad de areniscas tobáceas y conglomerados, depositados en un ambiente continental; son de color rosa e intemperizan a pardo. La arenisca tobácea consta de cuarzo, plagioclasa, piroxeno, epidota, clorita, y gran cantidad de hematita, así como fragmentos de rocas intrusivas y toba vítrea; su textura es clástica y su estructura compacta. Al conglomerado polimíctico lo forman fragmentos angulosos de rocas intrusivas y extrusivas de carácter ácido e intermedio, su matriz es areno-tobácea; se presenta en delgados horizontes acuñados en la arenisca. Sobreyace a rocas volcánicas ácidas del Oligoceno-Mioceno; su expresión morfológica es de lomas alargadas. Unidad formada por una secuencia de rocas sedimentarias clásticas dispuestas en forma arrítmica entre la arenisca lítica feldespática, mal seleccionada e inmadura, de grano medio a grueso, en horizontes irregulares, localmente con estratificación cruzada de carácter conglomerático y el conglomerado polimíctico de clastos subredondeados a redondeados de rocas ígneas y metamórficas. La secuencia presenta capas medianas y delgadas de limolita y lutita. En general muestran diferentes grados de compactación.

#### Aluvión Q (al)

Depósito de grava, arena, limo y arcilla no consolidado; su granulometría varía de material grueso al pie de la sierra y fino hacia los valles, su color es café claro-amarillo; se originó en el depósito de material detrítico generado por el río Cuchujaqui.

El carácter progradante de los materiales fue favorecido por la existencia de prominencias rocosas que formaban antiguas islas, que proporcionaron el aporte y acumulación rápida de sedimentos.

### Rocas metamórficas

#### Complejo Metamórfico Pe (Complejo Metamórfico)

Formado por la alternancia de rocas de metamorfismo regional de alto grado, consideradas como basamento (Rodríguez, Córdoba, 1977), compuesta por gneis anfibolítico, gneis, pegmatita y migmatita. El gneis anfibolítico está constituido por plagioclasa, hornblenda, tremolita-actinolita, biotita, clorita, esfena, pirita y cuarzo secundario; con textura granoblástica y lepidoblástica, de color blanco con tonos oscuros y verdes. La mineralogía del gneis es: cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa sódica, biotita, muscovita, hornblenda, granate, sericita y óxidos de hierro, con textura granoblástica de color blanco con tonos oscuros. Ambos gneises pertenecen a la facies de esquisto verde y anfibolita-almándino. La pegmatita y migmatita están formadas por cuarzo, albita y muscovita, principalmente. Se observan también diques aplíticos no deformados y pequeños troncos de hornblendita y gabro.

La morfología es de sierras altas con escarpes de pendiente fuerte y picos elevados.

#### Esquisto P (E)

Unidad con metamorfismo regional, constituida por cuarzo, tremolita-actinolita, clorita epidota, plagioclasa, hematita y pirita, pertenece a la facies de esquisto verde, con textura lepidoblástica y estructura compacta afanítica. Su color es verde y gris. Presenta morfología de sierras alargadas con dirección noreste-suroeste.

#### Pizarra-Filita Ps (Pz-F)

Alternancia de rocas metamórficas de bajo grado: pizarras y filitas, derivadas de rocas de un origen sedimentario como lutitas y areniscas, con aislados horizontes calcáreos.

La composición mineralógica es de cuarzo, sericita, biotita, escasa muscovita, clorita, granate, hematita y magnetita; con textura cataclástica, lepidoblástica, presentando una foliación lustrosa con un color gris oscuro.

#### Metavolcánico J (Metavolcánico)

Constituido por lavas y material piroclástico de composición andesítica y básica; afectadas por metamorfismo de contacto. Pertenecen a la facies de hornfels de albita-epidota, compuesta por minerales de epidota, biotita, sericita, muscovita, hematita y magnetita; son de color gris-claro y oscuro con tonalidades verdosas; de fracturamiento moderado a intenso. Su topografía es de lomeríos y cerros con altitud mediana. Se correlaciona con las rocas del Arco Jurásico del noroeste de México (Rodríguez y Córdoba, 1977).



## 4.2 Geología Estructural

Los rasgos estructurales más sobresalientes consisten de un intenso patrón de fallas y fracturas que pueden agruparse en tres grupos principales: Patrón con dirección aproximada norte-sur; patrón con dirección NW – SE y patrón con dirección NE – SW. Estos patrones estructurales se correlacionan a la apertura del Golfo de California, que provocó la generación de fosas tectónicas donde se acumularon gruesos paquetes de productos volcanoclásticos y detríticos.

Las rocas paleozoicas presentan vergencia hacia el norte, se encuentran descansando en contacto tectónico sobre rocas metavolcánicas del Jurásico; además las rocas metamórficas se encuentran cortadas por rocas intrusivas, muestran foliación y deformación concordante a las rocas encajonantes. El intrusivo del norte de Sinaloa, de dimensión batolítica, se encuentra afectado por el sistema de fallamiento normal cuyo patrón estructural es casi paralelo al Golfo de California. Los extensos afloramientos de sedimentos del Mioceno y Plioceno por los que discurre el río Cuchujaqui, evidentemente son producto de acumulación en fosas tectónicas y en ambas partes el control de este río es de carácter estructural.

El Complejo Sonobari se encuentra deformado estructuralmente, la vergencia de los esfuerzos es hacia el noreste, pero este efecto puede haber sido alterado por el emplazamiento del Batolito de Sinaloa.

## 4.3 Geología del Subsuelo

Con el objeto de conocer el comportamiento del subsuelo en sitios seleccionados de la cuenca del río Cuchujaqui, se procedió a la ejecución sondeos geofísicos en la siguiente modalidad:

Método aplicado: Resistividad Eléctrica.

Modalidad: Sondeo Eléctrico Vertical (S. E. V.)

Arreglo: Tetraelectródico de Schlumberger, figura No. 5

Apertura máxima de AB/2: 200 m; Apertura mínima de AB/2: 1.0 m

No. de Sondeos: 4

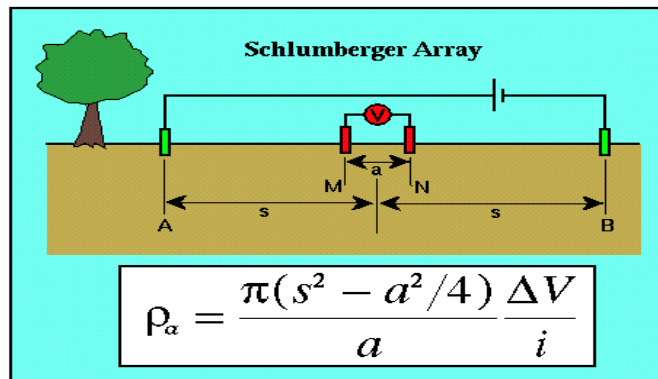


Figura No. 5. Arreglo tetraelectródico de Schlumberger

### Equipo utilizado:

Marca: **Scintrex – Saris**. Potencia máxima: 180 W. Corriente: 1.0 – 1000 Mampers. Software para interpretación: Resix – Plus V 2.0 - WinGlink. La interpretación cuantitativa de los datos de campo se resume en las siguientes tablas.

### Modelo Óptimo: **El Babójori**

No. de SEV	No de Capa	Corte Geoelectrico	Resistividad	Espesor
B1 CC1	1	KQ	42	0.30
	2		536	2.22
	3		**240	7.12
	4		**17	----

**\*\* Capas favorables**

Resistividad en  $\Omega$  - m; Espesor en metros.

### Modelo Óptimo: **Casa Vieja**

No. de SEV	No de Capa	Corte Geoelectrico	Resistividad	Espesor
CV1 AD1	1	KQQ	103	0.35
	2		6890	0.39
	3		***644	8.55
	4		****14	66
	5		1	----

**\*\* Capas favorables**

Resistividad en  $\Omega$  - m; Espesor en metros.

### Modelo Óptimo: **Cruce de Arroyos**

No. de SEV	No de Capa	Corte Geoelectrico	Resistividad	Espesor
CA1 AD2	1	KQ	404	0.61
	2		***104	15
	3		***9.5	41
	4		2.6	-----

**\*\* Capas favorables**

Resistividad en  $\Omega$  - m; Espesor en metros.

### Modelo Óptimo: **Los Muertos**

No. de SEV	No de Capa	Corte Geoelectrico	Resistividad	Espesor
LM1 LMSP	1	QQ	1450	1.72
	2		***430	4.2
	3		***23	24
	4		5	----

**\*\* Capas favorables**

Resistividad en  $\Omega$  - m; Espesor en metros.

Del análisis de los modelos óptimos obtenidos para cada uno de los sondeos levantados se concluye:

- La profundidad al nivel freático varía en el rango de los 3 a 5 m.
- El espesor del medio aluvial (granulometría de gravas – boleos) descansa en el rango de los 4 a los 15 m.
- Las Resistividades obtenidas para el medio Aluvial varían en el rango de los 100 a los 600  $\Omega \cdot m$ .
- Las terrazas fluviales que subyacen en discordancia al medio Aluvial presentan espesores favorables mínimos del orden de los 20 m.
- Las Resistividad obtenidas para estas terrazas varían en el rango de los 10 a los 17  $\Omega \cdot m$ .
- Es evidente, desde el punto de vista Geohidrológico, que las unidades representadas por el medio Aluvial y las Terrazas fluviales son las más importantes para la acumulación y alumbramiento de las aguas subterráneas.
- Las unidades formadas por las rocas intrusivas y metamórficas, constituyen las fronteras y barreras al flujo subterráneo.

## 5. HIDROGEOLOGÍA

### 5.1 Tipo de Acuífero

El tipo de acuífero que se presenta en las unidades Aluvial y Terrazas Fluviales es de tipo libre.

La Cuenca del Río Cuchujaqui tiene una superficie de 1,933.34 km<sup>2</sup> de los cuales 121.18 km<sup>2</sup> (6.3%) pertenecen a la unidad geohidrológica aluvial, 146.9 km<sup>2</sup> (7.6%) corresponden a la unidad geohidrológica conglomerado, 425.33 km<sup>2</sup> (22%) son de terrazas y 1,239.95 km<sup>2</sup> (64.1%) están constituidos por rocas impermeables del Cenozoico (tabla No. 2).

Unidad Geohidrológica	Área en km <sup>2</sup>	Porcentaje
Aluvial	121.18	6.7 %
Conglomerado	146.9	7.6 %
Terrazas	425.33	22%
Roca Compacta	1239.95	64.1 %
Total	1933.34	100 %

**Tabla No. 2. Unidades Geohidrológicas**

Las condiciones a la frontera son al Norte, Noreste y Este limita con la Sierra Madre Occidental, al noroeste con la Sierra de Álamos, al Oeste con el cinturón definido por la Sierra El Chorro. Al sur se encuentra la salida de la Cuenca hacia la Presa Josefa Ortiz de Domínguez, en el Estado de Sinaloa.

Se considera como única entrada de agua a la Cuenca la proveniente de la Precipitación Pluvial y como salidas los escurrimientos superficiales y subterráneos, evapotranspiración (el mayor porcentaje), y el bombeo.

Lo anterior lo confirma la piezometría medida, dando las líneas equipotenciales casi transversales a la dirección del flujo (norte-sur), con pequeñas deformaciones ocasionados por los cauces como el Cuchujaqui y Güirocoba.

El acuífero se ha mantenido en equilibrio o subexplotado debido a la incipiente explotación de las aguas subterránea.

## 5.2 Parámetros hidráulicos

Como parte de actividades realizadas durante el estudio de 2005, se llevaron a cabo pruebas de bombeo que permitieron determinar las propiedades hidráulicas del acuífero: transmisividad, coeficiente de almacenamiento, gasto específico, etc.

Mediante estas pruebas, puede observarse que la transmisividad se incrementa, de acuerdo con la geología subsuperficial; el aluvión del río contiene gran cantidad de material grueso y por lo tanto, las transmisividades son relativamente grandes,  $0.014 \text{ m}^2/\text{s}$  (alrededor de  $1000 \text{ m}^2/\text{día}$ ) aunque los depósitos pueden ser poco profundos. Los pozos en el Babójori y Rancherías resultaron con las mejores transmisividades, estos pozos se encuentran en el medio aluvial e interceptan los flujos de los arroyos Manojaqui y Cuchujaqui, respectivamente. Los pozos de Tapizuelas, Basiroa, Los Muertos y Los Parajes presentaron una transmisividad regular o media, dado que sus valores varían en el rango de  $300$  a  $500 \text{ m}^2/\text{día}$ . Los pozos El Salado, Paredones, Soto Montoya, Cerro Colorado y Las Uvalamas, presentaron valores bajos, menores de  $200 \text{ m}^2/\text{día}$ . Estos últimos están enclavados en terrazas antiguas y en roca.

En la tabla No. 3, se presentan los valores de transmisividad y conductividad hidráulica, resultado de las pruebas de bombeo de abatimiento y recuperación y dos aforos.

Pozo	Transmisividad $m^2/s$	Conductividad Hidráulica $m/s$	Espesor del acuífero (m)	Observaciones
El Salado- abatimiento	$9.5 \times 10^{-4}$	$6.33 \times 10^{-5}$	15	Casi $10^{-3}$ , un valor regular de Transmisividad
Tapizuelas	$6.10 \times 10^{-3}$	$3.10 \times 10^{-3}$	11.13	Valor regular de Transmisividad
Basiroa- abatimiento	$5.73 \times 10^{-3}$	$8.18 \times 10^{-4}$	7	Valor regular de Transmisividad
Basiroa- recuperación	$4.22 \times 10^{-3}$	$2.01 \times 10^{-4}$	7	Valor regular de Transmisividad
Los Parajes Abatimiento	$2.85 \times 10^{-3}$	$1.42 \times 10^{-4}$	20	Valor regular de Transmisividad
Los Parajes recuperación	$2.98 \times 10^{-3}$	$1.49 \times 10^{-4}$	20	Valor regular de Transmisividad. Similar a la de abatimiento
Rancherías abatimiento	$1.06 \times 10^{-2}$	$4.24 \times 10^{-4}$	25	La que presentó mejor valor de Transmisividad
Paredones abatimiento	$3.6 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-5}$	35	Baja Transmisividad
Los Muertos abatimiento	$6.55 \times 10^{-3}$	$8.19 \times 10^{-5}$	80	Valor regular de Transmisividad
Soto- Montoya abatimiento	$4.17 \times 10^{-4}$	$2.08 \times 10^{-5}$	20	Baja Transmisividad
Soto-Mntoya recuperación	$9.17 \times 10^{-4}$	$4.58 \times 10^{-5}$	20	Casi $10^{-3}$ , un valor regular de Transmisividad
F. Montoya abatimiento	$1.44 \times 10^{-2}$	$1.8 \times 10^{-4}$	80	La segunda mejor en Transmisividad
Cerro Colorado- abatimiento	$3.53 \times 10^{-4}$	$4.41 \times 10^{-5}$	8	Baja Transmisividad
Uvalamas Abatimiento	$1.52 \times 10^{-4}$	$6.2 \times 10^{-5}$	2.45	La que dio el valor mas bajo de Transmisividad
Uvalamas recuperación	$3.33 \times 10^{-3}$	$1.36 \times 10^{-3}$	2.45	Valor regular de Transmisividad

Tabla No. 3. Resultados de la interpretación de pruebas de bombeo

En 1982, se perforaron 10 pozos profundos entre las comunidades Los Muertos y Tapizuelas, se realizaron los respectivos aforos y con esa información se presentan en la tabla No. 4, los valores de Capacidad Específica (caudal entre abatimiento,  $Q/s$ ,  $m^3/s/m$ ).

Pozo	Profundidad (m)	Nivel Estático (m)	Nivel Dinámico(m)	Gasto (m <sup>3</sup> /s)	Capacidad Específica (m <sup>2</sup> /s)
Cuchujaqui 1	50.77	3.94	19.38	0.101	6.53*10 <sup>-3</sup> (564m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 2	95.67	4.55	14.27	0.101	1.03*10 <sup>-2</sup> (890m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 3	56.70	4.00	11.74	0.101	1.3*10 <sup>-2</sup> (1123m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 4	88.70	4.26	22.55	0.107	5.5*10 <sup>-3</sup> (475m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 5	57.37	4.20	34.76	0.0412	1.34*10 <sup>-3</sup> (116m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 6	56.80	3.40	31.90	0.0412	1.44*10 <sup>-3</sup> (124m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 7	56.70	4.25	18.12	0.0583	4.18*10 <sup>-3</sup> (361m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 8	50.67	5.80	13.70	0.100	1.27*10 <sup>-2</sup> (1097m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 9	57.50	7.00	37.20	0.028	9.27*10 <sup>-4</sup> (80m <sup>2</sup> /día)
Cuchujaqui 10	95.60	4.30	49.70	0.033	7.2*10 <sup>-4</sup> (63m <sup>2</sup> /día)

**Tabla No. 4. Capacidades específicas de pozos profundos**

Los pozos Tapizuelas 2 y 3 de Basiroa y el Tapizuelas 8 (Cuesta Vieja), dieron muy alta transmisividad, en cambio los Tapizuelas 9 y 10, localizados al norte de ésta población, resultaron con la más baja transmisividad.

### 5.3 Piezometría

Con la información obtenida de la nivelación de brocales se determinó la piezometría. El plano respectivo muestra que la configuración de las líneas equipotenciales se comportan en forma perpendicular a las líneas de flujo y casi paralelas en dirección noroeste-sureste, variando ligeramente en los cursos de agua. Lo anterior evidencia el estado de equilibrio que guarda el acuífero dado que no existe deformación en las isopiezas.

## 5.4 Comportamiento Hidráulico

### 5.4.1 Profundidad al nivel estático

En términos generales las profundidades al nivel freático (2005), decrecen hacia el sur de la cuenca, las profundidades máximas son del orden de los 20 metros a la altura de los poblados El Zapote y La Gacela mientras que, las profundidades mínimas son del orden de los 3 metros y se registran hacia los poblados Basiroa y Tapizuelas (figura No. 6).

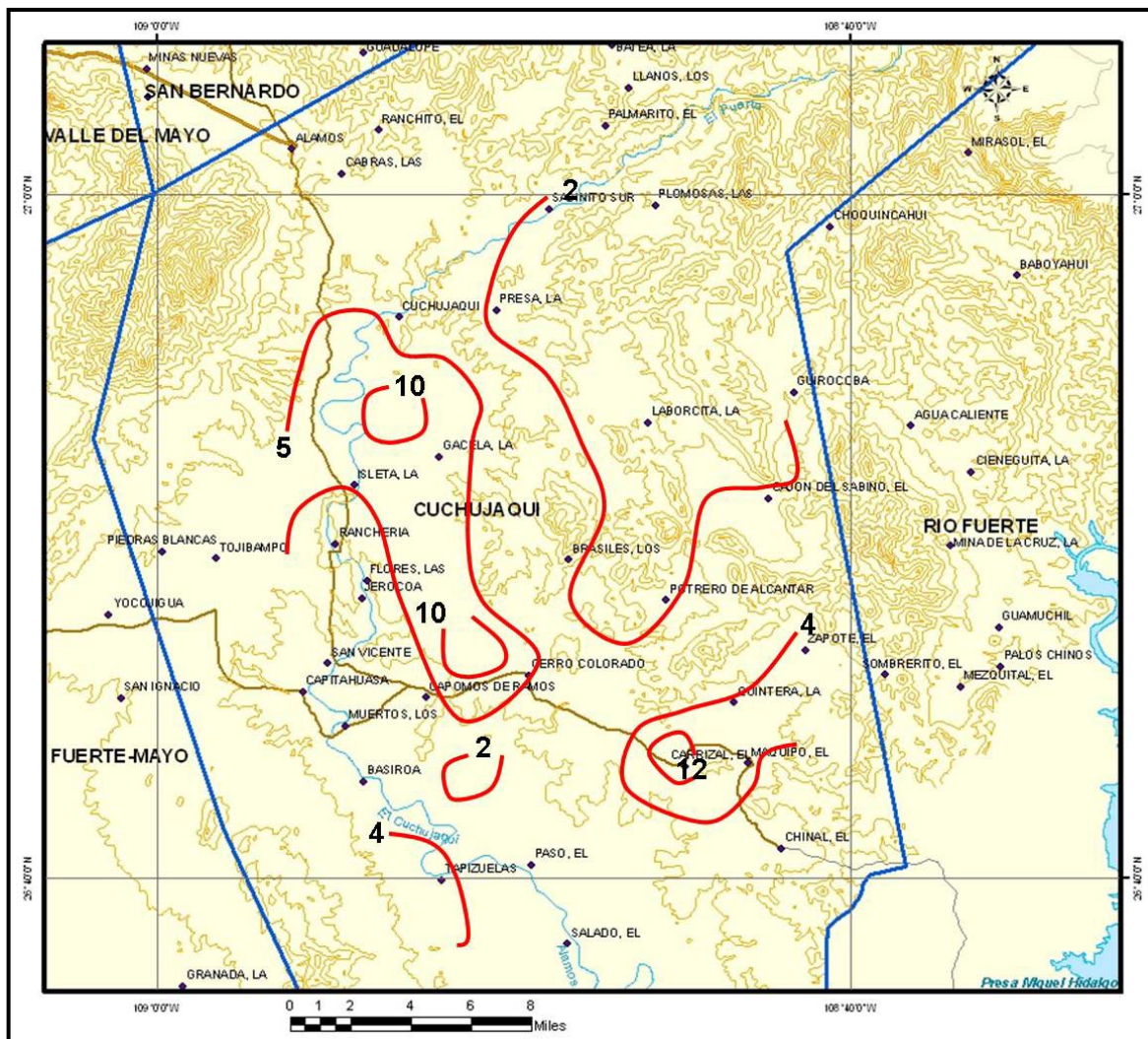


Figura No. 6. Profundidad al nivel estático en m (2005).

#### 5.4.2 Elevación del nivel estático

Las elevaciones de los niveles del agua subterránea (2004), indican una clara disminución hacia el sur, a partir de localidades como La Presa o Cuchujaqui, en donde se tiene elevaciones del nivel del agua de 300 msnm, hacia el poblado El Salado, al sur del área de balance, la cual alcanza una elevación de 120 msnm. Observando esta tendencia, y observando que las líneas de flujo son perpendiculares a las líneas equipotenciales, además de otros factores geológicos y estructurales, se deduce que las direcciones de flujo subterráneo en el acuífero están orientadas con una tendencia general hacia el sur (figura No. 7).

#### 5.4.3 Evolución del nivel estático

Este valor es difícil de estimar dado que no se realizan mediciones continuas, solo se tiene información de una campaña efectuada en 1991 y la actual, dando una diferencia de 10 centímetros a favor del almacenamiento (positivo).



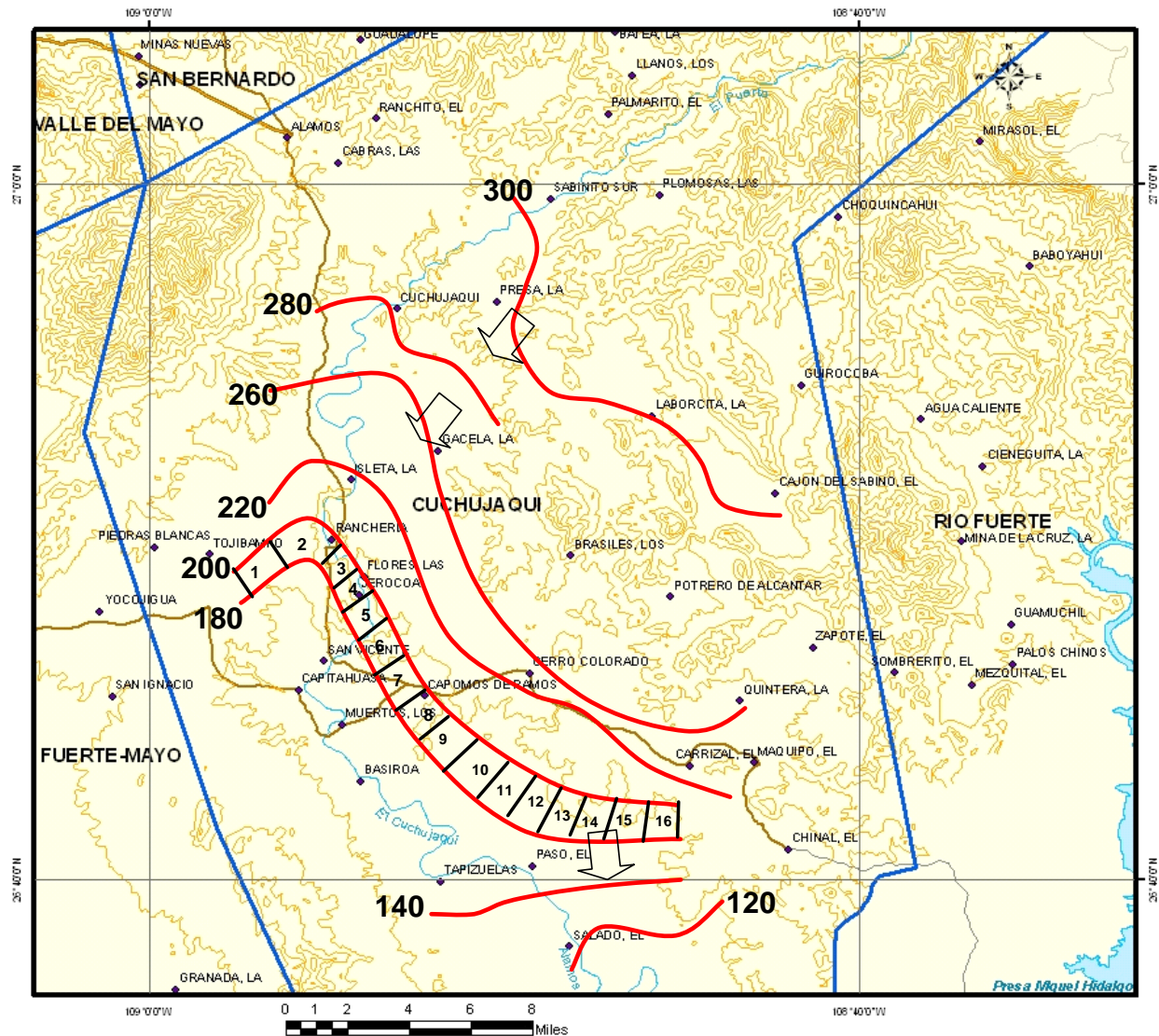


Figura No. 7. Elevación del nivel estático en msnm (2004)

#### 4.5 Hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea

Para la determinación del comportamiento hidrogeoquímico y la calidad del agua subterránea, se realizó el muestreo del agua en 27 pozos, de acuerdo al protocolo recomendado por el laboratorio reconocido por la CNA, determinándose 18 parámetros físicoquímicos.

##### Marco hidrogeoquímico.

En el sistema acuífero se distinguen cuatro facies hidrogeoquímicas principales:

Ca-HCO <sub>3</sub>	Bicarbonatada-Cálcica
Na-HCO <sub>3</sub>	Bicarbonatada-Sódica
Ca-Na-HCO <sub>3</sub>	Bicarbonatada Cálcico – Sódica
Ca- Cl - Na - HCO <sub>3</sub>	Bicarbonatada Cálcica – Clorurada Sódica



Estas facies o tipos de familias de agua se relacionan con los diferentes orígenes y medios de depósito.

### **Calidad del agua.**

La calidad del agua de toda la Cuenca es muy buena y excelente en el caso del Sabinito del Sur, fuente de abastecimiento a la Ciudad de Álamos. Se observa que en el caso de Santa Lucía sucede un caso de contaminación puntual por nitratos, dado que el pozo está dentro de los corrales de manejo del ganado. La concentración de Sólidos Totales Disueltos, muestran un rango de 100 a 600 mgs/lit, presentándose los valores más elevados hacia el este de la cuenca.

Los valores de Conductividad Eléctrica, muestra que los valores fluctúan en un rango de 150 a 950 microSiemens/cm, observándose los valores más elevados hacia el este de la cuenca confirmando la información del plano de Sólidos Totales. Ambos parámetros confirman la buena calidad del agua subterránea.

## **6. CENSO DE APROVECHAMIENTOS**

De acuerdo con las estimaciones del volumen de extracción, hechas durante el censo de aprovechamientos, se considera que el total de extracción asciende a los 2.5 Mm<sup>3</sup> anuales, extraídos mediante 254 aprovechamientos, de los cuales la gran mayoría son norias de bajo rendimiento que se utilizan para satisfacer las necesidades del uso doméstico abrevadero. Del volumen total de extracción, 1.6 Mm<sup>3</sup> anuales se utilizan para dotación de agua potable, 0.1 para uso agrícola, 0.1 más para uso doméstico-abrevadero y los 0.7 Mm<sup>3</sup> restantes tienen usos múltiples.

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

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

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

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

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

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

$$R_v + E_h - B - S_h - D_m - ETR = \pm \Delta V(S) \text{ ---- (1)}$$

Donde:

Eh: entradas subterráneas por flujo horizontal  
 Rv: recarga vertical  
 B: extracción por bombeo  
 Sh: salidas subterráneas por flujo horizontal  
 Dm: descarga por manantiales  
 ETR: descarga por evapotranspiración  
 $\Delta V$ : cambio de volumen en el acuífero

Para el caso particular de este acuífero, dado que no existen salidas por flujo base ni descarga a través de manantiales, por lo que la ecuación se simplifica:

$$Eh + Rv = B + Sh + ETR + \Delta V(S) \text{ ----- (2)}$$

Las entradas al acuífero están integradas por las recargas naturales por infiltración de agua de lluvias y recargas inducidas producto de fugas en la red de agua potable. Para el cálculo de la recarga se obtuvo primero el cambio de almacenamiento y conociendo las salidas totales, las entradas (recarga total) quedaron como una incógnita en el sistema.

### Escurrimiento Superficial que sale de la Cuenca.

Para la determinación del flujo por escurrimiento se utilizó el método indirecto del INEGI (figura No. 8): Este método toma en cuenta tres parámetros básicos; la permeabilidad de suelos y rocas, la densidad de la cubierta vegetal y la variación espacial de la lluvia. Con la interacción de estos parámetros se obtiene un coeficiente de escurrimiento.

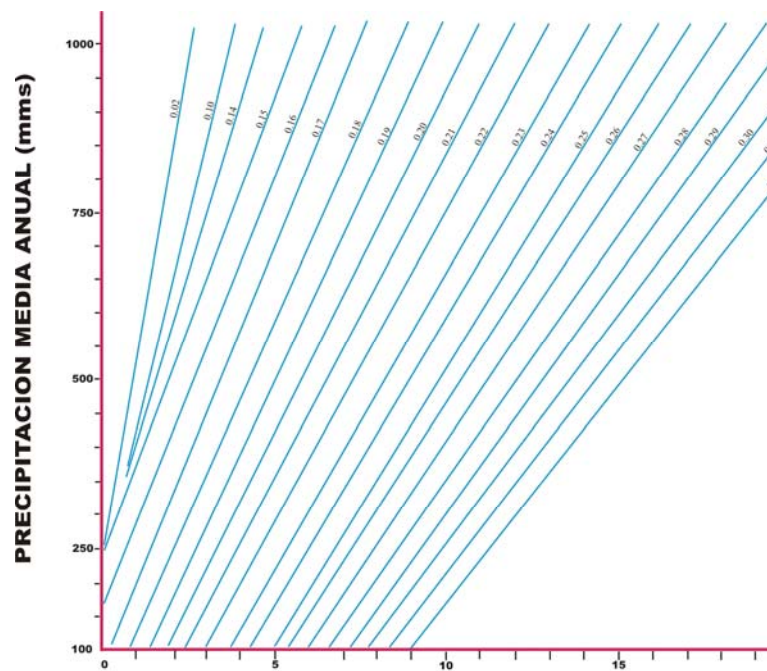


Figura No. 8. Porcentaje del coeficiente de escurrimiento

Por medio de este método se obtuvo una relación de permeabilidad – densidad de 0.22 y con una precipitación de 600 mm, se obtiene un coeficiente de escurrimiento de 8.5%.

Volumen escurrido = área \* precipitación \* coeficiente de escurrimiento

$$\text{Volumen escurrido} = 1933.34 \text{ km}^2 * 0.0006 \text{ km} * 0.085 = 0.0986 \text{ km}^3 = 98.6 \text{ hm}^3$$

Este volumen escurrido de 98.6 millones de metros cúbicos está muy cercano al volumen escurrido medio anual registrado en la estación Cazanate, que es de 107.5 hm<sup>3</sup> (Arambula, 1991).

## 7.1. Salidas

Las salidas del acuífero ocurren principalmente por flujo horizontal subterráneo, evapotranspiración y bombeo.

### 7.1.1 Flujo subterráneo horizontal.

Con base en la configuración de curvas de igual elevación del nivel estático mostrada en la figura No. 7, se seleccionaron los canales de flujo para aplicar la Ley de Darcy y calcular el caudal “Q” que sale del acuífero, como se muestra a continuación:

$$Q = T * B * i$$

Donde:

T: Transmisividad (m<sup>2</sup>/s) en el canal de flujo

B: Ancho (m) del canal de flujo

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

El volumen estimado se muestra en la tabla No. 5 y asciende a **19.5 (hm<sup>3</sup>/año)**.

**Tabla No. 5. Salidas horizontales subterráneas**

No. de Celda	Transmisividad	Ancho de Celda	Gradiente Hidráulico	Gasto	Gasto Anual
	m <sup>2</sup> /s	m	m/m	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /a
1	0.0001	1800	0.02	0.0036	0.1
2	0.0005	1600	0.013	0.0104	0.3
3	0.0005	1400	0.013	0.0091	0.3
4	0.0005	1800	0.011	0.0099	0.3
5	0.001	1800	0.01	0.018	0.6
6	0.001	2000	0.0095	0.019	0.6
7	0.002	2700	0.008	0.0432	1.4
8	0.002	2400	0.0069	0.03312	1.1
9	0.003	3000	0.0066	0.0594	1.9
10	0.003	2000	0.0066	0.0396	1.2
11	0.005	2000	0.0095	0.095	3.0
12	0.005	1800	0.01	0.09	2.8
13	0.005	1600	0.0091	0.0728	2.3
14	0.01	800	0.01	0.08	2.5
15	0.001	2000	0.01	0.02	0.6
16	0.001	1600	0.01	0.016	0.5
				0.61912	19.5

### 7.1.2 Evapotranspiración

Este parámetro es la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas, por lo tanto es considerada una forma de pérdida de humedad del sistema. Existen dos formas de Evapotranspiración: la que considera el contenido de humedad en el suelo y la que considera la etapa de desarrollo de las plantas (Evapotranspiración Potencial y la Evapotranspiración Real), el escurrimiento y el volumen de evapotranspiración real (ETR). Este parámetro es utilizado para la recarga potencial de infiltración

La evapotranspiración es determinada por variables meteorológicas como radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

Gran parte de la precipitación que ocurre en el territorio nacional vuelve a la atmósfera como vapor, como resultado de la evaporación, la transpiración y la sublimación. Evaporarse significa que las moléculas de agua, al adquirir suficiente energía por acción de la radiación solar, escapan de la superficie del agua o de un suelo húmedo, pasando del estado líquido al gaseoso.

La transpiración es el agua que después de ser absorbida por las plantas escapa de ellas convertida en vapor. La evapotranspiración representa, tanto al agua que evaporan las superficies húmedas, como la que simultáneamente transpiran las plantas.

La evapotranspiración real (ETR) fue calculada por el método de Turc; esta ecuación empírica se expresa de la siguiente forma:

$$ETR = P / (0.9 + (P^2/L^2)^{1/2})$$

Donde:

ETR: Evapotranspiración real, en mm

P: Precipitación media anual, en mm

L:  $300 + 25T + 0.05T^3$

T: Temperatura media anual, en °C

Con el método de Turc se obtuvo un valor medio en la cuenca de 573 mm anuales.

Tomando como dato la evapotranspiración, un área de niveles someros de 121.18 km<sup>2</sup> y un valor promedio de profundidad al nivel del agua subterránea de 6 m, tenemos lo siguiente:

$$\text{Evapotranspiración} = 0.573 \text{ m/año} (121.18 \times 10^6 \text{ m}^2) \times 0.4 = 27.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

$$\text{ETR} = 27.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Se ha observado que en acuíferos libres con superficie freática cercana a la del terreno, ocurren variaciones diarias de su nivel, a consecuencia de la evaporación y/o transpiración. Ambos fenómenos causan una descarga de agua a la atmósfera, que es prácticamente constante, puesto que la misma tiene una fuerte correlación con la temperatura. La evaporación que se produce en el agua subterránea es pequeña, excepto en aquellos casos en que la superficie freática se encuentre cerca del terreno. Su magnitud depende de la posición de la franja capilar con respecto a la superficie del terreno. Para este caso, para una profundidad media de 6 metros al nivel del agua, se tomó un porcentaje del 4%.

### 7.1.3. Bombeo

De acuerdo con la información del censo de aprovechamientos y la hidrometría realizada durante el estudio de 2005 el volumen de extracción asciende a **2.5 hm<sup>3</sup>/año**.

## 7.2 Cambio de almacenamiento

Para la estimación del cambio de almacenamiento se comparó la información piezométrica recaba durante un estudio realizado en 1991 por la Universidad de Sonora con los niveles piezométricos registrados en el 2005. De esta comparación se observa que la profundidad de los niveles piezométricos no han sufrido alteraciones importantes durante el periodo 1991-2005.

Los valores negativos son puntuales y la tendencia general es la estabilidad de los niveles, con un valor promedio de recuperación general de 10 cm. Por esta razón es que para fines prácticos del balance, se considera nulo el cambio de almacenamiento.

$$\Delta V(S) = 0$$

### 7.3. Entradas

#### 7.3.1. Flujo subterráneo horizontal

Dado que no existe información piezométrica confiable para toda la superficie del acuífero que permita definir las celdas de entradas por flujo subterráneo horizontal, en apego estricto a la NOM-011-CNA-2000, se decidió calcular las salidas del acuífero y el cambio de almacenamiento para proceder a calcular el valor de las entradas (o recarga total).

#### 7.3.2. Recarga total

La recarga total ( $R_t$ ) que recibe el acuífero representa la suma de las entradas calculadas al acuífero ( $R_v + E_h$ ), resultan de aplicar la ecuación de balance:

$$E_h + R_v = B + S_h + E_v + \Delta V(S) \text{ ----- (2)}$$

$$R_t = 2.5 + 19.5 + 27.7 + 0.0 = 49.7$$

$$R_t = 49.7 \text{ hm}^3/\text{año}$$

En la tabla No. 6 se resume el balance de aguas subterráneas

**Tabla No. 6. Balance de aguas subterráneas**

<b>RECARGA</b>			
Entradas Totales		hm <sup>3</sup> /año	<b>49.7</b>
<b>RECARGA TOTAL</b>	$R_t$	hm <sup>3</sup> /año	<b>49.7</b>
<b>DESCARGA</b>			
Salidas horizontales		hm <sup>3</sup> /año	<b>19.5</b>
Manantiales		hm <sup>3</sup> /año	<b>0.0</b>
Evapotranspiración		hm <sup>3</sup> /año	<b>27.7</b>
Extracción total		hm <sup>3</sup> /año	<b>2.5</b>
Agrícola		hm <sup>3</sup> /año	0.1
Múltiples		hm <sup>3</sup> /año	0.7
Público-Urbano		hm <sup>3</sup> /año	1.6
Doméstico-Abrevadero		hm <sup>3</sup> /año	0.1
<b>DESCARGA TOTAL</b>	$S_t$	hm <sup>3</sup> /año	<b>49.7</b>
<b>Cambio de Almacenamiento</b>	$\Delta V$	hm <sup>3</sup> /año	<b>0.0</b>

### 8. DISPONIBILIDAD

Para el cálculo de la disponibilidad del agua subterránea, se aplica el procedimiento indicado en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, que en la fracción relativa a las aguas subterráneas establece la expresión siguiente:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Disponibilidad media} & & & & \text{Descarga} & & \text{Volumen anual de} \\ \text{anual de agua} & & & & \text{natural} & & \text{aguas subterráneas} \\ \text{subterránea en una} & = & \text{Recarga total} & - & \text{comprometida} & - & \text{concesionado e} \\ \text{unidad hidrogeológica} & & \text{media anual} & & & & \text{inscrito en el REPDA} \end{array}$$

De acuerdo con la Norma, para deducir una recarga media representativa, se planteará el balance a un intervalo de tiempo de varios años en que se disponga de los datos básicos para cuantificar sus términos y que incluya tanto años secos como años lluviosos. En su defecto, el balance se planteará para un intervalo mínimo de un año.

**Disponibilidad publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de agosto de 2007**

### **Recarga total media anual**

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida. Para el caso del acuífero Cuchujaqui, la recarga media total anual asciende a **29.0 hm<sup>3</sup>/año**.

### **Descarga natural comprometida**

La descarga natural comprometida, se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben de ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes. Para el acuífero Cuchujaqui, Sonora, existe una descarga natural comprometida de **19.5 hm<sup>3</sup>/año**, que corresponde a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero Río Fuerte, estado de Sinaloa.

### **Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA**

En el acuífero Cuchujaqui, Sonora, el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, al **31 de mayo de 2005** es de **2.496409 hm<sup>3</sup>/año**.

### **Disponibilidad de aguas subterráneas**

La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología indicada en la norma referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA:

$$7.003591 \text{ hm}^3/\text{año} = 29.0 \text{ hm}^3/\text{año} - 19.5 \text{ hm}^3/\text{año} - 2.496409 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe disponible un volumen de **7.003591 hm<sup>3</sup>/año (millones de m<sup>3</sup>/año)** para nuevas concesiones en el acuífero denominado *Cuchujaqui*, en el estado de Sonora.

## **Actualización Técnica y Administrativa de la Disponibilidad al 31 de diciembre de 2007**

### **8.1. Recarga total media anual**

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida. Para el caso del acuífero Cuchujaqui, su valor se calculó despejándola de la ecuación de balance. La recarga media total anual asciende a **49.7 hm<sup>3</sup>/año**.

### **8.2. Descarga natural comprometida**

La descarga natural comprometida, se cuantifica mediante medición de los volúmenes de agua procedentes de manantiales o de caudal base de los ríos alimentados por el acuífero, que son aprovechados y concesionados como agua superficial, así como las salidas subterráneas que deben de ser sostenidas para no afectar a los acuíferos adyacentes. Para el acuífero Cuchujaqui, Sonora, existe una descarga natural comprometida de **19.5 hm<sup>3</sup>/año**, que corresponde a las salidas por flujo subterráneo hacia el acuífero Río Fuerte, estado de Sinaloa.

### **8.3. Volumen anual de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA**

En el acuífero Cuchujaqui, Sonora, el volumen anual concesionado, de acuerdo con los títulos de concesión inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), de la Subdirección General de Administración del Agua, al **31 de diciembre de 2007** es de **4.074596 hm<sup>3</sup>/año**.

### **8.4. Disponibilidad de aguas subterráneas**

La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología indicada en la norma referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de aguas subterráneas concesionado e inscrito en el REPDA:

$$26.125404 \text{ hm}^3/\text{año} = 49.7 \text{ hm}^3/\text{año} - 19.5 \text{ hm}^3/\text{año} - 4.074596 \text{ hm}^3/\text{año}$$

La cifra indica que existe disponible un volumen de **26.125404 hm<sup>3</sup>/año (millones de m<sup>3</sup>/año)** para nuevas concesiones en el acuífero denominado *Cuchujaqui*, en el estado de Sonora.



## 9. BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Alencaster G. 1961. "Estratigrafía del Triásico Superior de la Parte Central del estado de Sonora". Paleontología Mexicana 11 parte I, Instituto de Geología, UNAM. México.
- Arámbula M. D. A., J.C. Palomino M. 1991. "Panorama Geohidrológico del Estado de Sonora". Tesis. Departamento de Geología. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- Astier, J.L. 1982. "Geofísica Aplicada a la Hidrogeología". Ed. Paraninfo. Madrid, España.
- Brady N.C., R.R. Weil. 1996. "The Nature and Properties of Soils". Eleventh edition. Prentice Hall. New Jersey. USA.
- Brooks K.N., P. F. Ffolliott, H.M. Gregersen, J.L. Thames. 1991. "Hydrology and the Management of Watersheds". Iowa State University Press/Ames. USA.
- Castillo G. J. L., Vega G., M. A. Ríos A., C. Rivas. 1991. "Apoyo al Conocimiento de los Recursos Hidráulicos de Seis Zonas Hidrológicas del Estado de Sonora". PRONASOL-SEP-CNA. Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora, México
- Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Modelación hidrogeológica. 2005. "Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Cuchujaqui, Almos, estado de Sonora, México".
- Dingman L.S. 1994. Physical Hydrology. Macmillan Publishing Company. University of New Hampshire. New York. USA.
- Fries, C. 1962. "Reseña Geológica del estado de Sonora, con énfasis en el Paleozoico". Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. Vol. 14. México.
- INEGI. 2000. "Anuario Estadístico de Sonora". Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- King, R. E. 1939. "Geological Reconnaissance in Northern Sierra Madre Occidental of Mexico". Geol. Soc. Of Am. Bull. V. 50.
- Maidment R. David. 1993. "Handbook of Hydrology". McGraw-Hill Inc. USA.
- Raisz, E. 1964. "Landforms of Mexico". Second edition. Prepared for the Geography and Branch of the office of Naval Researchs. Cambridge, Mass. USA.
- Renard, K. G. 1970. "The Hydrology of Semiarid Rangeland Watersheds". USDAS\_ARS41-162. Tucson, Arizona. USA.
- Springall R. 1967. "Esguerrimiento en Cuencas Grandes". Secretaría de Obras Públicas. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Telford, W.M., L.P. Geldart, R.E. Sheriff, D.A. Keys. 1984. "Applied Geophysics". Cambridge University Press