



UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y
NATURALES
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA
SUBCUENCA RÍO BACANUCHI, SONORA, MÉXICO”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
GEOLOGO

PRESENTA:
GISELA GUADALUPE ARAUJO QUINTERO

DIRECTOR: JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO



HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Hermosillo, Sonora, a 13 de marzo del 2017

DRA. SILVIA MARTINEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
UNIVERSIDAD DE SONORA
P R E S E N T E.-

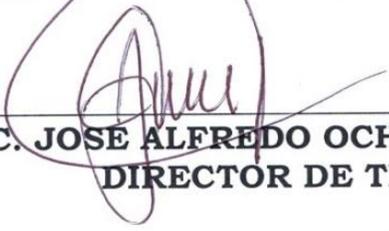
Por este conducto y de la manera más atenta, me permito someter a su consideración, para el registro y aprobación el siguiente tema de tesis, intitulado:

**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA RIO
BACANUCHI, SONORA, MÉXICO”**

Lo anterior es con el fin de que la alumna **GISELA GUADALUPE ARAUJO QUINTERO** con **No. de Expediente 211201788** pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología.

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
“EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA”



M.C. JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO
DIRECTOR DE TESIS.

C.c.p. Interesada.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

Hermosillo, Sonora, 29 de marzo, 2017

M.C. JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E.-

Por este conducto, le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por usted intitulado:

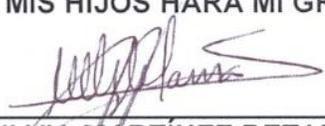
**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA RÍO
BACANUCHI, SONORA, MÉXICO”**

Esto es con el fin de que la alumna: **GISELA GUADALUPE ARAUJO
QUINTERO** con **Expediente No. 211201788** pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura en Geología. Así mismo les comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

PRESIDENTE	M.C. JOSÉ ISMAEL MINJAREZ SOSA
SECRETARIO	DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA
VOCAL	M.C. JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
“EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA”



DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO.



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo.



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

**“CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA SUBCUENCA RÍO BACANUCHI,
SONORA, MÉXICO”**

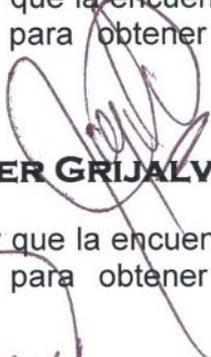
NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

GISELA GUADALUPE ARAUJO QUINTERO

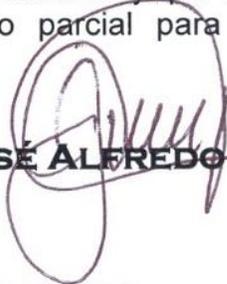
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.


M.C. JOSÉ ISMAEL MINJAREZ SOSA

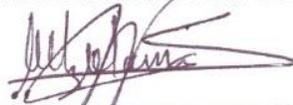
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.


DR. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.


M.C. JOSÉ ALFREDO OCHOA GRANILLO

ATENTAMENTE
“EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA”


DRA. SILVIA MARTÍNEZ RETAMA
JEFA DEL DEPARTAMENTO

C.c.p. Archivo.

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a las personas más especiales de mi vida, que siempre han estado a mi lado apoyándome y dando lo mejor de sí para que yo siga progresando personal y profesionalmente.

A mi madre Francisca Quintero Barraza que gracias a su apoyo, amor, comprensión y esfuerzo, hoy culmino esta etapa de mi vida, a quien le debo todo lo que soy hoy en día.

A mis hermanas Nancy y Daniela que siempre estuvieron conmigo.

A mis amigos de la Universidad, Nallely, Saira, Mayra, Sebastián, Rodrigo por su gran apoyo y paciencia al ayudarme a culminar esta etapa de mi vida.

A Christian Alegria por estar siempre a mi lado y darme apoyo en todo momento junto con su familia: Diana, Paola, Diego, Yesenia y a sus padres Lorenia y Juan.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad de Sonora, por permitirme formar parte de ella. A mis maestros por enseñarme nuevos conocimientos y sobre todo por mostrarme que hay tanto por aprender. Al departamento de Geología por el préstamo de recursos para campo para este trabajo.

Quiero agradecer a mi director de tesis, el Mc. José Alfredo Ochoa Granillo por sus enseñanzas y discusiones, por todo el tiempo brindando.

De igual modo quiero agradecer a mis sinodales el Dr. Francisco Javier Grijalva Noriega y al Mc. José Ismael Minjarez Sosa, por sus comentarios, correcciones y ayuda a entender temas bases para este trabajo.

INDICE

CAPITULO 1	GENERALIDADES.....	12
1.1	Introducción	12
1.2	Objetivo General	13
1.3	Localización y vías de acceso	13
1.4	Antecedentes	14
1.5	Metodología	16
CAPITULO 2	MARCO FÍSICO.....	17
2.1	Fisiografía	17
2.2	Climatología	18
Estaciones climatológicas		19
2.3	Hidrografía	21
2.4	Geomorfología	21
Tipos de relieve.....		22
Unidades geomorfológicas.....		23
CAPITULO 3	GEOLOGÍA	25
3.1	Marco Geológico	25
3.2	Estratigrafía	28
3.3	Geología estructural	32
CAPITULO 4	PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS.....	33
4.1	Precipitación	33
4.2	Temperatura	34
4.3	Evapotranspiración	37
CAPITULO 5	HIDROGEOLOGÍA SUBTERRANEA.....	38
Material no consolidado con posibilidades bajas		40
5.1	Piezometría	41
5.2	Profundidad del nivel estático.....	42
5.3	Elevación del nivel estático (2013)	44
5.4	Evolución de Nivel Estático para el periodo 2013-2016	46
5.5	Balance de aguas subterráneas	48
5.6	Entradas.....	50
Recarga Vertical (Rv)		50
Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh).....		51

5.7 Salidas (Descarga)	53
5.8 Bombeo	53
5.9 Salidas por flujo subterráneo Horizontal (Sh).....	53
Evapotranspiración	54
Cambio de almacenamiento V(S)	55
CAPITULO 6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	56
Recomendaciones	57

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio de la sub-cuenca Bacanuchi	14
Figura 2. Unidades Fisiográficas en el estado de Sonora	17
Figura 3. Climas del área de la sub-cuenca Bacanuchi	18
Figura 4. Localización de las estaciones climatológicas utilizadas	19
Figura 5. Hidrografía de la sub-cuenca Bacanuchi	22
Figura 6. Unidades Geomorfológicas en la sub-cuenca Bacanuchi	24
Figura 7. Mapa Geológico de la sub-cuenca Bacanuchi	26
Figura 9. Columna Estratigráfica	27
Figura 8. Secciones esquemáticas donde se muestra la relación de la unidad Conglomeratica del Mioceno (Formación Báucarit) con otras litologías volcánicas	31
Figura 10. Gráfica de precipitación total dentro de la sub-cuenca Bacanuchi	34
Figura 11. Isoyetas de precipitación para la sub-cuenca Bacanuchi	35
Figura 12. Gráfica de temperatura media dentro de la sub-cuenca Bacanuchi	36
Figura 13. Isotermas de temperatura para la sub-cuenca Bacanuchi	36
Figura 14. Gráfica de evapotranspiración dentro de la sub-cuenca Bacanuchi	37
Figura 15. Isolíneas de evapotranspiración para la sub-cuenca Bacanuchi	38
Figura 16. Usos de aprovechamientos (REPDA,2016)	39
Figura 17. Curvas del Nivel Estático (2013) de la Sub-cuenca Bacanuchi	43
Figura 18. Curvas del Nivel Estático (2016) de la Sub-cuenca Bacanuchi	44
Figura 19. Curvas de Elevación del Nivel Estático, 2013 para la Sub-cuenca Bacanuchi	46
Figura 20. Elevación del Nivel Estático en msnm	47
Figura 21. Evolución del Nivel Estático (2013-2016) para la Sub-cuenca Bacanuchi	49
Figura 22. Ley de Darcy en el medio poroso	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación media anual para la sub-cuenca Bacanuchi	34
Tabla 2. Temperatura media anual para la sub-cuenca Bacanuchi	35
Tabla 3. Evapotranspiración por el método de Turc	37
Tabla 4. Aprovechamientos del acuífero Bacanuchi	42
Tabla 5. Elevación del nivel estático	45
Tabla 6. Valores de evolución del nivel estático	48
Tabla 7. Calculo de entradas de flujo subterráneo para el 2016	53
Tabla 8. Calculo de salidas de flujo subterráneo para el 2016	54

Resumen

La subcuenca Río Bacanuchi, se encuentra en la Región Hidrológica 9 “Sonora Sur”, situada en la porción NNE del estado de Sonora, al SSW de la ciudad de Cananea y a unos 30 km al NNW del poblado de Arizpe. Se encuentra acotada por las coordenadas UTM 3429028 y 3358478 de latitud Norte y 543703 y 588527 de longitud Oeste.

La zona acuífera presente en el área de estudio está formado por elevaciones topográficas constituidas por rocas volcánicas félsicas (riolitas, tobas riolíticas y aglomerados) así como también rocas sedimentarias (calizas, areniscas y conglomerados) intercaladas entre si y rocas intrusivas altamente fracturadas, que permiten la infiltración, almacenamiento y circulación del agua. La recarga se lleva a cabo por la infiltración del agua de lluvia en las zonas altas de la sierra y lomas. Parte del flujo subterráneo es captado en los flancos de las elevaciones topográficas a través de los aprovechamientos. El volumen concesionado de agua subterránea es para dos usos principales: público urbano y pecuario. Cabe mencionar que el 18 por ciento de este volumen concesionado es para el uso agrícola y un 3 por ciento para uso doméstico.

De acuerdo con los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en el año 1970, en el acuífero Río Bacoachi, los valores de transmisividad varían de 10.0 a 50.0 x 10⁻³ m²/s. Ninguna de ellas contaron con pozos de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento ni el rendimiento específico.

Adicionalmente, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Río Bacoachi, Río Sonora, Río San Miguel, Magdalena, Cocóspera y Cuitaca, que presentan la misma litología y evolución geológica, es posible adoptar valores de transmisividad que varían de 0.2 a 5.1 x 10⁻³ m²/s, para el medio granular, y de 6.6 a 11.6 10⁻³ m²/s para el medio fracturado. Los valores de conductividad hidráulica varían de 0.02 a 6.1 m/d (2.3 X10⁻⁷ a 7.1 X10⁻⁵ m/s).

El análisis piezométrico se llevó a cabo para el periodo 2013-2016, con la que se elaboraron las configuraciones correspondientes. Debido a que los niveles del

agua no muestran variaciones significativas para estos años, sólo se describe la configuración de profundidad, elevación y evolución correspondiente para esta etapa.

CAPITULO 1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

Para un mejor desarrollo económico-social de alguna región es indispensable el conocimiento de los recursos existentes y el aprovechamiento que se lleve a cabo con los mismos. Uno de los principales es sin lugar a duda el agua subterránea, por lo que el conocimiento de este recurso, su evaluación, explotación racional y conservación, son muy necesarios y de gran valor para el consumo humano, así como el desarrollo agrícola, económico e industrial.

Las diferentes localidades asentadas a lo largo de los principales ríos en Sonora, y en el área de Bacanuchi en particular, se han desarrollado en el tiempo a partir tener como una actividad primordial la agricultura y la ganadería, por lo que su economía depende directamente de sus recursos hídricos, y dado a las condiciones climáticas y de sequía que se tienen en esta región, dependen más del agua subterránea que del agua superficial. Si bien es cierto que en la zona escogida para este estudio aún no se presentan problemas graves de abastecimiento de agua, es importante conocer su potencial y su estado actual.

Un modelo conceptual hidrogeológico representa la simplificación esquemática que intenta representar las condiciones del agua subterránea en determinado lugar, para lo cual se requiere analizar de manera integral la geología superficial, los diferentes parámetros hidrogeológicos del acuífero, el comportamiento del flujo del agua en el subsuelo y, de ser posible, información hidrogeológica obtenida en áreas con similares condiciones a las del área estudiada. Con esto se obtiene un acercamiento más acorde a la realidad, y puede ser un elemento importante para el desarrollo e implementación de políticas que lleven a un manejo sustentable del agua subterránea.

En este contexto, la caracterización geológica y de los diferentes parámetros hidrogeológicos que están involucrados en el desarrollo de un modelo conceptual, son un paso importante para llegar a éste. En este trabajo se presentan precisamente esta caracterización para el área estudiada, que corresponde a la sub-cuenca Bacanuchi y que forma parte de la cuenca hidrográfica del río Sonora en el noreste del estado.

1.2 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es obtener información geológica e hidrogeológica de la sub-cuenca Bacanuchi, la cual permita en el futuro realizar un modelo conceptual hidrogeológico de esta área.

1.2 Objetivos Particulares

Este trabajo tiene como objetivos particulares dentro del área estudiada de:

- Definir la geología y la geomorfología
- Identificar las condiciones hidrometeorológicas
- Analizar las condiciones piezométricas del agua subterránea
- Conocer el balance de aguas subterráneas

1.3 Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra situada en la porción NNE del estado de Sonora, al SSW de la ciudad de Cananea y a unos 30 km al NNW del poblado de Arizpe. Se encuentra acotada por las coordenadas UTM 3429028 y 3358478 de latitud Norte y 543703 y 588527 de longitud Oeste (Figura 1). Cubre una superficie aproximada de 1607 Km², y engloba parte de los municipios de Bacoachi, Arizpe y Cananea. Esta área cubre las cartas geológicas 16 de Septiembre, Cananea, Santa Teresa, Bacanuchi y Arizpe editadas por el Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50,000.

Las vías que dan acceso al área de estudio son: las carreteras federales N° 2 y N° 14 que comunica a la Ciudad de Hermosillo con la Ciudad de Agua Prieta. Se toma la carretera Federal No. 14 pasando por las poblaciones de Ures, La Junta y Mazocahui, en esta localidad se toma hacia el norte la carretera estatal N° 89, la cual comunica a esta población con la ciudad de Cananea, pasando por los poblados de Huepac, Banamichi, Sinoquipe, Arizpe y Tahuichopa. A partir de esta última localidad, se toma un camino de terracería que conduce al norte hasta la ciudad de Cananea, este camino cruza longitudinalmente toda el área de estudio, comunicando al poblado de Bacanuchi con rancherías, minas y pueblos vecinos a través de caminos y brechas en malas condiciones.

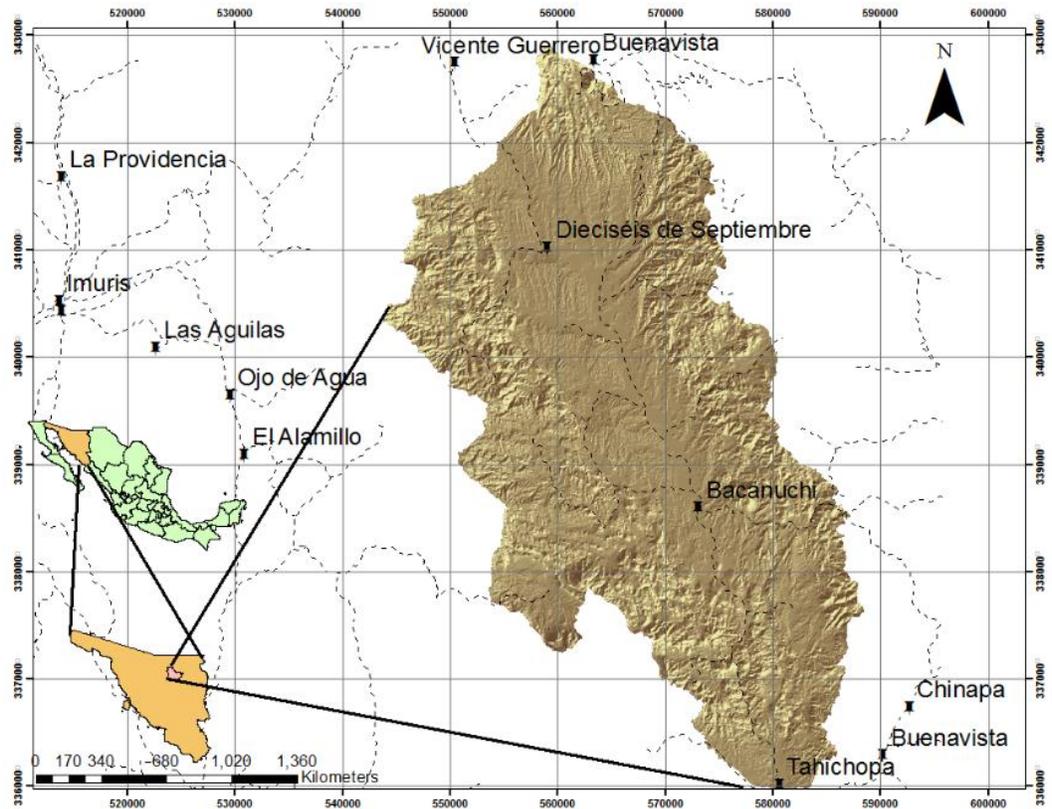


Figura1.- Mapa de localización del área estudiada

1.4 Antecedentes

Dentro del área estudiada y en general dentro de la región, se han realizado una serie de trabajos hidrogeológicos que en este trabajo fueron consultados, y para los cuales se hace un breve resumen:

DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO (2628) RIO BACANUCHI, ESTADO DE SONORA, 2010, Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. Se obtuvo como resultado la existencia de un volumen adicional de 10'290,142 m³ anuales para otorgar nuevas concesiones.

ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DE LAS SUBCUENCAS DE LOS RÍOS SONORA, ZANJÓN, SAN MIGUEL, MESA DEL SERI-LA VICTORIA Y CUENCA BACOACHITO, 2005, elaborado por la Universidad de Sonora, para la Comisión

Estatad del Agua (CEA) de Sonora. Mediante actividades de campo que incluyeron censo de aprovechamientos, piezometría, hidrometría de las extracciones, ejecución de sondeos geofísicos y estimación de parámetros hidráulicos fue posible plantear el balance de aguas subterráneas para calcular la recarga media anual que reciben los acuíferos. Adicionalmente, se recabaron muestras de agua subterránea para su análisis fisicoquímico correspondiente. Se recomendó realizar la prospección geofísica y directa para conocer el potencial de las rocas fracturadas y en la zona cercana a Hermosillo intensificar el monitoreo hidrodinámico e hidrogeoquímico.

ATLAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y RED DE MONITOREO DEL ESTADO DE SONORA. UNIVERSIDAD DE SONORA, 2005., elaborado para la Comisión Nacional del Agua. El estudio consistió en establecer una red de monitoreo piezométrico para cada acuífero que se encuentra bajo la administración de la Gerencia Regional Noroeste, que incluye la totalidad del estado de Sonora y parte de Chihuahua. Además de planos temáticos (clima, precipitación, temperatura, geomorfología, vegetación, etc.), se incluyen planos de configuración del nivel estático. Constituye una buena obra de consulta general de los acuíferos.

ESTUDIOS GEOELÉCTRICOS EN DIVERSAS ZONAS DEL ESTADO DE SONORA, 1974, elaborado por la empresa Ingeniería y Desarrollo, S.A., para la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). Este estudio aporta información de perfiles geoeléctricos, la mayoría de ellos perpendiculares al Río Sonora, localizados desde Mazocahui hasta Cananea.

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL DE LOS VALLES DE LOS RÍOS SAN MIGUEL, SONORA, ZANJÓN, BACOACHI Y MÁTAPE, SONORA, 1970, elaborado por la empresa Ariel Construcciones, S.A., para la Dirección de Aguas Subterráneas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). Entre las conclusiones más trascendentes, enfatiza que las corrientes de los Ríos Sonora, San Miguel y Bacoachi presentan escurrimiento durante todo el año, aunque en algunos tramos se pierde por infiltración; el conglomerado Báucarit es el principal acuífero de la región, funciona de manera general como acuífero libre y sólo cuando presenta interdigitaciones de lentes de arcillas adquiere un carácter semiconfinado. Los volúmenes medidos fueron

del orden de los 221.1 millones de m³, de los cuales 168.5 correspondieron a las avenidas que se presentaron durante la temporada de lluvias. Se recomienda aumentar el número de estaciones hidrométricas, la precisión y continuidad de la toma de datos, así como la construcción de secciones geofísicas perpendiculares a los cauces de los Ríos Sonora, Zanjón y San Miguel.

1.5 Metodología

La primera etapa consistió en llevar a cabo la recopilación de la información disponible dentro del área y en los alrededores, incluyendo estudios, bases de datos de estaciones climatológicas en Comisión Nacional del Agua, información digital y estadística del Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática, revisión de conceptos básicos a utilizarse en el estudio. Posterior a la recopilación de información se procedió a la verificación y toma de datos de campo, dentro de los cuales se tiene: la evaluación del nivel piezométrico, preparación del material cartográfico, y el procedimiento necesario de digitalización en Arcgis 10.3.

Para el trabajo piezométrico de campo se utilizó una sonda eléctrica con el objetivo de identificar la profundidad del nivel estático en el aprovechamiento. Se busca algún orificio para introducir la sonda (cable), no sin antes haber verificado su buen funcionamiento, una vez que se tiene detectada la profundidad del espejo del agua desde esa altura se va a considerar al brocal, después de hacer la medición de la distancia que existe entre la altura determinada y el terreno, y ambas medidas son anotadas. Este procedimiento se hace para todos los aprovechamientos

En cuanto a la climatología, se calculan los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración, por medio de la información de las estaciones climatológicas obtenida de la Comisión Nacional del Agua. El escurrimiento e infiltración se calculan en base a la información de las estaciones hidrométricas (también proporcionadas por la CONAGUA) y los coeficientes de escurrimiento en la zona son proporcionados por el INEGI.

Para definir la geología e hidrología del área, se tomaron en cuenta como base las cartas geológicas e hidrológicas del INEGI, escala 1:250 000, las cartas geológicas del

Servicio Geológico Mexicano, escala 1:50 000 y 1:250 000, con sus informes respectivos, verificando esta información por medio de la geología de campo.

Por último se calculó la disponibilidad de aguas en las zonas, utilizando la norma oficial NOM-011-CNA-2000, y se discute el modelo conceptual, para finalizar con las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO 2 MARCO FÍSICO

2.1 Fisiografía

El área de estudio se encuentra contenida en la provincia fisiográfica de Sierra Madre Occidental, y específicamente en la sub-provincia de Sierras y Valles del Norte (Figura 2), la cual está caracterizada por sierras altas y valles angostos entre éstas, con orientaciones preferenciales NW-SE.

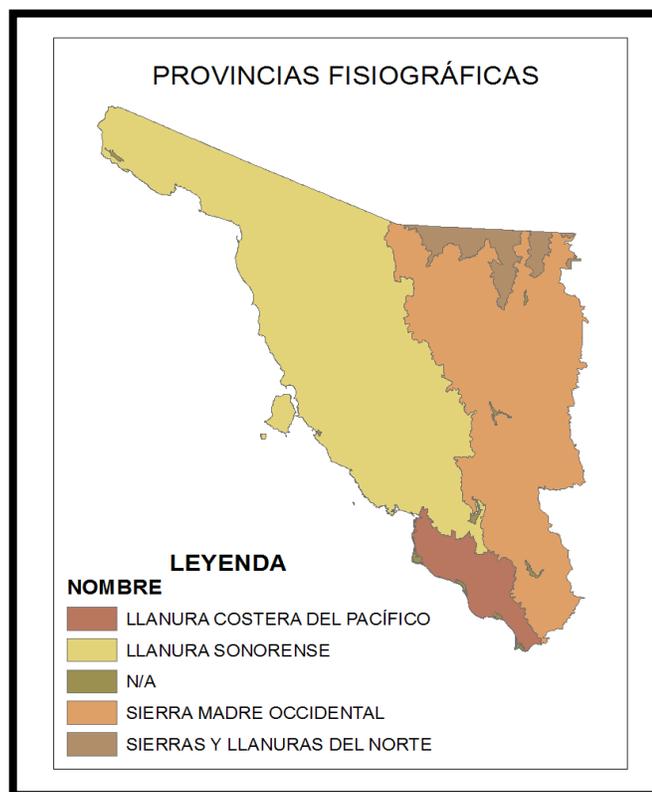


Figura 2.- Unidades Fisiográficas en el estado de Sonora

La altitud de los sistemas montañosos decrece hacia el sur, las mayores exceden los 2200 msnm y se encuentran en el límite norte del área de estudio, cercanos a la ciudad de Cananea; mientras que en la zona de menor elevación se presenta en el área del poblado de Tahuichopa, con elevaciones del orden de los 850 msnm.

2.2 Climatología

De acuerdo a la clasificación utilizada por Köeppen, modificado por García (1964), el clima que prevalece en la región es el BS1 kw (x'), que corresponde a clima semiseco-templado con lluvias en verano (Figura 3). Se caracteriza porque su temperatura media anual es de 12° a 18°C, una precipitación total anual de entre 400 y 600 mm, un verano cálido, y por un porcentaje de lluvia invernal mayor a 10.2 mm. En general éste clima se ubica en las zonas con una altura sobre el nivel del mar entre 1000 y 2400 m.

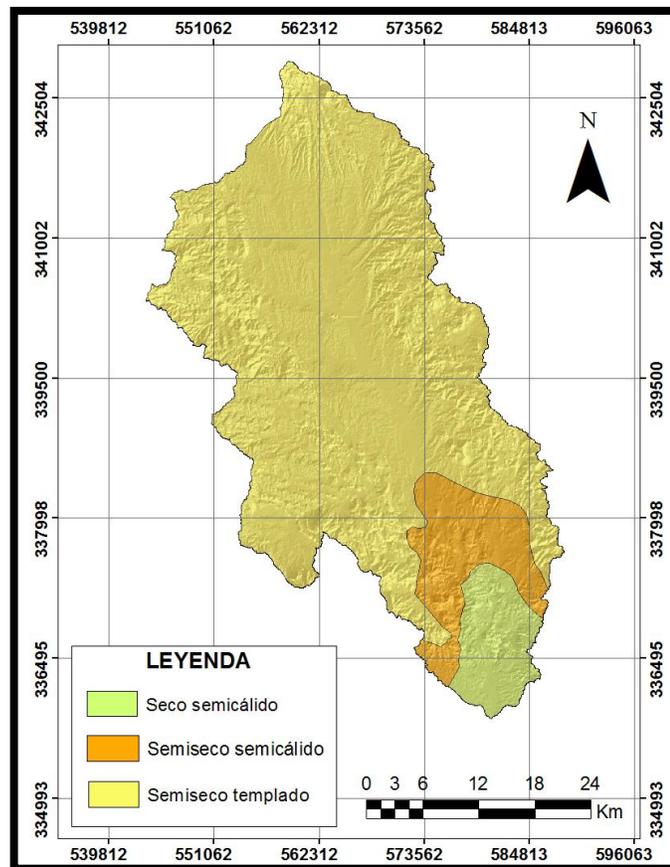


Figura 3.- Climas del área de la sub-cuenca Bacanuchi

Para el análisis climatológico se consideró la información de cinco estaciones climatológicas: Arizpe, Bacanuchi, Bacoachi, Cananea y Cucurpe, administradas por la Comisión Nacional del Agua. De acuerdo con sus registros para el periodo de 1964-2004.

Estaciones climatológicas

En la realización de este estudio, se analizó la información de las cinco estaciones climatológicas (Figura 4), todas ellas administradas por la Comisión Nacional de Agua. Los parámetros recopilados corresponden a temperatura (°C), precipitación (mm) y evaporación potencial (mm). Las estaciones son las siguientes:

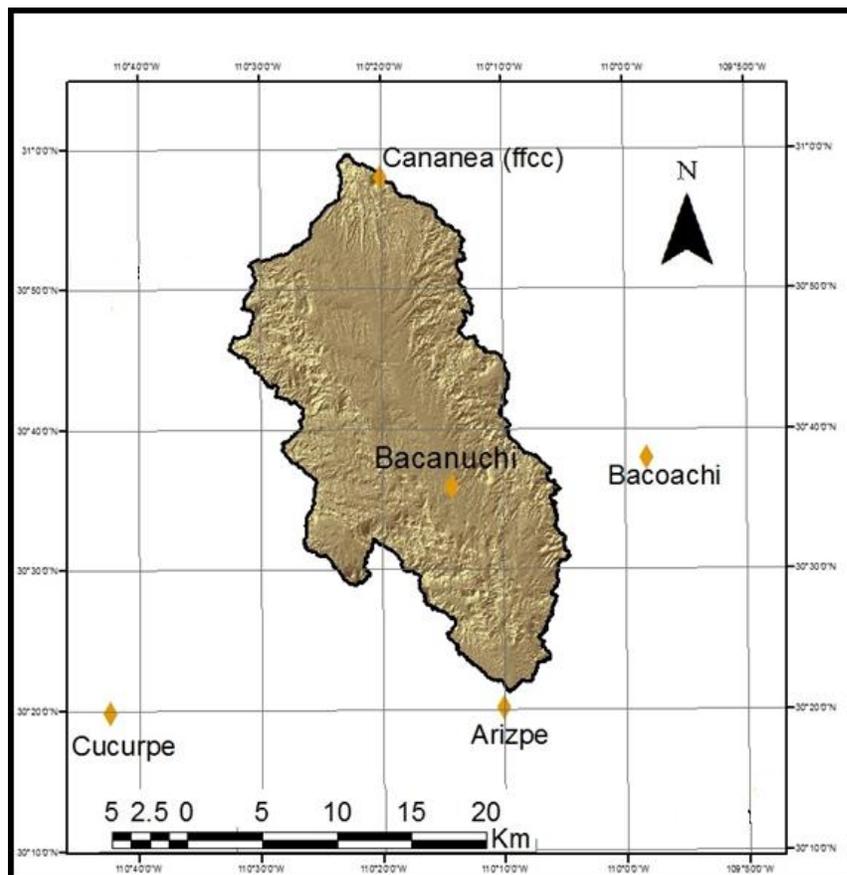


Figura 4.- Localización de estaciones climatológicas utilizadas

Arizpe

Esta estación se encuentra en el municipio de Arizpe con las siguientes coordenadas: latitud 3356293 N y longitud 580022.36 W. La temperatura y la precipitación cuentan con un período de datos muy consistentes, de abril de 1961 a diciembre de 1984, y a partir de ahí se tienen datos dispersos hasta 2002. Para ambos parámetros no se cuenta con datos en el período de 1989 a 1996. Para la evaporación potencial, abarca un período de datos sin interrupción de abril de 1961 a diciembre de 1984.

Bacanuchi

Esta estación se encuentra en el municipio de Arizpe. Geográficamente se ubica en las coordenadas: latitud N 3385397y longitud W 572990.3. Su información incluye 40 años con datos de temperatura y precipitación para el período de enero de 1964 a julio de 2003. Los datos son consistentes y solamente hacen falta para los últimos 5 meses de 1998, y para los primeros 3 de 1999. Para evaporación potencial es consistente en el período de 1964 a junio de 1989, pero desde entonces a la fecha prácticamente no existe registro, pues solo se tienen datos en el período de enero-julio de 2002.

Bacoachi (FFCC)

El nombre de la estación corresponde al municipio donde se encuentra, geográficamente se ubica en las coordenadas: latitud N 3389265.39 y longitud W 598708.25. Se encuentra a una altitud de 1,049 msnm, con un periodo de datos entre 1981 y 2010.

Cananea (FFCC)

Se encuentra en el municipio de Cananea con las siguientes coordenadas: latitud N 3426098.36 y longitud W 563666.85. Está a una altitud de 1,489 msnm, con un periodo de datos entre 1951 y 2010.

Cucurpe

El nombre de esta estación corresponde al municipio donde se encuentra con las siguientes coordenadas: latitud 3355451.1 N y longitud 528250.55 W. Con una altitud de 853 msnm.

2.3 Hidrografía

La subcuenca Río Bacanuchi, se encuentra en la Región Hidrológica 9 “Sonora Sur”, cuenca Río Sonora y sub-cuenca Río Bacanuchi. Esta sub-cuenca tiene un área de captación de 1607 Km² y su origen es en el parteaguas con el Río Bacoachi, que es el primer afluente del río Sonora; La corriente principal de esta subcuenca es el Río Bacanuchi, su nacimiento es en las cercanías de Cananea, como producto de los escurrimientos del flanco occidental de la sierra del Manzanal, de la porción oriental de la Sierra Papigochic y de parte suroeste de la Sierra de Cananea.

Mantiene un caudal constante hasta su confluencia con el río Sonora. Algunos de sus arroyos tributarios tienen un gasto constante durante el año debido a la presencia de pequeños manantiales que nacen en las sierras aledañas, además, el agua de los mismos que no alcanza a llegar al cauce principal.

El Río mantiene un rumbo NW-SE hasta el rancho Santa Elena, donde cambia a casi Norte-Sur hasta su desembocadura, con el Río Sonora, la cual ocurre al norte del poblado de Arizpe. El drenaje es de tipo dendrítico subparalelo (Figura 5) y los almacenamientos de agua superficial son mínimos, contando con un volumen menor a 1 millón de m³ que se utilizan con fines pecuarios.

2.4 Geomorfología

La geomorfología que se presenta en la sub-cuenca Río Bacanuchi se tomó del Atlas Estatal de Riesgos del 2005, elaborado por el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Para llevar a cabo dicho estudio se basaron en los lineamientos descritos por Verstappen y Van Zuidam (1981). En dicho trabajo se realizó el análisis morfogenético utilizando las cartas topográficas del INEGI del año 2000, y las cartas geológicas del Servicio Geológico Mexicano (SGM) a escala 1:250,000, mediante la delimitación de Sistemas de Terreno; la clasificación comprendió las características de las geoformas, altura relativa, pendiente, litología y origen, expresadas en el afloramiento de cada elemento.

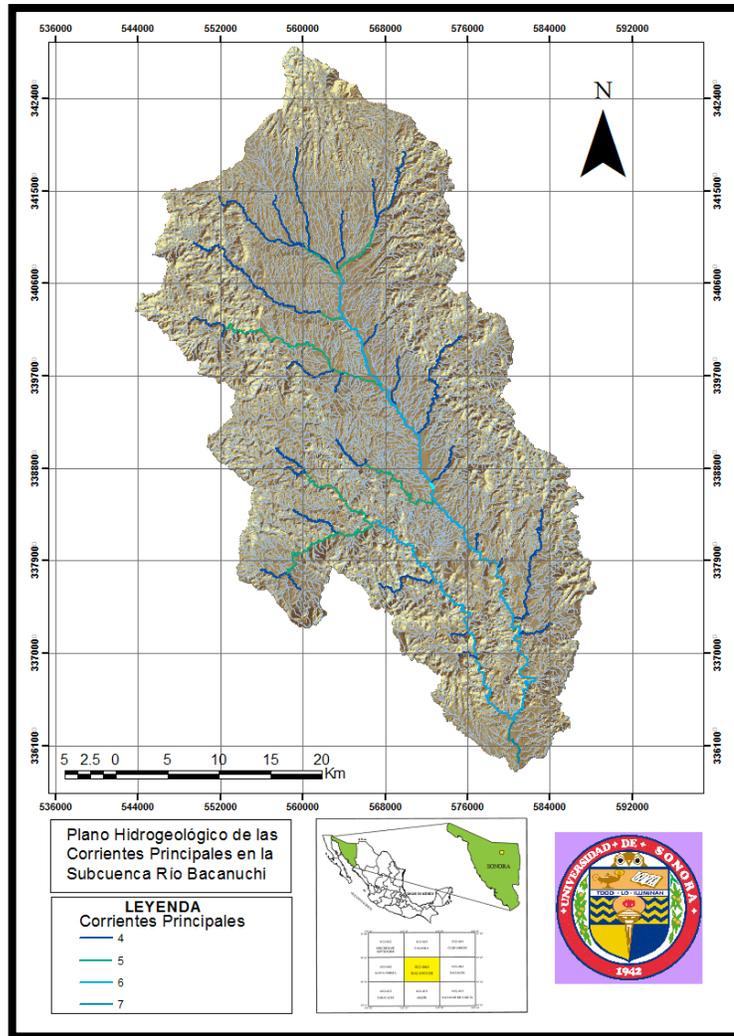


Figura 5.- Hidrografía de la sub-cuenca Bacanuchi.

Tipos de relieve

La plataforma de un levantamiento geomorfológico es la clasificación de cuatro grupos mayores, denominados tipos de relieve; éstos están definidos por su diferencia altitudinal, tomada en cuenta de la base a la cima de la misma unidad, y dentro de cada uno contiene componentes que dependen directamente de la escala de trabajo. Los tipos de relieve generales están determinados como:

Ladera montañosa: la condición principal de esta unidad morfogenética es una altura relativa mayor a 200 m, que según Lugo Hubp (1989), se deben a procesos endógenos de plegamiento, magmatismo y vulcanismo, y además también puede ser originada por la disección de una estructura de formación endógena modelada. Se sub-clasifica en

ladera montañosa baja y alta; la primera presenta un intervalo de 200-500 m y la segunda es superior a la anterior.

Lomerío: el factor determinante es que su altura relativa sea menor a 200 m; este grupo se origina por la nivelación de montañas (endógeno modelado) o por la disección de una planicie inclinada (exógeno erosivo).

Piedemonte: constituye márgenes montañosas o zonas transicionales que se distinguen por cambio de pendiente y altura considerablemente menor, va de 0-200 m, dependiendo del comportamiento del terreno; está compuesto de material detrítico y presenta drenaje fluvial.

Planicie: es una superficie de poca inclinación y diferencia altitudinal, corresponde al relieve exógeno acumulativo de depósitos aluviales, eólicos y costeros. Se consideró para su identificación el uso de suelo (agrícola y urbano), el cambio de pendiente y el patrón de drenaje.

La estabilidad de la pendiente se clasificó en tres categorías denominándose como estable para una pendiente entre los 0-10°, metaestable entre 10-25° e inestable entre 25-35°.

Unidades geomorfológicas

En el análisis para el acuífero Río Bacanuchi se encontraron 4 unidades geomorfológicas, de las cuales sobresalen: Lo E Cgp-B Tm, Ma M Vi-Va Ks y Ma I Vi-Va Ti (Figura 6).

Según la carta de Unidades Geomorfológicas, el área de estudio se ubica dentro de las Provincias Sierras Sepultadas de Sonora, Sierras y Valles, Sierra Madre Occidental; dentro de esta última, en las Subprovincias de Planicies y Montañas Residuales y Sierras Volcánicas Paralelas. Lugo Hubp et al., (1990). Dentro de esta sub-cuenca se forman estructuras complejas de rocas ígneas y sedimentarias, así como valles con una alineación NNW-SSE.

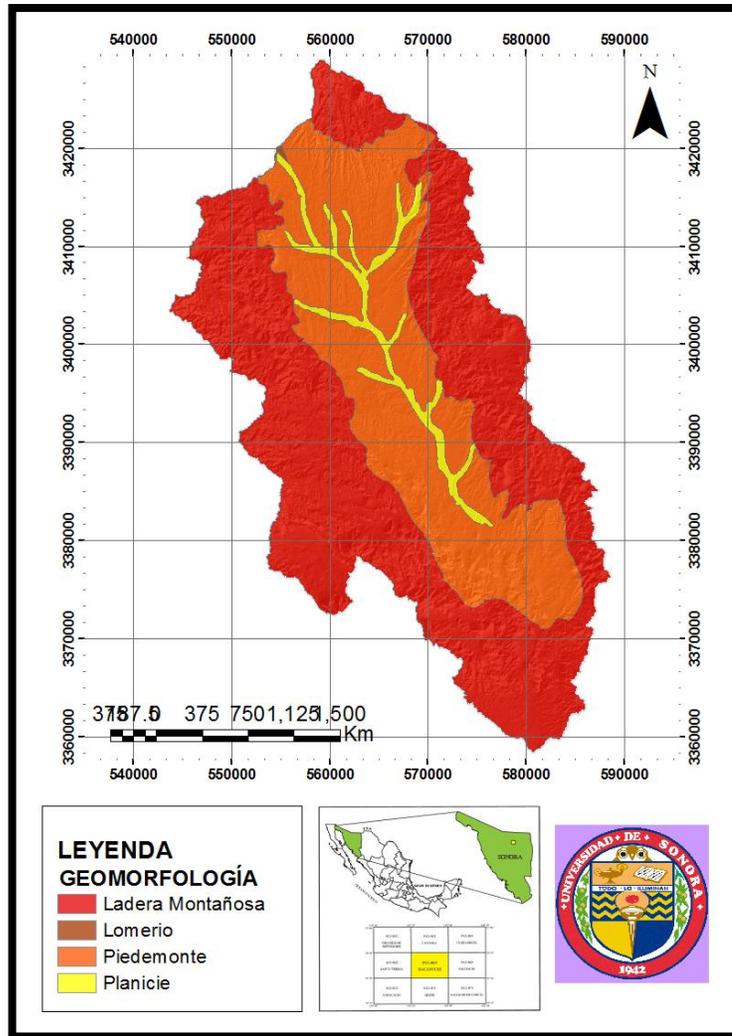


Figura 6.- Unidades Geomorfológicas en la sub-cuenca Bacanuchi.

Las principales geoformas como lomeríos y planicies se definen como todos aquellos cuerpos que presentan un nivel menor a los 200 m; mientras que la montaña baja y alta son aquellas que presentan elevaciones menores de 400 y 1150 m respectivamente. Las geoformas en el área estudiada están representadas por:

Montaña alta de pendiente metaestable: constituida de caliza masiva y arcillosa, arenisca, toba, ignimbrita, caliza y conglomerado, todas estas litologías con un rango de edad del Cretácico Temprano al Paleoceno.

Montaña Baja: está constituida por rocas volcánicas de composición de intermedia a ácida, andesita y rocas piroclásticas del Oligoceno.

Lomerío de pendiente estable: está constituido por conglomerado polimíctico y basalto del Mioceno, la planicie del aluvión está formada por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario, y sus afloramientos se encuentran en los cauces de ríos y arroyos.

CAPITULO 3 GEOLOGÍA

3.1 Marco Geológico

En el área de estudio afloran unidades litológicas que varían en edad del Jurásico Medio hasta el Reciente, específicamente rocas sedimentarias, volcanosedimentarias, volcánicas, intrusivas y sedimentos no consolidados (Figura 7 y 8).

Las rocas más antiguas que afloran en el área son volcánicas félsicas (riolitas y tobas riolíticas) del Jurásico, mientras que del Cretácico Temprano se encuentran unidades sedimentarias del Grupo Bisbee. Para el Cretácico Superior encontramos unidades tanto volcanosedimentarias (Formación Mesa) como conglomerados polimícticos que se intercalan con areniscas y presentan una diversidad de clastos tanto sedimentarios como volcánicos. Intrusivos granodioríticos y dioríticos se encuentran en la parte centro-este de la sub-cuenca, intrusionando a las unidades volcánicas y volcanosedimentarias de la Formación Mesa.

Para el Oligoceno se tiene una secuencia de rocas volcánicas representada, de la base a la cima, por basaltos y andesitas basálticas en forma de aglomerados, brechas y flujos afaníticos y porfídicos. El Mioceno presenta dos unidades; la Formación Baucarit que aflora en la porción del valle del área de estudio, que son conglomerados clastos dominados por fragmentos de andesita, riolita, toba riolítica, toba andesítica, andesita porfídica, traquiandesita y riodacita. La segunda unidad miocénica son andesitas porfídicas y lavas dacíticas con algunos flujos ignimbríticos.

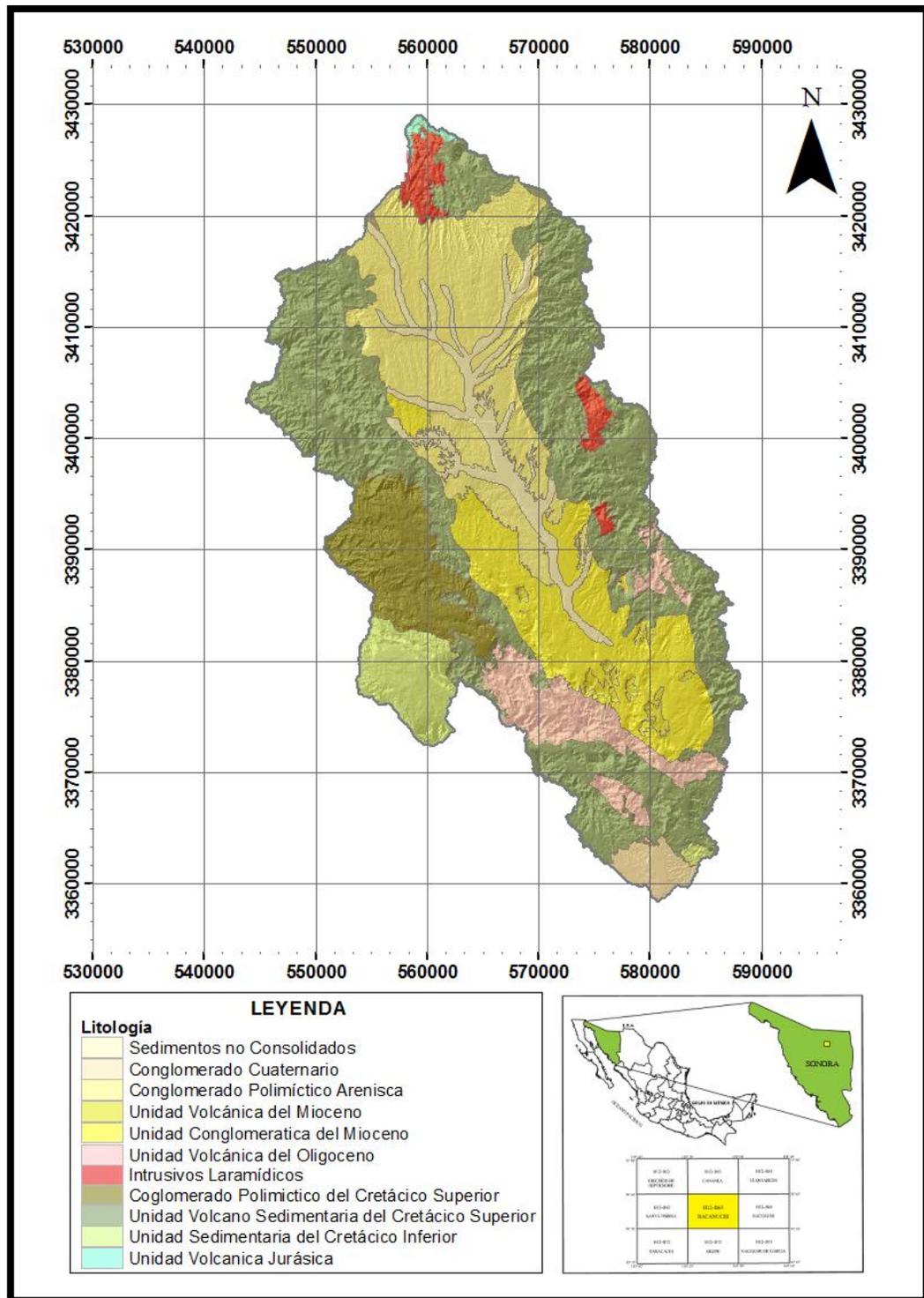


Figura 7.- Mapa geológico de la sub-cuenca Bacanuchi.

OBSERVACIONES

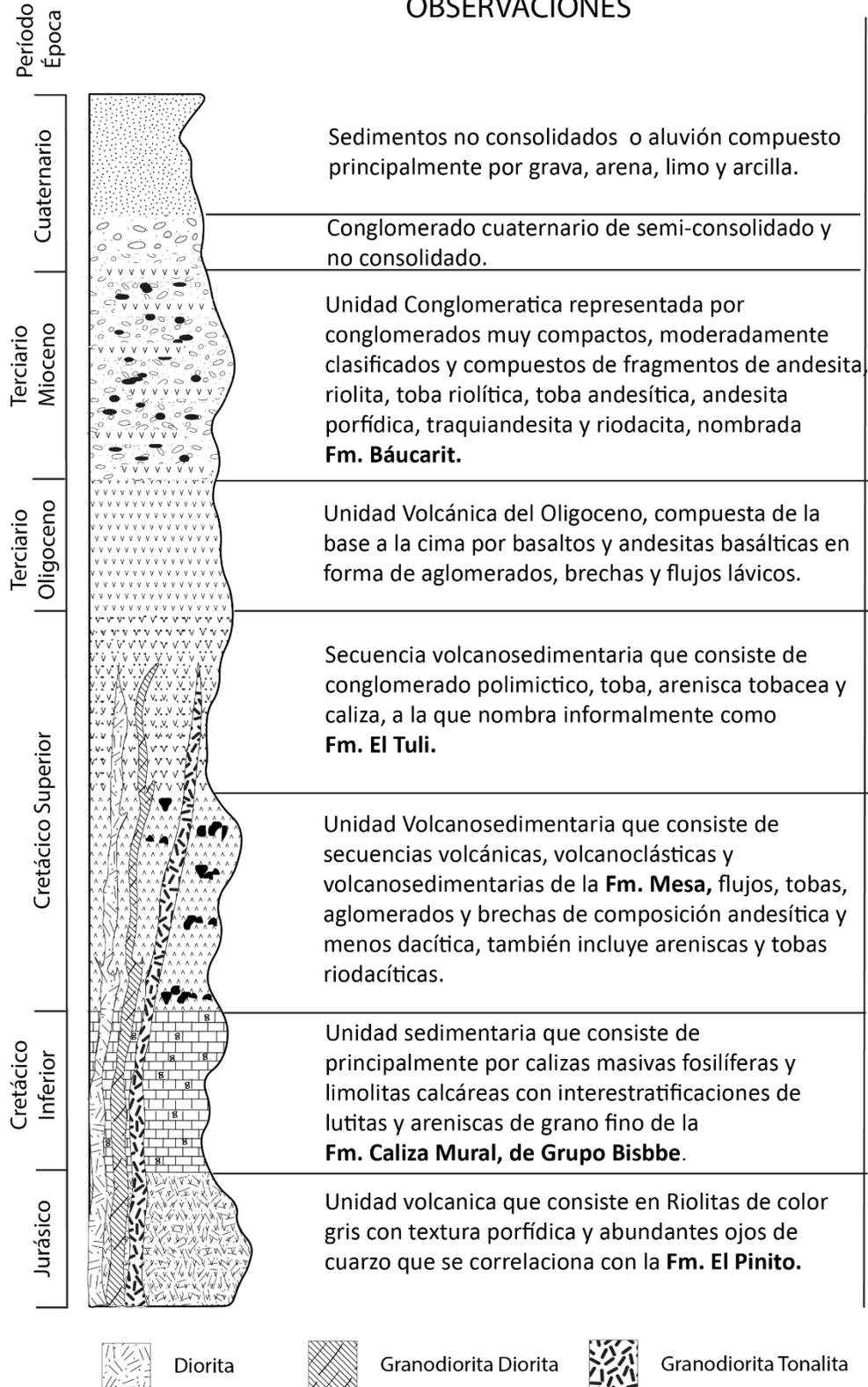


Figura 8.- Columna estratigráfica.

En el Plio-Cuaternario se tiene el depósito de un conglomerado polimíctico mal consolidado con escasos horizontes de limos y arenas, estos depósitos de formaron al igual que la Formación Baucarit en ambientes continentales. La unidad del Cuaternario es producto de la denudación de rocas preexistentes, se encuentra en la parte sur de la sub-cuenca Bacanuchi.

3.2 Estratigrafía

Unidad volcánica del Jurásico

En la parte NW de la sub-cuenca se encuentra aflorando una riolita asignada al Jurásico Medio, es de color gris con textura porfídica y abundantes ojos de cuarzo. Para esta unidad se reporta un espesor estimado de 1700 m (Valentine, 1936), ya que se correlaciona con la Formación El Pinito de una edad de 174 Ma (Stewart et al., 1986). Estas rocas se encuentran afectadas por las intrusiones más jóvenes (Iaramídicas).

Unidad Sedimentaria del Cretácico Inferior

Esta unidad aflora en la parte suroeste del área estudiada y está constituida principalmente por calizas masivas fosilíferas y limolitas calcáreas con interstratificaciones de lutitas y areniscas de grano fino, las cuales son consideradas como parte de la Formación Caliza Mural del Grupo Bisbee. Por esta correlación, se asignan al Cretácico Temprano

Unidad Volcanosedimentaria del Cretácico Superior

Como parte de esta unidad se encuentran aflorando ampliamente dentro del área estudiada secuencias volcánicas, volcanoclásticas y volcanosedimentarias de la Formación Mesa (Valentine, 1936). Está constituida por flujos, tobas, aglomerados y brechas de composición andesítica y menos dacítica, también incluye areniscas y tobas riódacíticas que se intercalan localmente con horizontes conglomeráticos. Para esta unidad se ha reportado una edad isotópica de 69 Ma (Wodzicki, 1995)

Unidad Conglomerado Polimíctico-Arenisca del Cretácico Superior

Esta unidad es descrita en el área de Arizpe por Rodríguez (1994) como una secuencia volcanosedimentaria que consiste de conglomerado polimíctico, toba, arenisca

tobacea y caliza, a la que nombra informalmente como formación El Tuli, la cual aflora en la parte centro-oeste del área de estudio. Esta unidad está compuesta principalmente por un conglomerado polimíctico y arenisca con horizontes lenticulares de limolitas, calizas impuras sin fósiles y horizontes de tobas riolíticas. Se encuentran afectadas por un intenso fracturamiento, ligeramente plegadas y deformadas generando rocas de metamorfismo de bajo grado de la facies de esquistos verdes. El conglomerado, presenta un color café-claro con tonos gris-violeta, pardo y café verdoso, con clastos pobremente clasificados sub-angulosos y sub-redondeados de litología variada, constituida de clastos de calizas, areniscas, cuarcita, toba andesítica, andesita y riolita porfídica englobados en una matriz arenosa.

Intrusivos Laramidicos

- *Granodiorita-Diorita*

Este intrusivo es de textura fanerítica generalmente de grano medio a grueso, esencialmente constituido por plagioclasas, feldespato potásico, cuarzo y biotita, presentando alteraciones locales de cloritización, sericitización y oxidación. Su color varía de blanco grisáceo (granodiorita) a gris verdoso (diorita). Sus principales afloramientos son hacia la porción central norte del área, conformando la base de la Sierra El Manzanal y más específicamente a lo largo de los arroyos Los Novillos, El Bajío y El Potrerito.

- *Granodiorita-Tonalita*

Esta unidad se encuentra muy distribuida en la parte sur de la sub-cuenca Bacanuchi, y litológicamente corresponde a facies de granito con cambios en la composición de sus minerales a una granodiorita, tonalita y monzonita. Presenta coloraciones claras, desde blanquecino a rosado, así como tonalidades de color oscuro. Son de textura granítica de grano medio a grueso, estructura masiva, y compacta, generalmente muy fracturados y silicificados.

- *Diorita*

Originalmente esta unidad fue definida por Emmons, (1910), como un granito porfídico, sin embargo, Valentine, (1936), a través de estudios más detallados, la definió

como una diorita (en Farfán, 2002). La roca generalmente es de color gris oscuro con abundantes ferromagnesianos, es de textura fanerítica y estructura masiva, además se le observa muy fracturada y una fuerte alteración de silicificación y propilitización.

Unidad Volcánica del Oligoceno

Se le da este nombre a una secuencia de rocas volcánicas representada de la base a la cima por basaltos y andesitas basálticas en forma de aglomerados, brechas y flujos lávicos; Flujos andesíticos, afaníticas y porfídicos con ocasionales horizontes de tobas ácidas. En su mayoría se encuentra aflorando en la parte sur de la sub-cuenca y a su vez se encuentra aflorando una porción más pequeña al centro del área.

Unidad Conglomerativa del Mioceno

Esta unidad es equivalente a la Formación Báucarit, la cual fue reconocida inicialmente por Dumble (1900) con el nombre de División Báucarit, describiéndola como una secuencia de sedimentos clásticos, localizada en las cercanías de poblado Báucarit, en el sur del estado de Sonora. Posteriormente King (1939) redefine el nombre además de cambiar su rango a Formación Báucarit como se conoce hasta la actualidad.

Dentro del área de estudio, esta unidad aflora en la porción central asociada con otras unidades volcánicas (Figura 9), y está representada litológicamente por conglomerados muy compactos, moderadamente clasificados y compuestos de fragmentos de andesita, riolita, toba riolítica, toba andesítica, andesita porfídica, traquiandesita y riodacita, son del tamaño desde 1 y hasta 15 cm de diámetro, en donde algunos alcanzan hasta 20 cm y son de forma sub-angulosa a sub-redondeada, dentro de una matriz arenosa.

Unidad Volcánica del Mioceno

Esta unidad se incluye para agrupar a una secuencia de andesitas porfídicas y lavas dacíticas con flujos ignimbríticos subordinados que identificó González-León et al.(2000); sus principales afloramientos se localizan en los Cerros Cebadehuachi y Orejanos en la porción sureste del área, donde sobreyacen discordantes a la Formación Mesa y están en contacto por falla normal con tobas riolíticas, basaltos, andesitas y conglomerados polimícticos del Mioceno (Formación Baucarit), también aflora hacia la

porción central norte en los Cerros Los Caballos, Los Lobos, Peñas Blancas, El Bohemio, El Moro, Buenos Aires y Las Albóndigas donde su principal relación estratigráfica es con la Formación Mesa a la que sobreyace discordante.

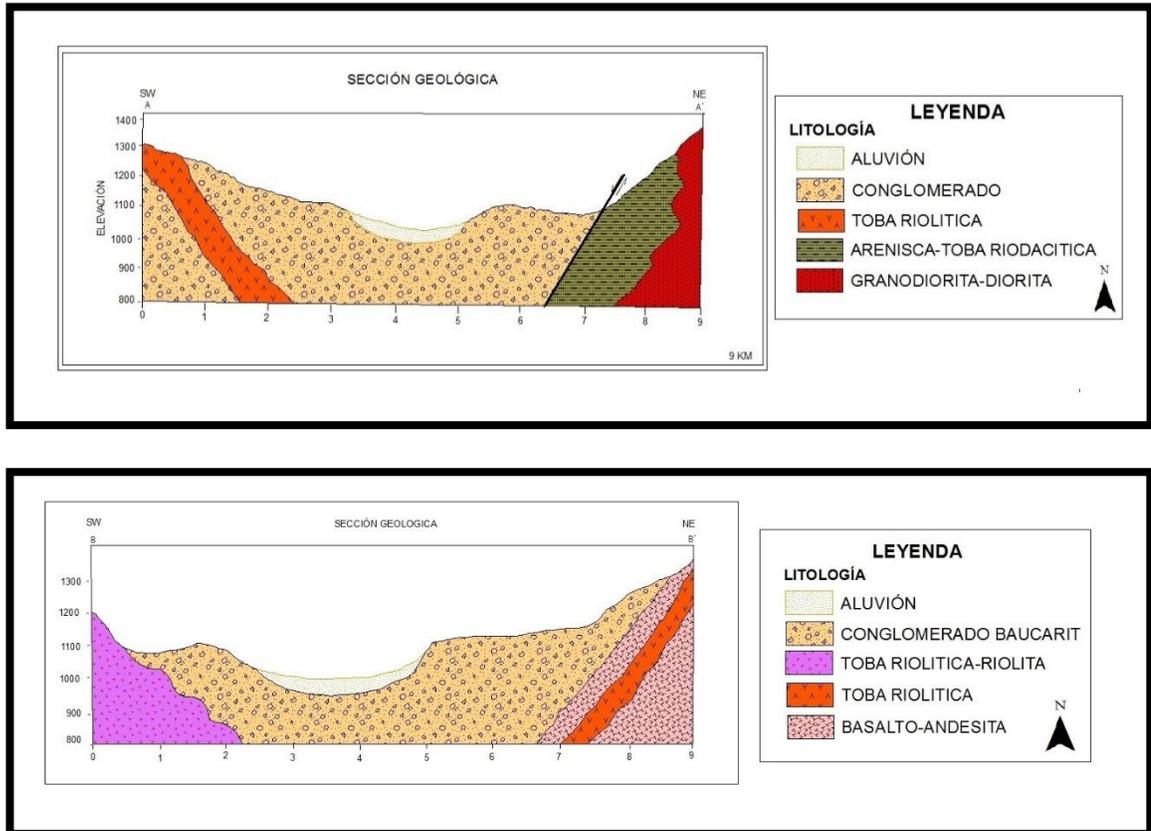


Figura 9.- Secciones esquemáticas donde se muestra la relación de la Unidad Conglomerática del Mioceno (Formación Báucarit) con otras litologías volcánicas.

Unidad Conglomeratica del Terciario-Neogeno

Esta unidad incluye conglomerados polimícticos recientes que están pobremente consolidados, y que incluye locales horizontes de limos y arenas. Los clastos generalmente son medianamente angulosos a bien redondeados, producto de la denudación detrítica de las rocas preexistentes, formado terrazas y depósitos de talud, Se distribuyen principalmente hacia la porción occidental del área, cubriendo discordantes a

la mayor parte de la litología más antigua. Se considera de Pleistoceno, sin embargo, no se descarta que pueda ser inclusive del Plioceno. Estos depósitos se formaron, al igual que la Formación Baucarit, en ambientes continentales, producto de la erosión de las rocas preexistentes.

Conglomerado Cuaternario

Consiste de depósitos semi-consolidados y no consolidados producto de la denudación de rocas preexistentes. Afloran principalmente en la porción central de la parte norte en el valle de Arizpe, constituyendo mesetas, lomeríos de pendiente suave y depósitos de talud.

Sedimentos no Consolidados

Los aluviones del Cuaternario se encuentran cubriendo los cauces de ríos y arroyos principales. Consisten de material suelto constituido principalmente de grava, arena, limo y arcilla, como resultado de la erosión de rocas preexistentes, estos materiales son transportados por las corrientes fluviales y depositados sobre el cauce de los ríos.

3.3 Geología estructural

Gran parte de la morfología dentro de esta sub-cuenca obedece a patrones geológico estructurales resultantes de la tectónica predominantemente extensional, y en menor medida compresional, que han sufrido las rocas a lo largo de su historia geológica, de aquí que la mayoría de los cambios bruscos en la dirección de los principales ríos se deben a grandes estructuras geológicas (fallas y fracturas) que aprovechan éstos como zonas de debilidad.

Las estructuras geológicas más sobresalientes se encuentran en las rocas paleozoicas y mesozoicas, corresponden en primer lugar a un gran alto estructural que de manera regional sobresale en todo el noroeste del estado de Sonora que está asociado a la gran intrusión batolítica cretácica que elevó toda la región situada al poniente de la provincia geológica Sierra Madre Occidental. A toda esta región donde afloran estos

granitos cretácicos, asociados con rocas calizas paleozoicas, algunos autores se refieren como la “Cuenca Paleozoica de Sonora” (López Ramos, 1979)

El segundo grupo de estructuras más importantes lo conforman los bloques fallados que alineados en cordones montañosos en dirección NW-SE, se desarrollan de manera escalonada del continente hacia el Golfo de California, como consecuencia de la erosión de estos altos estructurales, los cuales son respuesta a un fallamiento normal que esculpió este panorama estructural al acomodarse estos gigantescos bloques.

El tercer grupo de estructuras, cuya importancia es relativamente menor porque no existe continuidad entre los afloramientos, lo conforman los pliegues de las rocas paleozoicas que son el resultado de los eventos tanto compresivos como distensivos a los que estuvieron sometidas estas rocas antiguas posterior a su depósito.

En la superficie del acuífero se presenta un patrón de lineamientos regionales con una orientación preferencial NW-SE, produciendo sierras paralelas a esta dirección. La mayoría de las estructuras corresponden a fallas normales de alto ángulo que caracterizan a la provincia del *Basin And Range* o de fosas y pilares (*horst-graben*), relacionada a la tectónica extensional ocurrida durante el Neógeno

CAPITULO 4 PARÁMETROS CLIMATOLÓGICOS

4.1 Precipitación

El régimen pluvial presenta en términos generales dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre correspondientes a la temporada de verano, y que es cuando se registran las mayores precipitaciones, y otro de lluvias invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas. Con los datos de las diferentes estaciones climatológicas (Figura 10) se calculó de la precipitación media para el área estudiada que fue de 494.56 mm (Tabla 1), tomando como base el método de los polígonos de Thiessen, así como también el plano de isoyetas de precipitación para esta área (Figura 11).

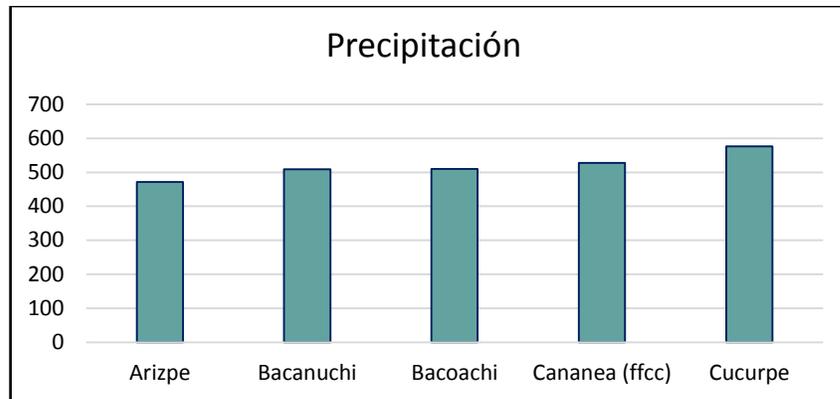


Figura 10.- Gráfica de Precipitación total dentro de la sub-cuenca Bacanuchi

Tabla 1 Precipitación media anual para la sub-cuenca Bacanuchi

ESTACIÓN	Área (km ²)	Factor Thiessen	Precipitación Total (mm)	Precipitación Media (mm)
Arizpe	954644344.6	0.5941	471.2	279.96
Bacanuchi	136012819.9	0.0846	509.4	43.12
Bacoachi	3777135.845	0.0023	510.4	1.19
Cananea (ffcc)	446612223.2	0.2779	527.8	146.70
Cucurpe	65698736.57	0.0408	576.5	23.57
	1606745260			494.56

4.2 Temperatura

Al igual que con los datos de precipitación, la información de temperatura se registra en las estaciones climatológicas operadas por la Comisión Nacional del Agua. En la tabla 2 se presenta el cálculo de la temperatura media por el método de los polígonos de Thiessen, de donde se obtiene que la temperatura media en la sub-cuenca es de 19.12°C; mientras que en la Figura 12 se muestra la gráfica de temperatura media para cada una de las estaciones, y la Figura 13 muestra las isoyetas de precipitación para esta área.

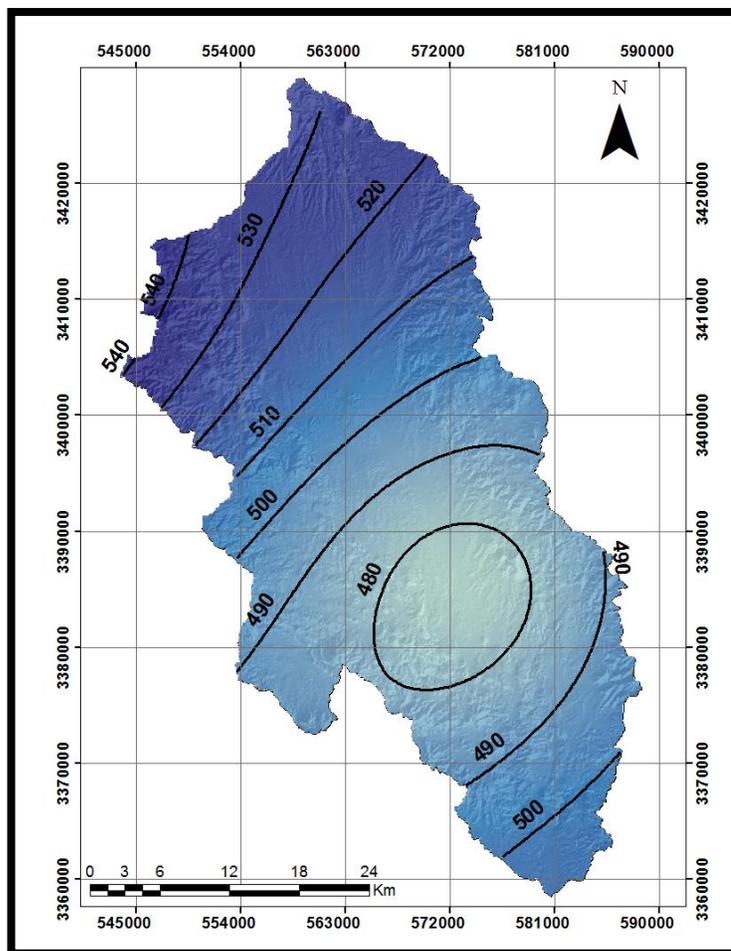


Figura 11.- Isolneas de Precipitación para la sub-cuenca Bacanuchi

Tabla 2 Temperatura media anual para la sub-cuenca Bacanuchi

ESTACIÓN	Area (km²)	Factor Thiessen	Temperatura (°C)	Temperatura Media (°C)
Arizpe	954644344.6	0.5941	19.7	11.62
Bacanuchi	136012819.9	0.0846	17.6	1.48
Bacoachi	3777135.845	0.0023	17.7	0.04
Cananea (ffcc)	446612223.2	0.2779	18.2	5.05
Cucurpe	65698736.57	0.0408	20.2	0.82
	1606745260			19.12

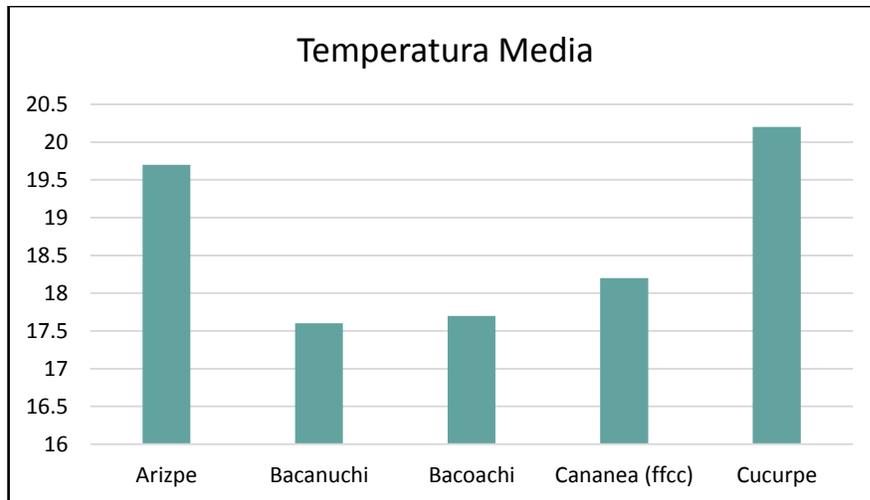


Figura 12.- Gráfica de temperatura media dentro de la sub-cuenca Bacanuchi

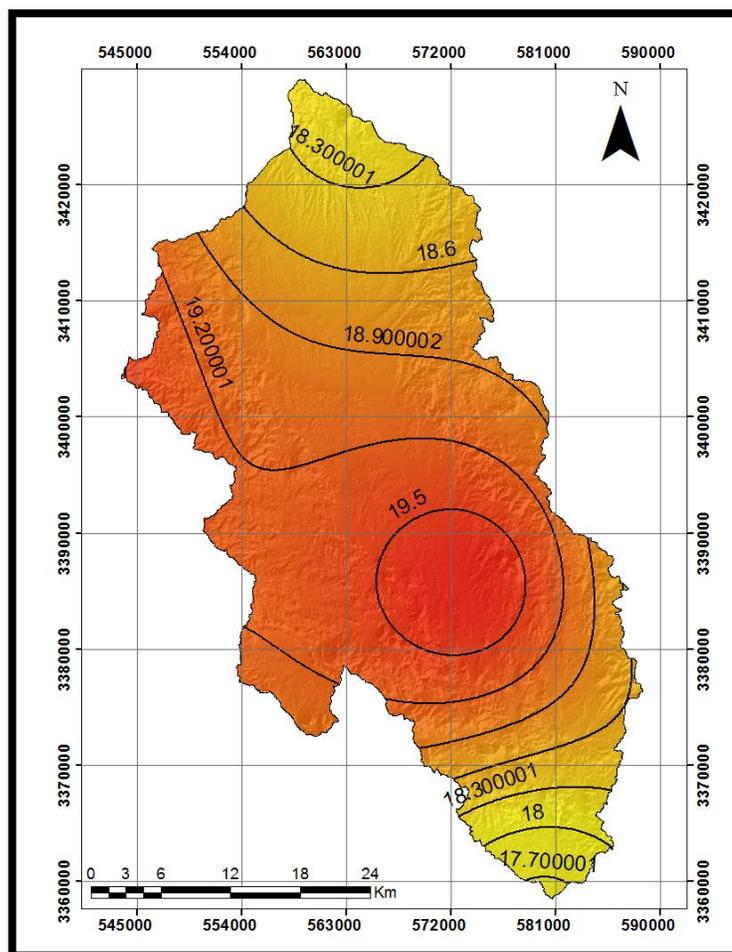


Figura 13.- Isotermas para la sub-cuenca Bacanuchi

4.3 Evapotranspiración

Los resultados de la Evapotranspiración (ETR) para cada una de las 7 estaciones climatológicas, se observan en la tabla 3. Además de la precipitación, temperatura, L, 0.31L, E, y sus respectivas coordenadas UTM, que fueron de ayuda para el cálculo de la ETR.

Tabla 3.- Evapotranspiración por el método de Turc.

Estación	X	Y	L	0.31*L	ETR	E
Arizpe	572990	3385397	1,174.769	364.178	457.480	13.720
Bacanuchi	580022	3356293	1,012.589	313.903	474.384	35.016
Bacoachi	598708	3389265.4	1,019.762	316.126	475.845	34.555
Cananea (ffcc)	563667	3426098.4	1,056.428	327.493	492.260	35.540
Cucurpe	527500	3408796.3	1,217.120	377.307	543.686	32.814

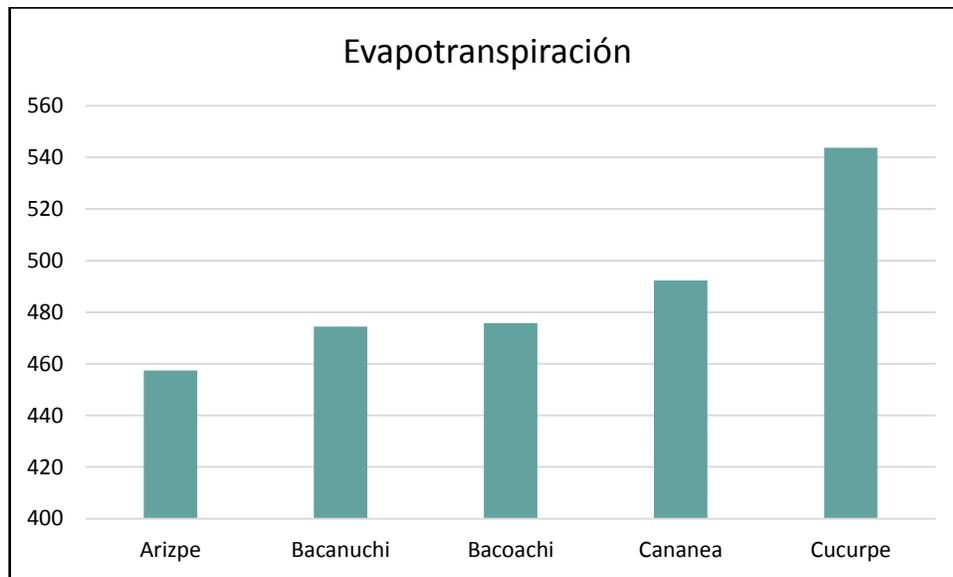


Figura 14.- Gráfica de Evapotranspiración dentro de la sub-cuenca Bacanuchi

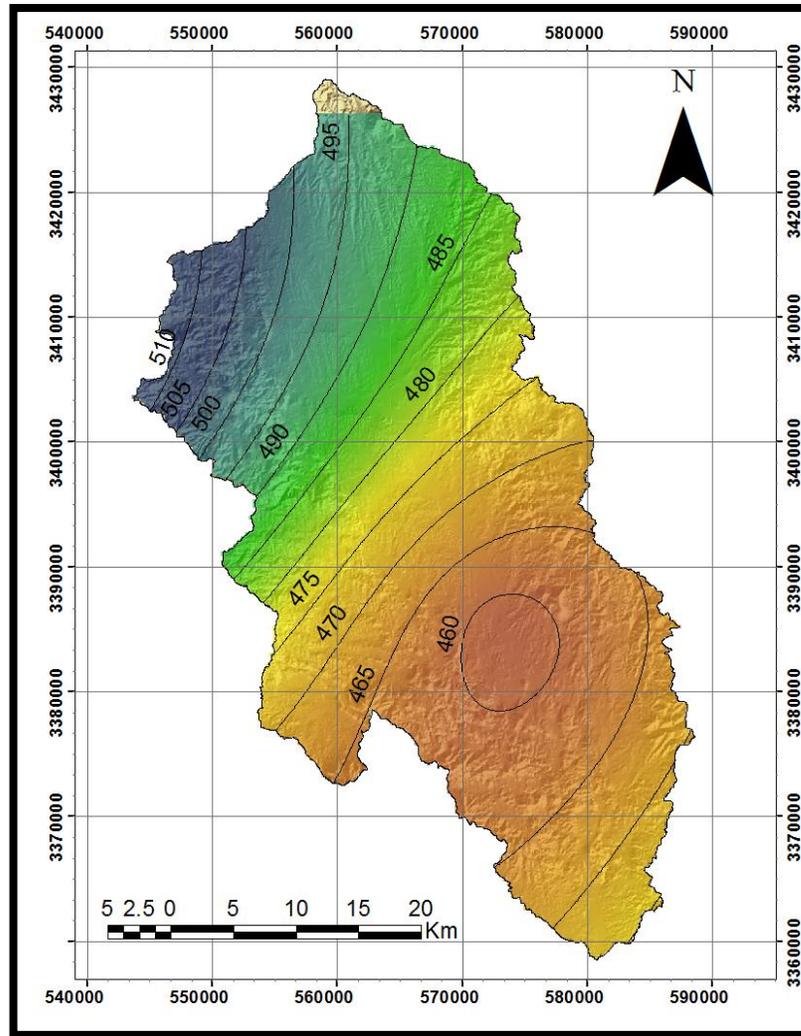


Figura 15.- Isolneas de Evapotranspiración para la sub-cuenca Bacanuchi

CAPITULO 5 HIDROGEOLOGÍA SUBTERRANEA

La zona acuífera presente en el área de estudio está formado por elevaciones topográficas constituidas por rocas volcánicas félsicas (riolitas, tobas riolíticas y aglomerados) así como también rocas sedimentarias (calizas, areniscas y conglomerados) intercaladas entre si y rocas intrusivas altamente fracturadas, que permiten la infiltración, almacenamiento y circulación del agua. La recarga se lleva a cabo por la infiltración del agua de lluvia en las zonas altas de la sierra y lomas. Parte

del flujo subterráneo es captado en los flancos de las elevaciones topográficas a través de los aprovechamientos.

La zona de explotación del agua subterránea presenta características peculiares. Se distingue por elevaciones topográficas con pequeños valles, en donde se han perforado varios pozos que son utilizados para uso agrícola, pecuario así como también para uso doméstico, como se ve en la figura 16.

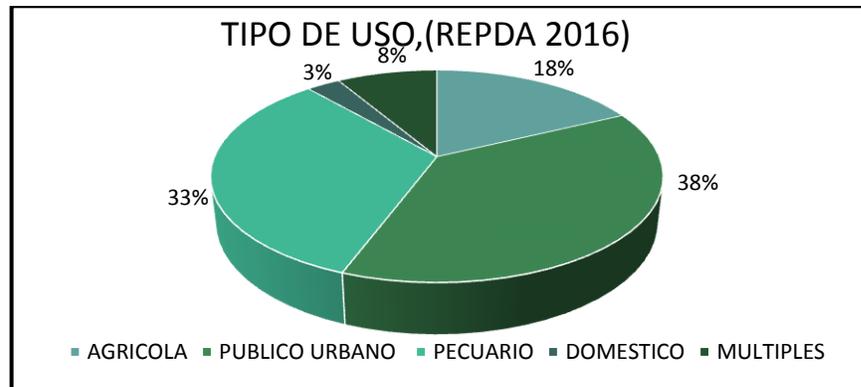


Figura 16.- Usos de aprovechamientos, REPDA 2016.

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir la presencia de un acuífero heterogéneo y anisotrópico, de tipo libre que presenta condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de lentes de sedimentos arcillosos. Está conformado, en su parte superior, por depósitos aluviales y conglomerados; y en su fragmento inferior por rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas, que en conjunto presenta un espesor promedio de 150 m. Considerando las posibilidades de las rocas de contener agua, tomando en cuenta sus características físicas, litológicas y estructurales, además de la influencia en el comportamiento geohidrológico dentro de cada unidad y según los materiales que constituyen las unidades, se determinaron dos grupos: consolidados y no consolidados.

Material consolidado con posibilidades bajas

Se constituye por rocas ígneas, sedimentarias, vulcanosedimentarias y metamórficas, que conforman la zona montañosa. Presentan características no favorables para conformar acuíferos, debido a que la gran mayoría de los cuerpos rocosos son impermeables o de muy baja permeabilidad.

Material no consolidado con posibilidades bajas

Está constituido por un conglomerado polimíctico, con fragmentos redondeados, incluidos en una matriz arcillo-arenosa; los clastos son derivados de rocas volcánicas ácidas y básicas y algunas sedimentarias. Sobreyacen en forma discordante a rocas riolíticas y tobas ácidas impermeables así como también a rocas intrusivas y sedimentarias. Presentan baja permeabilidad y la ausencia de obras de captación confirma la inexistencia de acumulación del agua subterránea económicamente explotable.

Material no consolidado con posibilidades medias

Constituido por conglomerados del Paleógeno-Neógeno y Cuaternario, ocasionalmente intercalados con basaltos. Los fragmentos varían en tamaño desde cantos rodados hasta limos y arcillas que rellenan las depresiones de estos lugares, los materiales son de composición variable, en ocasiones cementados. Presenta permeabilidad media a alta y constituyen acuíferos de tipo libre. En esta unidad se localizan norias en las que la profundidad al nivel estático varía de 3 a 8 m.

Material no consolidado con posibilidades altas

Está constituido por conglomerados semiconsolidados del Paleógeno-Neógeno y Pliocuatnario, así como aluviones, depósitos eólicos y de piedemonte que se encuentran en cuencas vecinas y en los depósitos próximos al río Bacanuchi. Presenta permeabilidad media a alta.

Parámetros hidráulicos

De acuerdo con los resultados de la interpretación de pruebas de bombeo realizadas como parte del estudio llevado a cabo en el año 1970, en el acuífero Río Bacoachi, los valores de transmisividad varían de 10.0 a 50.0 x 10⁻³ m²/s. Ninguna de ellas contaron con pozos de observación, por lo que no fue posible estimar el coeficiente de almacenamiento ni el rendimiento específico.

Adicionalmente, por correlación hidrogeológica con los acuíferos vecinos Río Bacoachi, Río Sonora, Río San Miguel, Magdalena, Cocóspera y Cuitaca, que presentan la misma litología y evolución geológica, es posible adoptar valores de transmisividad

que varían de 0.2 a $5.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, para el medio granular, y de 6.6 a $11.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ para el medio fracturado. Los valores de conductividad hidráulica varían de 0.02 a 6.1 m/d (2.3×10^{-7} a $7.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$).

5.1 Piezometría

Para el conocimiento de la profundidad del acuífero es necesario la medición de nivel que se determina por medio de una sonda eléctrica bipolar ó por medio de piezómetros automatizados instalados en un pozo de monitoreo. Esta información aporta el sentido o direcciones preferenciales del movimiento del agua subterránea y de su red de flujo en el acuífero.

La medición de niveles se efectúa periódicamente y sistemáticamente para verificar la posición de los niveles estáticos del agua en los aprovechamientos seleccionados, siendo necesario efectuar una nivelación de brocales de los pozos con el fin de referirlos a la elevación sobre el nivel medio del mar conocido como Altitud.

Esta nivelación de brocales se llevó a cabo por medio de dos GPS profesionales de tipo diferencial, en modo estático, considerando una estación base y otra móvil, en sistema de coordenadas transversales (UTM) en el Datum WGS84, así como la ubicación de los sitios de Piezometría para el periodo 2013-2016 (Tabla 4).

El análisis piezométrico se llevó a cabo para el periodo 2013-2016, con la que se elaboraron las configuraciones correspondientes. Debido a que los niveles del agua no muestran variaciones significativas para estos años, sólo se describe la configuración de profundidad, elevación y evolución correspondiente para esta etapa.

Tabla 4.- Aprovechamientos del acuífero Bacanuchi

Clave	X	Y	Z	NE2013	NE2016
BCN-001	554930	3419537	1410	32.89	31.75
BCN-004	555766	3411221	1279	18.24	17.86
BCN-005	567602	3412634	1259	18.12	17.96
BCN-006	558493	3410877	1254	17.9	17.43
BCN-007	558361	3409923	1247	17.73	17.36
BCN-008	560813	3409226	1218	21.77	21.45
BCN-009	561653	3408705	1215	29.96	28.67
Sin clave	557332	3414334	1303	18.1	17.81
BCN-010	555070	3406306	1243	8	7.1
BCN-012	563997	3405360	1176	25.59	24.01
BCN-013	560587	3403083	1188	22.5	21.98
BCN-014	564638	3401687	1146	20.06	19.94
BCN-015	565992	3400204	1138	24.27	23.89
BCN-016	564675	3397213	1129	26.92	26.41
BCN-017	560835	3396497	1173	18.35	17.92
BCN-024	573162	3386776	1052	12.83	12.58

5.2 Profundidad del nivel estático

Con la información de los sitios donde se realizó el levantamiento piezométrico se conoció la profundidad del nivel estático de pozos y norias.

La profundidad al nivel estático (NE) para el año 2013 presenta valores que varían de 8 a 32.89 m, siendo el de mayor profundidad localizado en el límite de la zona acuífera en la porción noroeste del área de estudio, aunque en la porción central del acuífero se tienen la mayor profundidad entre las localidades de Papigochic y La Morita (Figura 16) que es la zona donde se lleva a cabo la mayor explotación del agua subterránea.

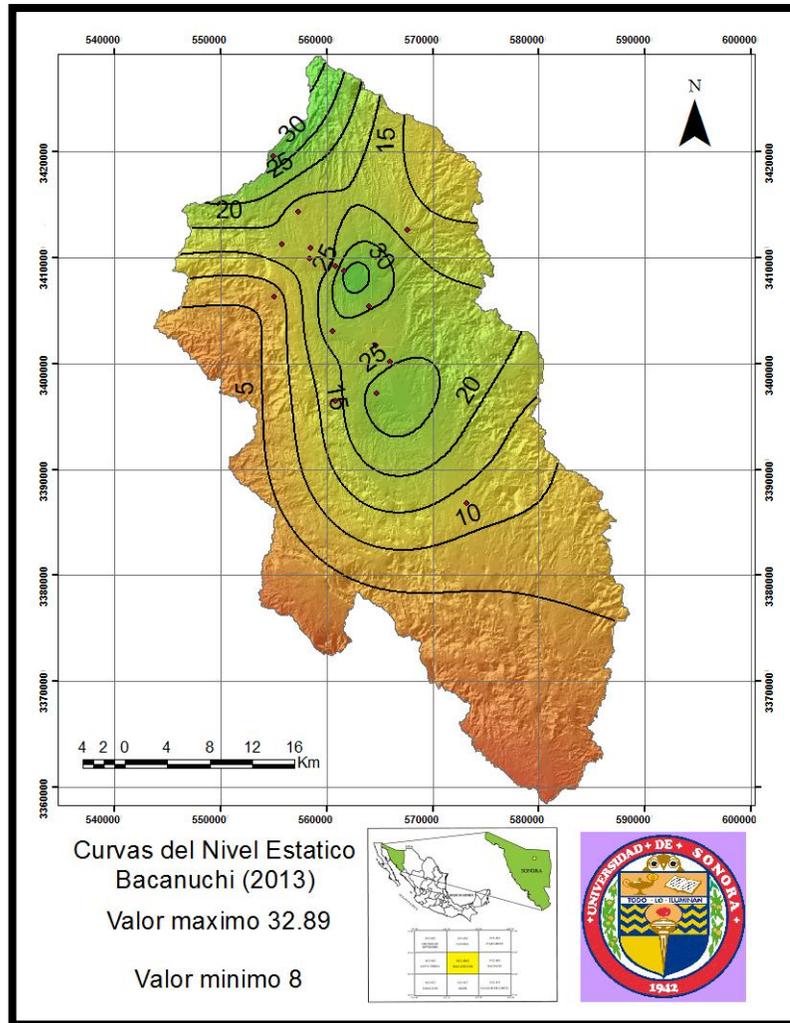


Figura 17.- Curvas del Nivel Estático (2013) de la Sub-cuenca Bacanuchi.

La profundidad de nivel estático (NE) para el año 2016 los valores oscilan de 7.1 a 31.75m. Al igual que el año 2013 la profundidad mayor se localiza al noroeste del área de estudio y profundidades mayores en la porción central entre las localidades de Papigochic y La Morita zona donde se tiene mayor consumo de agua subterránea y específicamente para uso agrícola.

Con estas dos evaluaciones nos muestra que la zona acuífera tuvo una pequeña recuperación, debido a que en este periodo hubo lluvias extraordinarias que permitieron que los niveles estáticos ascendieran (Figura 17).

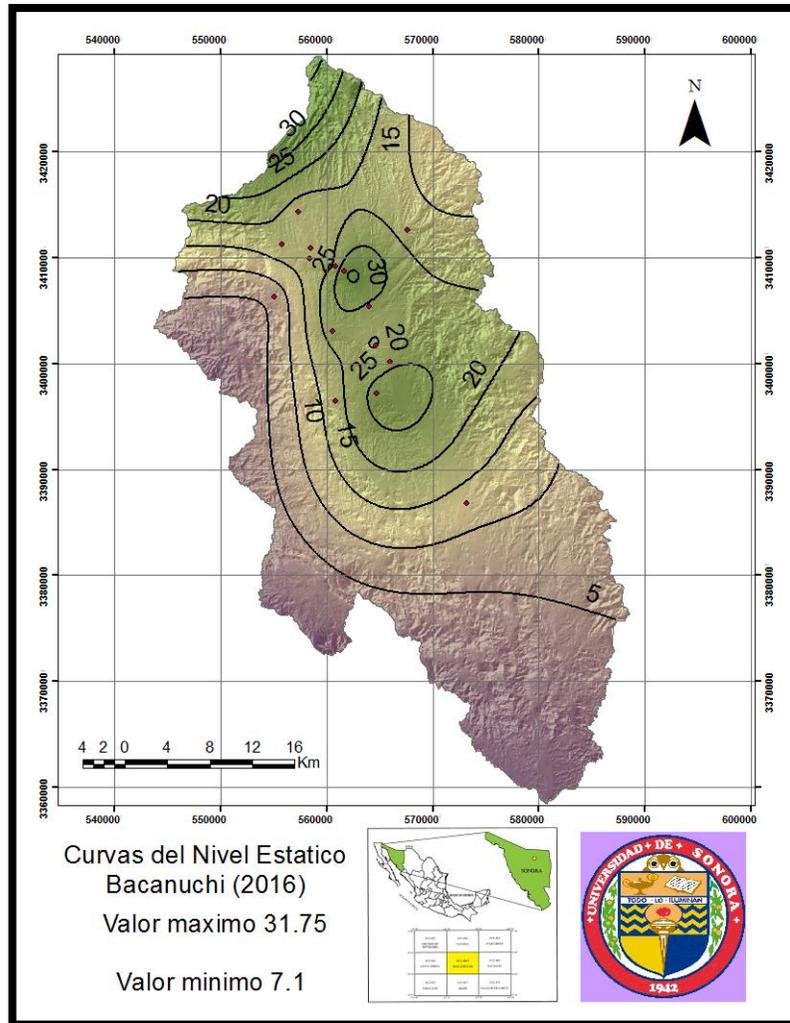


Figura 18.- Curvas del Nivel Estático (2016) de la Sub-cuenca Bacanuchi.

5.3 Elevación del nivel estático (2013)

La Elevación del Nivel Estático (ENE) se realizó a partir de los datos obtenidos de la nivelación de brocales en pozos y norias y mediciones de la profundidad del nivel estático en cada uno de los aprovechamientos (Tabla 5) y se configuró para poder mostrar la dirección de flujo subterráneo del agua (Figura 18).

Tabla 5.- Elevación del nivel estático

Clave	X	Y	Z	ELE13	ELE2016
BCN-001	554930	3419537	1410	1377.11	1378.25
BCN-004	555766	3411221	1279	1260.76	1261.14
BCN-005	567602	3412634	1259	1240.88	1241.04
BCN-006	558493	3410877	1254	1236.1	1236.57
BCN-007	558361	3409923	1247	1229.27	1229.64
BCN-008	560813	3409226	1218	1196.23	1196.55
BCN-009	561653	3408705	1215	1185.04	1186.33
Sin clave	557332	3414334	1303	1284.9	1285.19
BCN-010	555070	3406306	1243	1235	1235.9
BCN-012	563997	3405360	1176	1150.41	1151.99
BCN-013	560587	3403083	1188	1165.5	1166.02
BCN-014	564638	3401687	1146	1125.94	1126.06
BCN-015	565992	3400204	1138	1113.73	1114.11
BCN-016	564675	3397213	1129	1102.08	1102.59
BCN-017	560835	3396497	1173	1154.65	1155.08
BCN-024	573162	3386776	1052	1039.17	1039.42

Con respecto a la configuración de elevación del nivel estático, se observa que los valores varían gradualmente, al igual que la profundidad, por efecto de la topografía a lo largo del cauce del río Bacanuchi y arroyos tributarios, conforme se asciende topográficamente desde el cauce hacia las estribaciones de las sierras que conforman el límite del acuífero; desde 1440 msnm que se registran en la porción norte del acuífero, hasta 1000 msnm en el extremo sur. La dirección preferencial del flujo subterráneo muestra una trayectoria s de NW - SE, paralela al Río Bacanuchi, con alimentaciones laterales que provienen de las sierras circundantes.

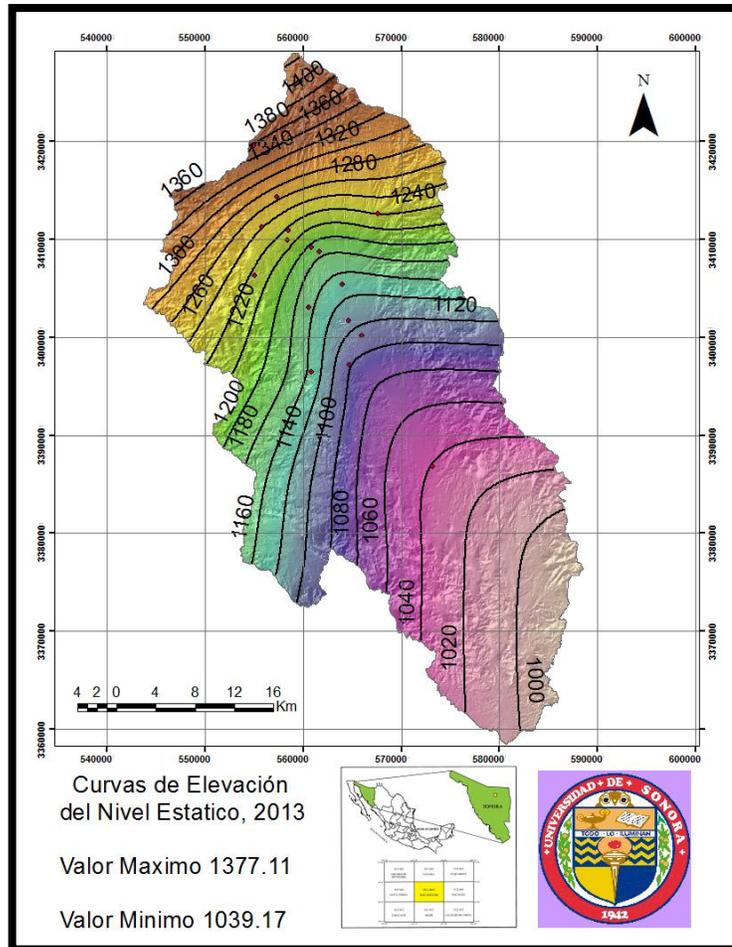


Figura 19.- Curvas de Elevación del Nivel Estático, 2013 para la Sub-cuenca Bacanuchi

Al igual que la configuración del 2013 para el año de 2016 presenta la misma configuración (Figura 19) lo cual muestra que no existen cambios significativos en el flujo del agua subterránea para el periodo del 2013 al 2016.

5.4 Evolución de Nivel Estático para el periodo 2013-2016

Las mediciones piezométricas obtenidas en dos recorridos son utilizadas para la generación de planos de curvas de igual evolución del nivel estático para el intervalo de tiempo que se da para los recorridos, cuando el lapso de tiempo es considerable muestran la ubicación de las zonas en donde es conveniente reducir o incrementar las zonas de extracción de bombeo.

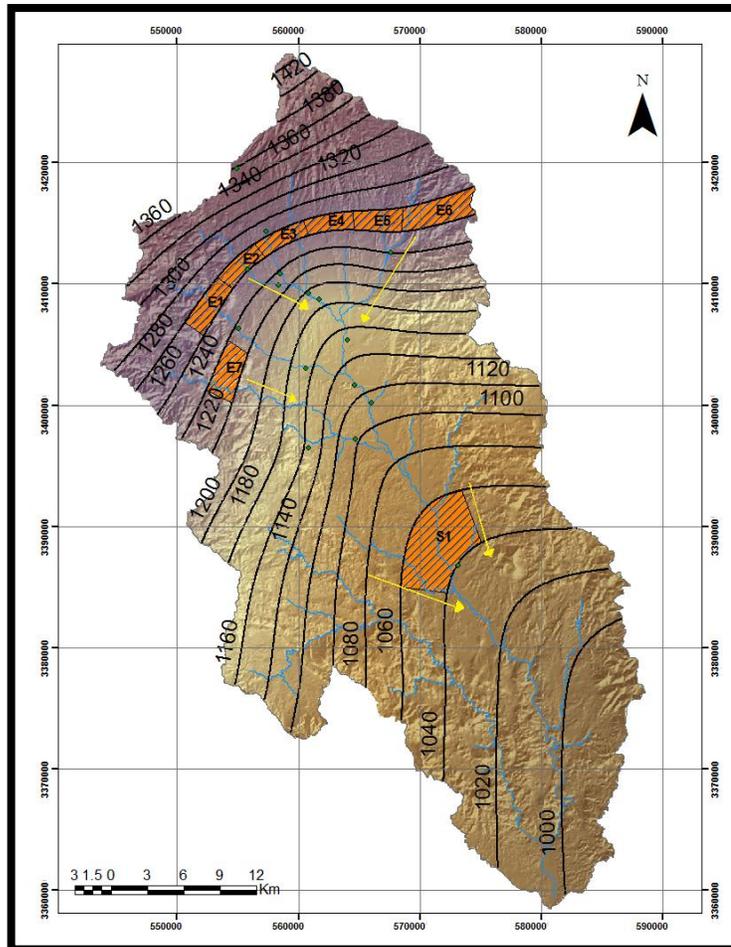


Figura 20.- Celdas de entrada y salida del flujo en la Sub-cuenca Bacanuchi

La evolución de niveles estáticos para el periodo comprendido entre 2013 y 2016, ha sido con tendencia de recuperación de niveles que varían desde 1.58 hasta 0.9 m (Tabla 6), y está reflejado en la parte central del acuífero entre los poblados de San Isidro, La Morita y Bacanuchi donde es la zona de mayor concentración de aprovechamientos subterráneos (Figura 20).

Esta recuperación de niveles estáticos fue favorecido por la restricción en agosto del 2014 del uso del agua subterránea en la mayoría de los aprovechamientos debido al derrame de 40000m³ de sulfato de cobre acidulado contenido en una represa de la región; lo cual permitió la disminución de la extracción y por consecuencia aumento del nivel del agua en algunos puntos del acuífero; aunado a las lluvias extraordinarias para este periodo en la región.

Tabla 6.- Valores de evolución del nivel estático

Clave	X	Y	Z	EVO13_16
BCN-001	554930	3419537	1410	-1.14
BCN-004	555766	3411221	1279	-0.38
BCN-005	567602	3412634	1259	-0.16
BCN-006	558493	3410877	1254	-0.47
BCN-007	558361	3409923	1247	-0.37
BCN-008	560813	3409226	1218	-0.32
BCN-009	561653	3408705	1215	-1.29
Sin clave	557332	3414334	1303	-0.29
BCN-010	555070	3406306	1243	-0.9
BCN-012	563997	3405360	1176	-1.58
BCN-013	560587	3403083	1188	-0.52
BCN-014	564638	3401687	1146	-0.12
BCN-015	565992	3400204	1138	-0.38
BCN-016	564675	3397213	1129	-0.51
BCN-017	560835	3396497	1173	-0.43
BCN-024	573162	3386776	1052	-0.25

5.5 Balance de aguas subterráneas

El balance consiste en la aplicación del principio de la conservación de masa a una cierta región de volumen conocido y definida por unas determinadas condiciones de contorno. Durante un periodo 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 volumen de almacenamiento. El establecer un balance supone medir flujos de agua (caudales) y almacenamiento (niveles), aunque una apropiada selección de la región y del periodo de tiempo, se puede suprimir algunas medidas y términos (niveles iguales al principio y al final, ausencia de flujo de agua a través de límites impermeables). Si las entradas superan a las salidas de flujo existe una acumulación (aumento del volumen) y de lo contrario si las salidas superan a las entradas existe un déficit en el volumen de almacenamiento.

Los términos del balance suelen contener errores de medida, interpretación, estimación y evaluación con una metodología poco apropiada, provocando que la

ecuación de balance no cierre de forma exacta. Este es el fundamento del método tradicional de obtención de la recarga a partir del balance de agua en un acuífero entre dos fechas determinadas en el cual se conoce los restantes de flujo de entrada y de salida (Samper, 1997a, b).

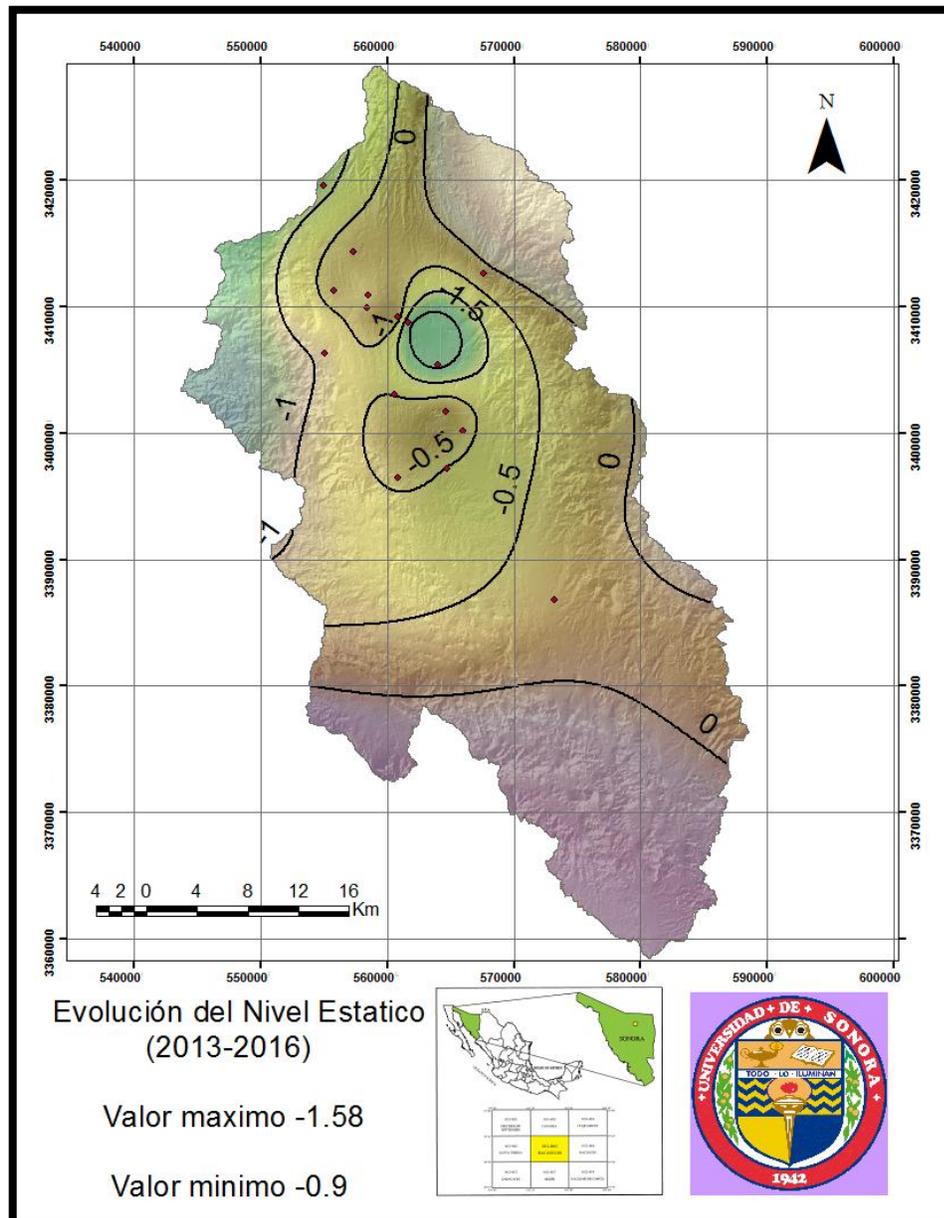


Figura 21.- Evolución del Nivel Estático (2013-2016) para la sub-cuenca Bacanuchi.

Los balances se aplican al conjunto de toda una cuenca, incluyendo a las aguas superficiales como a las subterráneas, o bien a cualquiera de las porciones o componentes del ciclo hidrológico.

Para el balance de agua subterránea, se plantea para el año 2016 en donde se cuenta con información confiable de la Piezometría del acuífero, con un área de captación de 1607 km².

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

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

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

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

5.6 Entradas

Recarga Vertical (Rv)

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

$$Rv + Eh - B - Sh - ETR = \pm \Delta V(S) \quad (1)$$

Donde:

Rv: Recarga vertical

Eh: Recarga por flujo horizontal

B: Bombeo

Sh: Salidas por flujo horizontal

ETR: Evapotranspiración real en niveles someros

V(S): Cambio en el volumen almacenado

De esta manera, despejando la recarga vertical:

$$R_v = B + Sh + ETR \pm V(S) - Eh \quad (2)$$

Entradas por flujo subterráneo horizontal (Eh)

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficas más altas del área de estudio, se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas, para posteriormente recargar el acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales.

El caudal de agua subterránea que participa como flujo de entrada, para un periodo considerado, se realiza aplicando la Ley de Darcy a la red de flujo a través de una sección limitada por dos isolíneas equipotenciales y dos líneas de corriente, definidas en la configuración de elevación del nivel estático (Figura 21).

La Ley de Darcy se expresa de la siguiente manera, para medios porosos:

$$Q = V.A$$

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

$$A = B.a$$

Mientras que la velocidad será:

$$V = K.i$$

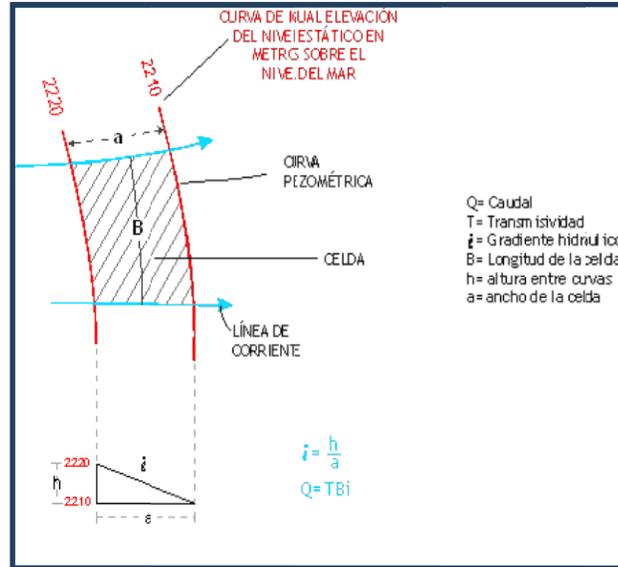
Donde

K es conductividad hidráulica

i es gradiente hidráulico

Sustituyendo en la ecuación de continuidad:

$$Q = B.a.K.i$$



22.- Ley de Darcy en el medio poroso

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

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

Donde:

T es transmisividad

B es longitud de celda

Para el cálculo es necesario conocer el espesor saturado del acuífero (b) y su coeficiente de permeabilidad (K), o bien, el valor de transmisividad (T). Los otros datos se obtienen de la piezometría. Las celdas se trazan a partir de la configuración de elevación del nivel estático y la geología, se calcula el flujo a través de cada una de ellas.

El coeficiente K, se obtiene a partir de las pruebas de bombeo de las cuales se obtiene el valor de transmisividad (T), que es el producto de la transmisividad hidráulica (K) por el espesor saturado:

$$T = K \cdot b$$

De acuerdo con la configuración del nivel estático para el año 2016 mostrada en la figura 19, las entradas se localizan sobre el cauce del Río Bacanuchi y los principales arroyos tributarios. El cálculo del flujo en las celdas de entrada se muestra en la tabla 7, en la que se observa que su valor anual es **16.96730443 hm³/año**.

Tabla 7.- Cálculo de entradas para flujo subterráneo para 2016.

Canal	Longitud B(m)	Ancho a(m)	h2-h1 (m)	Gradiente i (m)	T (m2/s)	Caudal Q(m3/s)	Volumen (hm3/año)
E1	4575.7	1731.2	20	0.01155268	0.0015	0.079292398	2.500565074
E2	3909.8	1376.1	20	0.014533827	0.002	0.113648717	3.584025952
E3	4265.5	1362.6	20	0.014677822	0.001	0.062608249	1.974413738
E4	3963.9	1386.8	20	0.01442169	0.0015	0.085749207	2.704186986
E5	4058.4	1793.5	20	0.01115138	0.001	0.045256761	1.4272172
E6	5739.5	2101.4	20	0.009517465	0.002	0.109250976	3.445338765
E7	4432.4	2099.5	20	0.009526078	0.001	0.042223387	1.331556717
						Total entradas	16.96730443

5.7 Salidas (Descarga)

Para el cálculo de Salidas de agua subterránea del acuífero, solamente se consideran la extracción de agua por bombeo y salida por flujo subterráneo horizontal, y la evaporación se considera despreciable ya que la profundidad del nivel estático se encuentra desde los 7.1 metros a 31.75 metros en el área de balance. En el caso de descargas del subsuelo es nula ya que no existen manantiales dentro del área de estudio ni descarga por flujo base.

5.8 Bombeo

Como se menciona en el apartado de censo e hidrometría, el valor de la extracción por bombeo asciende a **4.1 hm³/año**.

5.9 Salidas por flujo subterráneo Horizontal (Sh)

Para el cálculo de las salidas por flujo subterráneo horizontal se utiliza la configuración de elevación del nivel estático correspondiente al año 2016 como se muestra en la tabla 8. Su valor es de **2.9 hm³ anuales**.

Tabla 8.- Cálculo de salidas de flujo subterráneo para 2016

Canal	Longitud B(m)	Ancho a(m)	h1-h2 (m)	Gradiente i (m)	T(m2/s)	Caudal Q(m3/s)	Volumen (hm3/año)
S1	7412.3	4743.3	20	0.004216474	0.003	0.093761305	2.956856528
						Total salidas	2.9

Evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración corresponde con aquella pérdida de agua freática somera y que se aplica al balance de aguas subterráneas, considerando que el concepto tiene influencia hasta una profundidad máxima de 10 mts.

En este tipo de climas se hace el siguiente proceso:

En zonas donde el nivel estático se encuentra a una profundidad menos a 10 mts, se calcula el valor de la evapotranspiración exclusivamente para estas zonas de niveles someros y se pondera el valor del volumen obtenido, partiendo de una relación lineal inversa entre la profundidad del nivel estático (PNE) y el % de ETR. Suponiendo una profundidad mayor será el % de ETR, de tal manera que a 10 mts el valor de ETR es nulo y a 0 mts el valor es de 100%, a 5 mts el 50%, a 2 mts el 80%.

$$ET_i = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad \text{Para } P/L > 0.316$$

$$ET_i = P \quad \text{Para } P/L < 0.316$$

Si se considera que en una superficie de 50 km² a lo largo del Río Bacanuchi (entre 16 de Septiembre, Bacanuchi y Arizpe) se registran niveles freáticos someros, con cobertura vegetal cuyas raíces son suficientemente largas y susceptibles a evapotranspirar, en la que la profundidad promedio al nivel del agua subterránea es de 5 m y una lámina de evapotranspiración real obtenida es de 490 mm.

$$ETR = 50 \text{ km}^2 (0.490 \text{ m}) (0.5) = 12.25 \text{ hm}^3 \text{ anuales}$$

Cambio de almacenamiento V(S)

Se toma v(s) como cero

Solución a la ecuación de balance

Una vez calculados los valores de los componentes, el único parámetro de los que intervienen y que falta por determinar es la infiltración vertical (R_v), por lo que despejando este término de la ecuación definida, se tiene:

$$RV = B + Sh + ETR + V(S) - Eh \quad (2)$$

$$RV = 4.1 + 2.9 + 12.25 + 0.0 - 16.95$$

$$RV = 2.3 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo tanto la recarga total es igual a:

$$R_t = R_v + Eh$$

$$R_t = 2.3 + 16.95 = 19.25 \text{ hm}^3 / \text{año}$$

CAPITULO 6. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El área de estudio forma parte de la provincia fisiográfica de la sierra Madre Occidental, específicamente de la subprovincias de sierras y valles del norte, queda comprendida en la subcuenta del Rio Bacanuchi que se encuentra en la región hidrológica 9 “Sonora sur”, cuenca Rio Sonora y cubre un área de captación de 1607 Km².

Se evaluó la climatología del lugar y se analizaron cinco estaciones climatológicas en sus elementos de temperatura, precipitación y evaporación en un periodo comprendido de 1981 al 2005.

Se determinó las unidades geológicas presentes en el área, donde existen rocas desde el jurásico al reciente, también se describió la geología estructural y cuatro unidades hidrogeológicas.

Se llevó a cabo el levantamiento piezométrico de 16 aprovechamientos subterráneos para la evaluación de la profundidad y elevación del nivel estático y su evolución para el periodo 2013-2016.

La profundidad del nivel estático de la zona acuífera para el periodo comprendido 2013-2016 oscila de 7.1 a 31.75 siendo las profundidades mayores en la porción central, la elevación del nivel estático con respecto a la configuración se observa que los valores varían gradualmente al igual que la profundidad por efecto de la topografía a lo largo del cauce del Rio Bacanuchi y van desde 1440 sobre el nivel medio del mar que se registra en la porción norte hasta mil metros en el extremo sur.

Se obtuvo la evolución para el periodo 2013-2016 y fue con tendencia de recuperación de niveles que varían desde 1.58 hasta 0.9 metros reflejado en la porción central de la zona acuífera

Se determinó un bombeo de 4.1 hm³/año, una entrada de 16.96730443 hm³/año y una salida de 2.9 hm³ anuales.

Recomendaciones

Se recomienda a partir de este estudio se continúe la evaluación piezométrica en el área al menos cada año.

Establecer una red de monitoreo para la evaluación de la zona de estudio.

Llevar a cabo una modelación del comportamiento hidrodinámico de la zona acuífera.

La instalación de varias estaciones climatológicas para así obtener un conocimiento más exacto de las condiciones climatológicas de la región y con ello poder realizar un buen balance que permite equilibrar la explotación del acuífero.

Llevar a cabo pozos exploratorios, con el fin de conocer a través de los cortes de los pozos los diferentes estratos que conforman el acuífero de la zona. De preferencia que la descripción de estos cortes sea hecha por un Geólogo.

Las mediciones de los pozos deben de ser mensual, estas mediciones incluyen las lecturas de los niveles estáticos, niveles dinámicos y régimen de operación. Esto permitirá delinear mejor y ampliar las redes de flujo actuales.

Llevar a cabo nuevas pruebas de bombeo en la cual mejorara el conocimiento de las propiedades físicas del acuífero la cual permitirá ratificar o en su defecto afinar los cálculos actuales, respecto al caudal del flujo subterráneo, la relación entre los niveles piezométricos y la variación del volumen de agua almacenada en el acuífero.

Efectuar estudios de tipo geofísico y gravimétrico en aquellas zonas del acuífero esté menos exploradas.

Respecto a la calidad de agua

Primeramente tener un inventario actualizado del número de aprovechamientos con sus características constructivas, con el propósito de tomar muestras de agua zonificadas y evitar mezclas de estas. Esto proporcionara información de la calidad del agua en diferentes estratos litológicos.

El muestreo de agua deberá ser siempre en los mismo pozos, las mismas fechas con una frecuencia de cuando menos trimestral también se recomienda cuidar el tipo de contaminación para la porción norte y el oriente de la zona ya que son áreas de recargas.

Referencias Bibliográficas

- Custodio, E & Llamas, M. R. (1996). Hidrología subterránea. Editorial Omega. Barcelona. Tomos I y II
- García, E. (1891). Modificación al sistema climático de Koppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Ed. Instituto de Geografía, U.N.A.M., México, D.F.
- Koppen, W. (1936). Das geographische system der klimate. Mandbuch der klimatologie. Bd.1. Teil C. Berlin, Gebruder Bornteager.
- Mc Dowell, F.W. y Clabaugh, S.E (1979). Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western México. Geological Society of America, special paper.
- Universidad de Sonora (2005). Estudio geohidrológico del Rio Sonora. Estudio realizado para la Comisión Estatal del Agua.
- INEGI, cartas topográficas, H12-B63,
- SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO, cartas geológicas escala 1:50 000:
H12-B63
- INEGI, cartas hidrológicas de aguas superficiales, de aguas subterráneas y topográficas
- Comisión Estatal del Agua (CEA) en Sonora, 2005. Estudio Geohidrológico de las Subcuencas de los Ríos Sonora, Zanjón, San Miguel, Mesa del Seri-La Victoria y Cuenca Bacoachito. Realizado por la Universidad de Sonora.
- Viveros, 1965. Geología del Área de CabullonaCaloso, Mpio. De Agua Prieta, Sonora México, D.F. UNAM, Fac. De Ingeniería, Tesis Profesional, 80 Páginas
- NORMA Oficial Mexicana, NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

