



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

**ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO
TECORIPA, SONORA, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
GEÓLOGO

PRESENTA:
GUSTAVO ADOLFO FIERRO FIMBRES

DIRECTORA:
M.I. EVA LOURDES VEGA GRANILLO



HERMOSILLO, SONORA, OCTUBRE DEL 2014.

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

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis no hubiera sido posible realizar, sin la ayuda de todas las personas que amablemente colaboraron conmigo para su realización, durante todo el tiempo que se requirió hasta su conclusión y con quienes me siento profundamente agradecido por sus importantes contribuciones.

Mi más grande agradecimiento:

A mis padres Luis Noel y Águeda Cruz: Por su inagotable esfuerzo para enseñarme que en la vida nada es imposible, por su tremendo amor y dedicación, por formarme como la persona que soy hoy en día, por jamás desistir y estar conmigo.

A mis hermanas Noelia Guadalupe, María Fernanda y Marlene: Por convertirse en mi motivación para seguir adelante y brindarme su apoyo y cariño.

A mi directora en tesis M.I. Eva Lourdes Vega Granillo: Por su infinito apoyo y su inagotable paciencia para la realización de mi trabajo y las minuciosas recomendaciones para mejorarlo, ya que sin su ayuda jamás hubiera logrado llegar tan lejos.

A mis asesores M.C. Mariano Morales Montaña y al Dr. José Castillo Gurrola: Por permitirme participar en el proyecto de investigación del cual forma parte esta tesis.

A la Geol. Milca Fraijo Meléndrez y al Ing. Adalberto Durazo Fimbres: Por las atenciones y facilidades brindadas en la obtención de información.

A mis compañeros Jesús Gpe. Ramírez Valenzuela y Miguel Encinas Miranda: Que me ayudaron a agilizar la elaboración de este trabajo de tesis y que me acompañaron al campo.

A la Universidad de Sonora: Por convertirse en mi hogar, por darme las bases y formarme como el profesionalista que soy ahora.

RESUMEN

El presente estudio deriva de un trabajo mayor que fue financiado por La Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno del Estado de Sonora, en la que participaron investigadores, maestros y alumnos de la Universidad de Sonora con el propósito de apoyar al Municipio de Suaqui Grande y a toda la región de la cuenca del Río Tecoripa.

Para así resolver la problemática que este enfrenta respecto a la escasez de agua, reflejado en el abatimiento de su acuífero y en los bajos escurrimientos superficiales, ocasionados por las recurrentes y extremas sequías que se han presentado en los últimos años.

Con este estudio se logrará obtener la información básica que sirva para gestionar ante otras Dependencias Federales y Estatales, con el fin de que en futuros proyectos, se tengan conocimientos que permitan reducir la velocidad del flujo, incrementar la infiltración y evitar la evaporación del agua.

Otro objetivo sería elaborar un reglamento que permita hacer un buen uso y manejo del acuífero, debido a que al igual que más de un centenar de zonas agrícolas del país, el acuífero del Río Tecoripa, presenta una sobreexplotación del agua del subsuelo.

Para esto se revisaron estudios anteriores, se recabó información de varias dependencias, se analizó la precipitación y se calculó la evapotranspiración, el escurrimiento y la infiltración en toda la cuenca del Río Tecoripa.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPÍTULO I: GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1.- Localización del área de estudio	2
1.2. Actividades económicas.....	4
1.3. Usos del agua	5
1.4. Geología	6
1.5. Climatología.....	9

CAPÍTULO II: CARACTERÍSTICAS FISIOGRÁFICAS

2.1. Regiones hidrológicas de México y sus vertientes	17
2.2. Regiones hidrológicas de Sonora.....	18
2.3. Región, cuenca y subcuenca donde se ubica el acuífero	19
2.4. Presas, tipos de ríos y de drenaje	19
2.5. Área de la cuenca	20
2.6. Orden de la cuenca.....	20
2.7. Densidad de corriente	22
2.8. Densidad de drenaje	22

CAPÍTULO III: HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

3.1. Estaciones climatológicas	25
3.2. Cálculo de precipitación media anual.....	25
3.3. Cálculo de escurrimiento medio anual.....	30
3.4. Cálculo de evapotranspiración media anual.....	40
3.5. Cálculo de infiltración media anual.....	41

CAPÍTULO IV: HIDROGEOLOGÍA

4.1. Provincia hidrogeológica	42
4.2. Descripción del acuífero.....	45

4.3. Pruebas de bombeo para calcular los parámetros geohidrológicos.....	46
4.4. Propiedades del acuífero	64
4.5. Mapa de elevación del nivel estático	65
4.6. Red de flujo y dirección del movimiento del agua subterránea	70
4.7. Balance hidrológico.....	75
4.8. Recarga vertical del acuífero.....	77
4.9. Disponibilidad.....	78
CONCLUSIÓN.....	80
BIBLIOGRAFÍA.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de temperatura media y precipitación de la estación meteorológica Tecoripa.....	12
Tabla 2. Régimen de lluvias (García, 1981).	13
Tabla 3. Valores de temperatura media y precipitación de la estación meteorológica Suaqui Grande.....	15
Tabla 4. Valores obtenidos de la densidad de drenaje y la densidad de corriente.	23
Tabla 5. Valores de los promedios de las Estaciones Meteorológicas cercanas a la cuenca del Río Tecoripa.	25
Tabla 6. Datos obtenidos de los Polígonos de Thiessen.....	27
Tabla 7. Tipos y características de suelo (NOM-011-CNA-2000).....	30
Tabla 8. Valores de K en función del uso y tipo de suelo (NOM-011-CNA-2000).....	30
Tabla 9. Cálculo del coeficiente de escurrimiento anual (NOM-011-CNA-2000).	31
Tabla 10. Datos obtenidos de Coeficiente de escurrimiento.....	33
Tabla 11. Pozos en la que se llevaron a cabo las pruebas de bombeo.....	46
Tabla 12. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Tunal.....	48
Tabla 13. Análisis de prueba de bombeo del pozo San Bartolo.	50
Tabla 14. Análisis de prueba de bombeo del pozo Agua Potable Suaqui Grande.....	52
Tabla 15. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Alamito.....	54
Tabla 16. Análisis de prueba de bombeo del pozo Agua Potable Tecoripa.....	56
Tabla 17. Análisis de prueba de bombeo del pozo La Burqueña.	58
Tabla 18. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Bacerán.	60
Tabla 19. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Tepeguaje.	62
Tabla 20. Resultados de los pozos de las pruebas de bombeo obtenidos con el programa Aquifer Test v3.5.....	64
Tabla 21. Pozos censados en el 2004.	65
Tabla 22. Pozos censados en el 2014.	66

Tabla 23. Gasto horizontal de entrada de los pozos censados en el 2004.....	72
Tabla 24. Gasto horizontal de salida de los pozos censados en el 2004.....	72
Tabla 25. Gasto horizontal de entrada de los pozos censados en el 2014.....	74
Tabla 26. Gasto horizontal de salida de los pozos censados en el 2014.....	74
Tabla 27. Balances superficiales de la cuenca del Río Tecoripa.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Regadío por aspersión en el rancho El Tunal.	5
Ilustración 2. Climograma de la Estación Tecoripa.....	12
Ilustración 3. Climograma de la Estación Suaqui Grande.	15
Ilustración 4. Resultado con el método de Theis, pozo El Tunal.	49
Ilustración 5. Prueba de bombeo, pozo El Tunal.....	49
Ilustración 6. Resultado con el método de Theis, pozo San Bartolo.....	51
Ilustración 7. Prueba de bombeo, pozo San Bartolo.	51
Ilustración 8. Resultado con el método de Theis, pozo Agua potable Suaqui Grande.....	53
Ilustración 9. Prueba de bombeo, pozo Agua potable Suaqui Grande.	53
Ilustración 10. Resultado con el método de Theis, pozo El Alamito.	55
Ilustración 11. Prueba de bombeo, pozo El Alamito.....	55
Ilustración 12. Resultado con el método de Theis, pozo Agua Potable Tecoripa.	57
Ilustración 13. Prueba de bombeo, pozo Agua Potable Tecoripa.	57
Ilustración 14. Resultado con el método de Theis, pozo La Burqueña.	59
Ilustración 15. Prueba de bombeo, pozo La Burqueña.....	59
Ilustración 16. Resultado con el método de Theis, pozo El Bacerán.....	61
Ilustración 17. Rancho El Bacerán.....	61
Ilustración 18. Resultado con el método de Theis, pozo El Tepeguaje.	63

Ilustración 19. Prueba de bombeo, pozo El Tepeguaje.	63
---	----

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación de la cuenca del Río Tecoripa en el Estado de Sonora.	2
Mapa 2. Cuenca del Río Tecoripa.....	3
Mapa 3. Geología de la cuenca del Río Tecoripa.	6
Mapa 4. Mapa de climas del Estado de Sonora.....	10
Mapa 5. Regiones hidrológicas de México y sus vertientes.	17
Mapa 6. Regiones hidrológicas de Sonora.....	19
Mapa 7. Orden de la cuenca del Río Tecoripa.....	21
Mapa 8. Polígonos de Thiessen de la cuenca del Río Tecoripa.....	26
Mapa 9. Unidades de permeabilidad de la cuenca del Río Tecoripa.....	32
Mapa 10. Provincias hidrogeológicas de México.....	42
Mapa 11. Provincias hidrogeológicas del Estado de Sonora.....	43
Mapa 12. Ubicación de los pozos en los que se llevaron a cabo las pruebas de bombeo.....	47
Mapa 13. Ubicación de los pozos censados en el 2004 y el 2014.....	67
Mapa 14. Mapa de nivel estático de los pozos censados en el 2004.	68
Mapa 15. Mapa de nivel estático de los pozos censados en el 2014.	69
Mapa 16. Red de flujo de los pozos censados en el 2004.	71
Mapa 17. Red de flujo de los pozos censados en el 2014.	73
Mapa 18. Balance hidrológico superficial de la cuenca del Río Tecoripa.	76

INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para el consumo humano y está profundamente arraigada en la cultura de todos los pueblos. Las necesidades básicas de todos los seres vivos dependen de ella. El desarrollo humano y el desarrollo económico se basan asimismo en la disponibilidad de agua.

El agua es de gran importancia para el crecimiento y desarrollo del Estado de Sonora; Contar con suficiente abastecimiento de agua potable, propicia el desarrollo de la industria, la agricultura y la ganadería. La carencia de este líquido nos afecta a grandes escalas. Por ello es necesario tener un manejo sustentable del agua, e indispensable tener conocimientos, recientes e históricos, de las características geohidrológicas, así como las condiciones de explotación.

En el Estado de Sonora, el incremento de las extracciones de agua subterránea para satisfacer las demandas es creciente, y la población de usuarios ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos, debido al escaso o nulo conocimiento de la disponibilidad que se tenía hasta hace una década y por supuesto a la falta de mecanismos eficaces de medición y control de las extracciones, las cuales exceden por mucho la recarga natural con el consecuente abatimiento de los niveles piezométricos.

Una de las principales dificultades del estudio del agua subterránea es que ésta no puede verse directamente desde la superficie, por lo que regularmente se lleva a cabo una exploración hidrogeológica, entendida ésta como el conjunto de estudios, trabajos y operaciones, que se llevan a cabo tanto por técnicas directas como indirectas, encaminados a la localización de acuíferos para la captación de agua subterránea, en cantidad y con calidad adecuadas para su explotación (Custodio & Llamas, 1996).

En el presente estudio se hace una caracterización de la subcuenca del Río Tecoripa, perteneciente a la cuenca del Río Yaqui. Dicha caracterización consiste en definir ciertas propiedades fisiográficas de la cuenca, como son: área, tipo de drenaje, orden de corriente, densidad de corriente y densidad de drenaje.

También se consultaron los registros de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de las estaciones meteorológicas, con el fin de conocer la hidrología superficial de la cuenca. Estos registros fueron utilizados para la elaboración de los polígonos de Thiessen, necesarios para obtener la precipitación media anual de la cuenca.

Para la obtención del coeficiente de escurrimiento se usó el método indirecto que se menciona en la NOM-011-CNA-2000. La cual nos da información correspondiente a tipo y uso de suelo y vegetación, tomando en cuenta la carta hidrológica de aguas subterráneas. Para calcular la evapotranspiración media anual se utilizó el método de Coutagne y para la infiltración media anual se utilizó la ecuación del ciclo hidrológico.

En la hidrogeología de la cuenca del Río Tecoripa mencionamos la clasificación de la provincia hidrogeológica en la que se encuentra nuestra cuenca, la descripción y las propiedades del acuífero, las pruebas de bombeo que se llevaron a cabo, y la construcción de mapas de nivel estático y red de flujo necesario para conocer la recarga y la descarga anual del acuífero. Y por último determinar el balance hidrológico para saber cómo regular la extracción del agua.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

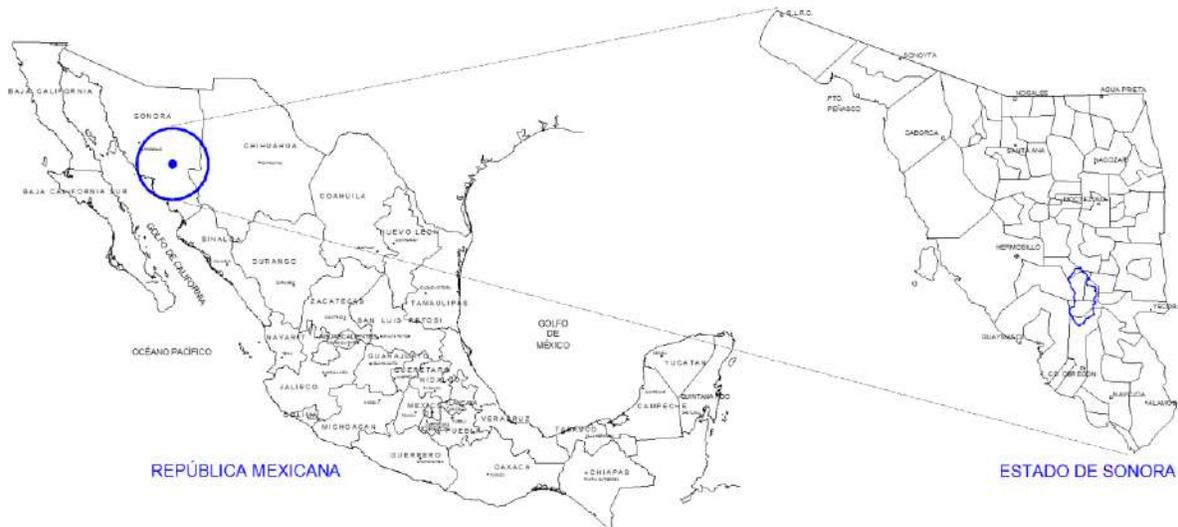
1.1.- Localización del área de estudio

El área de estudio se localiza en la porción centro oriental del Estado de Sonora entre los paralelos 28° y 29° de latitud Norte y entre los meridianos 109° 30' y 110° 30' de longitud Oeste, cubriendo una extensión territorial de 2,447.44 km²; limita al Noroeste con la cuenca del Río Mátape-San Marcial, al Suroeste con la subcuenca Arroyo Agua Caliente (Sahuaral) y al Este con la subcuenca del Río Yaqui (Chico Bacanora).

Limita al este con las Sierras Santa Barbará, Las Tarugas, El Aliso, El Encinal, Varilleras y Los Coyotes. Al oeste con Sierra Verde, Sierra Chichiquelite y la Sierra Agua Zarca.

La cuenca del Río Tecoripa, geopolíticamente comprende total o parcialmente los municipios de La Colorada, San Javier, Mazatán, Villa Pesqueira, Suaqui Grande, Cajeme y en una pequeña proporción de Guaymas (Mapa 1). Se accede por la porción norte del área estudiada por la carretera federal No. 16 (Hermosillo-Chihuahua).

Dentro de la cuenca del Río Tecoripa se encuentran las poblaciones de Tecoripa, San Javier, Suaqui Grande y Cumuripa (Mapa 2) (Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2639 Río Tecoripa, Estado de Sonora, 2008).



Mapa 1. Ubicación de la cuenca del Río Tecoripa en el Estado de Sonora.

1.2. Actividades económicas

El municipio de Suaqui Grande está ubicado al noreste del Estado de Sonora, colinda al norte con La Colorada y San Javier, al sur con Cajeme, al oeste con Guaymas y al este con Ónavas y Yécora.

Sus principales actividades económicas son la ganadería y la agricultura.

Cuenta con alrededor de 215 hectáreas de las cuales 205 son de riego y 10 de temporal. Las hectáreas de riego se encuentran ubicadas en los márgenes de los arroyos Suaqui Grande y márgenes del arroyo conocido como “El otro Arroyo” y estas tierras se encuentran distribuidas en alrededor de 45 parcelas de diferentes longitudes.

La ganadería es el sector en donde se genera la mayor fuente de empleo. Se cuenta con la cría de ganado bovino para carne y leche, así como también ganado equino y de abejas con 730 colmenas.¹

Dichas actividades son el soporte a la principal actividad primaria, lamentablemente el área de cultivo en los últimos años se ha reducido de forma importante amenazando con colapsar tanto al sector pecuario como el abastecimiento para consumo humano lo cual ocasionaría que los productores abandonen sus centros de producción y emigren en busca de una mejor calidad de vida.

El municipio de La Colorada está ubicado en el centro del Estado de Sonora limita al norte con Mazatán, al noreste con Villa Pesqueira, al este con San Javier y Soyopa, al sur con Guaymas, al sureste con Suaqui Grande, y al oeste con Hermosillo.

Entre las principales actividades económicas de la región podemos encontrar a la agricultura, para esto se dispone de una superficie de 19,549 hectáreas, de las cuales el 46% son de riego y el 54% de temporal. Los principales cultivos son de trigo, forrajes, frijol, frutas, hortalizas y otros alimentos en menor escala. La actividad ganadera es la principal fuente de ingresos, se cuenta con 40,976 cabezas de ganado bovino, 62 de porcino, 144 de ovino, 466 de caprino, 1,150 de equino y 115 colmenas aproximadamente.²

El municipio de San Javier está ubicado en el centro del Estado de Sonora, limita al norte con Soyopa, al este con Ónavas, al sur con Suaqui Grande y al oeste con la Colorada.

Las principales actividades económicas de la entidad son la ganadería y la minería.

La ganadería es principalmente de ganado bovino y es lo que mantiene económicamente activo al municipio. También se extraen minerales como oro, plata, cobre, plomo y actualmente carbón mineral pero esto se está convirtiendo en más una tradición que una actividad económica puesto que varios factores como el alto costo han impedido que se siga realizando.³

¹ <http://asignatura-regional-1.blogspot.mx/>

² http://es.wikipedia.org/wiki/Usuario_discusi%C3%B3n:Francia.lopezs

³ http://asignatura-regional-1.blogspot.mx/2013_03_01_archive.html

1.3. Usos del agua

El acuífero del Río Tecoripa pertenece al Organismo de Cuenca II Noroeste. La porción occidental de su territorio se encuentra sujeta a las disposiciones de dos decretos de veda. El primero se denomina “Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la Costa de Hermosillo, Sonora,” publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 2 de junio de 1967. El segundo es el “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Estado de Sonora, en la parte oeste del meridiano 110° de Greenwich, del Estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona, que no quedaron incluidos en las vedas impuestas en los ordenamientos señalados en el considerando primero de este Decreto”, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de septiembre de 1978. Estos decretos son de tipo II, en el que la capacidad de los mantos acuíferos sólo permite extracciones para usos domésticos. La superficie restante del acuífero no se encuentra vedada.

El uso principal del agua es el agrícola. En el acuífero no se localiza distrito ni unidad de riego alguna, ni tampoco se ha constituido a la fecha un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

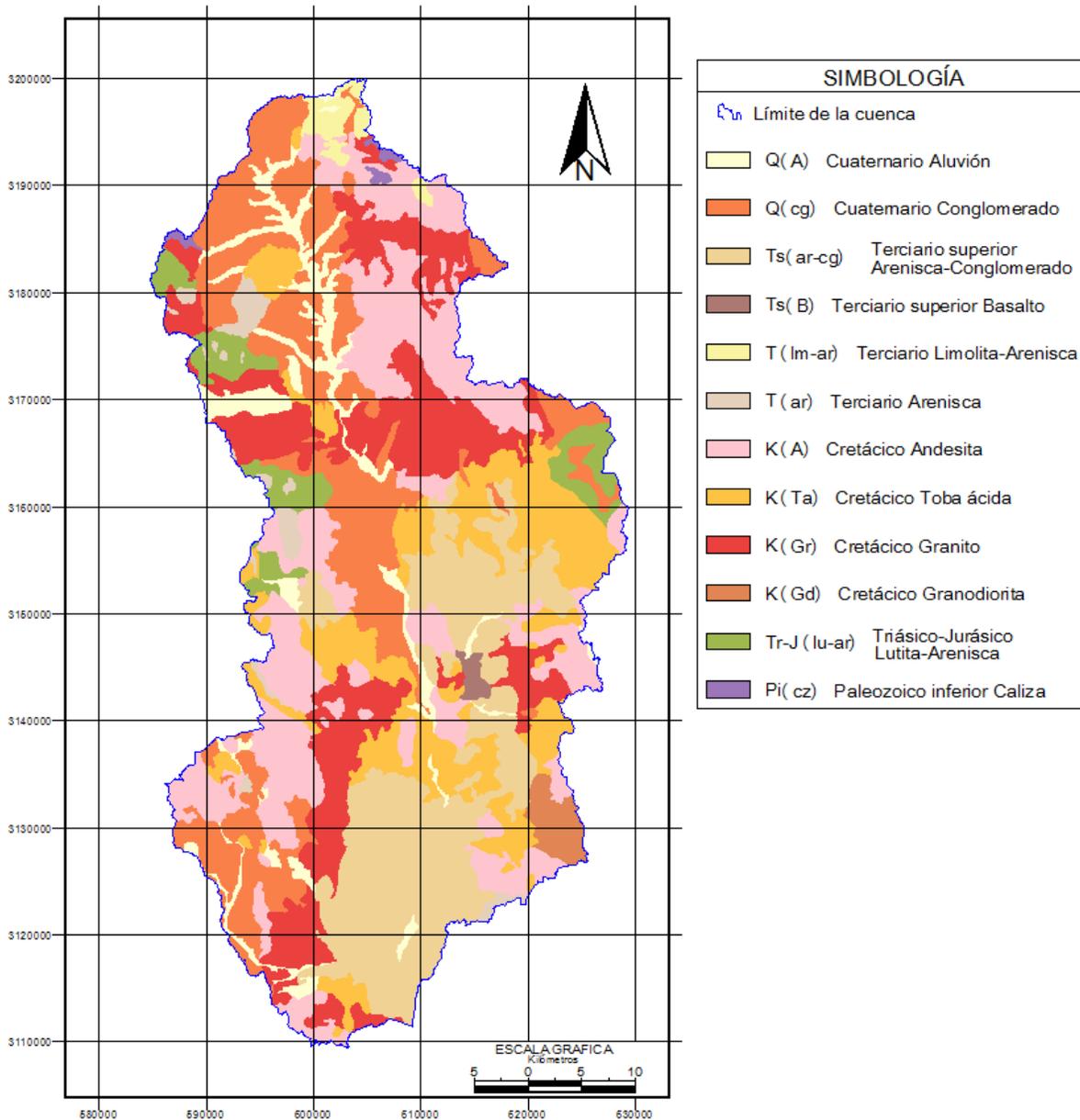
De acuerdo con los resultados reportados en el censo realizado en 2007. El volumen de extracción conjunto estimado asciende a 2.4 Mm³ anuales, de los cuales el (4.2%) se utilizan para uso público urbano, el (75%) se utilizan para uso agrícola y el (20.8%) para uso doméstico. (Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2639 Río Tecoripa, Estado de Sonora, 2008).



Ilustración 1. Riego por aspersión en el rancho El Tunal.

1.4. Geología

La geología general está representada por un conjunto de rocas de origen sedimentario e ígneo de complejas relaciones estructurales debido a los eventos de deformación que dieron lugar a extensos plegamientos en dirección de este a oeste noroeste a sureste (Mapa 3).



Mapa 3. Geología de la cuenca del Río Tecoripa.

El registro estratigráfico que cubre las rocas que afloran en la región comprende del Paleozoico al Reciente. A continuación se describen las diferentes unidades litoestratigráficas, de la más antigua a la más reciente.

Paleozoico

Secuencia de caliza masiva de origen marino, de color gris claro, que presenta algunas intercalaciones de horizontes de lutita y arenisca. Esta unidad se encuentra plegada y generalmente recristalizada por el efecto de las intrusiones graníticas del Cretácico. Los afloramientos de estas rocas se localizan al norte de nuestra área de estudio.

Triásico – Jurásico

El Triásico aflora en toda la porción centro-oriental del Estado de Sonora; está representado por un conjunto de rocas sedimentarias, de las cuales Dumble (1900) designó con el nombre de División Barranca, dividiéndola en tres miembros: Inferior, Medio y Superior. Posteriormente, King (1934) le otorga el nombre de Formación Barranca, y finalmente Alencaster en 1961 lo eleva formalmente al rango de Grupo y lo divide en tres Formaciones: Arrayanes, Santa Clara y Coyotes, según las tres divisiones de Dumble.

- *Formación Arrayanes.* Está constituida por una alternancia de conglomerados, areniscas de cuarzo y lutitas. Las capas de conglomerados están constituidas por fragmentos de cuarcitas y pedernal de color rojizo, de hasta 14 cm de diámetro, las areniscas se encuentran intercaladas con los conglomerados y se presentan en unidades de 1 a 15 m de espesor, y las lutitas se presentan con estratificación delgada, de hasta 20 m de espesor. Se considera que la Formación Arrayanes se depositó en un ambiente fluvial y se estima que su espesor es de 1,150 m.
- *Formación Santa Clara.* Conforman la parte media del Grupo Barranca, y es la única unidad del Grupo que en ciertos estratos de lutita presenta fósiles marinos que aun siendo escasos, permitieron asignarle una edad Cárnica.

Está constituida por una secuencia de lutitas de coloración clara y oscura, intercaladas con horizontes de areniscas de cuarzo. Las lutitas se presentan en capas laminares delgadas y ocasionales horizontes areno-arcillosos que contienen plantas fósiles y escasos intervalos con fósiles marinos, que consisten en braquiópodos, pelecípodos y amonitas.

Es frecuente la presencia de horizontes intercalados de lutitas carbonosas con gran contenido de materia orgánica y restos fósiles de plantas. Cojan y Potter (1991) estudiaron secciones parciales de la Formación Santa Clara en la región de San Javier y postularon que dicha unidad fue depositada en una planicie costera cruzada por ríos meándricos y con subambientes pantanosos y lacustres.

- *Formación Coyotes.* Está constituida principalmente por conglomerados intercalados con horizontes de areniscas y pequeñas capas de lutitas. El conglomerado se presenta en estratos de hasta 1.5 m de espesor y contiene fragmentos de cuarcitas, calizas con fusulínidos, pedernal y esporádicas rocas volcánicas. El depósito de esta formación marca un cambio drástico en la

sedimentación del Grupo Barranca, como consecuencia de la reactivación de la distensión que produjo levantamientos relativos y el depósito de esta secuencia conglomerática.

Cubre en discordancia a la Formación Santa Clara. Debido a la litología y disposición de las rocas que integran el Grupo Barranca, se considera que su ambiente de depósito fue en una zona de transición palustre–deltaica, próxima al margen continental o a una zona emergida, dada la abundancia de materia orgánica y la presencia de sedimentos clásticos (González León, Lawton, & Weber, 2010).

Cretácico Inferior

- *Formación Tarahumara.* Esta secuencia forma relieves topográficos en forma de lomeríos suaves, está constituida por un paquete de andesitas, areniscas y traquitas con algunos horizontes de areniscas, lutitas, calizas y tobas andesíticas. La edad de los emplazamientos varía desde el Maestrichtiano Superior al Paleoceno Inferior. Sin embargo, se pueden establecer edades relativas dentro de estos cuerpos intrusivos; las rocas graníticas son más viejas que las rocas con alto contenido de minerales ferromagnesianos, ya que éstas cortan al intrusivo granítico.

Las distintas composiciones y variedades texturales que presentan estas rocas, se deben a la diferenciación magmática y fusión parcial de las rocas encajonantes. Estas rocas se generaron a partir de la subducción de la placa Farallón bajo la placa Norteamericana a finales del Cretácico. Este evento tectónico corresponde a la orogenia Laramide.

Paleógeno-Neógeno

- *Formación Báucarit.* Originalmente Dumble (1900) la llamó División Báucarit. Posteriormente King (1937) la redefinió y la elevó al rango de Formación, como se le conoce actualmente. Se restringe a la región central y oriental del Estado de Sonora, incluyendo la parte occidental de la Sierra Madre Occidental, en una franja que inicia aproximadamente a 100 km de la costa a la longitud de Hermosillo (McDowell et al., 1997). Está compuesta por conglomerados polimícticos constituidos por fragmentos angulosos a subangulosos de todas las rocas preexistentes: intrusivas, volcánicas, areniscas y pedernal. Tiende a formar mesetas alargadas con una orientación NNW. El rumbo general de esta secuencia es de 30° hacia el NW con echados de 15 a 30° hacia el NE. Cubre discordantemente a rocas del Grupo Barranca, Formación Tarahumara y rocas volcánicas. El medio ambiente de depósito está asociado a cuencas continentales, formadas a partir del evento distensivo de Sierras y Valles (Basin and Range) (Calmus, 2011).

Cuaternario

Correspondientes al Pleistoceno existen depósitos no consolidados de conglomerados, gravas, arenas y limos, con clastos subangulosos de tamaños y composición heterogénea. Descansan discordantemente sobre toda la columna precuaternaria. Desde el punto de vista hidrogeológico, es la unidad más importante ya que de ella se extrae la

mayor cantidad del agua utilizada en la región (Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2639 Río Tecoripa, Estado de Sonora, 2008).

1.5. Climatología

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) define el clima como un conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un lugar determinado.

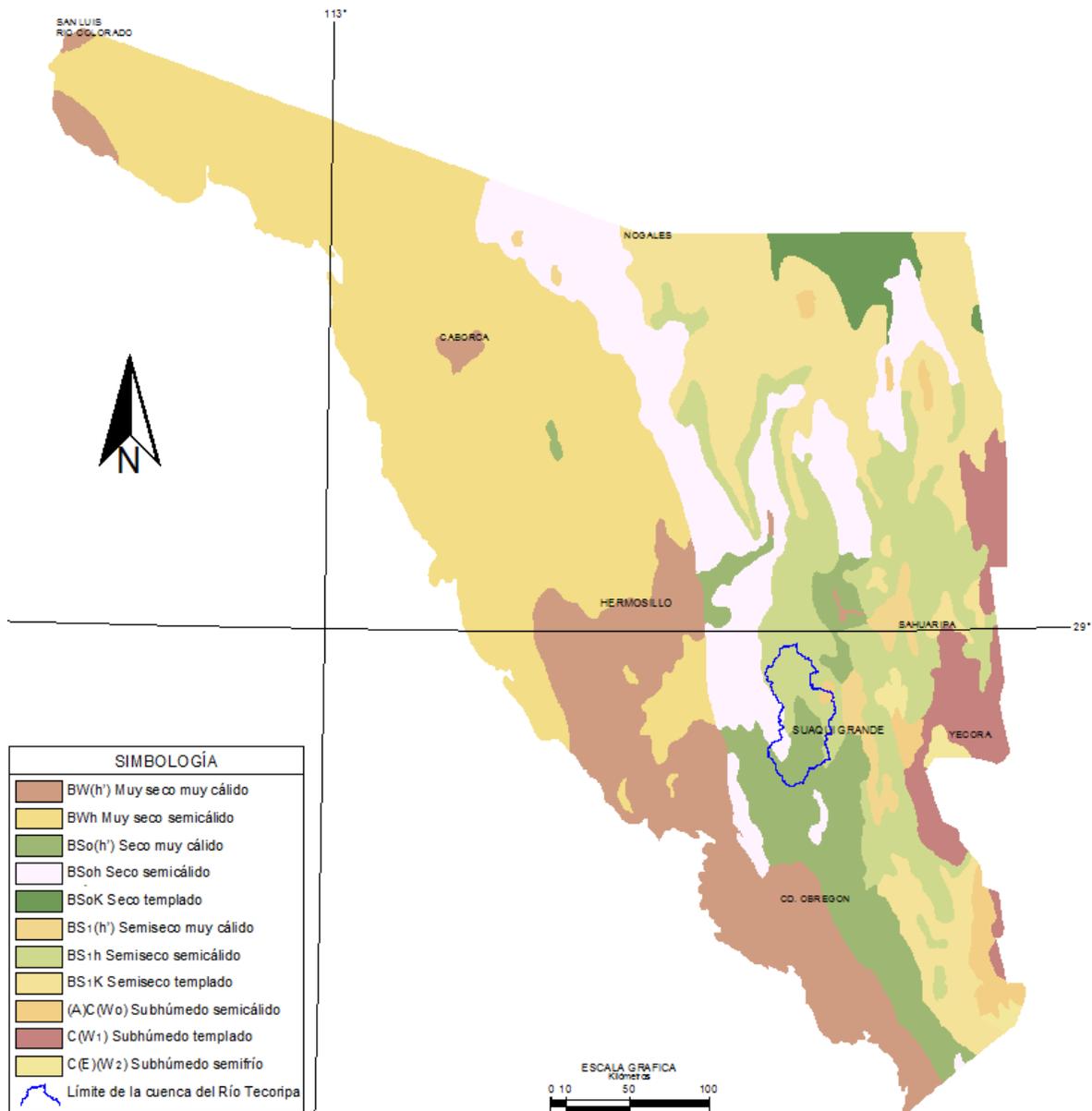
El clima es el resultado de la interacción de varios factores que influyen directamente en sus características. A continuación se nombran las características que podemos considerar como esenciales en un grupo de elementos del clima, estas son: la temperatura, la humedad y presión del aire, vientos y precipitaciones. También intervienen los factores climáticos, tales como la latitud, altitud y localización de un lugar y dependiendo de ellos variarán los elementos del clima. También se deben considerar factores como las masas de agua y las corrientes marinas.⁴

En México la observación, vigilancia y medición constante de las condiciones atmosféricas está a cargo del Servicio Meteorológico Nacional. En el Estado de Sonora se cuenta con alrededor de 150 estaciones climatológicas, 7 estaciones meteorológicas automatizadas, 5 observatorios, 1 radiosonda y 1 radar (Comisión Nacional del Agua, 2014).

La definición de los tipos de climas del Estado de Sonora se basó en el Sistema de Clasificación Climática de Köppen (Köppen-Geiger), modificado por la Maestra Enriqueta García en 1964, para su adaptación a las condiciones de la República Mexicana.

El Estado de Sonora presenta once tipos de climas según la clasificación de García. Esta consiste en una clasificación climática mundial que identifica cada tipo de clima con una serie de letras que indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que caracterizan dicho tipo de clima (Mapa 4) (Arámbula Montiel & Palomino Moreno, 1991).

⁴ <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/metodologia.aspx>



Mapa 4. Mapa de climas del Estado de Sonora.

A continuación se nombran y se describe cada uno de éstos:

- **BW(h')** Muy seco muy cálido, temperatura media anual superior a 22°C, con verano cálido (temperatura del mes más caliente mayor a 18°C) régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno.
- **BWh** Muy seco semicálido, La temperatura media anual está por encima de los 18 C, régimen de lluvias intermedio entre verano e invierno.
- **BSo(h')** Seco muy cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes más frío mayor de 18°C; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.
- **BSo,h** Seco semicálido, inviernos fresco, con temperatura media anual entre 18 y 22°C.

- BS_oK Seco templado, temperatura entre 12°C y 18°C , temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C , temperatura del mes más caliente menor de 22°C ; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.
- $BS_i(h')$ Semiseco muy cálido, temperatura media anual mayor de 22°C , temperatura del mes más frío mayor de 18°C ; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.
- BS_ih Semiseco semicálido, presenta una temperatura anual mayor a los 18°C , con temperatura del mes más frío menor a 18°C . La temperatura del mes más cálido es de 22°C , con lluvias distribuidas en todo el año y porcentaje de lluvias invernal mayor al 18% del total anual.
- BS_iK Semiseco templado, Presenta una temperatura anual de entre 12 y 18°C , con una temperatura del mes frío de entre -3 a 18°C , la temperatura del mes más cálido menor a los 22°C ; con lluvias de verano y porcentaje de lluvias invernales mayor al 18% del total anual.
- $(A)C(W_o)$ Subhúmedo semicálido del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C , temperatura del mes más frío menor de 18°C , temperatura del mes más caliente mayor de 22°C . Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor a 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
- $C(W_i)$ Subhúmedo templado, temperatura media anual entre 12°C y 18°C , temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C . Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
- $C(E)(W_2)$ Subhúmedo semifrío, lluvias de verano de los más húmedos y cuya precipitación es de 900 mm anuales (Base de datos geográficos, diccionario de datos climáticos escalas 1:250 000 y 1:1 000 000, 2000).

Como podemos observar en Sonora, el clima varía de muy seco a seco en las zonas costeras, de seco a semiseco en las regiones intermontanas y fronterizas y de subhúmedo a templado en las partes altas montañosas.

La época más cálida en el Estado de Sonora es del 15 de junio al 15 de julio y la más fría del 15 de diciembre al 15 de enero.

En nuestra área de estudio se llevó a cabo un análisis climatológico que se realizó con base a los datos de dos estaciones climatológicas en el área de influencia del acuífero, estas son las estaciones 26-201 Estación Tecoripa y 26-125 Estación Suaqui Grande.

Para esto se llevó a cabo la creación de un Climograma. Este consiste en un gráfico de doble entrada en el que se presentan los valores de precipitación y temperatura de una estación meteorológica. Se presentan los datos medios de cada mes del año, teniendo en cuenta la precipitación y la temperatura media a lo largo de todos los años observados (Hernández López, 2012).

Antes de elaborar un Climograma se procede a contestar un cuestionario sencillo acerca de los valores de temperatura media y precipitación, como se muestra a continuación, tomando los datos de la Estación Tecoripa y Estación Suaqui Grande.

Elaboración del Climograma de la Estación Tecoripa:

Tabla 1. Valores de temperatura media y precipitación de la estación meteorológica Tecoripa.

26-201 Estación Tecoripa													
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
Temperatura (°C)	14.0	15.2	17.4	20.9	24.6	29.0	29.2	28.7	27.4	23.4	18.0	14.7	21.9
Precipitación (mm)	24.2	13.3	7.3	5.4	4.8	23.7	170.6	142.3	79.8	22.3	21.2	29.4	544.1

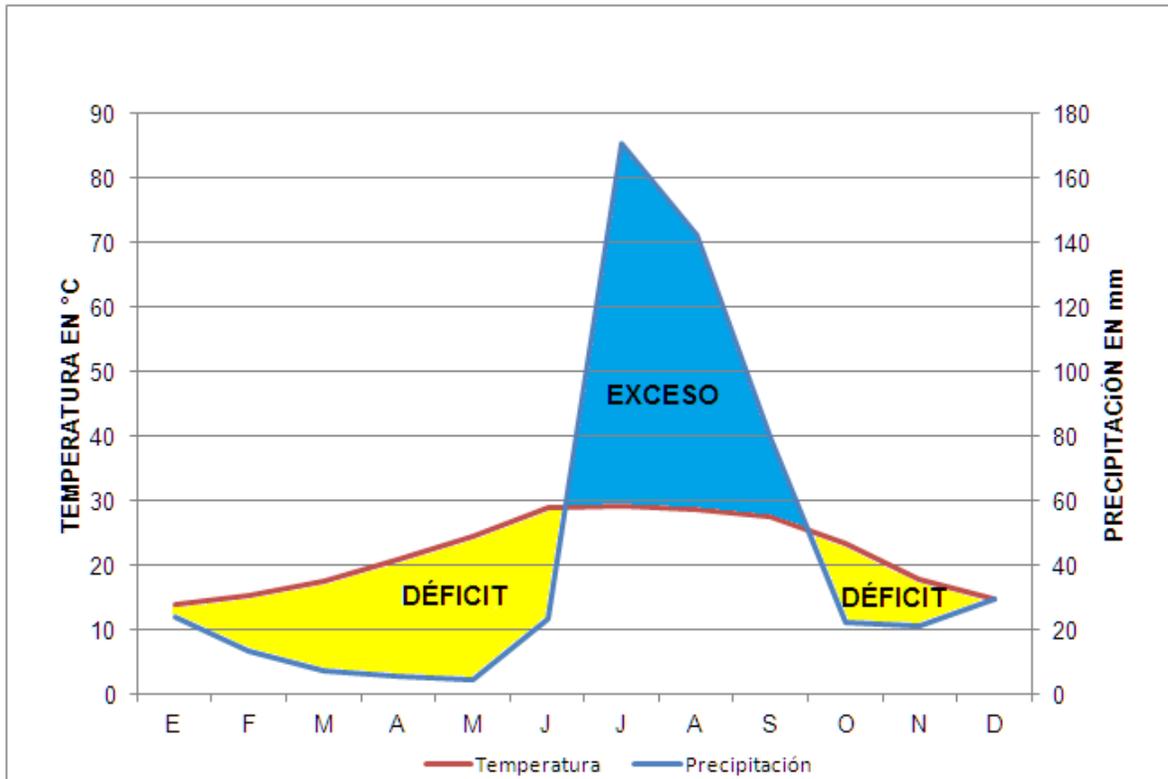


Ilustración 2. Climograma de la Estación Tecoripa.

Cuestionario para realizar un Climograma (García, 1981).

- 1) Temperatura media anual en °C.
21.9°C
- 2) Temperatura media del mes más frío y mes en el que se presenta.
14.0°C en Enero
- 3) Temperatura media del mes más cálido y mes en el que se presenta.
29.2°C en Julio
- 4) Precipitación total anual en mm.
544.1 mm
- 5) Precipitación del mes más seco y mes en que se presenta.
4.8 mm en Mayo
- 6) Precipitación del mes más lluvioso y mes en que se presenta.
170.6 mm en Julio

7) Porcentaje de lluvia invernal.

$$\text{Porcentaje de lluvia invernal} = \frac{P_{dic} + P_{ene} + P_{feb}}{P_{anual}} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de lluvia invernal} = \frac{29.4 + 24.2 + 13.3}{544.1} \times 100$$

Porcentaje de lluvia invernal = 12.2%

8) Determinación del régimen de lluvias.

Si mayo siendo el mes más seco con una lluvia de 4.8 mm se multiplica por 10, da 48 mm y se compara con la de Julio que es el mes más lluvioso con 170.6 mm, por lo que 170.6 mm > 48 mm se determina que es lluvioso de verano (García, 1981).

9) Anotar las formulas de la tabla 2 *rh* y *rs* que corresponden al porcentaje de lluvia invernal calculado.

Tabla 2. Régimen de lluvias (García, 1981).

Régimen de lluvias						
De verano: por lo menos 10 veces mayor cantidad de precipitación en el mes más húmedo de la mitad caliente del año que en el mes más seco. Esto no necesariamente se cumple en los climas Am.		Intermedio: entre verano e invierno: si el máximo de precipitación se encuentra a la mitad caliente del año, no llega a 10 veces la del mes más seco; si está en invierno, no llega a tres veces.		De invierno: por lo menos tres veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad fría del año, que el mes más seco		
$rh = 2t + 28$		$rh = 2t + 21$		$rh = 2t + 21$		$rh = 2t + 21$
$rs = \frac{2t + 28}{2}$		$rs = \frac{2t + 21}{2}$		$rs = \frac{2t + 21}{2}$		$rs = \frac{2t + 21}{2}$
PORCENTAJE DE PRECIPITACIÓN INVERNAL RESPECTO AL TOTAL ANUAL						
menores de 5	entre 5 y 10.2	mayor de 10.2	menor de 18	mayor de 18	menor de 36	mayor de 36

$$rh = 2t + 21$$

$$rs = \frac{2t + 21}{2}$$

Donde:

rh = cantidad mínima necesaria de precipitación anual (expresada en cm), para que el clima sea húmedo o subhúmedo; si la estación cuyo clima se clasifica tiene una precipitación anual menor que el valor calculado de *rh*, el clima es seco; *rh* es el límite entre los climas secos y los húmedos y subhúmedos (García, 1981).

rs = es la cantidad mínima necesaria de precipitación anual (expresada en cm), para que el clima sea BS (seco) en cualquiera de sus dos modalidades, si la estación cuyo clima se

clasifica tiene una precipitación anual menor que el valor calculado para r_s , el clima es muy árido (García, 1981).

$t =$ es la temperatura promedio anual.

10) Aplicar las fórmulas de la tabla 2 para separar el régimen calculado:

a. Húmedo y subhúmedos de secos.

$$rh = 2(21.9) + 21 = 64.8 \text{ cm}$$

b. Secos de *BS* de muy secos *BW*.

$$rs = \frac{2(21.9) + 21}{2} = 32.4 \text{ cm}$$

c. Decidir si el clima es seco o no lo es

Puesto que $64.8 \text{ cm} > 54.41 \text{ cm}$, el clima es Semiseco semicálido.

Elaboración del Climograma de la Estación Suaqui Grande:

Tabla 3. Valores de temperatura media y precipitación de la estación meteorológica Suaqui Grande.

26-125 Estación Suaqui Grande													
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
Temperatura (°C)	16.6	17.9	19.8	23.0	26.5	30.6	29.9	29.0	28.8	25.3	20.0	17.0	23.7
Precipitación (mm)	22.5	15.6	7.4	4.2	2.8	24.2	155.1	132.2	54.9	23.4	11.2	23.5	477.1

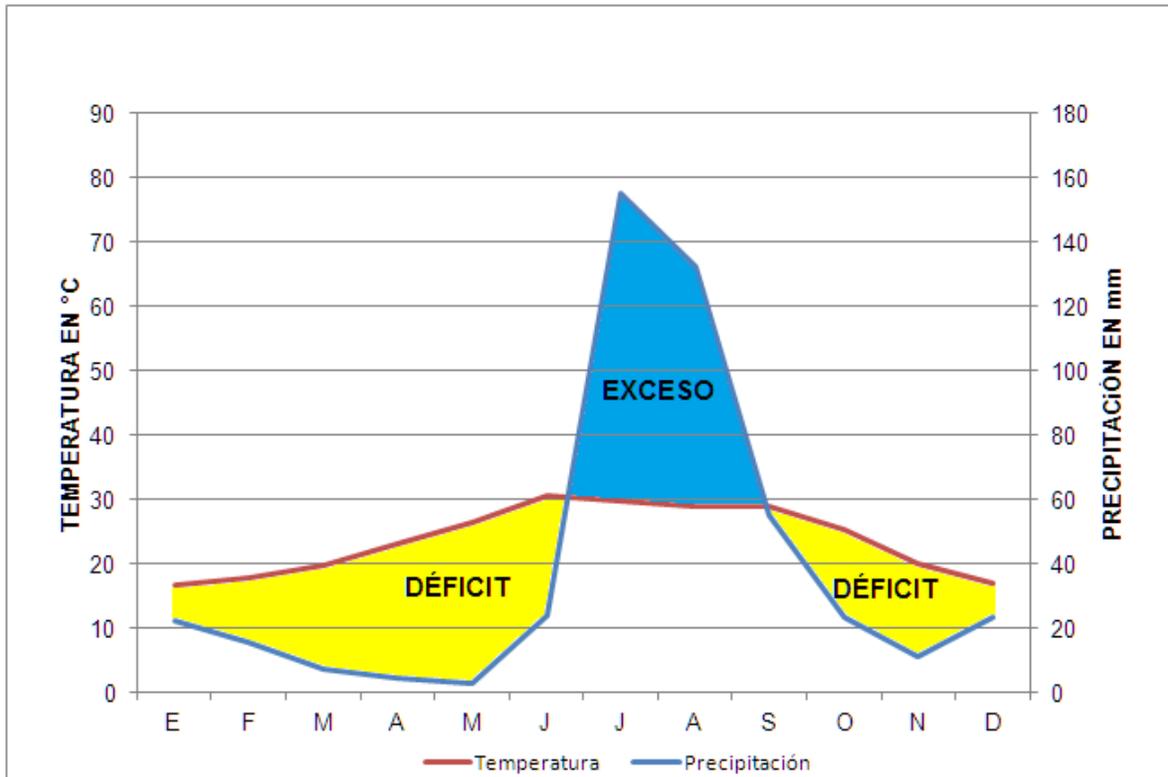


Ilustración 3. Climograma de la Estación Suaqui Grande.

Cuestionario para realizar un Climograma (García, 1981).

- 1) Temperatura media anual en °C.
23.7°C
- 2) Temperatura media del mes más frío y mes en el que se presenta.
16.6°C en Enero
- 3) Temperatura media del mes más cálido y mes en el que se presenta.
30.6°C en Junio
- 4) Precipitación total anual en mm.
477.1 mm
- 5) Precipitación del mes más seco y mes en que se presenta.
2.8 mm en Mayo
- 6) Precipitación del mes más lluvioso y mes en que se presenta.
155.1 mm en Julio

7) Porcentaje de lluvia invernal.

$$\text{Porcentaje de lluvia invernal} = \frac{P_{\text{dic}} + P_{\text{ene}} + P_{\text{feb}}}{P_{\text{anual}}} \times 100$$

$$\text{Porcentaje de lluvia invernal} = \frac{23.5 + 22.5 + 15.6}{477.1} \times 100$$

Porcentaje de lluvia invernal = 12.9%

8) Determinación del régimen de lluvias.

Si mayo siendo el mes más seco con una lluvia de 2.8 mm se multiplica por 10, da 28 mm y se compara con la de Julio que es el mes más lluvioso con 155.1 mm, por lo que $155.1 \text{ mm} > 28 \text{ mm}$ se determina que es lluvioso de verano (García, 1981).

9) Anotar las Formulas de la tabla 2 rh y rs que corresponden al porcentaje de lluvia invernal calculado.

$$rh = 2t + 21$$

$$rs = \frac{2t + 21}{2}$$

10) Aplicar las fórmulas de la tabla 2 para separar el régimen calculado:

a. Húmedo y subhúmedos de secos.

$$rh = 2(23.7) + 21 = 68.4 \text{ cm}$$

b. Secos de *BS* de muy secos *BW*.

$$rs = \frac{2(23.7) + 21}{2} = 34.2 \text{ cm}$$

c. Decidir si el clima es seco o no lo es

Puesto que $68.4 \text{ cm} > 47.71 \text{ cm}$, el clima es Seco muy cálido.

Como podemos observar en los climogramas anteriores, el exceso de lluvia es principalmente en los meses de Julio a Septiembre y el déficit es en los otros meses.

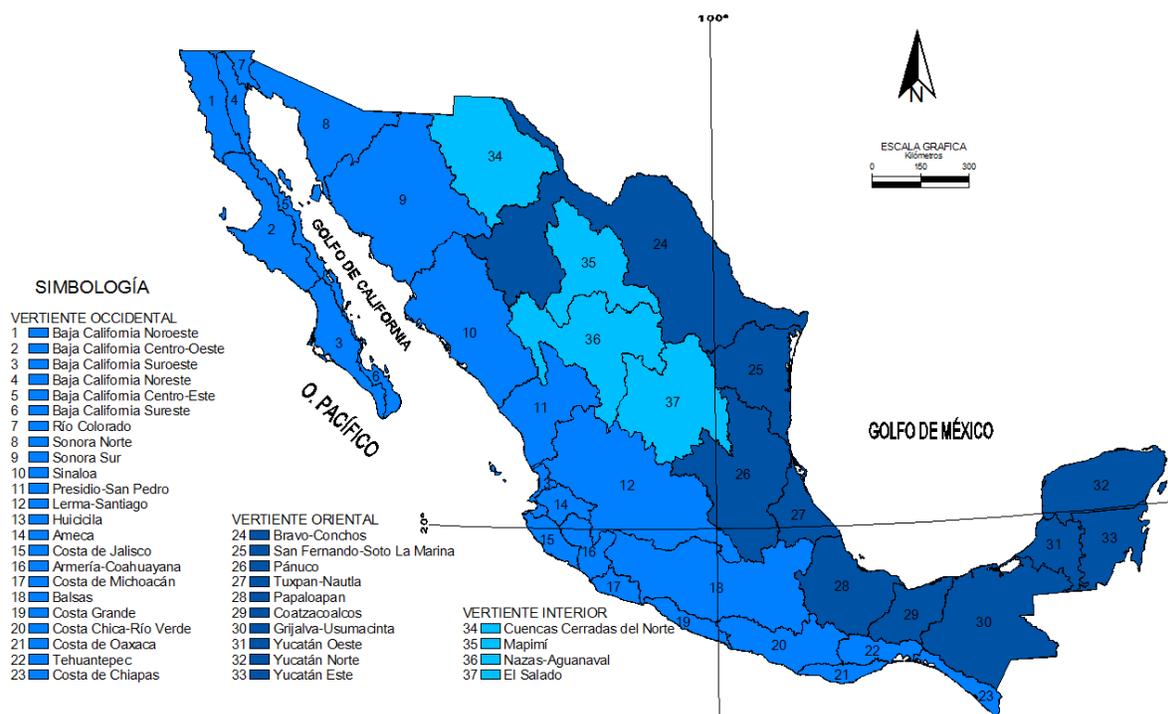
De acuerdo a la Clasificación de Climas de Köppen, los climas predominantes en la cuenca del Río Tecoripa son de semiseco semicálido a seco muy cálido.

CAPÍTULO II: CARACTERÍSTICAS FISIGRÁFICAS

2.1. Regiones hidrológicas de México y sus vertientes

La República Mexicana está dividida en 37 regiones hidrológicas (RH), agrupadas en tres vertientes (Mapa 5):

- *Vertiente Occidental* (Océano Pacífico)
- *Vertiente Oriental* (Golfo de México y Mar Caribe)
- *Vertiente Interior*, conformada por cuencas endorreicas que no tienen salida al mar.



Mapa 5. Regiones hidrológicas de México y sus vertientes.

Las regiones más húmedas son la Grijalva-Usumacinta (RH-30), la Papaloapan (RH-28) y la Coatzacoalcos (RH-29), y la llamada Costa de Chiapas (RH-23). Las tres primeras corresponden a la vertiente oriental (Golfo de México), y la última a la vertiente occidental (Océano Pacífico). Las cuatro se localizan en los estados del sureste de México.

Las regiones hidrológicas más secas del país son las seis de la península de Baja California: Noroeste (RH-1), Centro Oeste (RH-2), Suroeste (RH-3), Noreste (RH-4), Centro-Este (RH-5) y Sureste (RH-6), además la Sonora Norte (RH-8) y Mapimí (RH-35). Las siete primeras corresponden a la vertiente occidental (Océano Pacífico) y la última a la vertiente interior.

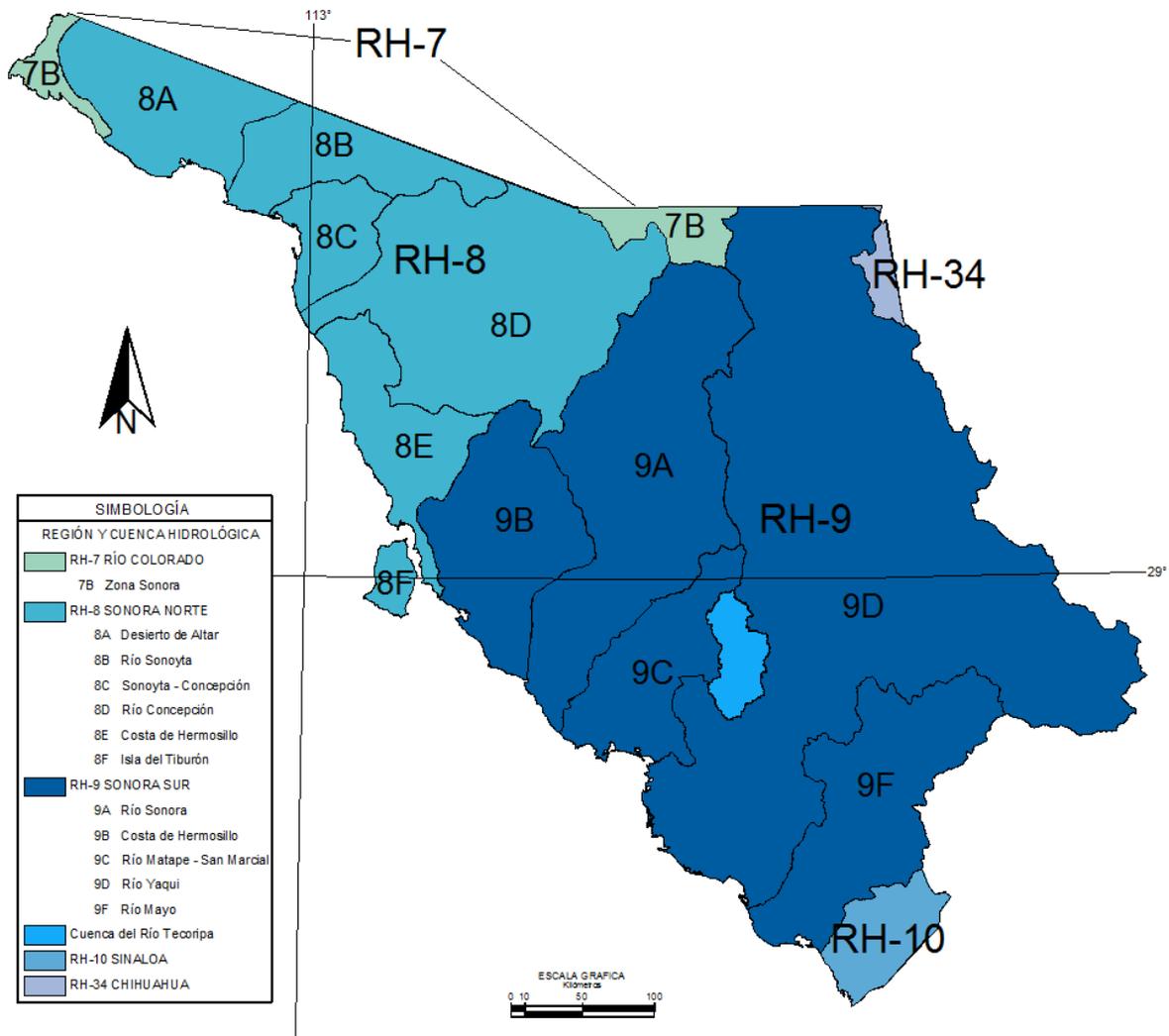
En la vertiente interior la región más importante es la Nazas-Aguanaval (RH-36) que se localizan en los estados de Zacatecas, Durango y Coahuila (Vega Granillo, 2011).

2.2. Regiones hidrológicas de Sonora

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ha dividido las regiones hidrológicas de México en 13 regiones hidrológico-administrativas, las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, considerando las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos pero también respetando los límites municipales, esto con el fin de facilitar el manejo del agua en un ámbito regional.

Sonora se ubica en la región II Noroeste, que comprende de cinco regiones hidrológicas: Río Colorado (RH-7), Sonora Norte (RH-8), Sonora Sur (RH-9), Sinaloa (RH-10) y Cuencas Cerradas del Norte (RH-34) (Mapa 6). Las cuatro primeras son cuencas exorreicas de la vertiente occidental y drenan sus aguas hacia el Golfo de California; en el estado también se tiene una pequeña parte de la cuenca endorreica de la vertiente interior (RH-34) que drena hacia el estado de Chihuahua.

La región más importante es la Sonora Sur (RH-9), ya que tiene un área de 117,363 km² que representa el 29.98% de la superficie estatal y aporta el 76% del volumen total precipitado al año, así como el 82% del escurrimiento total registrado en el estado. Otras regiones, como la Sonora Norte (RH-8) recibe el 17% de la precipitación anual del estado; sin embargo, el escurrimiento es mayor en la Sinaloa (RH-10) y representa el 9.6% del total anual (Vega Granillo, 2011).



Mapa 6. Regiones hidrológicas de Sonora.

2.3. Región, cuenca y subcuenca donde se ubica el acuífero

La cuenca del Río Tecoripa, es parte de la cuenca del Río Yaqui. Esta se ubica en la región hidrológica Sonora Sur (RH-9). Se halla enmarcada por las coordenadas 28° y 29° de latitud Norte y 109° 30' y 110° 30' de longitud Oeste. Abarca las hojas editadas por el INEGI de escala 1:250 000 de: Tecoripa (H12-12) y Sierra Libre (H12-11).

2.4. Presas, tipos de ríos y de drenaje

El Río Tecoripa se origina a 32 km al oeste de la cortina de la presa Plutarco Elías Calles, a una altitud de 750 msnm. Su curso general es hacia el sur y pasa por los poblados de Tecoripa, Suaqui Grande y Cumuripa.

La subcuenca es clasificada como una cuenca exorreica, ya que esta desemboca dentro de la cuenca del Río Yaqui, misma con la que limita al sur hasta su descarga en la presa Álvaro Obregón (El Oviáchic).

Su topografía es ligeramente accidentada con algunos valles intermontanos en las porciones central y occidental. Debido al clima extremo del estado, el tipo de río es intermitente, esto quiere decir que la corriente del río escurre en época de lluvias y se seca durante las temporadas de sequías.

En el área de la subcuenca del Río Tecoripa, se percibe un drenaje del tipo dendrítico ya que las corrientes secundarias se unen libremente al cauce principal en ángulos parecidos, y contiene una importante cantidad de arroyos tributarios. También es considerada un tipo de drenaje rectangular porque los tributarios y el cauce principal se unen en ángulos rectos y el trazado del drenaje está fuertemente controlado por fallas o fracturas.

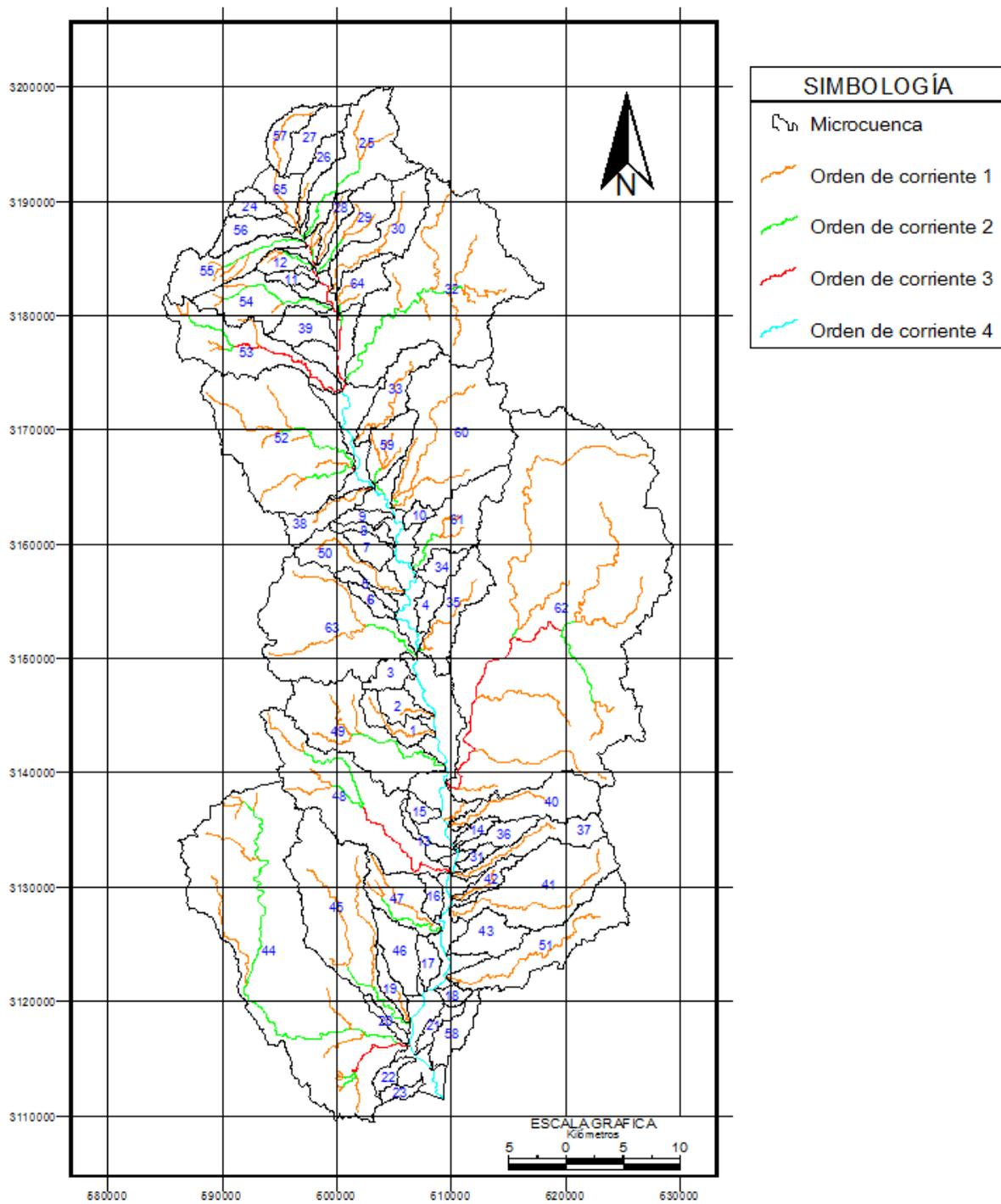
2.5. Área de la cuenca

El Río Tecoripa, afluente del Río Yaqui, tiene una cuenca de forma alargada en dirección de norte a sur, con la ayuda del programa de cómputo (AutoCAD) se pudo especificar que su territorio superficial es de 2,447.44 km² debido a su tamaño esta se puede definir como una cuenca pequeña.

2.6. Orden de la cuenca

Para una mejor interpretación, la cuenca fue dividida en 65 microcuencas, cuyas áreas varían desde los 3.67 a los 470.59 km². Se contabilizaron 141 corrientes en un mapa escala 1:250,000 variando en las microcuencas de 0 a 19 corrientes.

En 1945 Horton, Ingeniero hidráulico e hidrólogo americano, desarrolló el primer método cuantitativo de análisis de una red de drenaje; en 1952 su esquema fue perfeccionado por su estudiante Strahler. El método para la obtención de la orden de corriente es determinando el grado de bifurcación de las corrientes tributarias, en nuestro caso tenemos que la cuenca del Río Tecoripa es de orden 4 (Mapa 7) (Vega Granillo, 2011).



Mapa 7. Orden de la cuenca del Río Tecoripa.

2.7. Densidad de corriente

La densidad de corriente es el cociente entre el número de corrientes y el área de la cuenca y se define a través de la expresión:

$$Dc = \frac{Nc}{A}$$

Donde:

Dc = densidad de corriente ($1/\text{km}^2$, km^{-2}).

Nc = número de corrientes dentro de la cuenca.

A = área de la cuenca (Km^2).

Entre mayor sea la densidad de corriente, la cuenca estará más ramificada, lo que provocará una rápida respuesta a una entrada de lluvia y tal vez, una menor recarga al acuífero (Tabla 4) (Vega Granillo, 2011).

El resultado obtenido utilizando los datos de la densidad de corriente de la tabla 4 fue:

$$\text{Densidad de corriente} = \underline{3.62 /\text{km}^2}$$

2.8. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje es la relación entre la longitud total de todos los cauces de agua y la superficie total de la cuenca y se define a través de la expresión:

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Donde:

Dd = densidad de drenaje ($1/\text{km}^2$, km^{-1}).

L = longitud total de las corrientes dentro de la cuenca (km).

A = área de la cuenca (Km^2).

La densidad de drenaje es un parámetro que permite correlacionar la capacidad volumétrica de la cuenca y el volumen de almacenamiento del agua. Esto quiere decir que las cuencas con mayor densidad de drenaje poseen una mayor capacidad para colectar superficialmente el agua de lluvia y viceversa (Tabla 4) (Vega Granillo, 2011).

El resultado obtenido utilizando los datos de la densidad de drenaje de la tabla 4 fue:

$$\text{Densidad de drenaje} = \underline{18.78 /\text{km}}$$

Tabla 4. Valores obtenidos de la densidad de drenaje y la densidad de corriente.

No. microcuenca	Orden	Área (km ²)	Longitud total de corrientes (km)	No. de corrientes	Densidad de drenaje (1/km)	Densidad de corriente (1/km ²)
1	1	11.81	9.58	1	0.81	0.08
2	1	9.03	3.84	1	0.43	0.11
3		8.00		0		
4		6.74		0		
5		5.08		0		
6		4.91		0		
7		8.55		0		
8		4.60		0		
9		4.92		0		
10		3.74		0		
11		4.24		0		
12	2	6.77	7.27	3	1.07	0.44
13		5.45		0		
14		3.92		0		
15		4.53		0		
16		5.80		0		
17		6.71		0		
18		3.77		0		
19	1	7.26	3.42	1	0.47	0.14
20		3.67		0		
21		5.41		0		
22		4.84		0		
23		3.82		0		
24		8.19		0		
25	2	48.81	18.75	3	0.38	0.06
26	1	11.12	4.77	1	0.43	0.09
27		15.95		0		
28	1	7.49	6.81	1	0.91	0.13
29	2	22.28	11.68	3	0.52	0.13
30	1	30.34	14.43	1	0.48	0.03
31		3.73		0		
32	2	154.85	58.88	8	0.38	0.05
33	1	22.02	12.50	1	0.57	0.05
34		8.72		0		
35	2	27.01	11.85	3	0.44	0.11
36		9.44		0		
37	1	21.02	11.94	1	0.57	0.05

Tabla 4. (Continuación).

No. microcuenca	Orden	Área (km ²)	Longitud total de corrientes (km)	No. de corrientes	Densidad de drenaje (1/km)	Densidad de corriente (1/km ²)
38	1	14.04	7.25	1	0.52	0.07
39		13.85		0		
40	1	33.06	11.22	1	0.34	0.03
41	1	63.08	20.47	1	0.32	0.02
42	1	6.88	6.01	1	0.87	0.15
43		17.39		0		
44	3	246.29	92.31	19	0.37	0.08
45	2	84.45	36.66	4	0.43	0.05
46		18.07		0		
47	2	23.89	21.39	4	0.90	0.17
48	3	86.16	39.16	7	0.45	0.08
49	2	61.51	24.66	4	0.40	0.07
50	1	20.83	11.49	1	0.55	0.05
51	1	49.48	20.33	1	0.41	0.02
52	3	114.67	43.76	10	0.38	0.09
53	3	50.78	29.25	8	0.58	0.16
54	2	30.54	16.90	5	0.55	0.16
55	2	29.35	16.68	5	0.57	0.17
56		13.35		0		
57	1	12.73	7.97	1	0.63	0.08
58		12.88		0		
59	2	16.18	12.22	4	0.76	0.25
60	2	97.35	32.47	4	0.33	0.04
61	2	32.41	11.74	3	0.36	0.09
62	3	470.59	139.37	13	0.30	0.03
63	2	94.90	27.29	3	0.29	0.03
64	2	13.55	5.73	3	0.42	0.22
65	4	194.63	113.99	10	0.59	0.05
TOTAL		2447.44	924.04	141	18.78	3.62

CAPÍTULO III: HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

3.1. Estaciones climatológicas

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) registra en sus estaciones climatológicas, la precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y evaporación.

Para el presente estudio, fueron seleccionadas siete estaciones meteorológicas por su distribución y cercanía a lo largo de la cuenca del Río Tecoripa, promediando los datos existentes desde los años de 1943 a 2013 (Tabla 5).

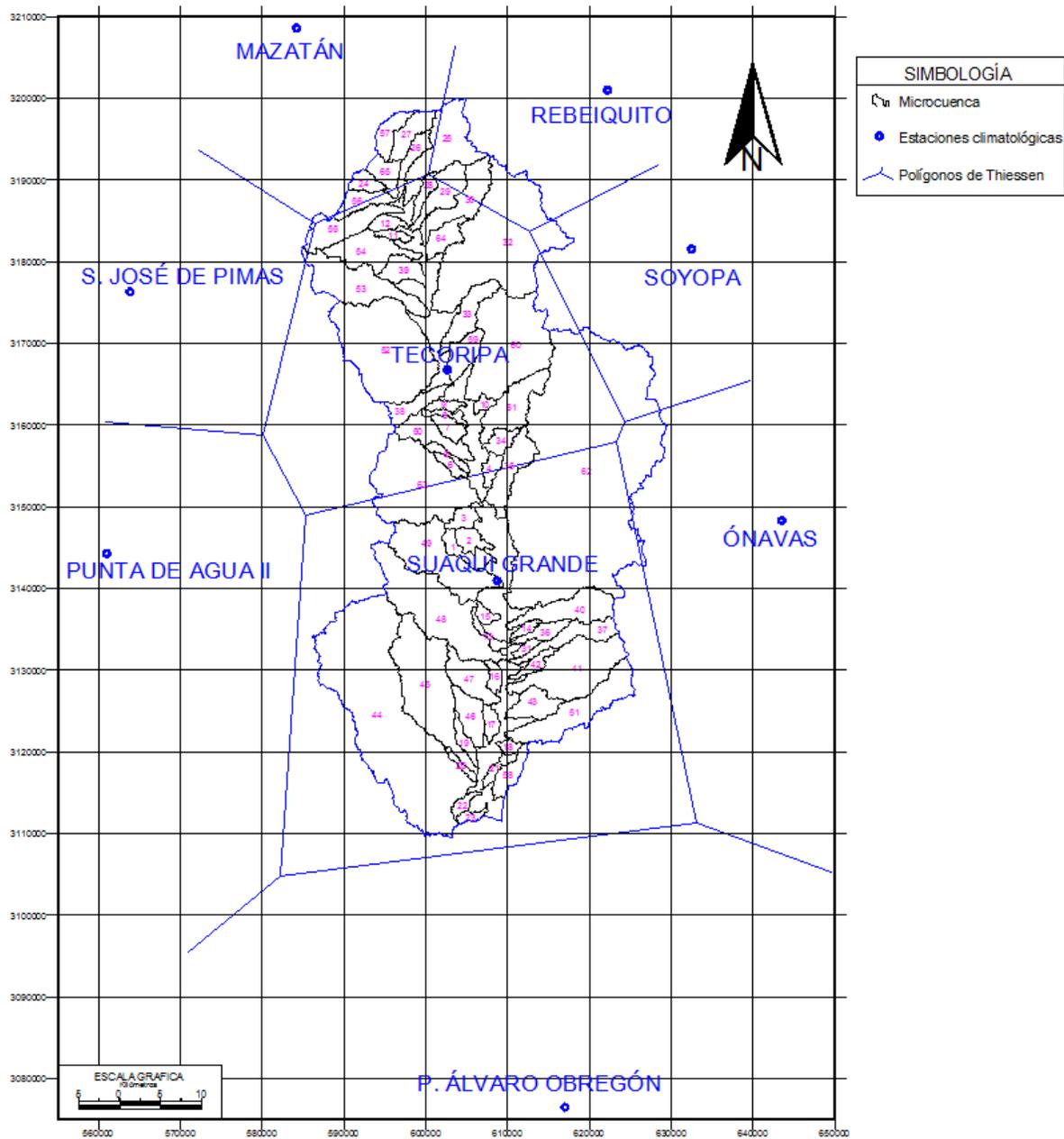
Tabla 5. Valores de los promedios de las Estaciones Meteorológicas cercanas a la cuenca del Río Tecoripa.

Estación	X	Y	Precipitación promedio anual (mm)	Temperatura promedio anual (°C)	Evaporación promedio anual (mm)
San José de Pimas	563647	3176400	455.04	22.92	1324.59
Mazatán	583979	3208692	515.55	20.93	
Tecoripa	602396	3166888	544.14	21.87	2128.89
Suaqui Grande	609389	3142021	477.05	23.70	
Rebeiquito	621997	3201090	672.82	22.56	
Soyopa	633331	3181053	652.89	23.97	
Ónavas	644275	3149291	606.14	24.11	2159.50
Máximo			672.82	24.11	2159.50
Mínimo			455.04	20.93	1324.59
Promedio			560.52	22.87	1870.99

3.2. Cálculo de precipitación media anual

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) define la precipitación media anual como la precipitación calculada para cualquier periodo de por lo menos diez años, que comienza el 1° de enero del primer año y que acaba el 31 de diciembre del último año.

Para calcular la precipitación media anual, fue utilizado el método de Polígonos de Thiessen (Mapa 8). El método consiste en trazar polígonos irregulares alrededor de cada estación climatológica. Cada estación se une a las estaciones más próximas formando triángulos (líneas discontinuas). A la mitad de cada línea que conecta dos estaciones, se traza una línea perpendicular que se extiende para formar polígonos (líneas continuas) (Vega Granillo, 2011).



Mapa 8. Polígonos de Thiessen de la cuenca del Río Tecoripa.

La precipitación media se calcula como un promedio pesado de las lluvias registradas en cada estación por el área de la estación correspondiente, usando la formula:

$$hp = \frac{\sum_{i=1}^n (hp_i * A_i)}{A_t}$$

Donde:

hp = altura de precipitación media (mm).

hp_i = altura de precipitación registrada en cada estación (mm).

A_i = área del polígono (Km²).

A_t = área total de la cuenca (Km²).

i y n = número de áreas y lluvias consideradas.

La siguiente tabla muestra los datos obtenidos de cada Polígono de Thiessen.

Tabla 6. Datos obtenidos de los Polígonos de Thiessen.

No. microcuenca	Estación	Área de la microcuenca (m ²)	Área del Polígono de Thiessen (m ²)	PP en la estación (m/año)	PP. EST. * Área microcuenca (m ³)
1	Suaqui Grande	11814096.74	1240873918	0.477	5635929
2	Suaqui Grande	9034120.69	1240873918	0.477	4309738.1
3	Suaqui Grande	8002381.56	1240873918	0.477	3817545.71
4	Suaqui Grande	2573065.38	1240873918	0.477	1227483.92
4	Tecoripa	4165326.8	919090884.6	0.544	2266522.8
5	Tecoripa	5077705.51	919090884.6	0.544	2762984.96
6	Suaqui Grande	43911.64	1240873918	0.477	20948.1
6	Tecoripa	4866464.07	919090884.6	0.544	2648039.95
7	Tecoripa	8547875.28	919090884.6	0.544	4651244.7
8	Tecoripa	4595999.78	919090884.6	0.544	2500869.39
9	Tecoripa	4919524.21	919090884.6	0.544	2676912.12
10	Tecoripa	3742572.56	919090884.6	0.544	2036485.12
11	Tecoripa	4241543.79	919090884.6	0.544	2307995.55
12	Tecoripa	6773409.45	919090884.6	0.544	3685686.07
13	Suaqui Grande	5447156.09	1240873918	0.477	2598572.34
14	Suaqui Grande	3921921.05	1240873918	0.477	1870957.13
15	Suaqui Grande	4531138.46	1240873918	0.477	2161585.03
16	Suaqui Grande	5797168.36	1240873918	0.477	2765546.11
17	Suaqui Grande	6707524.51	1240873918	0.477	3199832.6
18	Suaqui Grande	3773933.74	1240873918	0.477	1800359.61
19	Suaqui Grande	7257845.41	1240873918	0.477	3462363.85
20	Suaqui Grande	3671746.95	1240873918	0.477	1751611.28
21	Suaqui Grande	5405834.32	1240873918	0.477	2578859.74
22	Suaqui Grande	4841442.11	1240873918	0.477	2309615.76
23	Suaqui Grande	3818748.43	1240873918	0.477	1821738.51

Tabla 6. (Continuación).

No. microcuenca	Estación	Área de la microcuenca (m ²)	Área del Polígono de Thiessen (m ²)	PP en la estación (m/año)	PP. EST. * Área microcuenca (m ³)
24	Mazatán	8190341.86	78223031.58	0.516	4222492.5
25	Tecoripa	4501037.84	919090884.6	0.544	2449196.76
25	Rebeiquito	33273283.09	96804830.5	0.673	22387095.09
25	Mazatán	11040224.93	78223031.58	0.516	5691736.4
26	Tecoripa	914718.69	919090884.6	0.544	497735.44
26	Mazatán	10208981.49	78223031.58	0.516	5263192.73
27	Mazatán	15950795.67	78223031.58	0.516	8223358.21
28	Tecoripa	7165186.74	919090884.6	0.544	3898867.93
28	Rebeiquito	327141.28	96804830.5	0.673	220108.82
29	Tecoripa	13368075.91	919090884.6	0.544	7274110.84
29	Rebeiquito	8916320.27	96804830.5	0.673	5999122.75
30	Tecoripa	16527420.7	919090884.6	0.544	8993238.14
30	Rebeiquito	13807808.73	96804830.5	0.673	9290238.24
31	Suaqui Grande	3733401.87	1240873918	0.477	1781023.84
32	Tecoripa	102524626.8	919090884.6	0.544	55787796.57
32	Soyopa	11849350.45	66720933.98	0.653	7736379.93
32	Rebeiquito	40480277.13	96804830.5	0.673	27236140.51
33	Tecoripa	22024751.19	919090884.6	0.544	11984558.02
34	Tecoripa	8724505.8	919090884.6	0.544	4747356.51
35	Suaqui Grande	14382651.99	1240873918	0.477	6861261.36
35	Tecoripa	12622401.88	919090884.6	0.544	6868359.44
36	Suaqui Grande	9437883.47	1240873918	0.477	4502353.62
37	Suaqui Grande	21018150.99	1240873918	0.477	10026734.11
38	Tecoripa	14035896.57	919090884.6	0.544	7637499.08
39	Tecoripa	13852045.42	919090884.6	0.544	7537458.23
40	Suaqui Grande	33064931.73	1240873918	0.477	15773665.3
41	Suaqui Grande	63078992.8	1240873918	0.477	30091909.09
42	Suaqui Grande	6879330.05	1240873918	0.477	3281792.64
43	Suaqui Grande	17387119.94	1240873918	0.477	8294546.4
44	Suaqui Grande	246294436.1	1240873918	0.477	117495055.8
45	Suaqui Grande	84453764.63	1240873918	0.477	40288769.6
46	Suaqui Grande	18068610.86	1240873918	0.477	8619652.46
47	Suaqui Grande	23887905.58	1240873918	0.477	11395753.98
48	Suaqui Grande	86161031.68	1240873918	0.477	41103223.39
49	Suaqui Grande	61508301.47	1240873918	0.477	29342608.91
50	Tecoripa	20830458.37	919090884.6	0.544	11334694.99

Tabla 6. (Continuación).

No. microcuenca	Estación	Área de la microcuenca (m ²)	Área del Polígono de Thiessen (m ²)	PP en la estación (m/año)	PP. EST. * Área microcuenca (m ³)
51	Suaqui Grande	49478919.62	1240873918	0.477	23603977.88
52	Tecoripa	114665149.6	919090884.6	0.544	62393946.1
53	Tecoripa	49987172.68	919090884.6	0.544	27200042.63
53	San José de Pimas	792330.96	2604513.53	0.455	360539.02
54	Tecoripa	30539376.34	919090884.6	0.544	16617709.98
55	Tecoripa	26204565.28	919090884.6	0.544	14258963.94
55	Mazatán	1328506.31	78223031.58	0.516	684905.22
55	San José de Pimas	1812182.56	2604513.53	0.455	824608.09
56	Tecoripa	6218525.86	919090884.6	0.544	3383751.46
56	Mazatán	7135798.99	78223031.58	0.516	3678827.85
57	Mazatán	12730389.04	78223031.58	0.516	6563092.62
58	Suaqui Grande	12880468.03	1240873918	0.477	6144642.7
59	Tecoripa	16178515.36	919090884.6	0.544	8803384.63
60	Tecoripa	97350903.04	919090884.6	0.544	52972564.19
61	Tecoripa	32407809.12	919090884.6	0.544	17634399.83
62	Suaqui Grande	253229120.6	1240873918	0.477	120803255.4
62	Tecoripa	119371076	919090884.6	0.544	64954631.02
62	Ónavas	43122234.05	43122234.05	0.606	26138170.12
62	Soyopa	54871583.53	66720933.98	0.653	35825374.52
63	Suaqui Grande	47047431.28	1240873918	0.477	22444033.46
63	Tecoripa	47848579.1	919090884.6	0.544	26036347.36
64	Tecoripa	13548048.4	919090884.6	0.544	7372041.15
65	Suaqui Grande	102239429.5	1240873918	0.477	48773442.35
65	Tecoripa	80749616.39	919090884.6	0.544	43939132.6
65	Mazatán	11637993.3	78223031.58	0.516	5999913.09
TOTAL		2447440346	75052167840		1268420212

Aplicando los valores obtenidos de la tabla 6 y con la fórmula visto anteriormente, el resultado de la altura de precipitación media queda:

$$hp = \frac{1,268,420,212.24 \text{ m}^3}{24,474,440,345.77 \text{ m}^2} = 0.518 \text{ m/año}$$

Altura de precipitación media = 518.26 mm/año

3.3. Cálculo de escurrimiento medio anual

La expresión escurrimiento superficial suele referirse al volumen de las precipitaciones que caen sobre una cuenca, menos la retención superficial y la infiltración.

La NOM-011-CNA-2000 (Conservación del recurso agua – establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales) muestra dos métodos para calcular el escurrimiento: el directo y el indirecto.

En nuestro caso se utilizó el método indirecto. Este método se utiliza cuando la cuenca en estudio no cuenta con suficiente información de registros hidrométricos.

El coeficiente de escurrimiento, se determinó mediante el método de K en función del tipo y uso de suelo y de la altura de lluvia anual de la cuenca. Los tipos de suelos se pueden clasificar en tres diferentes tipos, como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 7).

Tabla 7. Tipos y características de suelo (NOM-011-CNA-2000).

Tipo de suelo	Características
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a suelos A, terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

Posteriormente se determina el uso del suelo en el área estudiada y se obtiene un valor del parámetro K en la intersección entre el uso y el tipo de suelo (Tabla 8).

Tabla 8. Valores de K en función del uso y tipo de suelo (NOM-011-CNA-2000).

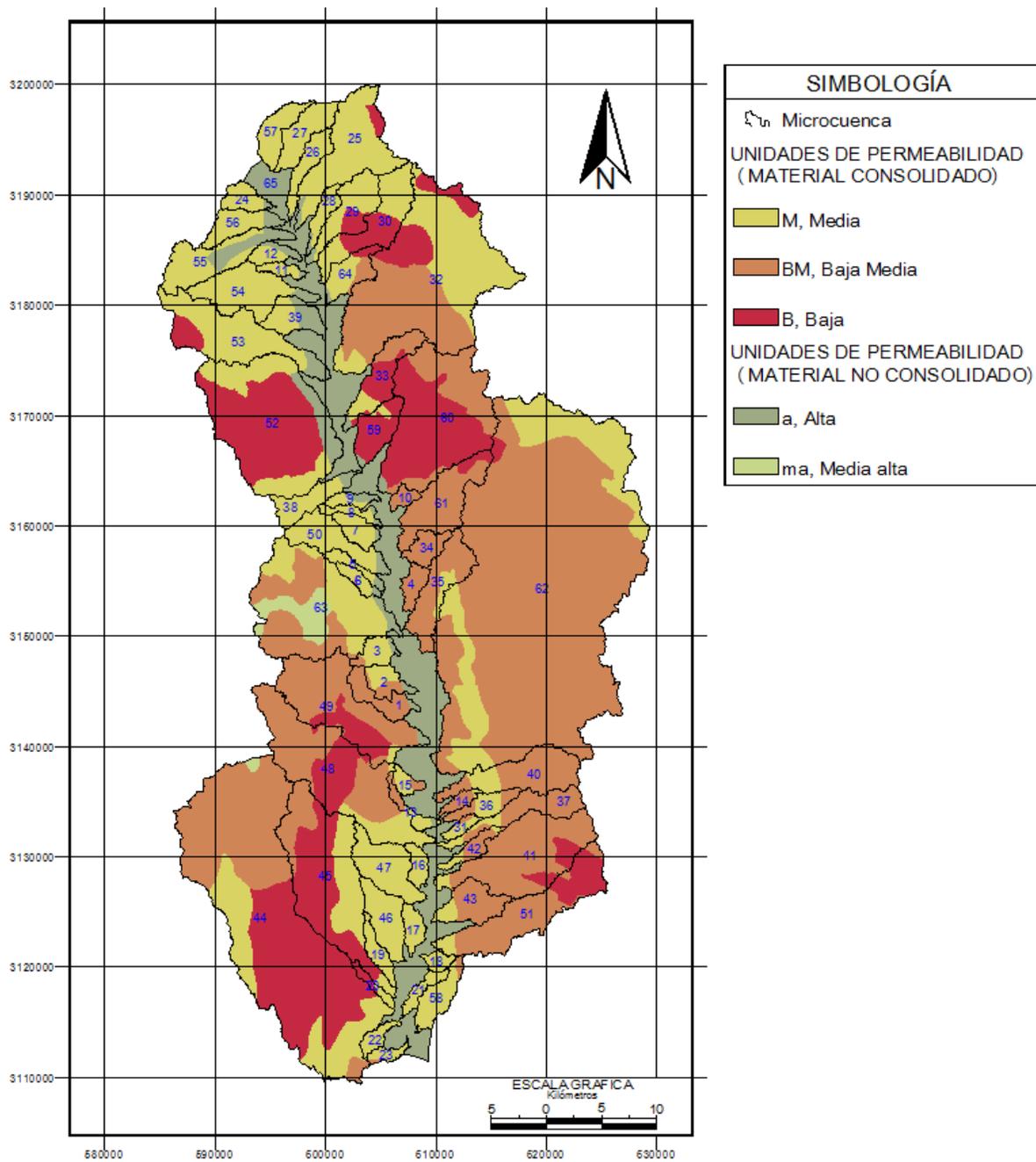
Uso del suelo	Tipo de suelo		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos			
En hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal (% del suelo cubierto o pastoreo):			
Más del 75% -Poco-	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% -Regular-	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% -Excesivo-	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto por más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto por menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Una vez obtenido el valor de K y conociendo la precipitación total anual en mm (P), el coeficiente anual (C_e) se calcula mediante la expresión empírica de la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000-Conservación del Recurso Agua) (Tabla 9).

Tabla 9. Cálculo del coeficiente de escurrimiento anual (NOM-011-CNA-2000).

K: parámetro que depende del tipo de suelo	Ce: Coeficiente de escurrimiento anual (adimensional)
Si $K \leq 0.15$	$C_e = K(P-250)/2000$
Si $K > 0.15$	$C_e = [K(P-250)/2000] + [(K - 0.15)/1.5]$

Para calcular el coeficiente de escurrimiento fue necesario utilizar la carta hidrológica de aguas subterráneas (HERMOSILLO), en donde esta indica las distintas unidades de permeabilidad dependiendo del tipo de material que esta tenga. (Mapa 9).



Mapa 9. Unidades de permeabilidad de la cuenca del Río Tecoripa.

A continuación la siguiente tabla muestra los datos obtenidos de cada microcuenca.

Tabla 10. Datos obtenidos de Coeficiente de escurrimiento.

No. microcuenca	Unidad geológica	Unidades de permeabilidad	Color	Tipo de suelo	Uso suelo	Total área (km ²)	K	Precipitación en la microcuenca (mm/año)	Ce
1	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media		C	Cultivos: en hilera	11.814	0.30	477.05	0.134
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
2	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	9.034	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
3	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	8.002	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
4	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	6.738	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
5	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	5.078	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
6	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	4.910	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
7	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	8.548	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
8	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	4.596	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
9	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	4.920	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
10	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	3.743	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
11	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Cultivos: en hilera	4.242	0.27	544.14	0.120
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							

Tabla 10. (Continuación).

No. microcuenca	Unidad geológica	Unidades de permeabilidad	Color	Tipo de suelo	Uso suelo	Total área (km ²)	K	Precipitación en la microcuenca (mm/año)	Ce
12	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	6.773	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
13	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	5.447	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
14	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	3.922	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
15	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	4.531	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
16	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	5.797	0.28	477.05	0.118
17	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	6.708	0.28	477.05	0.118
18	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	3.774	0.28	477.05	0.118
19	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	7.258	0.28	477.05	0.118
20	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	3.672	0.28	477.05	0.118
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
21	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	5.406	0.28	477.05	0.118
22	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Cultivos: en hilera	4.841	0.30	477.05	0.134
23	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Cultivos: en hilera	3.819	0.30	477.05	0.134
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
24	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	8.190	0.28	515.55	0.124
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							

Tabla 10. (Continuación).

No. microcuenca	Unidad geológica	Unidades de permeabilidad	Color	Tipo de suelo	Uso suelo	Total área (km ²)	K	Precipitación en la microcuenca (mm/año)	Ce
25	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	48.815	0.30	672.82	0.163
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
26	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	11.124	0.30	515.55	0.140
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
27	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	15.951	0.28	515.55	0.124
28	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	7.492	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
29	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	22.284	0.30	544.14	0.144
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
30	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	30.335	0.30	544.14	0.144
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
31	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	3.733	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
32	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	154.854	0.30	544.14	0.144
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
33	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Cultivos: en hilera	22.025	0.27	544.14	0.120
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
34	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	8.725	0.28	544.14	0.128

Tabla 10. (Continuación).

No. microcuenca	Unidad geológica	Unidades de permeabilidad	Color	Tipo de suelo	Uso suelo	Total área (km ²)	K	Precipitación en la microcuenca (mm/año)	Ce
35	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	27.005	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
36	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Cultivos: en hilera	9.438	0.27	477.05	0.111
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
37	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	21.018	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
38	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Cultivos: en hilera	14.036	0.27	544.14	0.120
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
39	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	13.852	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
40	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	33.065	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
41	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	63.079	0.30	477.05	0.134
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
42	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	6.879	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
43	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	17.387	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							

Tabla 10. (Continuación).

No. microcuenca	Unidad geológica	Unidades de permeabilidad	Color	Tipo de suelo	Uso suelo	Total área (km ²)	K	Precipitación en la microcuenca (mm/año)	Ce
44	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	246.294	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	ma	Mat. No Consol. Permeabilidad. Media-alta							
45	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	84.454	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
46	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	18.069	0.28	477.05	0.118
47	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	23.888	0.28	477.05	0.118
48	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	86.161	0.30	477.05	0.134
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
49	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	61.508	0.30	477.05	0.134
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
50	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	20.830	0.30	544.14	0.144
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
51	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	49.479	0.30	477.05	0.134
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							

Tabla 10. (Continuación).

No. microcuenca	Unidad geológica	Unidades de permeabilidad	Color	Tipo de suelo	Uso suelo	Total área (km ²)	K	Precipitación en la microcuenca (mm/año)	Ce
52	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Cultivos: en hilera	114.665	0.27	544.14	0.120
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
53	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	50.780	0.28	544.14	0.128
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
54	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Cultivos: en hilera	30.539	0.27	544.14	0.120
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
55	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	29.345	0.28	544.14	0.128
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
56	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Pastizal: menos del 50% -excesivo-	13.354	0.28	515.55	0.124
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
57	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	12.730	0.28	515.55	0.124
58	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	12.880	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
59	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Cultivos: en hilera	16.179	0.27	544.14	0.120
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
60	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media		B	Cultivos: en hilera	97.351	0.27	544.14	0.120
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
61	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	32.408	0.30	544.14	0.144
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							

Tabla 10. (Continuación).

No. microcuenca	Unidad geológica	Unidades de permeabilidad	Color	Tipo de suelo	Uso suelo	Total área (km ²)	K	Precipitación en la microcuenca (mm/año)	Ce
62	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	470.594	0.28	477.05	0.118
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
63	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		C	Bosque: cubierto por menos del 25%	94.896	0.30	544.14	0.144
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
	ma	Mat. No Consol. Permeabilidad. Media-alta							
64	M	Mat. Consol. Permeabilidad. Media		B	Bosque: cubierto por menos del 25%	13.548	0.28	544.14	0.128
	BM	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja-media							
	B	Mat. Consol. Permeabilidad. Baja							
	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta							
65	a	Mat. No Consol. Permeabilidad. Alta		A	Cultivos: en hilera	194.627	0.24	477.05	0.087
TOTAL						2447.440			0.125

Con los resultados obtenidos de cada microcuenca se puede sacar un promedio del coeficiente de escurrimiento el cual es:

Promedio del coeficiente de escurrimiento anual = 0.125

$$\text{Escurrimiento medio anual} = Ce * Pp$$

$$\text{Escurrimiento media anual} = 0.125 * 518.26 \text{ mm/año}$$

$$\text{Escurrimiento medio anual} = \underline{64.78 \text{ mm/año}}$$

3.4. Cálculo de evapotranspiración media anual

La evapotranspiración se define como la combinación de evaporación del agua y transpiración de las plantas y animales por medio de la cual el agua es transferida a la atmósfera desde la superficie (Vega Granillo, 2011).

Para calcular la evapotranspiración se utilizó el método de Coutagne, que es la siguiente ecuación:

$$ET = P - \lambda P^2$$

Donde:

ET = evapotranspiración real anual (m/año).

P = precipitación media anual (m/año). En nuestro caso es 0.5183 m/año

T = temperatura media del aire (°C). En nuestro caso es 22.87°C

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 T}$$

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14 (22.87)} = 0.250$$

$$ET = P - \lambda P^2 = 0.518 - [0.250 * (0.518)^2] = 0.451 \text{ m/año}$$

Evapotranspiración media anual = 450.95 mm/año

3.5. Cálculo de infiltración media anual

La infiltración es la capacidad que tiene un líquido de introducirse en el subsuelo se mide en milímetros (mm). Para el cálculo de la infiltración se utilizó la ecuación del ciclo hidrológico que toma en cuenta la precipitación, el escurrimiento y la evapotranspiración.

$$Pp = Esc + Evap + Inf \pm S$$

Donde:

Pp = precipitación (mm).

Esc = escurrimiento (mm).

$Evap$ = evapotranspiración (mm).

Inf = Infiltración (mm).

$\pm S$ = almacenamiento en depresiones, variación de reservas (mm).

$$Inf = Pp - Esc - Evap$$

$$Inf = 518.26 - 64.78 - 450.95 = 2.53\text{mm/año}$$

Visto de esta manera, podemos decir que la infiltración que hay en la cuenca es:

$$\text{Infiltración media anual} = \underline{2.53 \text{ mm/año}}$$

Si consideramos los porcentajes de cada proceso, tenemos los siguientes resultados en la cuenca.

Precipitación = 518.26 mm/año, esto equivale al 100% de la lluvia que entra en la cuenca.

Escurrecimiento = 64.78 mm/año, esto quiere decir que el 12.50% de la lluvia precipitada en la cuenca se escurre.

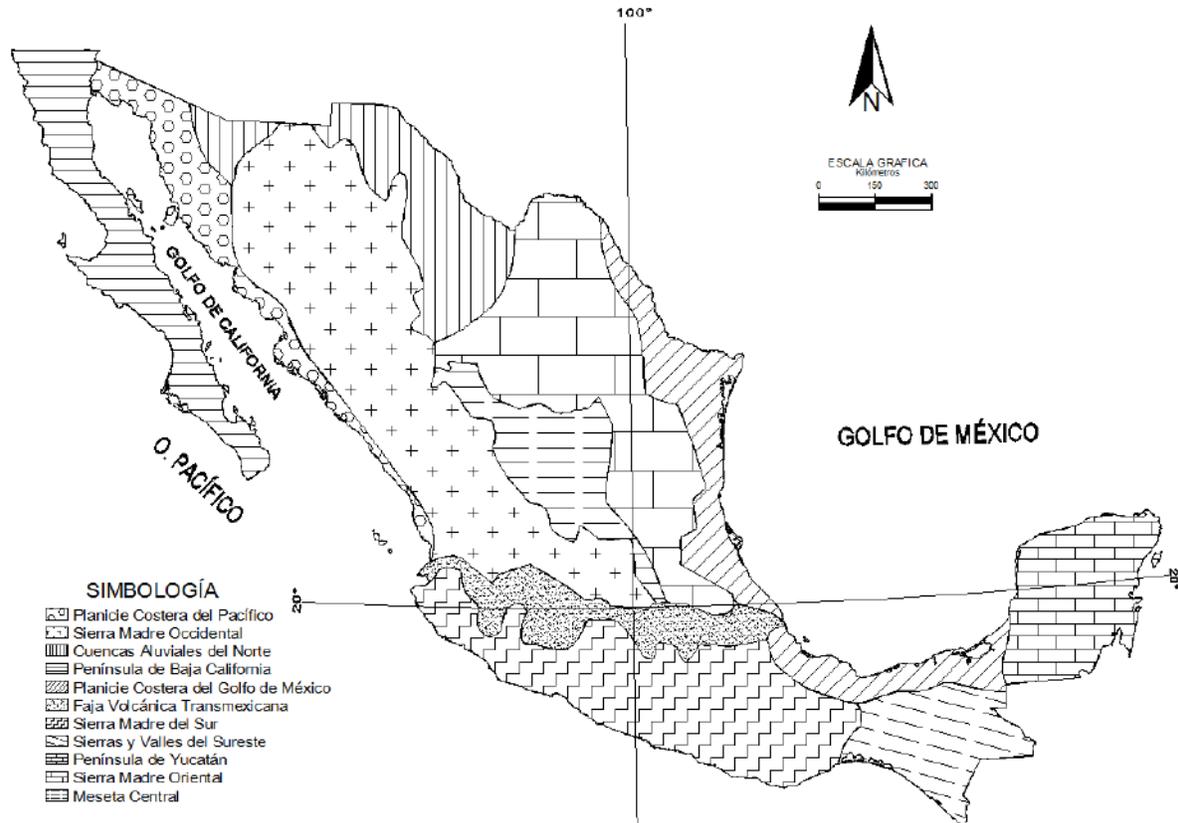
Evapotranspiración = 450.95 mm/año, esto quiere decir que el 87.01% de la lluvia se evapora.

Infiltración = 2.53 mm/año, solo el 0.49% que precipita en la cuenca se infiltra.

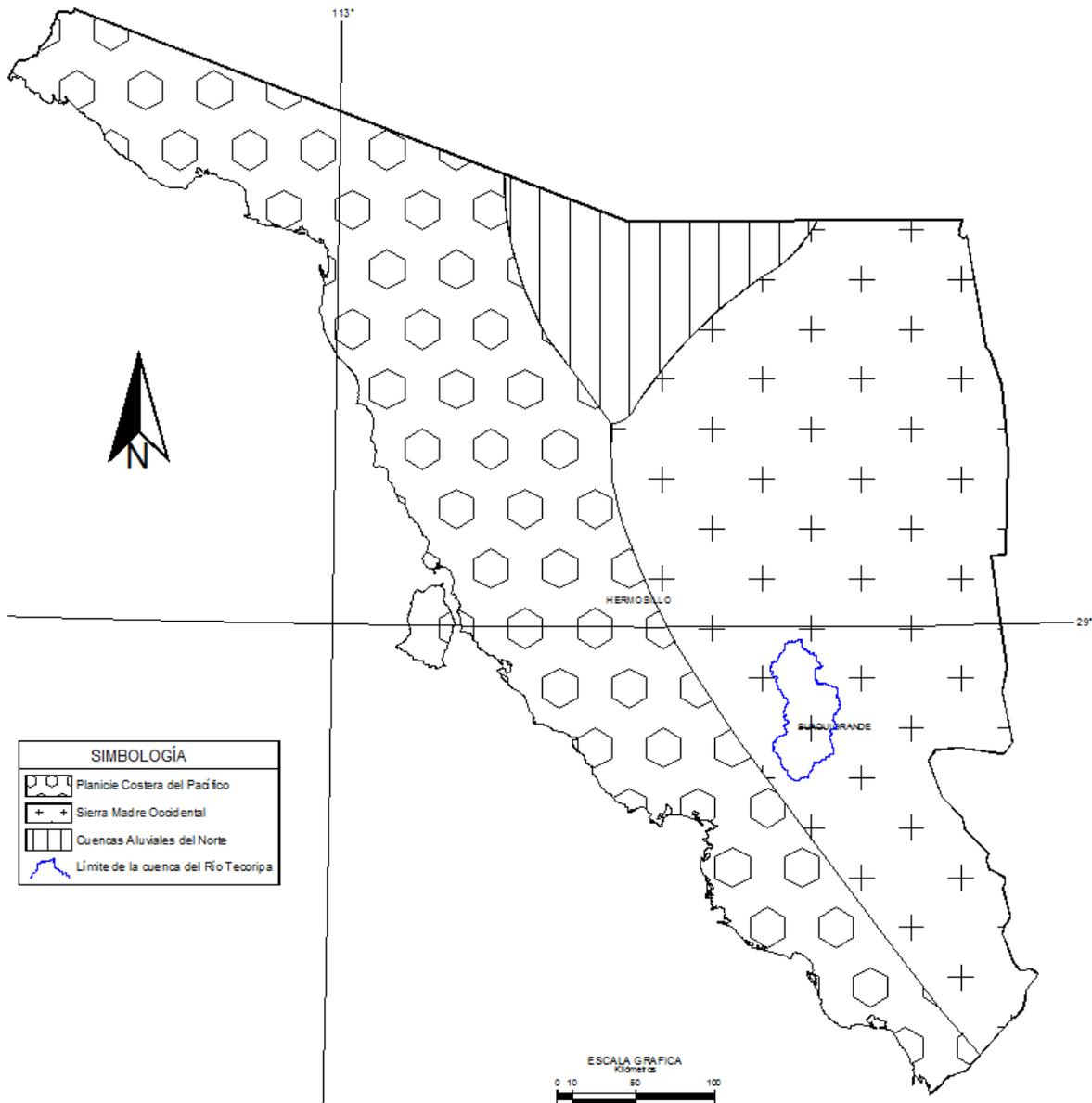
CAPÍTULO IV: HIDROGEOLOGÍA

4.1. Provincia hidrogeológica

Velázquez-Aguirre y Ordaz-Ayala (1993-1994) propusieron 11 provincias hidrogeológicas para México (Mapa 10), de las cuales tres de ellas se ubican en el Estado de Sonora que son: Planicie Costera del Pacífico, Sierra Madre Occidental y Cuencas Aluviales del Norte (Mapa 11).



Mapa 10. Provincias hidrogeológicas de México.



Mapa 11. Provincias hidrogeológicas del Estado de Sonora.

En nuestro caso el acuífero del río Tecoripa se encuentra ubicado en la provincia Sierra Madre Occidental. A continuación se describe las características de esta.

- *Sierra Madre Occidental.* Cubre alrededor de 358,845 km² del territorio nacional, y ocupa el 45% del Estado de Sonora. Esta cadena tiene 1,500 km de longitud y es esencialmente paralela a la costa occidental de México. Se extiende desde el límite internacional, cerca de la población de Agua Prieta, en dirección sureste, hasta la región del cinturón volcánico, en el paralelo 20° de latitud norte. El ancho de la sierra es en promedio de 220 km.

Se caracteriza por cañones y elevadas mesetas formadas por la extrusión a gran escala de materiales volcánicos del Terciario Inferior a Medio, con espesores de hasta 1,800 m, que se depositaron sobre rocas sedimentarias más antiguas. Las

mayores elevaciones en Sonora llegan hasta los 2,620 msnm y van disminuyendo gradualmente hacia las planicies costeras al poniente.

Las condiciones climatológicas de esta zona varían desde húmedo templado, con lluvias todo el año en las partes altas de la sierra, a un clima de estepa seco al este, y en las partes bajas, al lado oeste, es caluroso y húmedo con lluvias en el verano.

La precipitación en la Sierra Madre Occidental es principalmente de tipo orogénico; hacia la parte sur y cerca del Pacífico la lluvia es mayor que 1,600 mm/año; en la parte central el promedio de la lluvia es ligeramente menor, y en la porción oriental la precipitación decrece hasta 600 mm. La precipitación máxima se da de junio a septiembre; la mínima de marzo a mayo. La temperatura media anual varía desde 12°C en las áreas altas y a 22°C en las áreas bajas de la vertiente del Océano Pacífico; en la región de la Meseta Central la temperatura media es de 16°C; la evaporación potencial excede a los 2,000 mm por año.

Hidrogeología. Los ríos que descargan en el Pacífico son virtualmente perennes y los cauces en la parte baja son de gran longitud; Los principales ríos que fluyen hacia las Cuencas Aluviales del Norte y Meseta Central son intermitentes. Las grandes cantidades de aguas superficial y subterránea que drenan al Pacífico son resultado de las copiosas lluvias que caen sobre las rocas con un amplio rango de permeabilidad.

Hacia el oriente, donde se encuentra el altiplano central o áreas de mesetas altas, se encuentran flujos de lava, asociados con piroclásticos y conglomerados; allí la infiltración es pequeña debido a lo compacto de estos materiales y a lo abrupto de la topografía que favorece más bien una gran disección fluvial.

El flujo de las corrientes aumenta por el flujo base de las rocas de baja permeabilidad que afloran a lo largo del cauce. La alta precipitación y los numerosos embalses son una contribución directa para los sistemas de agua subterránea. La recarga afecta a manantiales que están a decenas de kilómetros de los embalses.

Hacia la porción occidental esta provincia se encuentra constituida por densos bloques de lava inclinados, con grandes fallas, que dan idea de los fuertes eventos tectónicos a que estuvieron sometidas estas rocas de carácter riolítico, fuertemente compactas y con poca infiltración.

Estas rocas de baja permeabilidad constituyen el acuitardo. Su ancho y gran espesor, así como la relativa posición topográfica horizontal que tienen, hacen que la explotación del agua del subsuelo sea en pequeña escala y sólo se use para el suministro de pequeños poblados.

En general, el carácter hidrogeológico de esta provincia es tal, que la gran cantidad de agua captada en las cadenas montañosas se descarga local y regionalmente para escurrir a lo largo de las principales corrientes superficiales, salir de éstas, infiltrarse y recargar los grandes acuíferos de las provincias adyacentes (Velázquez Aguirre & Ordaz Ayala, 1993-1994).

4.2. Descripción del acuífero

Desde un punto regional, los acuíferos de Sonora son parte de la provincia fisiográfica de Sierras y Valles (Basin and Range) que se extiende desde el suroeste de Estados Unidos (California, Arizona, Nuevo México y Nevada) hasta el noroeste de México (Sonora y Chihuahua). En esta provincia, la litología y estructuras son los factores geológicos que más influyen en la ocurrencia y movimiento del agua subterránea.

De acuerdo a la litología representada en el mapa geológico, el acuífero se encuentra constituido en su parte superior por los depósitos aluviales y en su parte inferior por la secuencia de conglomerados y rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. El basamento y barreras al flujo subterráneo están conformados por las rocas ígneas intrusivas de composición granítica (Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2639 Río Tecoripa, Estado de Sonora, 2008).

En el estudio financiado por La Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno del Estado de Sonora. Se llevó a cabo sondeos eléctricos verticales, y de gravimetría para conocer con precisión la geometría del acuífero, profundidad del basamento, localizar los sitios para realizar futuras perforaciones, zonas de mayor permeabilidad donde se puedan efectuar infiltraciones ó recarga al acuífero, así como retenciones del agua superficial.

De acuerdo con las unidades hidrogeológicas identificadas, es posible definir que el acuífero es de tipo libre, esto quiere decir que el nivel freático forma el límite superior, está en contacto con el aire y a presión atmosférica. (Ocurren cerca de la superficie del terreno).

En el presente estudio se reconocieron básicamente 3 unidades geohidrológicas: Unidad aluvial sin saturación (Zona vadosa), Unidad aluvial saturada (Zona saturada) y Unidad basal (Basamento impermeable).

- *Unidad aluvial sin saturación* (Zona vadosa). Constituida por materiales granulares de espesor variable representados por arenas, gravas y boleos cuyo espesor, descansa entre los 5 a los 10 metros.
- *Unidad aluvial saturada* (Zona saturada). La más importante desde el punto de vista geohidrológico está constituida por materiales granulares de espesores variables, representados por arenas, gravas y boleos cuyo espesor alcanza entre los 2 y los 10 metros.
- *Unidad basal*. Constituye el Basamento en los sitios analizados, a nivel local se le conoce como “El Cascajo”. Está representado por la unidad geológica conocida como Formación o Grupo Báucarit constituido por un conglomerado polimíctico con matriz arcillo-limo-arenosa con intercalaciones de estratos areno-arcillosos, improductivos desde el punto de vista geohidrológico.

Los reducidos espesores del relleno aluvial indican una pobre fuente de retención de los escurrimientos, por lo cual, es imprescindible realizar obras que permitan reducir su velocidad del agua propiciando una mayor infiltración al subsuelo.

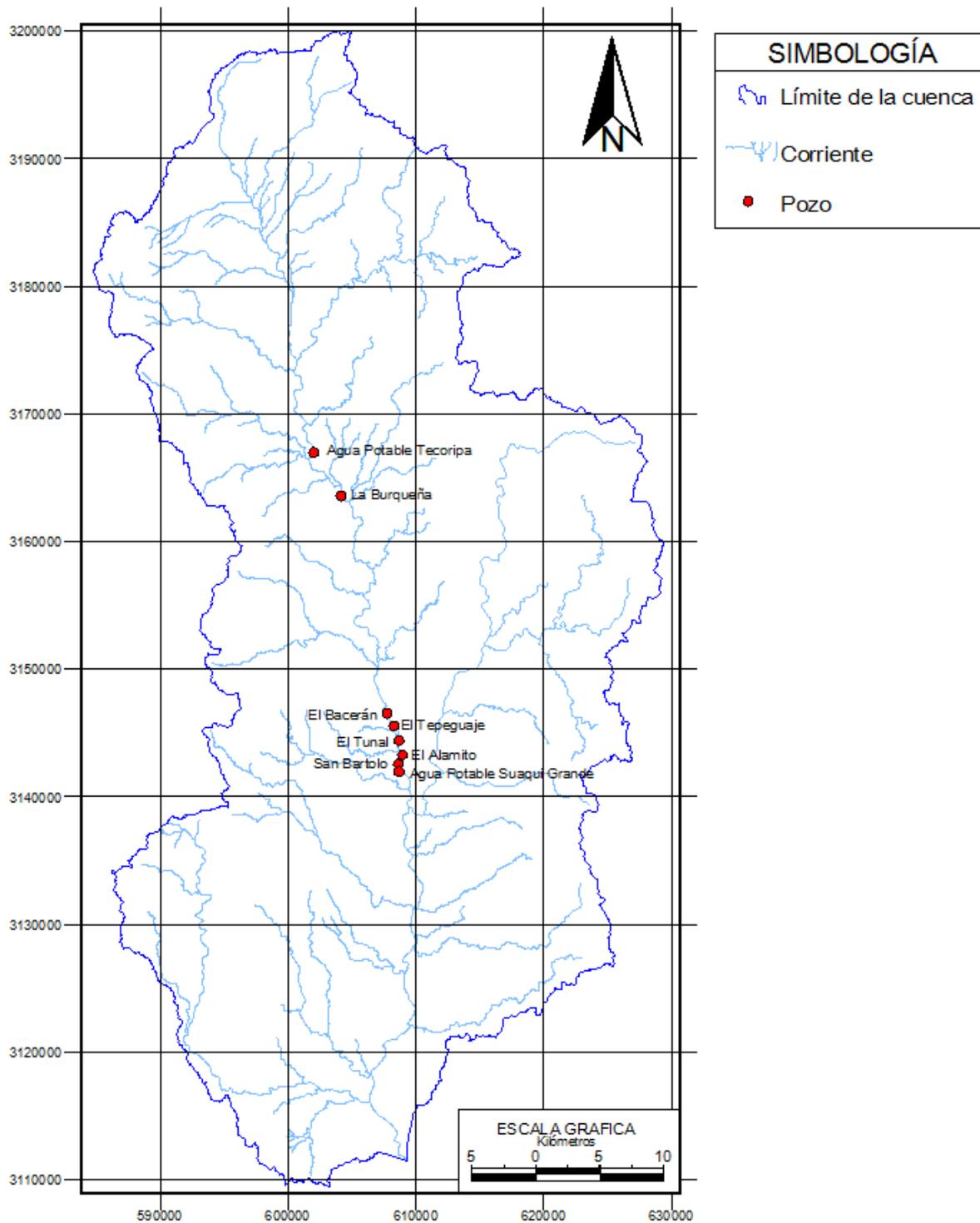
4.3. Pruebas de bombeo para calcular los parámetros geohidrológicos

Se llevaron a cabo ocho pruebas de bombeo de corta duración, en etapa de abatimiento y abatimiento acumulado. Los ensayos se realizaron en las localidades de Tecoripa y Suaqui Grande (Mapa 12), y para su interpretación se utilizó el método de Theis.

La siguiente tabla muestra la ubicación, así como las características principales de cada pozo.

Tabla 11. Pozos en la que se llevaron a cabo las pruebas de bombeo.

Clave de pozo	Pozos	Coordenadas UTM			Elevación del nivel estático (m)	Altura del brocal (m)	Profundidad del nivel estático (m)
		X	Y	Z			
Sg19	El Tunal	608662	3144404	248	12.55	0.34	12.21
Sg11	San Bartolo	608592	3142579	249	10.28	0.39	9.89
	Agua Potable Suaqui Grande	608670	3141977	232	9	0.69	8.31
Sg14	El Alamito	608910	3143255	237	13.7	0.83	12.87
Sg35	Agua Potable Tecoripa	601985	3166980	380	7.57	0.85	6.72
	La Burqueña	604136	3163562	396	4.26	0.05	4.21
Sg23	El Bacerán	607719	3146543	252	4.75	2	6.75
Sg21	El Tepeguaje	608253	3145542	240	6.99	2.2	9.19

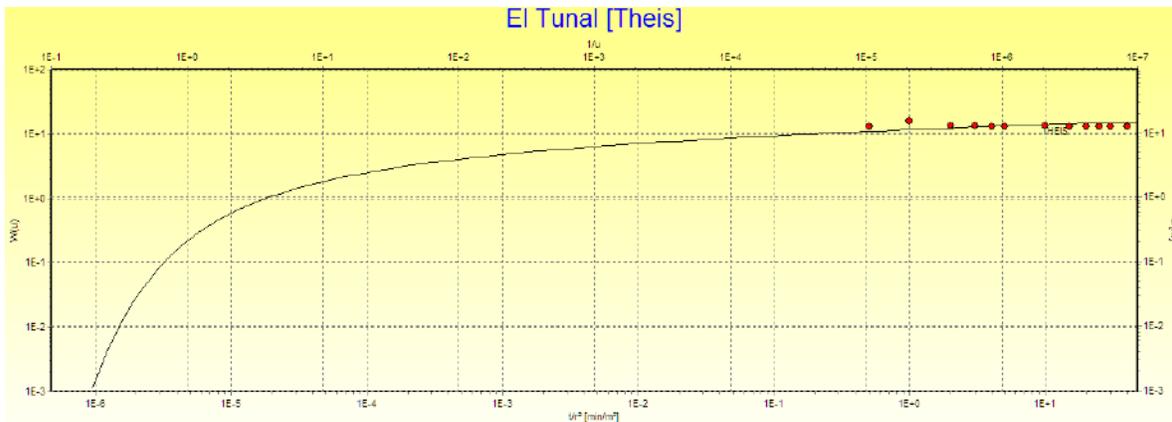


Mapa 12. Ubicación de los pozos en los que se llevaron a cabo las pruebas de bombeo.

A continuación se muestra los resultados y características de cada pozo donde se llevó a cabo las pruebas de bombeo (Tablas 12-19). También se muestran los resultados obtenidos por el método de Theis utilizando el programa Aquifer Test v3.5 (Ilustraciones 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 y 18).

Tabla 12. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Tunal.

Análisis de prueba de bombeo			
Pozo:	El Tunal		
Coordenadas geográficas:	Fecha:	04/03/2014	
X	608662	Descarga:	36 lts/seg
Y	3144404	Equipo de bombeo:	25 caballos de fuerza
NE (m)	12.55	Diámetro de tubo:	6 pulgadas
Alt de brocal (m)	0.34	Propietario:	José Ma. Fimbres Vásquez
PNE (m)	12.21	Dist. de pb-po:	9.48 m
El Tunal			
Tiempo (min)	Abatimiento (m)		Abatimiento acumulado (m)
0.5	0		0
1	2.56		2.56
1.5	0		2.56
2	0.4		2.96
2.5	0		2.96
3	0.31		3.27
4	0.03		3.3
5	0.01		3.31
6	0		3.31
7	0		3.31
8	0		3.31
9	0		3.31
10	0.21		3.52
15	0.03		3.55
20	0.04		3.59
25	0.02		3.61
30	0.03		3.64
40	0.03		3.67
TOTAL	3.67		3.67



Transmisividad $2.98E-03 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $1.49E-04 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $3.42E-06$

Ilustración 4. Resultado con el método de Theis, pozo El Tunal.



Ilustración 5. Prueba de bombeo, pozo El Tunal.

Tabla 13. Análisis de prueba de bombeo del pozo San Bartolo.

Análisis de prueba de bombeo		
Pozo:	San Bartolo	
Coordenadas geográficas:	Fecha:	04/03/2014
X	608592	Descarga:
Y	3142579	Equipo de bombeo:
NE (m)	10.28	Diámetro de tubo:
Alt de brocal (m)	0.39	
PNE (m)	9.89	
San Bartolo		
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Abatimiento acumulado (m)
0.5	0.05	0.05
1	0.14	0.19
1.5	0	0
2	0.33	0.52
2.5	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
15	0	0
20	0	0
25	0	0
30	0	0
35	0	0
40	0	0
50	0	0
60	0	0
TOTAL	0.52	0.52



Transmisividad $3.92E-03 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $1.96E-04 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $2.41E-07$

Ilustración 6. Resultado con el método de Theis, pozo San Bartolo.



Ilustración 7. Prueba de bombeo, pozo San Bartolo.

Tabla 14. Análisis de prueba de bombeo del pozo Agua Potable Suaqui Grande.

Análisis de prueba de bombeo			
Pozo:	Agua Potable Suaqui Grande		
Coordenadas geográficas:	Fecha:	04/03/2014	
X	608670	Descarga:	13 lts/seg
Y	3141977	Diámetro de tubo:	4 pulgadas
NE (m)	9	Observaciones:	
Alt de brocal (m)	0.69	Trabaja 17 hrs. diarias	
PNE (m)	8.31	0.5 % de Cl (para matar bacterias)	
Agua Potable Suaqui Grande			
Tiempo (min)	Abatimiento (m)		Abatimiento acumulado (m)
0.5	0.35		0.35
1	0		0
1.5	0		0
2	0		0
2.5	0		0
3	0		0
4	0		0
5	0		0
6	0		0
7	0		0
8	0		0
9	0		0
10	0		0
15	0		0
20	0		0
25	0		0
30	0		0
40	0		0
TOTAL	0.35		0.35



Transmisividad $1.20E-03 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $6.01E-05 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $1.38E-06$

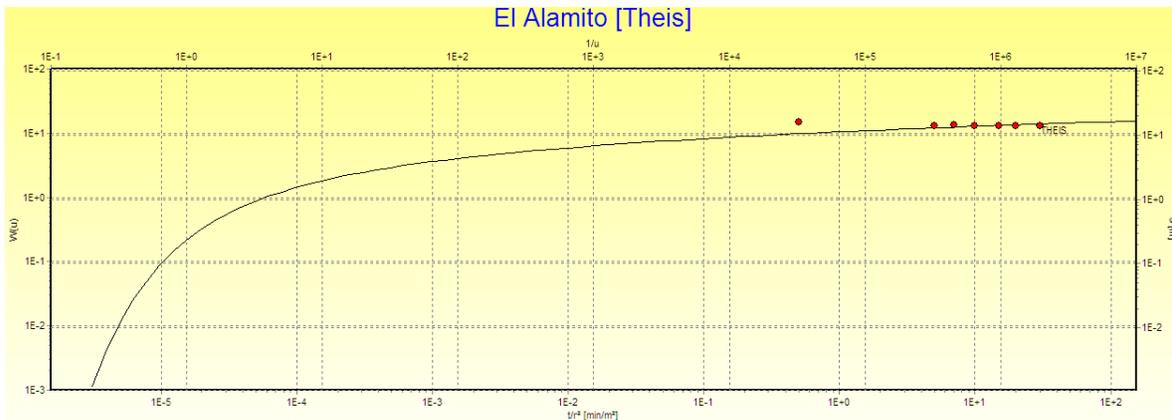
Ilustración 8. Resultado con el método de Theis, pozo Agua potable Suaqui Grande.



Ilustración 9. Prueba de bombeo, pozo Agua potable Suaqui Grande.

Tabla 15. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Alamito.

Análisis de prueba de bombeo			
Pozo:	El Alamito		
Coordenadas geográficas:	Fecha:	04/03/2014	
X	608910	Descarga:	35-36 lts/seg
Y	3143255	Equipo de bombeo:	30 caballos de fuerza
NE (m)	13.7	Diámetro de tubo:	6 pulgadas
Alt de brocal (m)	0.83		
PNE (m)	12.87		
El Alamito			
Tiempo (min)	Abatimiento (m)		Abatimiento acumulado (m)
0.5	2		2
1	0		0
1.5	0		0
2	0		0
2.5	0		0
3	0		0
4	0		0
5	0.1		2.1
6	0		0
7	0.7		2.8
8	0		0
9	0		0
10	0.105		2.905
15	0.17		3.075
20	0.13		3.205
25	0		0
30	0.14		3.345
40	0		0
50	0		0
60	0		0
TOTAL	3.345		3.345



Transmisividad $2.64E-03 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $1.32E-04 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $9.79E-06$

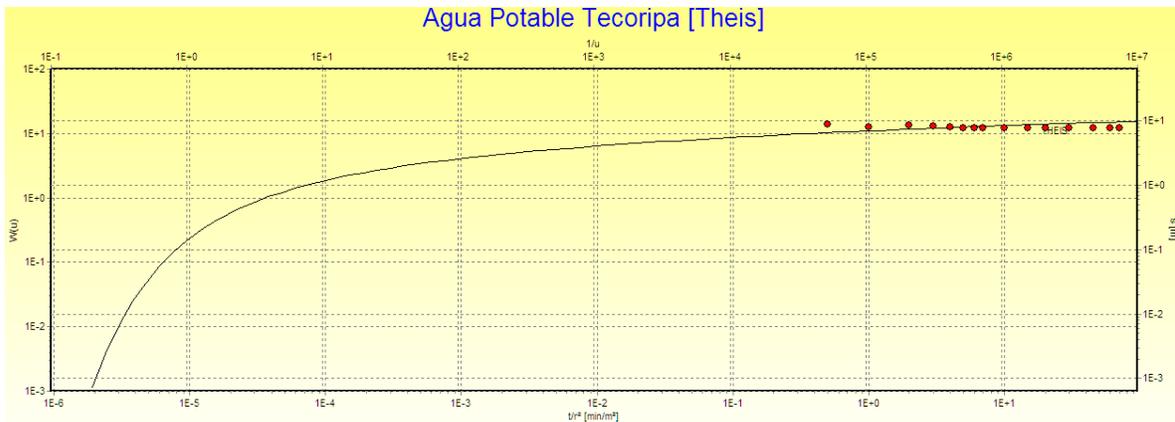
Ilustración 10. Resultado con el método de Theis, pozo El Alamito.



Ilustración 11. Prueba de bombeo, pozo El Alamito.

Tabla 16. Análisis de prueba de bombeo del pozo Agua Potable Tecoripa.

Análisis de prueba de bombeo			
Pozo:	Agua Potable Tecoripa		
Coordenadas geográficas:	Fecha:	05/03/2014	
X	601985	Descarga:	8-10 lts/seg
Y	3166980	Equipo de bombeo:	7.5 caballos de fuerza
NE (m)	7.57	Diámetro de tubo:	3 pulgadas
Alt de brocal (m)	0.85		
PNE (m)	6.72		
Agua Potable Tecoripa			
Tiempo (min)	Abatimiento (m)		Abatimiento acumulado (m)
0.5	1.13		1.13
1	0.37		1.5
1.5	0		0
2	0.9		2.4
2.5	0		0
3	0.615		3.015
4	0.51		3.525
5	0.24		3.765
6	0.1		3.865
7	0.05		3.915
8	0		0
9	0		0
10	0.21		4.125
15	0.265		4.39
20	0.1		4.49
25	0		0
30	0.085		4.575
40	0		0
45	0.13		4.705
50	0		0
60	0.085		4.79
70	0.08		4.87
TOTAL	4.87		4.87



Transmisividad $1.13E-03 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $5.63E-05 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $2.58E-06$

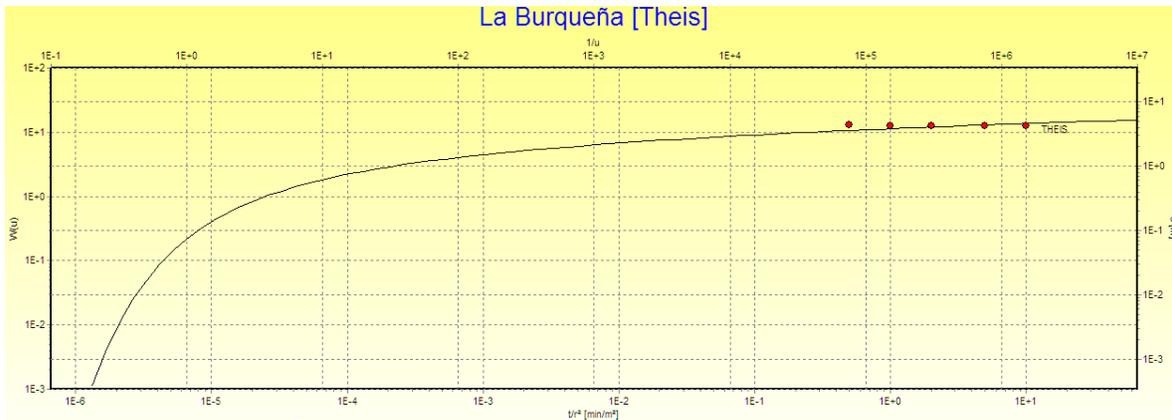
Ilustración 12. Resultado con el método de Theis, pozo Agua Potable Tecoripa.



Ilustración 13. Prueba de bombeo, pozo Agua Potable Tecoripa.

Tabla 17. Análisis de prueba de bombeo del pozo La Burqueña.

Análisis de prueba de bombeo			
Pozo:	La Burqueña		
Coordenadas geográficas:	Fecha:	05/03/2014	
X	604136	Descarga:	2.5 lts/seg
Y	3163562	Equipo de bombeo:	3.5 caballos de fuerza
NE (m)	4.26	Diámetro de tubo:	2 pulgadas
Alt de brocal (m)	0.05	Propietario:	Juan de Dios López Navarro
PNE (m)	4.21		
La Burqueña			
Tiempo (min)	Abatimiento (m)		Abatimiento acumulado (m)
0.5	0.06		0.06
1	0.045		0.105
1.5	0		0
2	0.03		0.135
2.5	0		0
3	0		0
4	0		0
5	0.015		0.15
6	0		0
7	0		0
8	0		0
9	0		0
10	0.015		0.165
15	0		0
20	0		0
25	0		0
30	0		0
TOTAL	0.165		0.165



Transmisividad $5.88E-04 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $2.94E-05 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $9.31E-07$

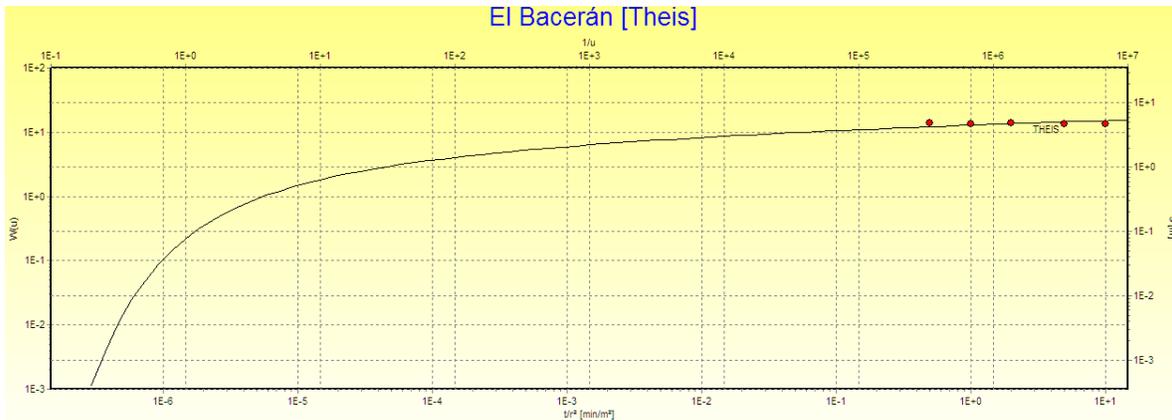
Ilustración 14. Resultado con el método de Theis, pozo La Burqueña.



Ilustración 15. Prueba de bombeo, pozo La Burqueña.

Tabla 18. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Bacerán.

Análisis de prueba de bombeo			
Pozo:	El Bacerán		
Coordenadas geográficas:	Fecha:	05/03/2014	
X	607719	Descarga:	3 lts/seg
Y	3146543	Equipo de bombeo:	3 caballos de fuerza
NE (m)	4.75	Diámetro de tubo:	2 pulgadas
Alt de brocal (m)	2	Propietario:	Inocente Castillo Flores
PNE (m)	6.75		
El Bacerán			
Tiempo (min)	Abatimiento (m)		Abatimiento acumulado (m)
0.5	0.05		0.05
1	0.03		0.08
1.5	0		0
2	0.05		0.13
2.5	0		0
3	0		0
4	0		0
5	0.035		0.165
6	0		0
7	0		0
8	0		0
9	0		0
10	0.01		0.175
15	0		0
20	0		0
25	0		0
30	0		0
TOTAL	0.175		0.175



Transmisividad $6.81E-04 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $3.40E-05 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $2.41E-07$

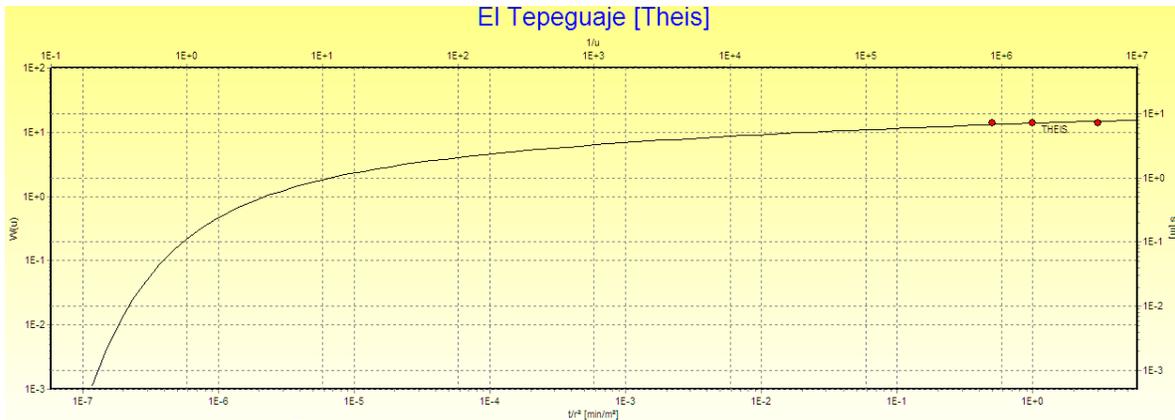
Ilustración 16. Resultado con el método de Theis, pozo El Bacerán.



Ilustración 17. Rancho El Bacerán.

Tabla 19. Análisis de prueba de bombeo del pozo El Tepeguaje.

Análisis de prueba de bombeo			
Pozo:	El Tepeguaje		
Coordenadas geográficas:	Fecha:	05/03/2014	
X	608253	Descarga:	4 lts/seg
Y	3145542	Equipo de bombeo:	5 caballos de fuerza
NE (m)	6.99	Diámetro de tubo:	2 pulgadas
Alt de brocal (m)	2.2	Propietario:	Ramón Tapia Vasquez
PNE (m)	9.19		
El Tepeguaje			
Tiempo (min)	Abatimiento (m)		Abatimiento acumulado (m)
0.5	0.04		0.04
1	0.03		0.07
1.5	0		0
2	0		0
2.5	0		0
3	0.055		0.125
4	0		0
5	0		0
6	0		0
7	0		0
8	0		0
9	0		0
10	0		0
15	0		0
20	0		0
25	0		0
30	0		0
TOTAL	0.125		0.125



Transmisividad $6.20E-04 \text{ m}^2/\text{s}$
 Conductividad hidráulica $3.10E-05 \text{ m/s}$
 Coeficiente de almacenamiento $8.74E-08$

Ilustración 18. Resultado con el método de Theis, pozo El Tepeguaje.



Ilustración 19. Prueba de bombeo, pozo El Tepeguaje.

4.4. Propiedades del acuífero

Las propiedades que deben poseer un acuífero son: transmitir y almacenar agua. Dentro de las propiedades de transmisión se tienen: la permeabilidad intrínseca, transmisividad y conductividad hidráulica. Entre las propiedades de almacenamiento están: la porosidad, el rendimiento específico y el coeficiente de almacenamiento, entre otras (Vega Granillo, 2011).

Enseguida se describen algunas de las propiedades de un acuífero, y en la tabla 20 se muestra los resultados de los pozos en las que se llevaron a cabo las pruebas de bombeo utilizando el programa Aquifer Test v3.5.

- *Transmisividad o transmisibilidad (T)*: medida de cuánta agua puede ser transmitida horizontalmente a través del ancho unitario de un acuífero totalmente saturado bajo un gradiente hidráulico unitario.
- *Conductividad hidráulica o permeabilidad (K)*: medida de la resistencia al flujo de agua subterránea, causada por los efectos combinados del medio poroso y del fluido. Depende de la forma, de acomodo y distribución granulométrica de las partículas y del grado de compactación o cementación.
- *Coficiente de almacenamiento (S)*: volumen de agua que un acuífero libera o toma en almacenamiento por una superficie de área unitaria cuando la carga hidráulica cambia una unidad.

Tabla 20. Resultados de los pozos de las pruebas de bombeo obtenidos con el programa Aquifer Test v3.5.

Pozos	Transmisividad (m ² /s)	Conductividad hidráulica (m/s)	Coficiente de almacenamiento
El Tunal	2.98E-03	1.49E-04	3.42E-06
San Bartolo	3.92E-03	1.96E-04	2.41E-07
Agua Potable Suaqui Grande	1.20E-03	6.01E-05	1.38E-06
El Alamito	2.64E-03	1.32E-04	9.79E-06
Agua Potable Tecoripa	1.13E-03	5.63E-05	2.58E-06
La Burqueña	5.88E-04	2.94E-05	9.31E-07
El Bacerán	6.81E-04	3.40E-05	2.41E-07
El Tepeguaje	6.20E-04	3.10E-05	8.74E-08
Máximo	3.92E-03	1.96E-04	9.79E-06
Mínimo	5.88E-04	2.94E-05	8.74E-08
Promedio	1.72E-03	8.60E-05	2.33E-06

Con los resultados obtenidos de cada pozo se puede sacar un promedio el cual es:

$$\text{Transmisividad} = \underline{1.72\text{E-}03 \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\text{Conductividad hidráulica} = \underline{8.60\text{E-}05 \text{ m/s}}$$

Coeficiente de almacenamiento = 2.33E-06

4.5. Mapa de elevación del nivel estático

El nivel estático del acuífero se refiere al nivel medio del mar utilizando para ello la cota de la superficie del terreno a la cual se le resta la profundidad del nivel estático, medida en el campo.

Para hacer el mapa del nivel estático, se consiguió información proporcionada por la CONAGUA de los pozos censados en el año 2004 (pozos que se encuentra en el sur de la cuenca) (Tabla 21) y en el año 2014 (pozos que se encuentra en el norte de la cuenca) (Tabla 22).

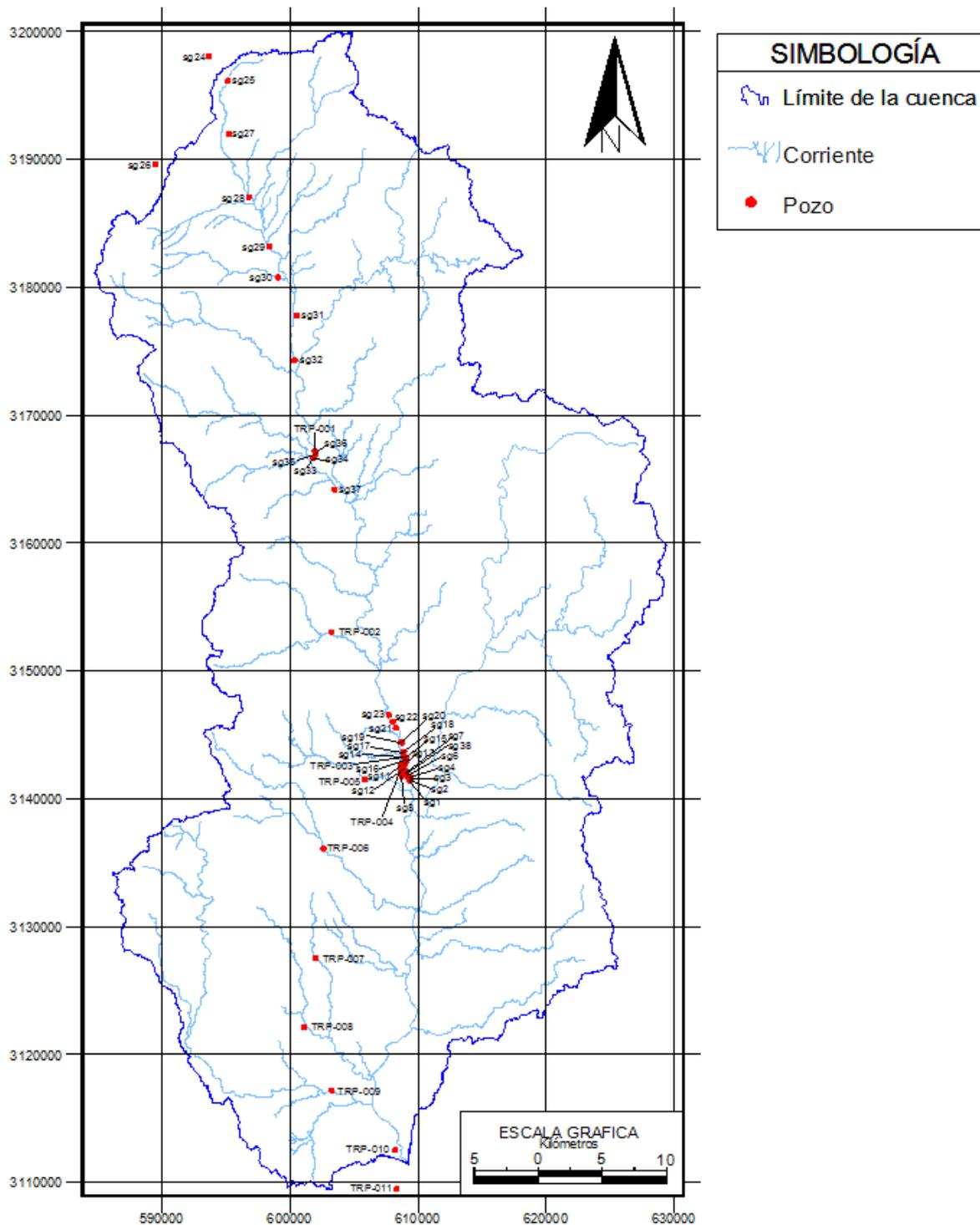
A continuación, las siguientes tablas muestran las características de estos pozos y el mapa 13 muestra su ubicación dentro de la cuenca del Río Tecoripa.

Tabla 21. Pozos censados en el 2004.

Relación de pozos censados en la cuenca del Río Tecoripa					
Clave de pozo	Coordenadas UTM			Profundidad del nivel estático (m)	Elevación del nivel estático (m)
	X	Y	Z		
TRP-001	601938	3167201	379	3.2	375.8
TRP-002	603217	3153049	337	7.6	329.4
TRP-003	609021	3143170	238	3.53	234.47
TRP-004	608604	3142155	238	3.5	234.5
TRP-005	605818	3141488	281	3.78	277.22
TRP-006	602599	3136077	295	5.62	289.38
TRP-007	601997	3127523	239	11.78	227.22
TRP-008	601071	3122134	180	8	172
TRP-009	603240	3117202	143	1.3	141.7
TRP-010	608218	3112532	80	5.55	74.45
TRP-011	608325	3109506	99	12.2	86.8

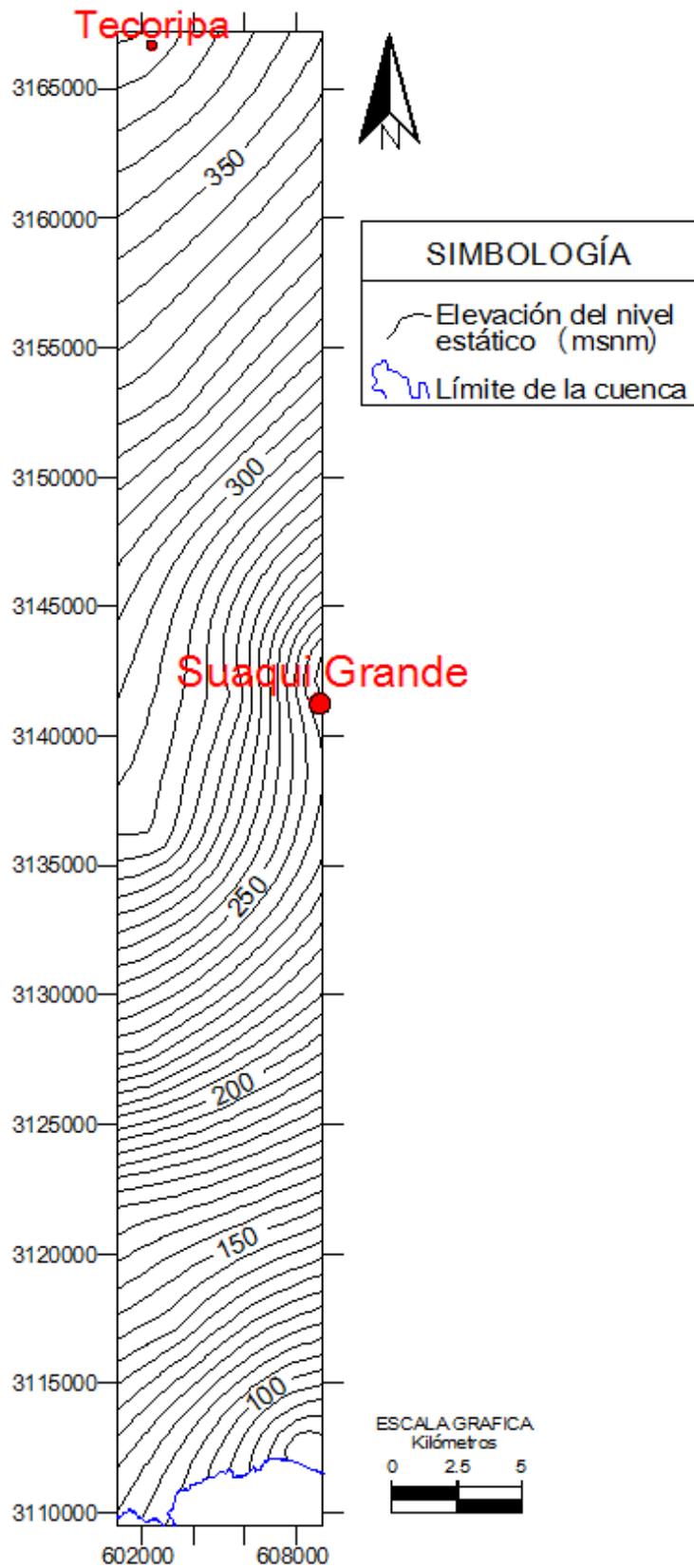
Tabla 22. Pozos censados en el 2014.

Relación de pozos censados en la cuenca del Río Tecoripa					
Clave de pozo	Coordenadas UTM			Profundidad del nivel estático (m)	Elevación del nivel estático (m)
	X	Y	Z		
sg1	609366	3141369	226	7	218.83
sg2	609411	3141510	226	6	219.69
sg3	609463	3141601	228	6.65	221.52
sg4	609349	3141702	226	6.26	220.04
sg6	609123	3141798	224	5.43	218.19
sg7	608990	3142075	227	7.26	219.30
sg8	608723	3141794	226	7.5	218.42
sg11	608602	3142576	233	9.89	222.85
sg12	608903	3142355	230	6.87	222.93
sg13	608959	3142701	232	6.39	225.70
sg14	608913	3143253	236	12.87	223.32
sg15	609053	3143248	235	0	235.06
sg16	609068	3142968	233	0	232.97
sg17	608858	3143611	236	0	236.02
sg18	608904	3143687	237	0	236.89
sg19	608662	3144407	241	12.21	228.73
sg20	608739	3144402	243	0	243.09
sg21	608255	3145539	240	9.19	231.10
sg22	608010	3146026	243	11.23	231.46
sg23	607716	3146545	244	6.75	237.21
sg24	593656	3198090	600	28	572
sg25	595140	3196144	606	33.8	572.20
sg26	589481	3189623	600	65.5	534.50
sg27	595211	3191979	572	26.05	545.95
sg28	596776	3187044	525	13.1	511.90
sg29	598399	3183212	495	15.35	479.65
sg30	599079	3180778	487	19.03	467.97
sg31	600515	3177810	454	14.8	439.20
sg32	600345	3174270	430	13.15	416.85
sg33	601809	3166642	375	7.38	367.62
sg34	601807	3166650	379	8	371
sg35	601985	3166979	387	6.72	380.28
sg36	602000	3167011	391	7.94	383.06
sg37	603481	3164203	362	4.55	357.45
sg38	609122	3141978	220	4.76	215.24

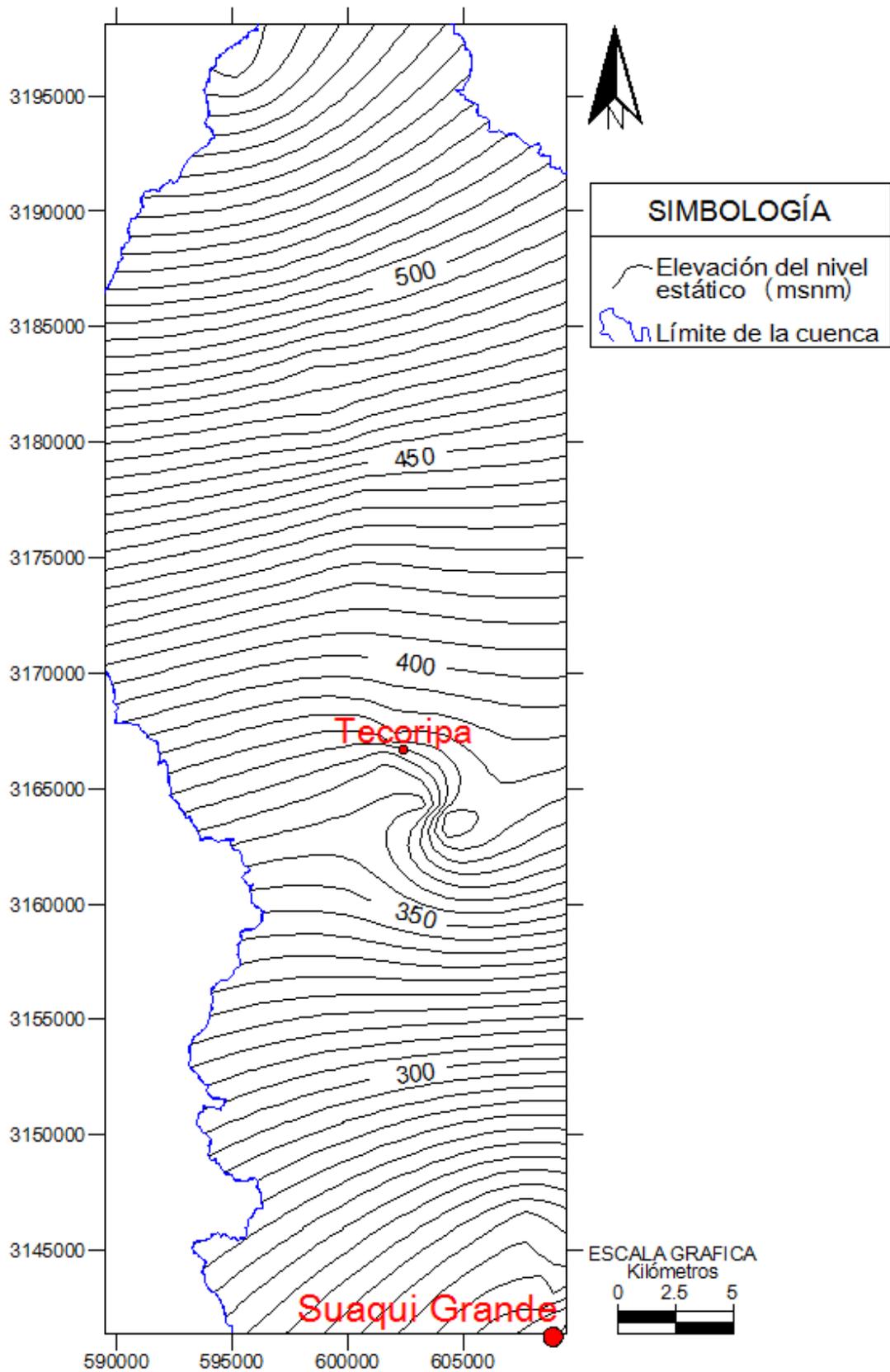


Mapa 13. Ubicación de los pozos censados en el 2004 y el 2014.

Con los pozos censados se creó dos mapas de elevación del nivel estático utilizando el programa Golden Software Surfer 10. Los mapas 14 y 15 muestran el nivel estático obtenido con dichos pozos del 2004 y el 2014.



Mapa 14. Mapa de nivel estático de los pozos censados en el 2004.



Mapa 15. Mapa de nivel estático de los pozos censados en el 2014.

4.6. Red de flujo y dirección del movimiento del agua subterránea

Las redes de flujo son un método gráfico para determinar la dirección del movimiento del agua subterránea. Se construyen a partir de datos puntuales de piezómetro de un sitio dado.

Para la construcción de la red de flujo se utilizaron los pozos censados en el 2004 y el 2014 utilizando el programa Golden Software Surfer 10 (Mapa 16 y 17).

- Gasto horizontal de entrada y salida de agua subterránea (zona de recarga y zona de descarga)

El caudal de agua que pasa por un acuífero es un dato muy importante para su mejor uso y manejo, para conocer cuánta agua recibe, cuánta agua puede ceder hacia otras cuencas o hacia el mar, que volumen se puede utilizar en las ciudades, si está contaminado, etc. (Vega Granillo, 2011).

Para realizar el cálculo de recarga y descarga, se utilizó la información de los pozos proporcionado por la CONAGUA del año 2004 y 2014, visto anteriormente, y se utilizaron además los valores promediados de transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) obtenidos anteriormente por medio de las pruebas de bombeo en el capítulo 4.4.

Para determinar el gasto o caudal de agua subterránea se deben medir algunos parámetros sobre el mapa donde se trazó la red de flujo (Mapa 16 y 17). Una vez que se escoja el conjunto de celdas a través de las cuales pasa un gasto dado, se mide al centro de cada celda, la separación entre líneas equipotenciales (dl), la distancia entre las líneas de flujo (B) y se determina el diferencial de carga hidráulica (dh). Todos los datos se introducen a la siguiente fórmula:

$$Q_j = \frac{(T_j B_j dh_j)}{dl_j}$$

Donde:

Q_j = caudal a través de la celda j (m^3/s).

T_j = trasmisividad de la celda j evaluada (m^2/s).

B_j = distancia entre líneas de flujo en la celda j (m).

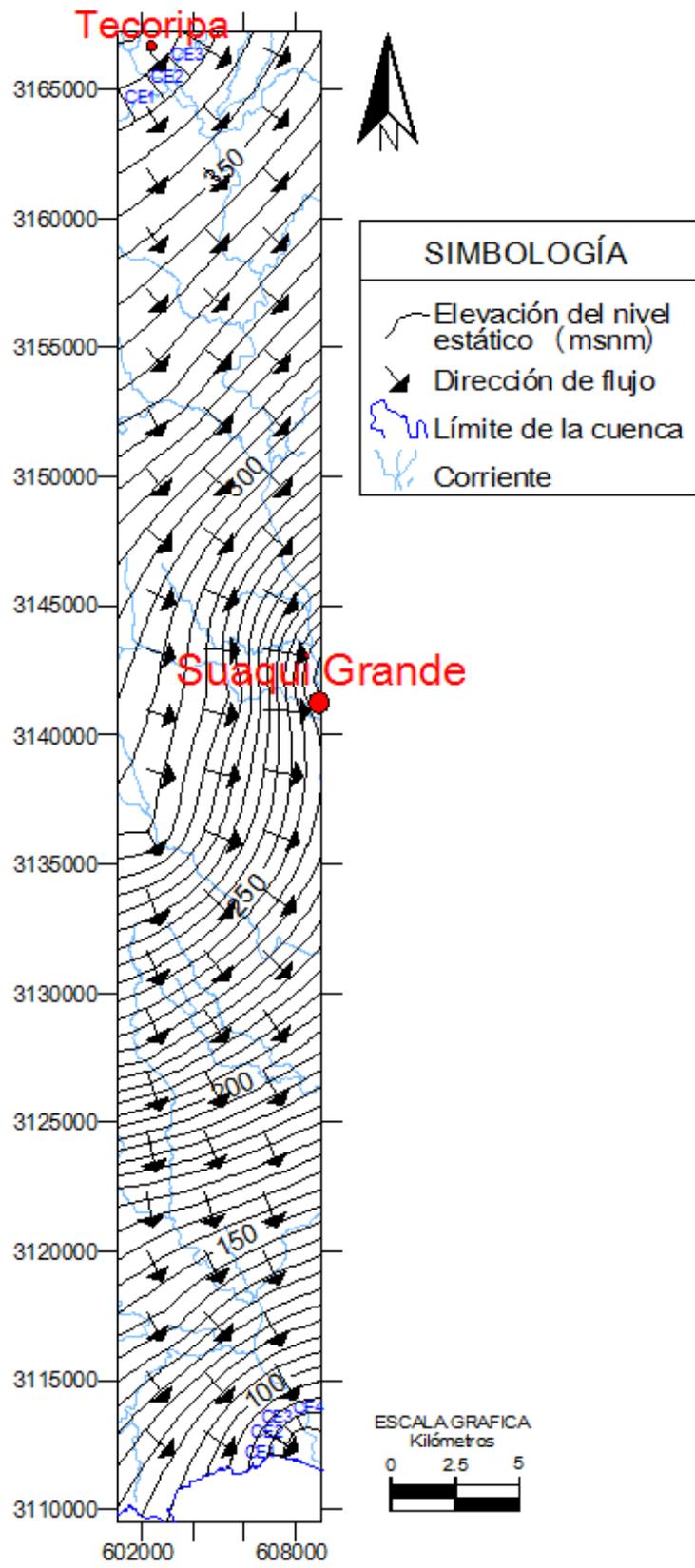
dh_j = diferencial de carga hidráulica (m).

dl_j = diferencial de longitud entre equipotenciales (m).

El gasto total será la suma de todos los gastos parciales:

$$Q_t = \sum_{j=1}^n Q_j$$

Las siguientes tablas 23-26 muestran los resultados obtenidos del gasto de entrada como de salida.



Mapa 16. Red de flujo de los pozos censados en el 2004.

Tabla 23. Gasto horizontal de entrada de los pozos censados en el 2004.

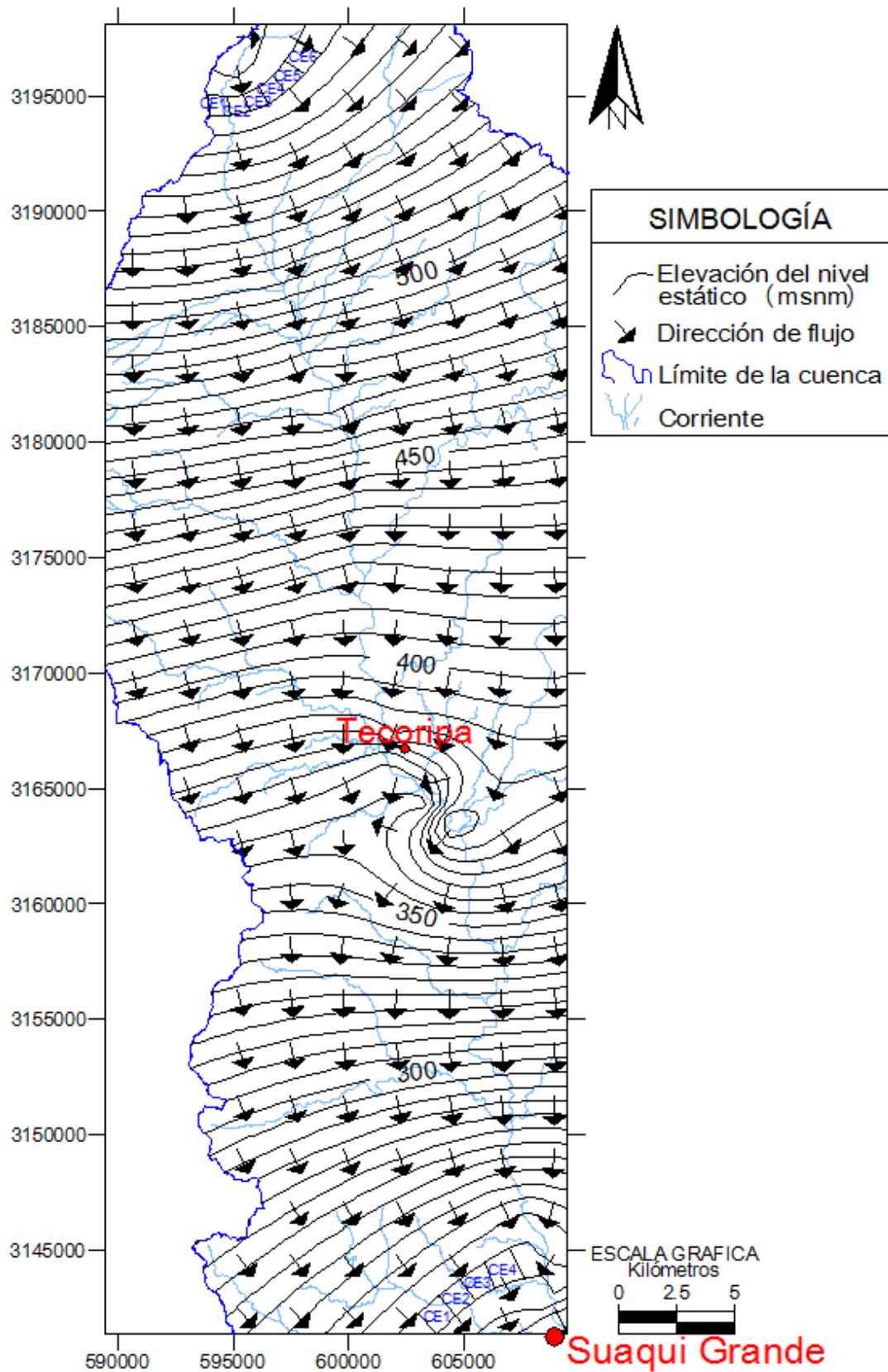
Gasto de entrada o recarga						
Celda	dl (m)	dh (m)	B (m)	Transmisividad (m ² /s)	Gasto Q (m ³ /s)	Gasto Q (Mm ³ /año)
CE1	1332.45	5	1320.62	1.72E-03	0.01	0.27
CE2	1213.58	5	1206.43	1.72E-03	0.01	0.27
CE3	1210.53	5	1200.79	1.72E-03	0.01	0.27
Total de gasto de entrada					0.03	0.81

Total de gasto de entrada o recarga en el 2004 = 0.81 (Mm³/año)

Tabla 24. Gasto horizontal de salida de los pozos censados en el 2004.

Gasto de salida o descarga						
Celda	dl (m)	dh (m)	B (m)	Transmisividad (m ² /s)	Gasto Q (m ³ /s)	Gasto Q (Mm ³ /año)
CE1	626.43	5	590.53	1.72E-03	0.01	0.26
CE2	560.34	5	561.81	1.72E-03	0.01	0.27
CE3	513.48	5	510.98	1.72E-03	0.01	0.27
CE4	539.75	5	547.04	1.72E-03	0.01	0.27
Total de gasto de salida					0.03	1.07

Total de gasto de salida o descarga en el 2004 = 1.07 (Mm³/año)



Mapa 17. Red de flujo de los pozos censados en el 2014.

Tabla 25. Gasto horizontal de entrada de los pozos censados en el 2014.

Gasto de entrada o recarga						
Celda	dl (m)	dh (m)	B (m)	Transmisividad (m ² /s)	Gasto Q (m ³ /s)	Gasto Q (Mm ³ /año)
CE1	859.66	5	867.56	1.72E-03	0.01	0.27
CE2	792.78	5	790.16	1.72E-03	0.01	0.27
CE3	777.36	5	773.29	1.72E-03	0.01	0.27
CE4	855.22	5	862.26	1.72E-03	0.01	0.27
CE5	950.72	5	961.49	1.72E-03	0.01	0.27
CE6	1098.10	5	1086.48	1.72E-03	0.01	0.27
Total de gasto de entrada					0.05	1.63

Total de gasto de entrada o recarga en el 2014 = 1.63 (Mm³/año)

Tabla 26. Gasto horizontal de salida de los pozos censados en el 2014.

Gasto de salida o descarga						
Celda	dl (m)	dh (m)	B (m)	Transmisividad (m ² /s)	Gasto Q (m ³ /s)	Gasto Q (Mm ³ /año)
CE1	1141.82	5	1142.00	1.72E-03	0.01	0.27
CE2	1119.63	5	1121.50	1.72E-03	0.01	0.27
CE3	1152.69	5	1162.34	1.72E-03	0.01	0.27
CE4	1318.51	5	1320.92	1.72E-03	0.01	0.27
Total de gasto de salida					0.03	1.09

Total de gasto de salida o descarga en el 2014 = 1.09 (Mm³/año)

Como se puede observar en los mapas 16 y 17 la dirección preferencial del flujo subterráneo es norte-sur, paralela al curso del río Tecoripa, con alimentaciones provenientes de los flancos, desde las partes topográficamente más altas o de los cauces de los arroyos tributarios.

4.7. Balance hidrológico

La disponibilidad del recurso agua se puede estimar a partir de un balance hidrológico mediante un conocimiento de la recarga y la descarga. A partir de este resultado se puede tomar la opción de controlar la explotación para mantener un equilibrio haciendo un uso racional del recurso como medida para administrarlo adecuadamente y evitar la sobreexplotación.

Un sistema de cualquier cuenca hidrológica puede ser descrito mediante un balance en el que se consideran entradas y salidas. La diferencia entre la suma total de las entradas (recarga), y la suma total de las salidas (descarga), representa el volumen de agua perdido o ganado por el almacenamiento del acuífero, en el periodo de tiempo establecido.

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

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

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 del acuífero:

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

Para el caso del acuífero río Tecoripa, la ecuación de balance propuesta considerando las componentes principales de entrada y salida se representa mediante la siguiente ecuación (Frutos Balibrea & Castorena Davis, 2011).

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

Donde:

Rv = recarga vertical por lluvias (infiltración).

Eh = recarga por flujo horizontal.

B = explotación de pozos (bombeo).

Sh = descarga por flujo horizontal subterránea.

$\Delta V(S)$ = Cambio en el volumen almacenado.

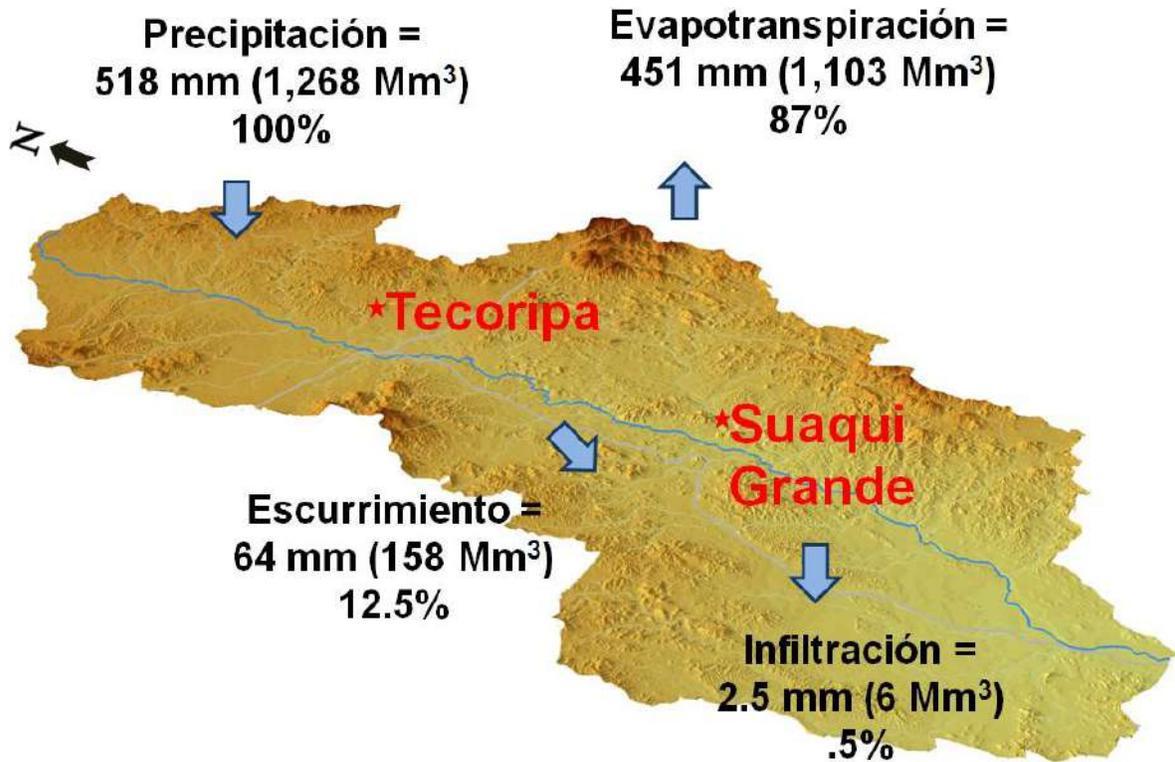
A continuación se muestra en la tabla 27 un estudio de balance hidrológico superficial de la cuenca del Río Tecoripa llevada a cabo con datos del 2004 y el 2014.

Tabla 27. Balances superficiales de la cuenca del Río Tecoripa.

		ENTRADAS					
Año	Área de la cuenca (Km ²)	Precipitación total (Mm ³)	Evapotranspiración total (Mm ³)	Precipitación efectiva (Mm ³)	Escurrimiento total (Mm ³)	Infiltración total (Mm ³)	Entrada horizontal (Mm ³)
2004	2,447.44	1268.42	1103.67	164.75	158.55	6.20	0.81
2014	2,447.44	1268.42	1103.67	164.75	158.55	6.20	1.63

Tabla 27. (Continuación).

Año	SALIDAS	
	Bombeo (Mm ³)	Salida horizontal (Mm ³)
2004	2.4	1.07
2014	2.4	1.09



Mapa 18. Balance hidrológico superficial de la cuenca del Río Tecoripa.

4.8. Recarga vertical del acuífero

La recarga del acuífero es el proceso por el cual el agua de lluvia se introduce a través del suelo hacia el acuífero subyacente. Existen muchos procesos naturales que determinan cuánta agua realmente alcanza a recargar un acuífero y cuánta se evapora o se consume por las plantas y animales o simplemente escurre hacia los arroyos, ríos lagos u océanos (Frutos Balibrea & Castorena Davis, 2011).

Para estimar la recarga vertical por lluvias en la cuenca del Río Tecoripa se utilizó la ecuación general del balance hidrológico en su forma reducida como se muestra a continuación:

$$Rv = Sh + B - Eh + I$$

Donde:

Rv = recarga vertical.

Salidas:

Sh = descarga por flujo horizontal subterránea.

B = explotación de pozos (bombeo).

Entradas:

Eh = recarga por flujo horizontal.

I = infiltración.

Por lo tanto esta fórmula queda para los datos del 2004:

$$Rv = 1.07 \text{ Mm}^3 + 2.4 \text{ Mm}^3 - 0.81 \text{ Mm}^3 + 6.20 \text{ Mm}^3$$

$$\text{Recarga vertical en el 2004} = \underline{8.87 \text{ Mm}^3/\text{año}}$$

La fórmula para los datos del 2014:

$$Rv = 1.09 \text{ Mm}^3 + 2.4 \text{ Mm}^3 - 1.63 \text{ Mm}^3 + 6.20 \text{ Mm}^3$$

$$\text{Recarga vertical en el 2014} = \underline{8.06 \text{ Mm}^3/\text{año}}$$

De esta manera la recarga total media anual (Rt) es igual a la suma de las entradas:

$$Rt = Rv + Eh$$

Recarga total para el 2004:

$$Rt = 8.87 \text{ Mm}^3 + 0.81 \text{ Mm}^3$$

$$\text{Recarga total en el 2004} = \underline{9.68 \text{ Mm}^3/\text{año}}$$

Recarga total para el 2014:

$$Rt = 8.06 \text{ Mm}^3 + 1.63 \text{ Mm}^3$$

$$\text{Recarga total en el 2014} = \underline{9.69 \text{ Mm}^3/\text{año}}$$

4.9. Disponibilidad

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

$$DAS = Rt - DNCOM - VCAS$$

Donde:

DAS = Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica.

Rt = Recarga total media anual.

DNCOM = Descarga natural comprometida.

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

- *Recarga total media anual (Rt)*. Es la que recibe el acuífero, corresponde con la suma de todos los volúmenes que ingresan al acuífero, tanto en forma de recarga natural como inducida. Para este caso, su valor es de 9.69 Mm³/año para el 2014.
- *Descarga natural comprometida (DNCOM)*. Se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que está comprometido como agua superficial, alimentados por el acuífero, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes; sostener el gasto ecológico y prevenir la migración de agua de mala calidad hacia el acuífero. Para este caso particular, se considera como descarga natural comprometida el volumen de 1.09 Mm³/año para el 2014.
- *Volumen concesionado de aguas subterráneas (VCAS)*. Este es el volumen anual de extracción, 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, con fecha de corte al 30 de septiembre de 2008, que es de 3,948,383 m³/año.
- *Disponibilidad de aguas subterráneas (DAS)*. Constituye el volumen medio anual de agua subterránea disponible en un acuífero, al que tendrán derecho de explotar, usar o aprovechar los usuarios, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro a los ecosistemas.

Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, 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.

Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica para el 2014:

$$DAS = 9.69 \text{ Mm}^3 - 1.09 \text{ Mm}^3 - 3.95 \text{ Mm}^3$$

Disponibilidad media anual de agua subterránea en el 2014 = 4.66 Mm³/año

La cifra indica que existe un volumen adicional de 4.66 Mm³/año, para otorgar nuevas concesiones.

No se descarta la posibilidad de que el valor de la disponibilidad media anual sea mayor, sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación.

Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

CONCLUSIÓN

Generalidades del área de estudio.

Las principales actividades económicas que se llevan en la cuenca del Río Tecoripa son la ganadería y la agricultura. Dichas actividades son el soporte y la principal fuente de ingresos a la región.

En base al censo del 2007 se estimó una extracción total anual de agua subterránea que asciende a 2.4 Mm^3 . Cabe mencionar que los mayores volúmenes de extracción se localizan en aprovechamientos ubicados cerca del cauce del Río Tecoripa y arroyos tributarios, así como en la planicie de inundación.

En el área afloran rocas sedimentarias e ígneas, cuyas edades van desde el Paleozoico al Reciente. Con permeabilidades altas constituido en su parte superior por los depósitos aluviales y en su parte inferior por la secuencia de conglomerados y rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento. Mientras que el basamento y barreras al flujo subterráneo están conformados por las rocas ígneas intrusivas de composición granítica.

En base al análisis climatológico se estimó una temperatura promedio anual de 22°C siendo clima seco, la precipitación promedio anual por el método del promedio aritmético es de 560.5 mm , mientras que la evaporación promedio anual por el método del promedio aritmético fue de 1870.9 mm .

Características fisiográficas.

El Río Tecoripa, es parte de la cuenca del Río Yaqui. Esta se ubica en la región hidrológica Sonora Sur (RH-9). El curso general es hacia el sur y pasa por los poblados de Tecoripa, Suaqui Grande y Cumuripa.

La subcuenca es clasificada como una cuenca exorreica, ya que esta desemboca dentro de la cuenca del Río Yaqui. Su topografía es ligeramente accidentada con algunos valles intermontanos en las porciones central y occidental. Debido al clima extremo, el tipo de río es intermitente y se percibe un drenaje del tipo dendrítico y rectangular.

La cuenca tiene una forma alargada en dirección norte a sur, con un área de $2,447.44 \text{ km}^2$. Considerándolo como una cuenca pequeña. Determinando el grado de bifurcación, el orden de la cuenca es 4 con una densidad de corriente de $3.62 /\text{km}^2$ y una densidad de drenaje de $18.78 /\text{km}$.

Hidrología superficial.

El resultado de la precipitación media anual, calculado por el método de Polígonos de Thiessen fue de 518.26 mm/año . El escurrimiento medio anual, calculado con el método indirecto fue de 64.78 mm/año este representa el 12.50% de la lluvia precipitado dentro de la cuenca.

La evapotranspiración media anual fue calculada por el método de Coutagne, y dio como resultado 450.95 mm/año representado como el 87.01% de la lluvia precipitado en la

cuenca. Para la infiltración media anual se utilizó la ecuación del ciclo hidrológico y este dio como resultado 2.53 mm/año que representa el 0.49% de la lluvia precipitada dentro de la cuenca.

Hidrogeología.

Según las provincias hidrogeológicas descritas por Velázquez y Ordaz, nuestra área de estudio se encuentra ubicada en la provincia Sierra Madre Occidental. En nuestra área de estudio se ubican tres unidades geohidrológicas que son: Unidad aluvial sin saturación (Zona vadosa), Unidad aluvial saturada (Zona saturada) y Unidad basal (Basamento impermeable). De acuerdo con las unidades identificadas, es posible definir que el acuífero es de tipo libre formado por una secuencia de depósitos aluviales constituidos principalmente por gravas y arenas no consolidadas, de alta permeabilidad, que presentan lentes intercalados de arcillas y debajo de esta secuencia y fuera de los cauces de los ríos y arroyos, el acuífero está conformado por conglomerados y una secuencia de rocas volcánicas que presentan permeabilidad secundaria por fracturamiento.

Referente a las propiedades del acuífero, concretamente a la transmisividad el resultado obtenido en la interpretación se obtuvo como valor mínimo de $5.88E-04$ m²/s, un máximo de $3.92E-03$ m²/s y un promedio de $1.72E-03$ m²/s.

Para la conductividad hidráulica se presentan valores mínimos del orden de $2.94E-05$ m/s, mientras que para los valores máximos están representados por $1.96E-04$ m/s, con un promedio general de $8.60E-05$ m/s.

En el coeficiente de almacenamiento el valor mínimo fue de $8.74E-08$, el valor máximo fue de $9.79E-06$, y el promedio fue de $2.33E-06$.

El gasto horizontal de entrada y salida de agua subterránea, se obtuvo con la información de los pozos censados proporcionada por la CONAGUA del año 2004 y 2014, con esta información se creó dos mapas de nivel estático y dos de redes de flujo.

En la mayor parte del área de estudio se identificaron niveles estáticos que fluctúan entre 1 a 65 m. Los niveles estáticos más profundos son mayores a 30 m, y se localizan en la parte noroeste del acuífero, siendo el nivel más profundo de 65.5 m. los niveles menores se localizan en la parte sur del acuífero, siendo el nivel mínimo de 1.3 m.

Las elevaciones máximas del nivel estático se ubican al noroeste del acuífero, presentando valores que van de los 570 msnm en el municipio de Mazatán. Mientras que en la parte sur del acuífero, en la localidad de Cumuripa, se encuentran las elevaciones mínimas que fluctúan entre 74 msnm.

Con las redes de flujo se obtuvo el gasto horizontal. Para el año 2004 el total de gasto de entrada o recarga fue de 0.81 Mm³/año, y el gasto de salida o descarga fue de 1.07 Mm³/año. En el caso del 2014 el total de gasto de entrada o recarga fue de 1.63 Mm³/año, y el gasto de salida o descarga fue de 1.09 Mm³/año.

En base al comportamiento del flujo de la elevación del nivel estático, se determinó que la dirección preferencial del flujo subterráneo es norte-sur, paralela al curso del Río Tecoripa, con alimentaciones provenientes de los flancos, desde las partes topográficamente más altas o de los cauces de los arroyos tributarios.

A partir de un balance hidrológico superficial se pudo estimar una precipitación de 1268.42 Mm³, una evapotranspiración de 1103.67 Mm³, un escurrimiento de 158.55 Mm³ y una infiltración de 6.20 Mm³.

La recarga vertical por lluvias en la cuenca del Río Tecoripa se obtuvo con la ecuación general del balance hidrológico en su forma reducida. Para el 2004 se calculó una recarga vertical de 8.87 Mm³/año con una recarga total de 9.68 Mm³/año, y para el 2014 la recarga vertical fue de 8.06 Mm³/año y la recarga total fue de 9.69 Mm³/año.

La disponibilidad se logró estimar a partir del procedimiento de la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-2000), que establece la metodología para calcular la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Conforme a la metodología indicada en la norma referida anteriormente, se obtuvo que la disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica para el 2014, fue de 4.66 Mm³/año.

Indicando que existe un volumen adicional de 4.66 Mm³/año para el 2014, para la otorgación de nuevas concesiones. No se descarta la posibilidad de que el valor de la disponibilidad media anual sea mayor, sin embargo, no es posible en este momento incluir en el balance los volúmenes de agua que circulan a mayores profundidades que las que actualmente se encuentran en explotación.

Conforme se genere mayor y mejor información, especialmente la que se refiere a la piezometría y pruebas de bombeo en pozos cercanos a los piedemonte, se podrá hacer una evaluación posterior.

Una buena recomendación para futuros proyectos sería el uso y manejo del agua superficial y subterránea por medio de un reglamento.

Realizar mediciones hidrogeológicas continuas en los pozos de la cuenca, y solicitar registros eléctricos y cortes geológicos cuando se realicen nuevas perforaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Arámbula Montiel, D. A., & Palomino Moreno, J. C. (1991). *Panorama geohidrologico del Estado de Sonora*.

(2000). *Base de datos geográficos, diccionario de datos climáticos escalas 1:250 000 y 1:1 000 000*.

Calmus, T. (2011). Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico. *Instituto de Geología, Boletín 118*.

Comisión Nacional del Agua. (4 de Junio de 2014). Recuperado el 4 de Junio de 2014, de Comisión Nacional del Agua: <http://smn.cna.gob.mx/glosario/glosario.html>

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrologia subterranea*. Omega.

(2008). *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2639 Río Tecoripa, Estado de Sonora*. México. D.F.

Frutos Balibrea, L., & Castorena Davis, L. (2011). *Uso y gestión del agua en las zonas semiáridas y áridas: el caso de la Región de Murcia (españa) y Baja California Sur (México)*. Murcia: Universidad de Murcia.

García, E. (1981). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*. México D.F.

González León, C., Lawton, T., & Weber, R. (2010). Estratigrafía del Triásico y el Jurásico Inferior de Sonora, México. *Instituto de Geología, Boletín 118*.

Hernández López, C. (2012). *Análisis del comportamiento de la temperatura y la precipitación mediante climogramas y tendencias en la zona central de Veracruz*. Xalapa.

Vega Granillo, E. L. (2011). *Hidrogeología*. Hermosillo, Sonora.

Velázquez Aguirre, L., & Ordaz Ayala, A. (1993-1994). Provincias hidrogeológicas de México. *Boletín de la Sociedad Geológica* , 15-33.