

TESIS DEFENDIDA POR
Teresita de Jesús Moraila Martínez
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Director del Comité

M. C. Francisco Suárez Vidal
Miembro del Comité

M.C. Alejandro Hinojosa Corona
Miembro del Comité

Dra. Maria Tereza Cavazos Pérez
Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández
*Coordinador del programa de posgrado
en Ciencias de la Tierra*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

Septiembre de 2010.

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN LA
SUBCUENCA SANTA ROSA, B.C.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

TERESITA DE JESÚS MORAILA MARTÍNEZ

Ensenada, Baja California, México, septiembre de 2010.

RESUMEN de la tesis de **Teresita de Jesús Moraila Martínez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en GEOCIENCIAS AMBIENTALES. Ensenada, Baja California. Septiembre de 2010.

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN LA SUBCUENCA SANTA ROSA, B.C.

Resumen aprobado por:

Dr. Thomas Gunter Kretzschmar
Director de Tesis

Este trabajo de investigación se llevó a cabo en la subcuenca Santa Rosa, localizada al norte de la ciudad de Ensenada, Baja California, delimitada por las siguientes coordenadas: al norte $32^{\circ}04'$; al sur $31^{\circ}58'$; al este $-116^{\circ}40'$; y al oeste $-116^{\circ}48'$.

El principal objetivo de este trabajo fue generar un modelo hidrológico de escurrimiento superficial para estimar la disponibilidad de agua en esta zona. Para cumplir este objetivo, se obtuvieron datos de precipitación para 1969-2000 y datos de escenarios de cambios en la precipitación para 2001-2030 en la estación meteorológica Olivares Mexicanos. Además, se realizó trabajo de campo mediante la colecta de 38 muestras de los primeros 5 cm suelo. Los datos de la estación meteorológica Olivares Mexicanos y la información obtenida de campo fue complementada con la carta geológica de GASTIL et al., (1975), con un Modelo Digital de Elevación (pendientes) y con una imagen de LANDSAT. Toda esta información fue procesada mediante un algoritmo utilizando el Método de Curvas Numeradas para el Escurrimiento desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos a través del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés).

De acuerdo con los resultados de este estudio, la pendiente de la cuenca Santa Rosa es el factor dominante responsable del alto potencial de escurrimiento de la subcuenca Santa Rosa. Según las estimaciones de escurrimiento superficial obtenidas en el período 1969-2000, la disponibilidad de agua en la subcuenca Santa Rosa es de 8,900,000 metros cúbicos anuales. De acuerdo a la estación meteorológica Olivares Mexicanos se proyecta una disminución en la precipitación para el año 2030, por lo que según nuestro modelo para aquel entonces la disponibilidad de agua en la subcuenca Santa Rosa podría disminuir a 5,400,000 metros cúbicos.

Palabras clave: subcuenca Santa Rosa, modelo hidrológico de escurrimiento superficial, disponibilidad de agua, Métodos de Curvas Numeradas para el Escurrimiento

ABSTRACT of the thesis presented by **Teresita de Jesús Moraila Martínez** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales. Ensenada, Baja California, México septiembre de 2010.

HYDROLOGICAL RUNOFF MODELING IN THE SANTA ROSA SUB-BASIN, B.C.

This study was realized in the Santa Rosa sub-basin, located north to Ensenada city, Baja California, delimited by the following coordinates: 32°04' to the north; 31°58' to the south; -116°40' to the east; and -116°48' to the west.

The main objective of this study was generating a hydrological runoff model to estimate the water availability for this zone. To achieve this objective, it was obtained precipitation data for 1969-2000 and precipitation change scenarios data for 2001-2030 from the Olivares Mexicanos meteorological station. In addition, it was realized a field work through the collection of 38 soil samples of 5 cm depth. The data from the Olivares Mexicanos meteorological station and the information obtained from field was complemented with: the geological map of Gastil et al. (1975), a Digital Elevation Model and a LANDSAT image. All this information was processed with an algorithm, using the Runoff Curve Number Method developed by the United States Agriculture Department from the Natural Resources Conservation Services (NRCS).

According to the results of this study, the slope of the Santa Rosa basin is the dominant factor responsible for the high runoff potential of the Santa Rosa sub-basin. From the runoff estimations obtained for the 1969-2000 period, the water availability in the Santa Rosa sub-basin is 8,900,000 cubic meters each year. According to the Olivares Mexicanos meteorological station, it is projected a precipitation drop for the 2030 year, thus from our model at that time the water availability in the Santa Rosa sub-basin could fall to 5,400,000 cubic meters each year.

Key words: Santa Rosa sub-basin, hydrological runoff model, water availability, Runoff Curve Number Method.

Dedicatorias

A mis padres Lucina y Jesús por impulsarme siempre a seguir adelante, gracias por ser mi mayor apoyo siempre

A Jesús Felipe, te adoro mi cielo

Agradecimientos

A mis padres por impulsarme a ser una mejor persona, espero estén felices conmigo. A Carmen Lucía, Rosita, Gloria, Frida y Felipe por acompañarme durante la vida. A mi abuelo Leandro Martínez, por apoyarme en cada etapa de mi vida, espero estés orgulloso de mí. A mis abuelas Mamá nina y ñomá que me cuidan en donde quiera que estén.

Un agradecimiento especial a mi director de tesis Dr. Thomas Kretzschmar por dirigir este proyecto y por estar pendiente de mi formación académica.

Gracias a mi comité de tesis. A los M.C. Alejandro Hinojosa Corona y Francisco Suárez por su invaluable colaboración y apoyo, a la Dr. María Tereza Cavazos Pérez por facilitarme datos para complementar mi trabajo.

A CICESE y a toda la División de Ciencias de la Tierra por recibirme y apoyarme durante mi formación académica. A la Universidad Autónoma de Sinaloa por seguir apoyándome.

A Francisco Núñez, por convertirse en alguien muy importante para mí, a todos mis compañeros de generación en la maestría y doctorado por compartir casi 3 años de estudio y por todos los buenos momentos que pasamos juntos. A todos los que conocí en CICESE durante este camino: Porfirio, Tomás, Mónica, Alex, Francisco del Toro, Karla, Ena, Erick, Juan Carlos, Cristy, Diana, Luz, Elvia, Gaby, Obed, Laura, Olaf, Mariana, Ricardo, Samantha. A todos mis amigos y compañeros de Geodesia

A CONACYT por beneficiarme con una beca durante 2 años para mis estudios.

.CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Objetivos.....	4
I.2. Descripción del área de estudio.....	4
I.3. Marco teórico.....	7
II. DATOS Y METODOLOGÍA.....	13
II.1 Análisis de la estación meteorológica Olivares Mexicanos.....	13
II.2 Metodología.....	14
II.2.1. Descripción del método de las Curvas Numeradas para el escurrimiento.....	14
II.2.2 Trabajo de campo y análisis de laboratorio.....	20
II.2.3 Análisis de datos de satélite.....	23
II.2.4 Obtención de las Curvas Numeradas.....	26
II.3 Estimación de volúmenes de escurrimiento aportados a la subcuenca Santa Rosa.....	31
III. RESULTADOS.....	32
III.1 Resultados del análisis en la estación hidrométrica Olivares Mexicanos.....	32
III.1.1. Precipitación.....	32
III.1.2. Temperatura.....	33
III.1.3 Evaporación potencial.....	34
III.2. Trabajo de laboratorio.....	34
III.2.1. Granulometría.....	35
III.2.2 Contenido de humedad gravimétrico.....	35

CONTENIDO (continuación)

	Página
III.2.3 Capacidad de campo.....	37
III.3. Datos de satélite.....	38
III.3.1. Geología.....	39
III.3.2. Pendiente.....	40
III.3.3. Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI).....	40
III.4. Aplicación del Método de Curvas Numeradas.....	41
III.4.1. Obtención de las Curvas Numeradas.....	41
III.4.2 Correcciones debido a las condiciones previas de humedad.....	43
III.5. Estimación de volúmenes de escurrimiento en la subcuenca Santa Rosa.....	45
III.6. Evaluación del escurrimiento superficial mediante escenarios de cambios en la precipitación.....	49
IV. DISCUSIÓN.....	55
V. CONCLUSIONES.....	57
VI. REFERENCIAS.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Proyecto presa Santa Rosa	3
2	Localización general de la subcuenca Santa Rosa	5
3	Mapa de la delimitación del área de estudio: la subcuenca Santa Rosa.	6
4	Litología de la zona de acuerdo al mapa de GASTIL (1975)	7
5	Ciclo hidrológico.	8
6	Método de Curvas Numeradas para la estimación del escurrimiento.	12
7	Ubicación de la estación meteorológica Olivares Mexicanos.	14
8	El área de estudio se delimita mediante la línea roja, las muestras tomadas en campo se indican con puntos verdes. Imagen (Digital Globe 2004)	21
9	Mapa satelital de vegetación muestra la densidad de plantas alrededor de todo el planeta (Weier y Herring 2000).	25
10	Rectas para el grupo hidrológico de suelos B (aluvión y depósitos inmaduros)	29
11	Rectas para el grupo hidrológico de suelos C (rocas ígneas)	30
12	Resultados de precipitación total anual de 1969-2000. Estación Olivares Mexicanos.	32
13	Resultados de precipitación mensual promedio en la estación Olivares Mexicanos.	33
14	Resultados del análisis de temperatura mensual promedio en la estación Olivares Mexicanos.	33
15	Resultados del análisis de evaporación potencial promedio mensual en la estación Olivares Mexicanos.	34
16	Resultados de la clasificación de Grupo Hidrológico de Suelos en la subcuenca Santa Rosa.	39

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
17	Resultados del análisis de pendiente en la subcuenca Santa Rosa.	40
18	Resultados del análisis de Índice de Vegetación Diferencial Normalizado.	41
19	Resultados de la obtención de Curvas Numeradas.	42
20	Corrección de las Curvas Numeradas por el cambio del factor de sustracción inicial.	43
21	Curvas Numeradas para la Condición Previa de Humedad clase I.	44
22	Curvas Numeradas para la Condición Previa de Humedad clase III.	44
23	Resultados de escurrimiento mensual promedio en la subcuenca Santa Rosa.	46
24	Resultados del escurrimiento total anual en la subcuenca Santa Rosa.	48
25	Resultados de precipitación total anual proyectada para el período 2001-2030 en la estación Olivares Mexicanos (basado en datos de Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2009)	50
26	Precipitación anual en la estación Olivares Mexicanos para la serie 1969-2000 (CNA, 2000) y (Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2009)	50
27	Proyección de la precipitación mensual promedio (ciclo anual) en la estación Olivares Mexicanos para 1969-2000 y 2001-2030.	51
28	Proyección de temperatura media mensual (oC) en la estación Olivares Mexicanos para 2001-2030	52
29	Proyección de escurrimiento total anual en la subcuenca Santa Rosa para la serie 2001-2030	53
30	Escenario de escurrimiento anual 1969-2030 en la subcuenca Santa Rosa	54

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Curvas Numeradas para regiones áridas y semiáridas (NRCS, 1986).	16
II	Muestras tomadas en campo.	20
III	Granulometría	22
IV	Capacidad de campo del suelo de acuerdo a la clase textural.	23
V	Incorporación de información de NDVI, pendiente y geología para la determinación de las Curvas Numeradas.	27
VI	Algoritmo para la determinación de las CN.	28
VII	Resultados del análisis textural para los sitios de muestreo.	35
VIII	Resultados del contenido de humedad gravimétrico en las muestras de suelo tomadas antes del período de lluvia.	36
IX	Resultados del contenido de humedad gravimétrico en las muestras de suelo tomadas durante el período de lluvia.	36
X	Resultados del contenido de humedad gravimétrico de las muestras de suelo tomadas posteriormente al período de lluvia.	37
XI	Resultados de Capacidad de campo en las muestras de suelo tomadas antes del período de lluvia.	37
XII	Resultados de Capacidad de campo en las muestras de suelo tomadas durante el período de lluvias.	38
XIII	Resultados de capacidad de campo en las muestras tomadas después del período de lluvia.	38
XIV	Definición de las Condiciones Previas de Humedad.	46
XV	Resultados del escurrimiento superficial mensual promedio.	47

LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
XVI	Escorrentamiento superficial anual en la subcuenca Santa Rosa.	48
XVII	Resultados de precipitación total anual proyectadas para el período 2001-2030 en la estación Olivares Mexicanos.	49
XVIII	Resultados de precipitación mensual promedio en la estación Olivares Mexicanos para las proyecciones de lluvia 2001-2030.	51
XIX	Resultados de temperatura mensual promedio en la estación Olivares Mexicanos.	52
XX	Resultados de escorrentamiento total anual en la subcuenca Santa Rosa.	53

I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más importantes debido al importante papel que desempeña para la realización de las actividades humanas. El constante crecimiento de la población conlleva a que sea cada vez más grande la demanda de agua y por lo mismo más difícil de abastecer, por lo que, conocer la cantidad de recursos hídricos en una región toma una gran importancia para su mejor manejo y sustentabilidad.

El abastecimiento satisfactorio de agua en gran parte del noroeste del país es cada vez más difícil de lograr debido al carácter semiárido de la región, a la actividad agrícola y al rápido crecimiento de la población (Antuna Ibarra, 2005). Según la Comisión Nacional del Agua, uno de los estados con serios problemas de abastecimiento de agua es el de Baja California. De acuerdo a la clasificación Koppen modificada por García en 1981, el clima del noroeste de Baja California es del tipo BSK, es decir, seco templado mediterráneo con lluvias en invierno; la mayor cantidad de agua se encuentra almacenada en pocos acuíferos, siendo la precipitación la principal fuente de almacenamiento.

La situación demográfica que presenta el estado de Baja California es el resultado de la inercia del rápido crecimiento que tuvo la población hasta la segunda mitad del siglo XX. Aunque la tasa de crecimiento comenzó a disminuir desde entonces ésta ha seguido aumentando en números absolutos. En el municipio de Ensenada la tasa de crecimiento es de 2.3%, lo que lo convierte en el segundo municipio del estado con menor tasa de crecimiento, superado por Mexicali.

De acuerdo a estimaciones realizadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) al 30 de junio de 2009, el municipio de Ensenada cuenta con una población de 455,700 habitantes, pero aún en estas condiciones se estima que dentro de 30 años se duplicará la población. Este crecimiento en la

población se debe en parte a que el municipio ha tenido un gran desarrollo derivado de las diversas actividades económicas (industria, comercio, producción agrícola y ganadera; y en el puerto sobresalen el transporte marítimo, la pesca y el turismo). Como puerto, ocupa el 4to lugar a nivel nacional.

La disponibilidad y la demanda de agua para la zona de Ensenada se encuentran hoy en día en un equilibrio límite. Se prevé que a corto plazo se presentarán problemas de escasez; para resolver el problema, se han propuesto diversas variantes de abastecimiento complementario para cubrir el déficit de suministro de agua. Uno de estos proyectos que se está desarrollando es el de la construcción de la presa Santa Rosa sobre el arroyo Guadalupe, afluente del río La Misión; esta presa se ubicará en la cuenca Guadalupe, dentro de la cual se localiza uno de los principales acuíferos que actualmente satisface las demandas de las distintas actividades agrícolas, y abastece de agua a la ciudad de Ensenada. En esta cuenca se encuentra El Valle de Guadalupe, que es la región vinícola más importante del país, ya que produce el 90% del vino nacional.

De acuerdo con la CNA (1998), se elaboró un informe técnico acerca del proyecto de la presa Santa Rosa, en dicho informe describía un conjunto de obras con las siguientes características: obra de desvío, presa, obra de excedencias, obra de toma, planta de bombeo, tubería a presión, conducción, subestación eléctrica y accesos. Mencionaba que las condiciones geológicas permiten construir una presa tipo sección-gravedad, con parámetro vertical aguas arriba y un talud de 0.875:1 en parámetro de aguas abajo. Una de las razones para la selección de este tipo de presa es que las estructuras para: el desvío, excedencias y toma se ubican en el cuerpo de la misma, resultando un esquema general sencillo, además de los ahorros que se obtienen comparados con otro esquema de las obras considerando una presa con núcleo de arcilla. Este informe técnico consideró para el diseño de la presa un gasto de 500 lps (incluyendo las demandas para riego) en una primera etapa, que arroja un volumen de 15,768,000 m^3 al año, pudiendo aumentar hasta 1000 lps es decir 31,536,000 m^3 en una segunda etapa, con lo cual se cubrirían los requerimientos en un período más

amplio. Sin embargo, cada vez que se aumente en un futuro, la capacidad de extracción, se aumenta también los déficit ya que se tendrán más años que no puedan cubrir la capacidad instalada. Esta presa almacenaría como máximo 43.18 millones de m^3 .

En el año de 1999 la CNA otorgó una concesión a Inveragua S.A de C.V. para explotar, usar o aprovechar 33,683,200 m^3 anuales con un gasto requerido de 1000 l/s que están distribuidos de la siguiente forma: 31,536,000 m^3 para uso agrícola y 2,147,200 m^3 para uso público urbano. Las coordenadas del punto de extracción serían: latitud $32^{\circ}01'$ y longitud $-116^{\circ}43'$.

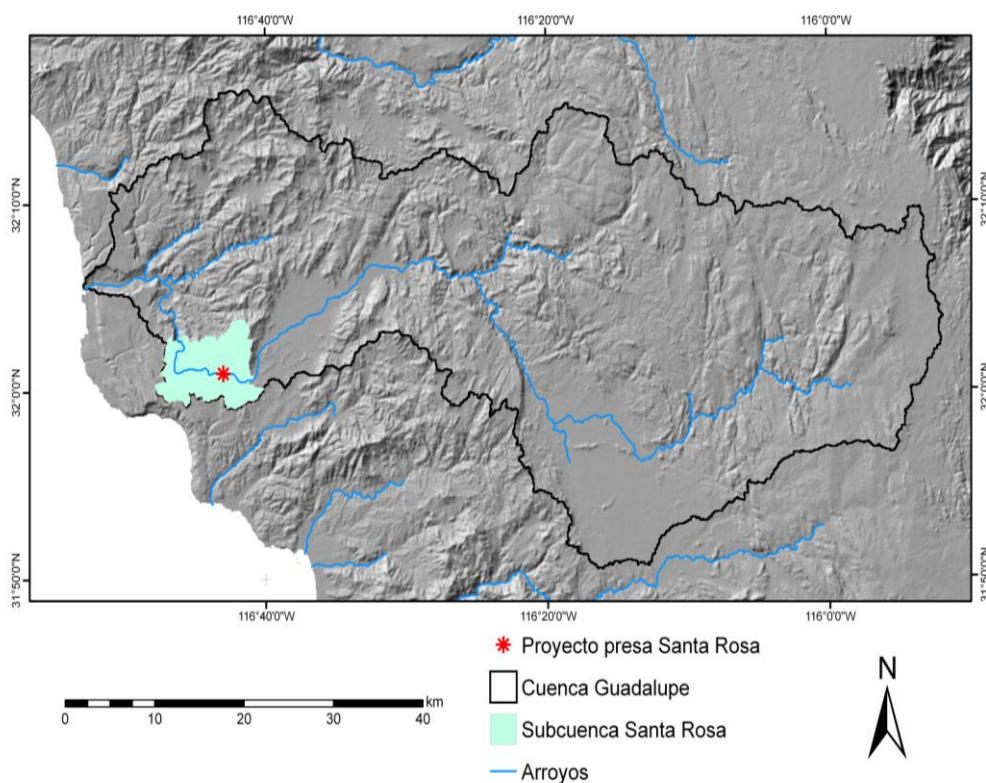


Figura 1. Proyecto presa Santa Rosa

1.1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el de generar un modelo hidrológico de escurrimiento superficial de la subcuenca Santa Rosa para estimar la disponibilidad de agua en la zona. Los objetivos particulares son:

- Realización del balance hidrológico del acuífero Santa Rosa para establecer relaciones entre las distintas variables hidrológicas
- Conocer el comportamiento de la cuenca.
- Hacer una predicción a futuro acerca del comportamiento de esta cuenca.

1.2 Descripción del área de estudio

La subcuenca Santa Rosa pertenece a la Región Hidrológica Baja California Noroeste (clave RH1), Río Tijuana-Arroyo Maneadero, a su vez forma parte de la cuenca Guadalupe (Clave CNA, BC-07), cubriendo un área de aproximadamente 2400 km^2 . El acceso al área de estudio se puede lograr a partir de Ensenada por la carretera libre federal No. 3 que comunica a las ciudades de Ensenada y Tecate. Se encuentra a 30 km al norte de la ciudad de Ensenada. Esta subcuenca colinda al norte con la subcuenca de La Misión, al sur con la de San Miguel y al oeste limita con el Valle de Guadalupe (Fig.1).

La cuenca Guadalupe está formada por distintas subcuencas, que se comunican entre sí principalmente mediante escurrimiento; este proceso se puede resumir de la siguiente forma: El escurrimiento se genera en la Sierra Juárez a través del arroyo El Barbón, que alimenta a la subcuenca Ojos Negros y Real de Castillo, continuando hacia el valle de Guadalupe, posteriormente sigue la esorrentía hacia la subcuenca Santa Rosa, para finalmente desembocar en el Océano Pacífico en La Misión, ubicada a 50 km aproximadamente al norte de Ensenada (Campos Gaytán 2002).

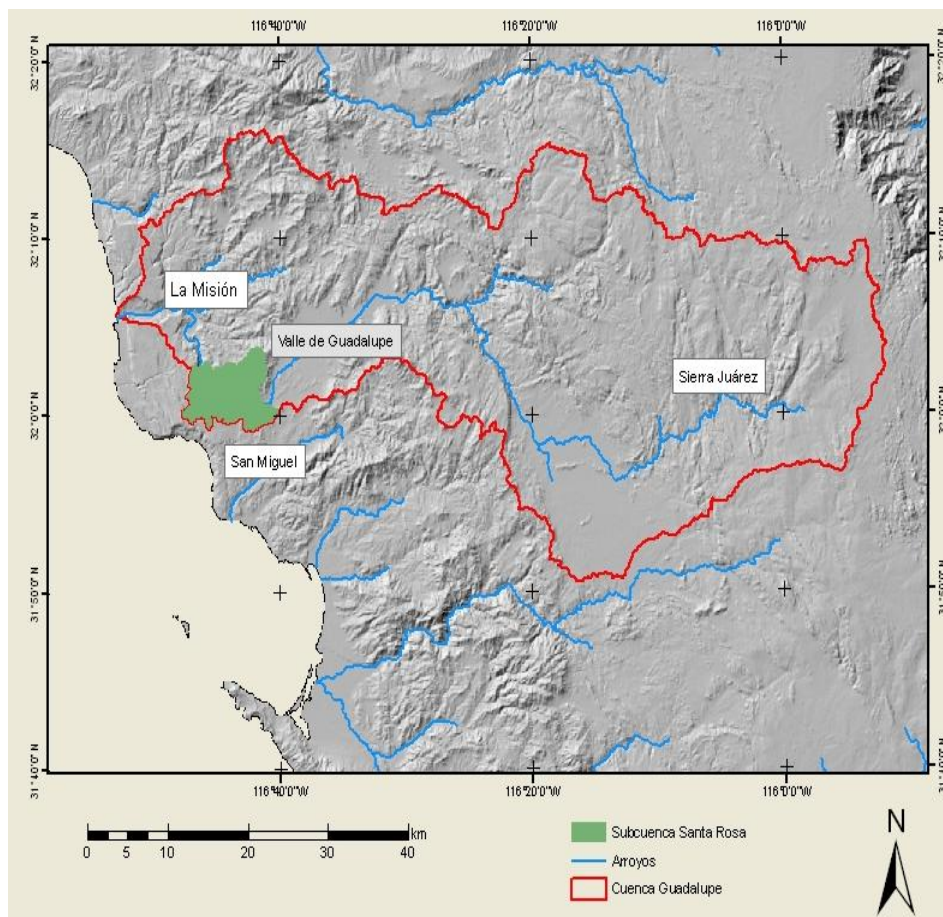


Figura 2. Localización general de la subcuenca Santa Rosa

La subcuenca Santa Rosa cuenta con un área de aproximadamente 67 km^2 ; es considerada como pequeña de acuerdo a la clasificación propuesta por Campos Aranda (1992). Se encuentra ubicada entre las siguientes coordenadas: al norte $32^\circ 04' \text{ N}$; al sur $31^\circ 58' \text{ N}$; al este $-116^\circ 40'$ y al oeste $-116^\circ 48'$ (Fig.2).

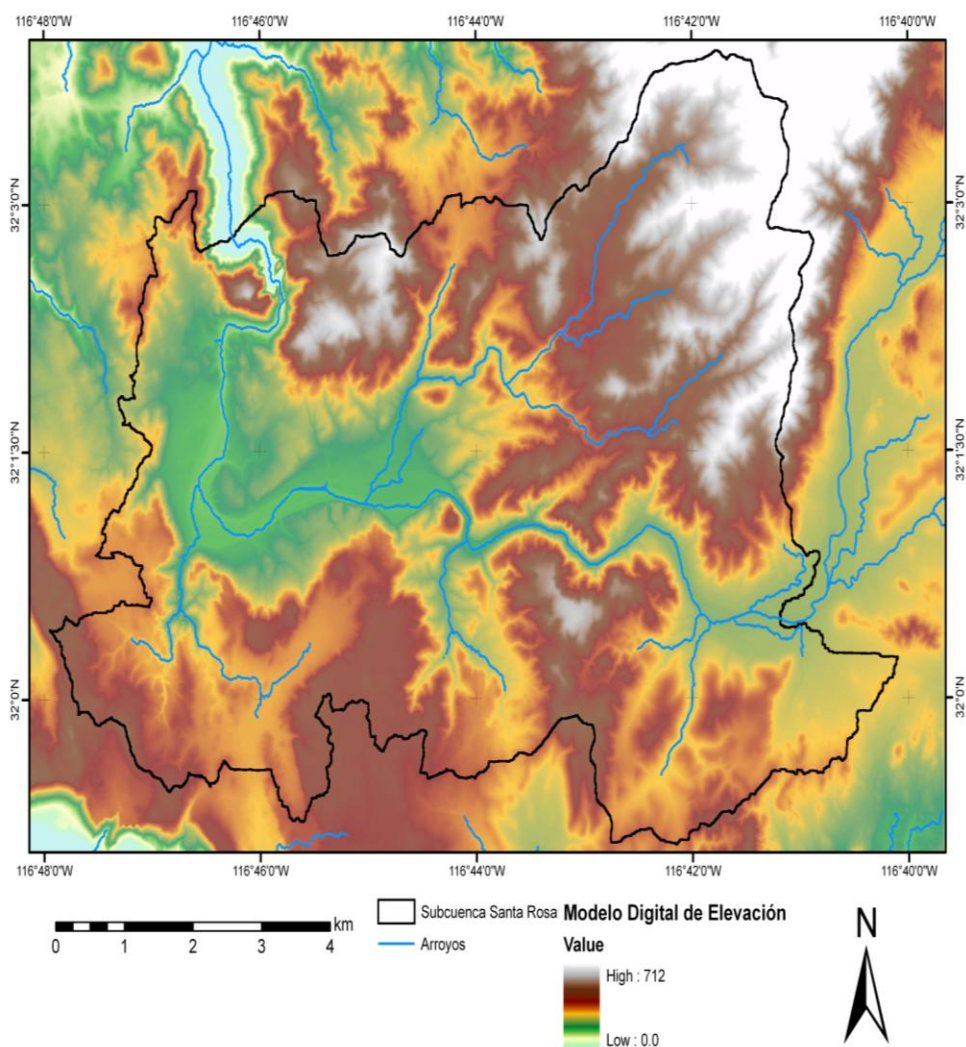


Figura 3. Mapa de la delimitación del área de estudio, la subcuenca Santa Rosa.

La litología que aflora y circunda a la cuenca (ver Fig.4) se constituye por rocas volcánicas no diferenciadas formadas durante el Cretácico inferior (Krpbv); Roca ígnea intrusiva (tonalita Kt y granodiorita KGd) del batolito peninsular; depósitos sedimentarios inmaduros de la formación redondo del Cretácico (KFmR), Volcánicas del Mioceno (Mba) y depósitos aluviales derivados de la corriente del río Guadalupe (fluvial Kfl) y aluvión del cuaternario(Qal) (GASTIL, 1975).

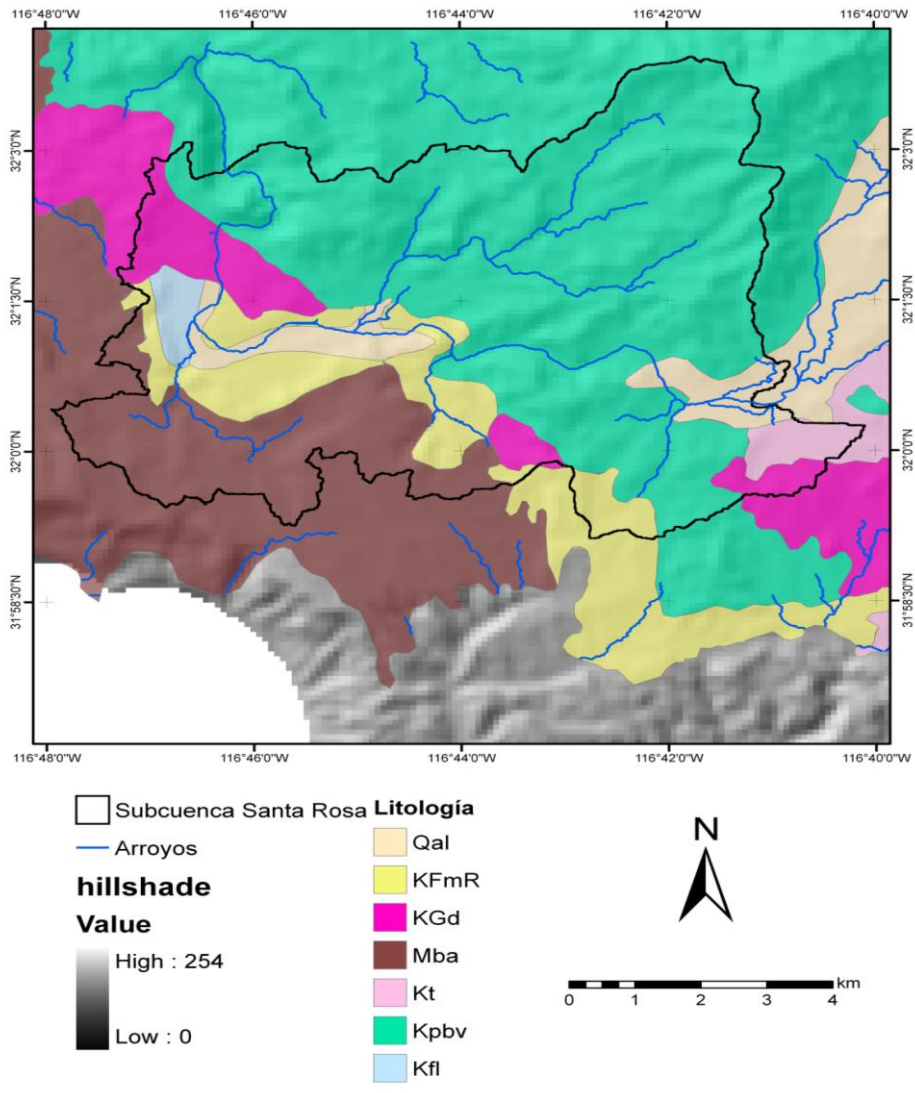


Figura 4. Litología de la zona de acuerdo al mapa de GASTIL (1975).

1.3 Marco teórico

Definición de escurrimiento:

Escurrecimiento es la parte de la precipitación que fluye por gravedad por la superficie del terreno, o en el interior del mismo por escurrimiento subsuperficial o escurrimiento subterráneo. El escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes superficiales, sean éstas perennes, intermitentes o

efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Se expresa en unidades de gasto Q (volumen/tiempo).



Figura 5. Ciclo hidrológico

Desde el punto de vista del aprovechamiento de los recursos hidráulicos en una región o país, el escurrimiento de una corriente constituye la disponibilidad para ser derivada y utilizada inmediatamente, en el riego y/o abastecimiento de agua a las poblaciones, o bien, para ser almacenada en los embalses y empleada posteriormente en diversos fines, inclusive retenida para su control, con el objeto de reducir los daños que causa su abundancia. Además, el transporte de sedimentos y nutrientes son calculados a partir del escurrimiento (Zhan y Huang, 2004).

La relación entre la precipitación y el escurrimiento fue comprobada por primera vez, con el trabajo de Pierre Perrault en la cuenca del Río Sena, durante el siglo XVII. Perrault midió la precipitación en la cuenca durante los años 1668, 1669 y 1670 obteniendo como valor medio 520 mm. Posteriormente estimó el escurrimiento anual de la cuenca y llegó a la conclusión que éste representaba sólo la sexta parte del volumen llovido, demostrando que las precipitaciones eran más que suficientes para justificar el escurrimiento de los ríos.

De acuerdo a la porción de la superficie terrestre en la que se origina el escurrimiento, éste se puede dividir en:

Escurrimiento superficial, es la parte que fluye sobre la superficie y después por los cauces. La parte del escurrimiento superficial que fluye sobre el terreno hacia los cauces se llama flujo sobre el terreno.

Escurrimiento subsuperficial (interflujo), es el escurrimiento debido a la porción de la precipitación que se infiltró en el terreno y se mueve lateralmente en los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes. Una parte de este tipo de escurrimiento aparece rápidamente en los cauces y otra se percola hasta alcanzar el agua subterránea, cuya descarga producirá escurrimiento subterráneo.

Componentes del escurrimiento:

El escurrimiento total proveniente de una cuenca típica heterogénea tiene 4 componentes: Precipitación en los cauces, flujo sobre el terreno, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo (Campos Aranda 1992).

Fases del escurrimiento

- 1) Época seca: precipitación escasa o nula. Flujo en ríos alimentado solo por los mantos de agua subterránea. Evapotranspiración bastante intensa, lo cual hace que el agua contenida por las plantas, en el suelo, en los depósitos de agua y en los cauces, se vaya perdiendo rápidamente, de tal suerte que si esta fase no fuera interrumpida por la temporada de lluvias, las corrientes llegarían a secarse.
- 2) Período húmedo: caen las primeras precipitaciones cuya función principal es la de satisfacer la deficiencia de humedad del suelo. Las corrientes en caso de no haberse secado, siguen siendo alimentadas por el escurrimiento subterráneo. En esta etapa sí ocurre escurrimiento superficial, pero es mínimo.

- 3) Período húmedo en una etapa más avanzada. Se satisface el almacenamiento en depresiones, así como la deficiencia de humedad del suelo, de manera que el agua infiltrada, al saturar la capa del suelo, pasa por gravedad a aumentar las reservas de agua subterránea. Al disminuir la capacidad de infiltración, se presenta el escurrimiento superficial que puede o no llegar a los cauces de las corrientes, esto depende de las características del suelo sobre el que el agua se desliza. Si el cauce continúa seco, el aumento del manto freático puede ser, en esta fase, suficiente para tener la pendiente necesaria y descargar en los cauces.
- 4) Continuación del período húmedo, cuando la lluvia ha satisfecho todo tipo de almacenamiento hidrológico.
- 5) Finalmente el último período se presenta cuando la temporada de lluvias ha cesado y termina cuando las reservas de agua del subsuelo quedan de tal manera reducidas que se presentan las características de la época seca.

Los factores que afectan el escurrimiento son: Factores climáticos, la influencia probablemente más efectiva en el volumen de escurrimiento es el balance medio entre la temperatura y la evapotranspiración de la cuenca. Factores fisiográficos y características físicas de la cuenca (pendiente, tipo de suelo y rocas), los cuales influyen en el volumen del escurrimiento afectando la infiltración y por lo tanto, la evapotranspiración. Altitud, a través del efecto orográfico en la precipitación. Otros factores hidrológicos, como la intercepción, evapotranspiración y humedad del suelo.

Infiltración, humedecimiento del suelo

Se entiende por infiltración el volumen de agua que procede de las precipitaciones (a veces también de los ríos o recarga artificial), en un determinado tiempo, que se filtra o absorbe hacia el subsuelo alojándose en los estratos porosos y permeables (Custodio, 1976).

No toda la infiltración alcanza la zona saturada (agua subterránea), pues en mayor o menor proporción, una parte queda en la zona superior (agua edáfica) y vuelve a la atmósfera por el fenómeno de evapotranspiración. El volumen de agua que alcanza la zona saturada, a veces se denomina lluvia eficaz, infiltración eficaz, recarga natural o recarga profunda.

Humedecimiento del suelo es el volumen de agua procedente de las precipitaciones, que no escurre sobre la superficie, dando origen a la escorrentía superficial. Comprende la infiltración, la retención superficial (charcos) y la interceptación por la vegetación.

Estimación del escurrimiento:

Para poder estimar cuantitativamente el escurrimiento superficial se requiere del uso de los modelos hidrológicos. El método de las Curvas numeradas es un modelo hidrológico empírico que se utiliza en la actualidad para estimar el escurrimiento superficial.

Este método fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los E.U.A (USDA por sus siglas en inglés) a través del Servicio de Conservación del Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés) en la década de los 50. Se basa en el análisis de un gran número de escurrimientos para distintos acuíferos, donde una familia de curvas fue formulada a partir de dicha información para demostrar la relación entre el escurrimiento diario acumulado y la precipitación diaria acumulada. Cada una de las familias de curvas fue numerada y de esta manera surgió el nombre de Curvas numeradas (Fig. 5).

Las curvas son afectadas por la suma de las remociones de la lluvia por la infiltración, por la retención en la vegetación y por el almacenamiento en depresiones de la superficie del suelo, Si no existe ninguna remoción del agua la relación entre escurrimiento diario y lluvia diaria sería una línea recta a 45°. A medida que las remociones se incrementan las curvas se alejan de esta línea. La curva específica que ha de utilizarse es determinada por la evaluación de los siguientes factores: Las condiciones superficiales del suelo (determinadas por la

vegetación y las prácticas de cultivo), las clases de escurrimiento y la capacidad de almacenamiento del suelo.

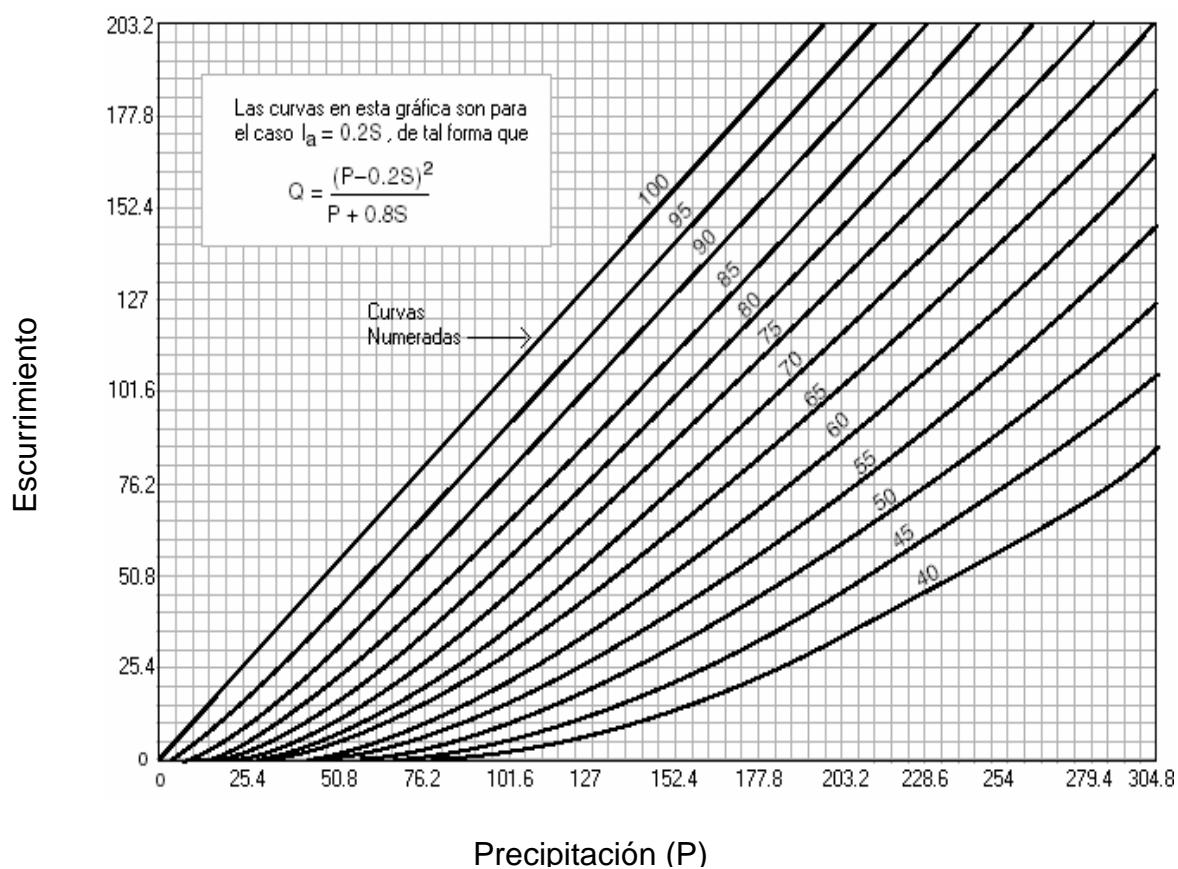


Figura 6. Método de Curvas numeradas para la estimación del escurrimiento

II. DATOS Y METODOLOGÍA

En este apartado se explicarán de forma breve los datos y la metodología empleados en este trabajo, los cuales consisten como punto de partida en la obtención de información mediante el desarrollo de una base de datos para dar comienzo a la etapa de investigación, por lo que se recabó la siguiente información:

- Datos de las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio
- Cartas topográficas digitales e impresas de INEGI a escala 1:50 000. I11D81 y H11B11
- Mapa geológico de GASTIL a escala 1:250 000
- Imagen satelital de Landsat 5 con fecha del 2 de junio de 2008
- Además de los siguientes programas: ER Mapper 7.1 y ArcGIS 9.3
- Modelo digital de elevación de alta resolución Lidar, Tipo TERRENO.
- Imagen de cortesía de la librería de Digital Globe con fecha del 3 de septiembre de 2009.

II.1 Análisis de datos de la estación meteorológica Olivares Mexicanos

El clima de una región se define cuantitativamente utilizando variables meteorológicas promediadas durante cierto tiempo, meses, años o bien, estaciones del año y entre las que se encuentran: temperatura promedio, viento, nubosidad, humedad y precipitación.

Con el fin de relacionar las variables climatológicas y de esta forma entender y predecir el comportamiento de la cuenca, es decir, la temporada de lluvias y la temporada seca se analizaron datos de la estación meteorológica Olivares Mexicanos (clave 2036), más cercana a la subcuenca Santa Rosa. Sus coordenadas son: Latitud $32^{\circ}02'57.12''$ N y longitud $-116^{\circ}40'50.8''$.

Este análisis fue realizado a partir de datos colectados diaria y mensualmente, esto se inició a partir del año 1969 hasta el año 2000. Para la

precipitación el análisis se dividió en 2 partes: la primera en donde se analizaron los datos para conocer la precipitación total anual y en la segunda parte se analizó la precipitación mensual promedio para conocer los meses de máximas y mínimas lluvias.

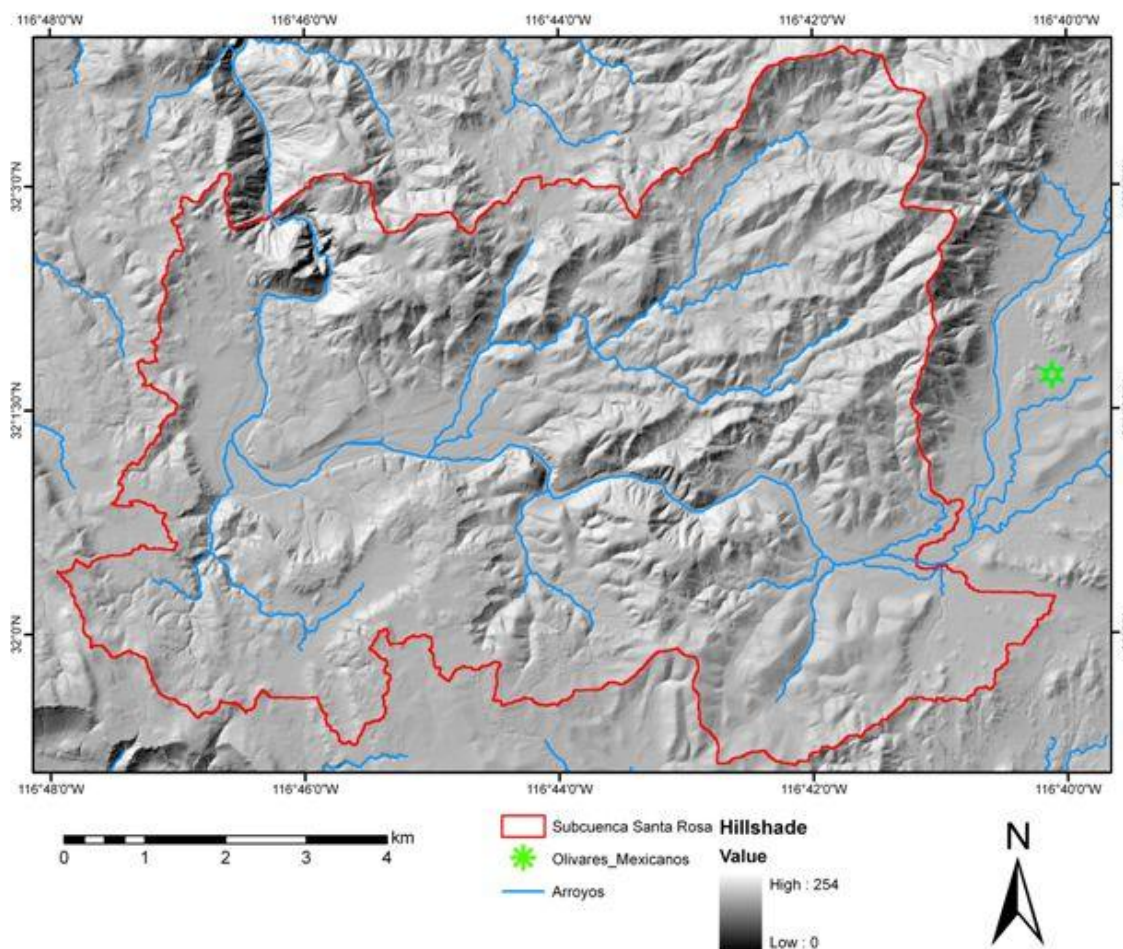


Figura 7. Ubicación de la estación meteorológica Olivares Mexicanos

II.2 Metodología

II.2.1 Descripción del método de las Curvas Numeradas para el escurrimiento

El procedimiento que marca el manual técnico 55 (NRCS 1986) indica que el método de las Curvas Numeradas para el escurrimiento depende de 4 factores: grupo hidrológico de suelo (GHS), tipo de cobertura superficial, condición

hidrológica y condiciones previas de humedad (CPH). Más adelante se describe la metodología para determinar las CN utilizando estos factores.

1) Grupo hidrológico de suelo

La tasa de infiltración de los suelos varía con frecuencia y es afectada por la permeabilidad de la subsuperficie así como las tasas de entrada de la superficie. Los suelos son clasificados en 4 grupos (A, B, C, y D) de acuerdo a su mínimo valor de infiltración, el cual es obtenido de un suelo desnudo después de un humedecimiento prologado.

- Grupo A: los suelos tienen bajo potencial de escurrimiento y alta infiltración aún cuando están saturados. Consisten principalmente de suelos profundos, de bien drenados a excesivamente drenados, arenas y gravas principalmente y tienen alto rango de transmisión de agua (>0.0021 mm/s).
- Grupo B: los suelos tienen valores de infiltración moderados cuando se encuentran completamente húmedos y consisten principalmente de suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen un índice moderado de transmisión de agua (0.0011-0.0021 mm/s).
- Grupo C: los suelos tienen baja infiltración cuando están completamente húmedos. Son suelos en su mayoría con una capa poco permeable que impide el movimiento vertical del agua y suelos de texturas moderadamente finas a finas. Esos suelos tienen un rango bajo de transmisión del agua.
- Grupo D: Los suelos tienen un alto potencial de escurrimiento. Tienen un bajo rango de infiltración cuando está completamente húmedo. Consisten en suelos arcillosos con un alto potencial de abultamiento, y un alto nivel freático permanente, con una capa de arcilla sobre o cerca de la superficie,

y son suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen un valor muy bajo de transmisión (0-0.0003 mm/s).

2) Tipo de cobertura

Esta se divide en suelos con vegetación, suelos desnudos y en superficies impermeables. Existen diversos métodos para determinar el tipo de cobertura. Los más comunes son reconocimiento en campo, fotografía aérea y mapas de uso de suelo. En la Tabla I se muestra los tipos de vegetación típicas para el área de estudio.

Tabla I. Curvas numeradas para regiones áridas y semiáridas. (NRCS, 1986).

Tipo de cobertura superficial	Condición hidrológica	Número de curva para cada Grupo Hidrológico de Suelo			
		A*	B	C	D
Herbácea: mezcla de maleza de pasto y hierbas; hierbas y arbustos, siendo los arbustos el menor elemento	Mala		80	87	93
	Regular		71	81	89
	Buena		62	74	85
Encino-aspen: mezcla de maleza de montaña formada por arbusto de encino, álamo, caoba de montaña, arce y otros arbustos	Mala		66	74	79
	Regular		48	57	63
	Buena		30	41	48

*Las curvas numeradas para el grupo A solo han sido desarrolladas para los arbustos del desierto

3) Condición hidrológica

Este factor indica los efectos que causa el tipo de cobertura en la infiltración y escurrimiento y generalmente se estima por la densidad de plantas y cobertura residual en las áreas de muestreo. Una condición hidrológica buena indica que el suelo tiene un bajo potencial de escurrimiento para ese grupo hidrológico de suelo y tipo de cobertura. Algunos factores a considerar para estimar este factor son: densidad de maleza de pastos y hierbas o de cosechas u otras áreas vegetativas;

cantidad de cobertura vegetal a lo largo del año; porcentaje de cobertura residual y el grado de rugosidad en la superficie.

4) Condiciones previas de humedad

El índice del potencial de escurrimiento antes de un evento de tormenta es la condición previa de humedad (CPH). Es un intento por evaluar la variación en las Curvas numeradas en un lugar entre un evento de tormenta y otro. Existen 3 clases de CPH:

Clase I: cuando la humedad del suelo es menor al 60% de la capacidad de campo las Curvas numeradas se ajustan a la siguiente ecuación

$$CN_{ajustada} = 0.39 * CN * e^{0.009 * CN} \quad (11)$$

Clase II: cuando la humedad de suelo está entre el 60% y menor que el 100% de la capacidad de campo las CN no reciben ajuste alguno.

Clase III: cuando la humedad del suelo está por encima de la capacidad de campo, las CN se ajustan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CN_{ajustada} = 1.95 * CN * e^{-0.006633 * CN} \quad (12)$$

Limitaciones del método

- Si la información de la precipitación pluvial utilizada es un evento histórico de tormenta, la exactitud del modelo disminuye.
- Las ecuaciones del método de las CN no tienen expresión para el tiempo, por lo tanto no toman en cuenta la duración de la lluvia ni su intensidad.
- El usuario debe entender la suposición reflejada en el término de la sustracción inicial I_a y debe asegurarse que esta suposición pueda aplicarse a las condiciones de estudio.
- El escurrimiento proveniente del derretimiento de nieve o lluvia sobre el suelo congelado no puede estimarse utilizando este método.

- El procedimiento de las CN es menos aproximado cuando el escurrimiento es menor que 12.7 mm. Como forma de comprobación, utilizar otro método para calcular el escurrimiento.

Una vez definidos estos 4 factores, se procede a determinar el escurrimiento superficial. La ecuación general para la determinación del escurrimiento es la siguiente:

$$Q = \frac{P - I_a^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

Donde

Q = escurrimiento (en pulgadas)

P = precipitación (en pulgadas)

S = Potencial máximo de retención después de que el escurrimiento inicia (en pulgadas)

I_a = sustracción inicial (en pulgadas)

La sustracción inicial son todas las pérdidas antes de que el escurrimiento haya comenzado. Incluye agua retenida en depresiones existentes en la superficie, agua interceptada por la vegetación, evaporación e infiltración. I_a Es altamente variable pero generalmente está correlacionada con los parámetros de suelo y cobertura. A través de estudios en varias cuencas pequeñas, se encontró que I_a se aproxima a través de la siguiente ecuación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

Una vez que I_a queda en función de S , la ecuación (1) queda en función de P y S , quedando Q de la siguiente forma:

$$Q = \frac{P - 0.2S^2}{P + 0.8S} \quad P \geq 0.2S \quad (3)$$

$$Q=0 \quad P \leq 0.2S$$

S está relacionada con las condiciones del suelo y cobertura de la cuenca a través de las Curvas Numeradas (CN), las cuales tienen un rango de 0 a 100, y S está relacionada a CN por:

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 100 \right) \quad \text{en pulgadas} \quad (4)$$

Para calcular el escurrimiento en mm, se introduce el dato de precipitación P en mm y S se convierte a mm mediante la siguiente ecuación:

$$S = \left(\frac{25400}{CN} - 2540 \right) \quad (5)$$

Discusión entre los términos I_a y S

Hawkins et al., (2001) analizaron los términos de I_a y S utilizando dos técnicas: análisis de eventos de lluvia y modelado de ajuste (mínimos cuadrados) y encontraron un valor más apropiado para I_a

$$I_a = 0.05S \quad (6)$$

Baltas et al., (2007) también realizaron un estudio para encontrar un valor más adecuado de I_a en una pequeña cuenca en Attica, Grecia ya que consideraron que este parámetro juega un papel muy importante en el cálculo del escurrimiento superficial, en el pico del hidrograma y en la distribución del escurrimiento en el tiempo. Este experimento lo realizaron analizando 18 eventos de tormentas y encontraron que los valores determinados de la sustracción inicial se asemejan al valor sugerido por Hawkins (2001).

Entonces una vez que I_a cambia su valor, las curvas numeradas y S se recalculan mediante las siguientes fórmulas:

$$CN_{\text{corregida}} = \frac{100}{18.79 \left[\frac{100}{CN} - 1 \right]^{1.15} + 1} \quad (7)$$

$$S = 1.33S^{1.15} \quad (8)$$

Relacionando las ecuaciones (5) y (8) resulta:

$$S = 1.33 \left(\frac{25400}{CN} - 2540 \right)^{1.15} \quad (9)$$

Finalmente, la ecuación para el cálculo del escurrimiento en mm será:

$$Q = \frac{P - 0.05S_{0.05}^2}{P + 0.95S_{0.05}} \quad P \geq 0.05S \quad (10)$$

$$Q=0 \quad P \leq 0.05S$$

II.2.2 Trabajo de campo y análisis de laboratorio

Tratando de cubrir la mayor área posible de la cuenca y en sitios con diferentes características (Fig. 6), se realizaron cinco salidas de campo antes, durante y posterior al período de lluvias, donde se tomaron muestras de los primeros cinco centímetros de suelo con la ayuda de un pico, colectando cada muestra en una bolsa de plástico resellable y etiquetada, además con GPS se tomaron las coordenadas geográficas de cada sitio de muestreo, también se tomaron notas acerca de las características del terreno tales como pendiente y tipo de vegetación. En total se obtuvieron 38 muestras de campo (Tabla II).

Tabla II. Muestras tomadas en campo

	Fecha de muestreo	Número de muestras recabadas
Antes de las lluvias	10-oct-2008	5
Durante las lluvias	27-feb-2009	10
Durante las lluvias	06-mar-2009	13
Después de las lluvias	19-may-2009	8
Después de las lluvias	20-may-2009	2

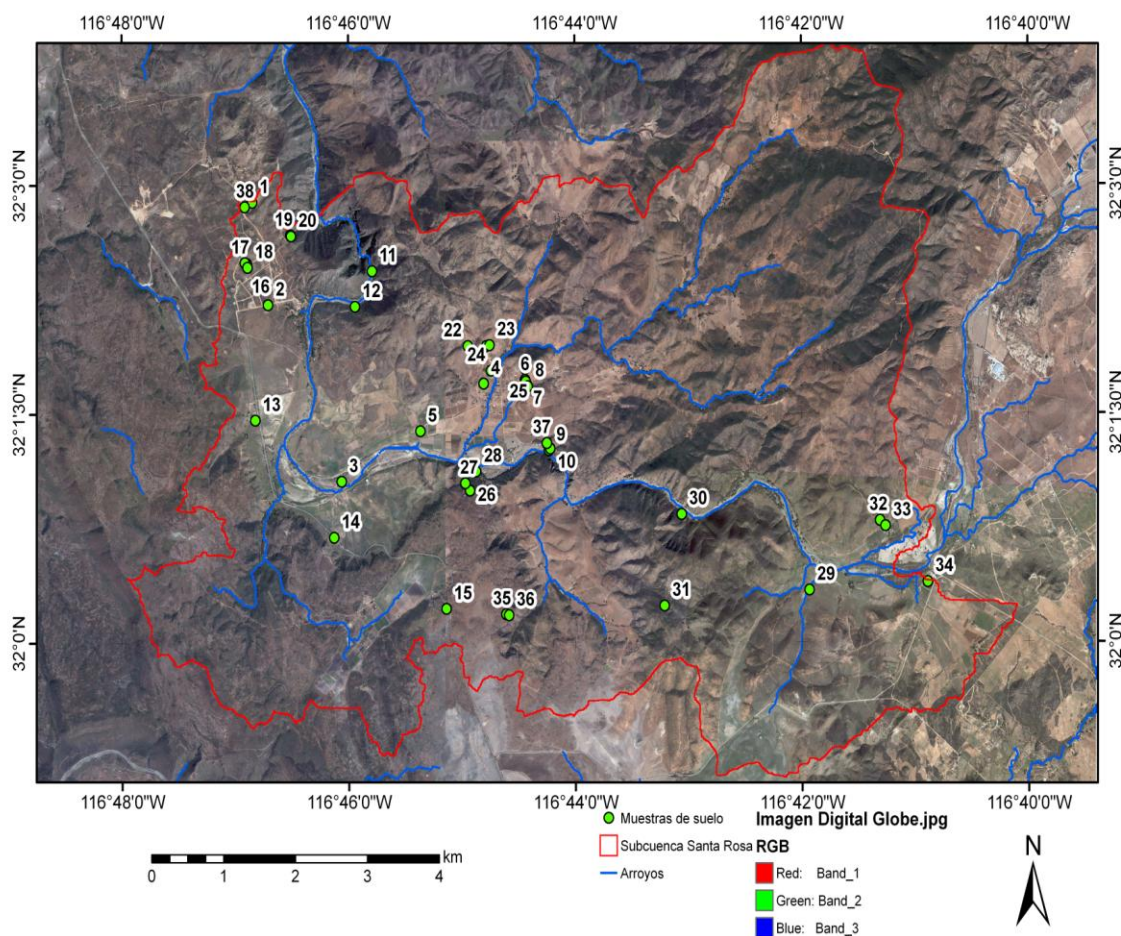


Figura 8. El área de estudio se delimita mediante la línea roja, las muestras tomadas en campo se indican con puntos verdes, indicados con número de muestra.

Análisis de laboratorio

Después de realizar cada salida de campo, inmediatamente se fue al laboratorio de petrología de CICESE con la finalidad de que las muestras perdieran la menor humedad posible; en el laboratorio se procedió a obtener el contenido de humedad gravimétrico y a realizar el análisis de granulometría.

Contenido de humedad gravimétrico

Para la determinación del contenido de humedad gravimétrico de cada muestra se siguió el procedimiento señalado por La Sociedad Americana de

Prueba y Materiales (ASTM), el cual consiste en separar cerca de 30 g de muestra y ponerlas a secar en un horno a una temperatura de 120°C por un período de 24 horas para posteriormente volver a pesarse. La diferencia entre los pesos antes y después del secado representará el contenido de humedad gravimétrico de la muestra.

Granulometría

Siguiendo el procedimiento que marca el manual de Técnicas petrográficas para el estudio de rocas y sedimentos en el laboratorio de petrología del CICESE, se procedió a tamizar cada muestra seca de acuerdo a lo siguiente: utilizando la muestra de suelo ya seca, se tamizaron en un juego de tamices con un tamaño de malla de 0 a 4 ϕ (Tabla III). Se sustrajo el contenido de arena de cada tamiz y se obtuvo su peso.

Se calculó el porcentaje de peso de cada tamiz y se procedió a clasificar la muestra de acuerdo al tamaño de grano (arena gruesa, media, fina o muy fina; Tabla III), los limos y las arcillas se contabilizaron de forma general. Esta parte del trabajo se realizó con el programa SYSGran 3.0.

Tabla III. Granulometría

Nombre	Escala Wentworth	Escala Phi	Nombre
US Standard	mm	ϕ	Wentworth
Arena	1	0.0 0.5	Arena gruesa
	1/2	1.0 1.5	Arena media
	1/4	2.0 2.5	Arena fina
	1/8	3.0 3.5	Arena muy fina
Limo	1/16	4.0 +4	Limo grueso

Capacidad de campo

La capacidad de campo (Cc) es un parámetro que nos dice la cantidad de agua que el suelo puede retener. Es una característica de cada suelo y depende fundamentalmente de su textura (Tabla IV) cantidad de materia orgánica y de su grado de compactación. Se valora por el porcentaje en volumen de agua existente con respecto al suelo seco.

$$C_c = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \times 100 \quad (13)$$

Donde:

Cc= capacidad de campo

Psh= peso del suelo húmedo

Pss= peso del suelo seco

De acuerdo a la clase textural a la cual pertenece un determinado suelo se pueden considerar los rangos admisibles de capacidad de campo que se muestran en la Tabla IV:

Tabla IV. Capacidad de campo del suelo de acuerdo a la clase textural

Clase textural	Capacidad de campo %
Arenoso	2.5-7.5
Franco arenoso	7.5-20.5
Franco limoso	20.5-33.0
Arcilloso	33.0-50.0

II.2.3 Análisis de datos de satélite

Con el objetivo de corroborar y mejorar la resolución espacial de algunos parámetros necesarios para la definición de las Curvas Numeradas, tales como grupo hidrológico de suelo, tipo de cobertura superficial y condición hidrológica, se utilizó la siguiente información: La carta geológica de GASTIL et al., (1975) para definir el grupo hidrológico de suelo; la imagen de satélite Landsat para analizar el

tipo de cobertura superficial y la condición hidrológica determinando para ello el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado; y por último con el Modelo Digital de Elevación, se calculó la pendiente expresada en porcentaje para analizar la condición hidrológica del suelo.

Determinación del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado

Para poder evaluar el espesor de la cobertura vegetal se utilizó el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés). En grandes superficies a menudo es difícil de evaluar la cobertura total de vegetación. Las técnicas de teledetección vía satélite que incorporan sensores espectrales para establecer índices de vegetación, han mostrado ser muy útiles para resolver este problema (Campo et al 2005). Los índices de vegetación son una alternativa de medición de cantidad de vegetación, así como su calidad y desarrollo en base a la medición por medio de sensores remotos instalados comúnmente desde una plataforma espacial, de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación refleja.

Las plantas absorben radiación solar en la región espectral de radiación fotosintética activa la cual es usada como fuente de energía en el proceso de fotosíntesis. Todos los organismos fotosintéticos contienen uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible que iniciará las reacciones fotoquímicas y fotosintéticas. Dos bandas del espectro, la azul (430 nm) y la roja (58-68 nm) muestran la cantidad de energía absorbida por las plantas; en contraste, la banda del infrarrojo cercano (725-1100 nm) (región invisible para el ojo humano) actúa justo de la forma inversa (Verdín et al 2003). El NDVI se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (14)$$

Donde

NDVI : Índice de Vegetación Diferencial Normalizado

NIR :Banda infrarrojo cercano

VIS : Banda rojo visible

Las variables de las bandas infrarrojo cercano y rojo visible están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. Estas reflexiones espectrales son en sí cocientes de la radiación, reflejada sobre la radiación entrante en cada banda espectral individual; por tanto, toman valores entre un rango de 0.0 a 1.0. El NDVI varía entre -1.0 y +1.0. Weier y Herring (2000) indican que valores muy bajos (menores a 0) corresponden a zonas descubiertas, arena, roca, agua o nieve; los valores moderados a pastizales (0-0.1) y arbustos (0.1-0.3); mientras que los valores más altos indican bosques templados y/o tropicales.

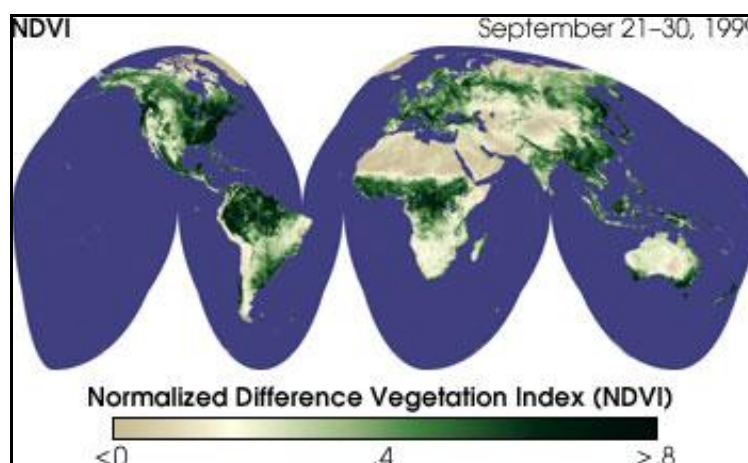


Figura 9. Mapa satelital de vegetación muestra la densidad de plantas alrededor de todo el planeta (Weier y Herring 2000).

Cálculo de la pendiente del terreno

Este es un dato muy importante para el cálculo del escurrimiento, ya que este factor aporta la relación directa del potencial escorrentía/infiltración, de aquí que esto significa que una pendiente suave favorece a la infiltración mientras que una alta pendiente favorece al escurrimiento. La pendiente se calculó utilizando el programa ArcGIS 9.3 empleando como dato de entrada el Modelo Digital de Elevación. (INEGI 2006).

II.2.4 Obtención de las Curvas Numeradas

Una vez analizados los datos de geología, índice de Vegetación y pendiente se incorporaron a la Tabla I para definir las CN para regiones áridas y semiáridas, dichas CN van de un mínimo de 30 a un máximo de 93, de acuerdo al manual técnico 55 (NRCS 1986).

El grupo hidrológico de suelos se asignó de acuerdo a la geología existente en la región: B para el aluvión y depósitos inmaduros y C a las rocas ígneas (roca volcánica no diferenciada, tonalita, granodiorita, basalto y andesita basáltica).

El tipo de cobertura vegetal se definió por los valores aportados por el NDVI, partiendo de que valores menores muy bajos corresponden a zonas descubiertas, valores medios a pastos y arbustos (Weier y Herring, 2000) y (Kurczyn Robledo, 2005); además aportó la información para definir la condición hidrológica, dado que este factor indica el efecto que causa la cobertura vegetal en el escurrimiento y la infiltración, es decir, vegetación densa favorece a la infiltración mientras que suelos desnudos favorecen el escurrimiento. Los valores quedaron definidos de la siguiente forma: valores menores a -0.1 se consideró sin vegetación y una condición hidrológica mala; valores de (-0.1 hasta 0.2) como maleza de pastos y hierbas y una condición hidrológica regular; finalmente los valores de (0.2-0.6) se consideraron como arbustos y una condición regular buena es decir favorable para la infiltración.

La pendiente expresada en porcentaje, también aportó información para definir la condición hidrológica; las bajas pendientes (0-0.8%) se consideraron como favorables a la infiltración (condición hidrológica buena); las pendientes medias (8-25%) se definieron como condición hidrológica regular; y las pendientes altas >25% se consideraron favorables al escurrimiento por lo tanto se definió como condición hidrológica mala.

Tabla V. Incorporación de información de NDVI, pendiente y geología para la determinación de las Curvas Numeradas

Tipo de cobertura superficial	Valores NDVI	Condición hidrológica	Pendiente (%)	Grupo hidrológico de suelo		
				B (aluvión y depósitos inmaduros)	C (rocas ígneas)	D* (rocas expuestas)
Herbácea: mezcla de maleza de pastos y hierbas.	>(-0.1-0.2)	Mala	>25%	80	87	93
		Regular	>8-25%	71	81	
		Buena	0-8%	62	74	
Encino-aspen: mezcla de maleza de montaña formada por arbustos.	>(0.2-0.6)	Mala	>25%	66	74	
		Regular	>8-25%	48	57	
		Buena	0-8%	30	41	

*En la clase de escurrimiento D solo se tomó el valor máximo de escurrimiento pues esta clase de escurrimiento están relacionada con las rocas expuestas en el área de estudio.

El procedimiento que marca el manual técnico 55 (NRCS 1986) asigna valores muy puntuales de CN por lo que la variabilidad de la información de la pendiente y la vegetación no puede mostrarse, por lo que a fin de poder mostrar con mayor detalle esta variación espacial y su relación con las CN se diseñó un algoritmo que ajusta diferentes rectas para de esta forma poder calcular las CN (Tabla VI).

Para el diseño se utilizaron los valores definidos por la Tabla V, se diseñaron 12 rectas con límites establecidos de acuerdo a su valor de NDVI o pendiente (ver figuras 10 y 11). Las CN se calculan haciendo un promedio entre NDVI y pendiente (siempre y cuando la pendiente sea baja o media), pero cuando la pendiente es mayor al 25% asigna un valor de CN puntual que corresponde a condición hidrológica mala.

Una vez calculadas las CN, se introdujo la ecuación (7) para calcular nuevamente las Curvas Numeradas debido al cambio en el valor de la Sustracción Inicial.

Posteriormente se realiza un último ajuste a las CN de acuerdo a las Condiciones Previas de Humedad (clase I, II ó III) mediante las ecuaciones (11) o (12).

Tabla VI. Algoritmo para la determinación de las CN

Grupo hidrológico de suelo	NDVI			Pendiente			Curva numerada
	<(-0.1)	(-0.1-0.2)	(>0.2-0.6)	<8%	(8-25%)	>25%	
B	X						30 mínimo escurrimiento
C	X						93 máximo escurrimiento
B		X		X			(NDVI+Pendiente)/2
		X			X		(NDVI+Pendiente)/2
		X				X	80
			X	X			(NDVI+Pendiente)/2
			X		X		(NDVI+Pendiente)/2
			X			X	66
C		X		X			(NDVI+Pendiente)/2
		X			X		(NDVI+Pendiente)/2
		X				X	87
			X	X			(NDVI+Pendiente)/2
			X		X		(NDVI+Pendiente)/2
			X			X	74

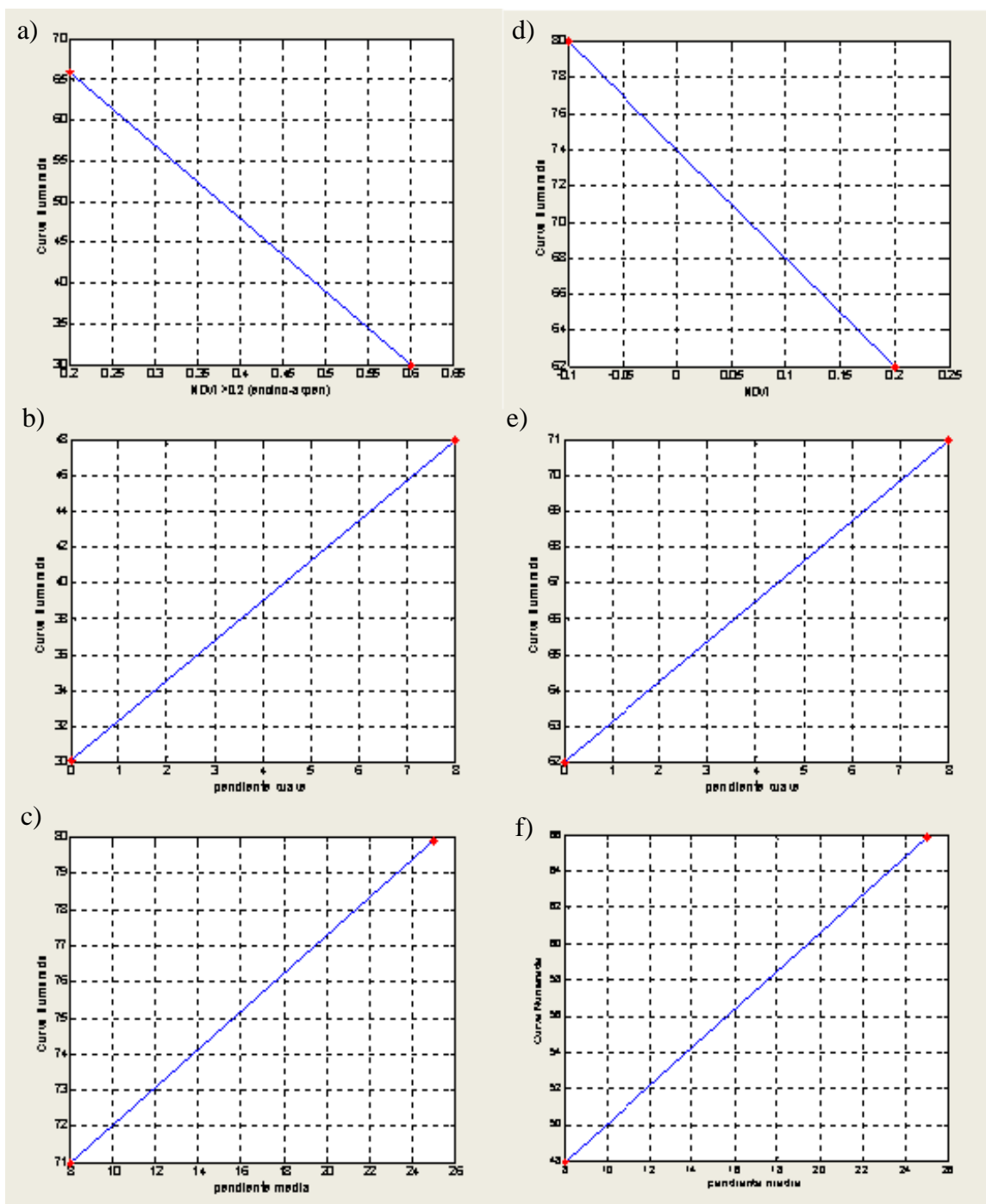


Figura 10. Rectas para el grupo hidrológico de suelos B (aluvión y depósitos inmaduros). Las gráficas a, b y c corresponden a un tipo de cobertura superficial correspondiente a maleza de pastos y hierbas; las gráficas d, e y f corresponden a la cobertura vegetal de encino-aven.

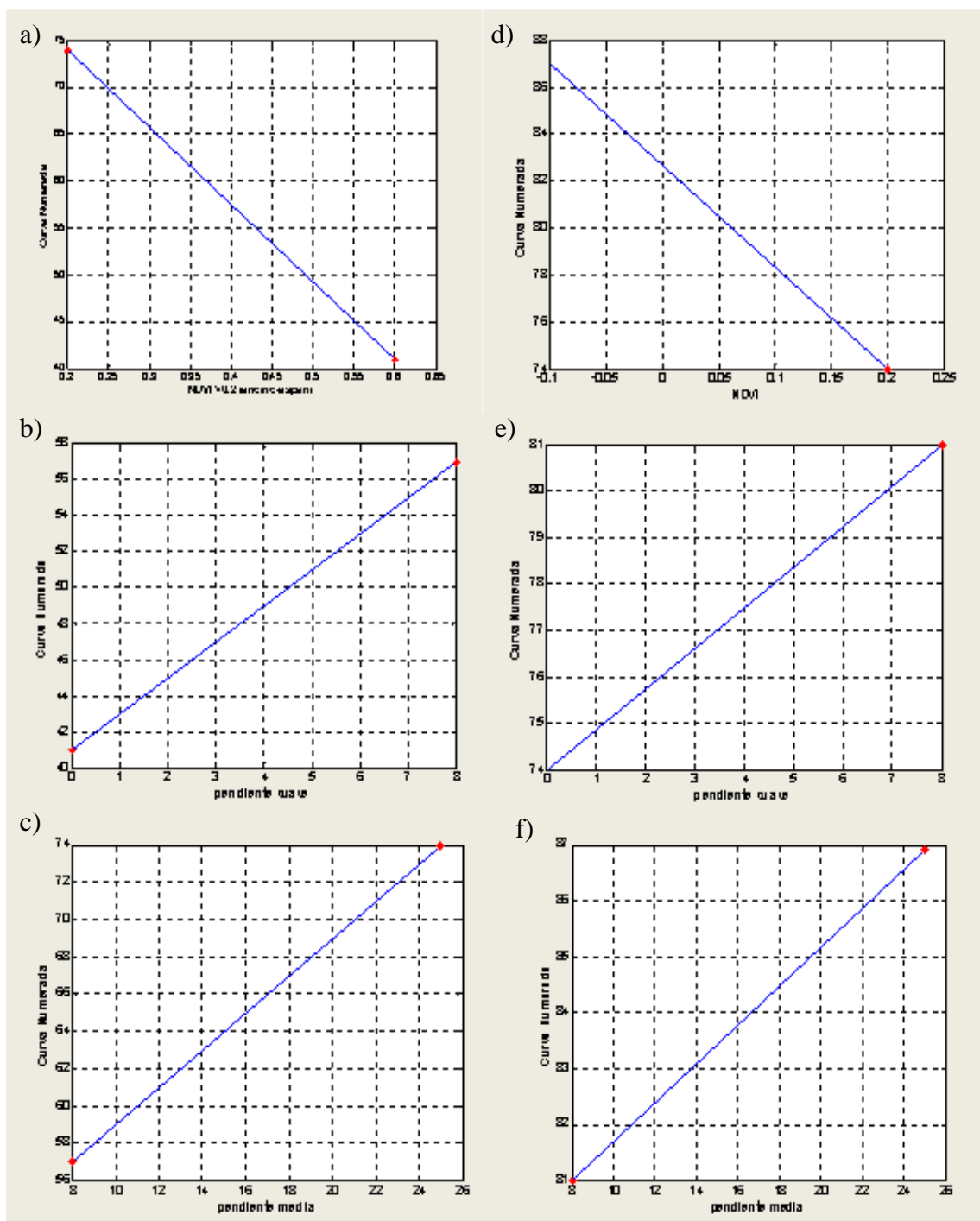


Figura 11. Rectas para el grupo hidrológico de suelos C (rocas ígneas). Las gráficas a, b y c corresponden a un tipo de cobertura superficial correspondiente a maleza de pastos y hierbas; las gráficas d, e y f corresponden a la cobertura vegetal de encino-aspén.

II.3 Estimación de los volúmenes de escurrimiento aportados por la subcuenca Santa Rosa

Una vez determinados los valores de las CN, se calcula el valor de S en mm mediante la ecuación (9). Para el cálculo de Q en mm se utiliza la ecuación (10), el análisis de escurrimiento se dividió en dos partes: la primera comprende los años 1969-2000, y la segunda parte los años 2001-2030. Para la segunda serie de datos se trabajó con escenarios de cambio en la precipitación mensual en la estación Olivares Mexicanos (Arriaga Ramírez y Cavazos Pérez, 2009). Este análisis se realizó con la finalidad de hacer un pronóstico acerca de qué comportamiento podría tener la cuenca durante los próximos 20 años. Se utilizó el mismo algoritmo de CN explicado anteriormente.

Finalmente se convirtieron las unidades de Q en mm a unidades de volumen m^3 de la siguiente forma:

$$Q(m^3) = Q(mm) * \left(\frac{1m}{1000mm} \right) * \text{área}(m^2) \quad (15)$$

III. RESULTADOS

III.1 Análisis de la estación meteorológica Olivares Mexicanos

El análisis en la estación hidrométrica Olivares Mexicanos permitió relacionar los elementos climáticos de temperatura media, precipitación y evaporación potencial y estos fueron un factor para la definición de las Condiciones Previas de Humedad.

III.1.1 Precipitación

En el análisis de precipitación total anual llevado a cabo de 1969 al 2000 se obtuvo que la media anual es de 337.41 mm; el año que presentó más lluvia fue en 1978 con 801.1 mm, precipitaciones muy altas durante enero (177.5mm), febrero (179.5mm), marzo (214.1mm) y noviembre (177mm); el año que se consideró más seco fue 1989 con 82.5mm, 1997 es un año incompleto debido a que los datos de precipitación de enero y marzo no fueron reportados (Fig. 12).

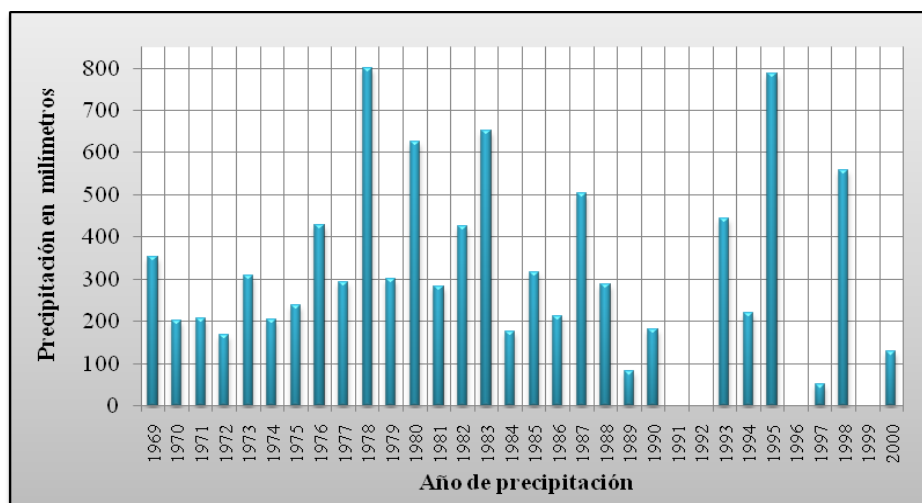


Figura 12. Resultados de precipitación total anual de 1969-2000. Estación Olivares Mexicanos

El análisis de precipitación mensual promedio muestra que el período de lluvias es mayor en los meses de noviembre a marzo; junio, julio y agosto los meses que presentan precipitación más baja, la media de este período de análisis es de 28.58 mm (Fig. 13).

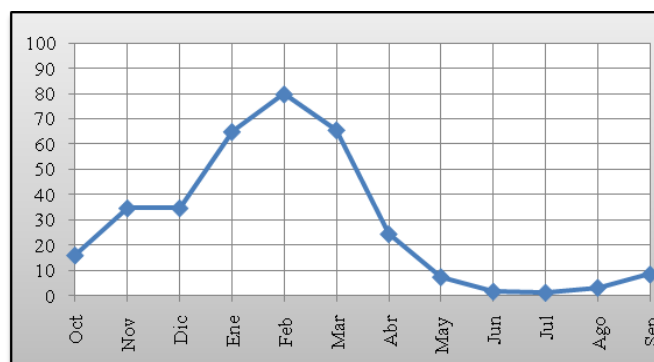


Figura 13. Resultados de precipitación mensual promedio en la estación Olivares Mexicanos

III.1.2 Temperatura

El análisis de temperatura promedio mensual muestra que las temperaturas más bajas se presentan durante los meses de diciembre, enero y febrero, siendo la más baja diciembre con 9.6°C; las más altas en los meses de julio, agosto y septiembre, siendo agosto el más alto y 20.03°C; la media de este análisis es de 12.46°C (Fig. 14).

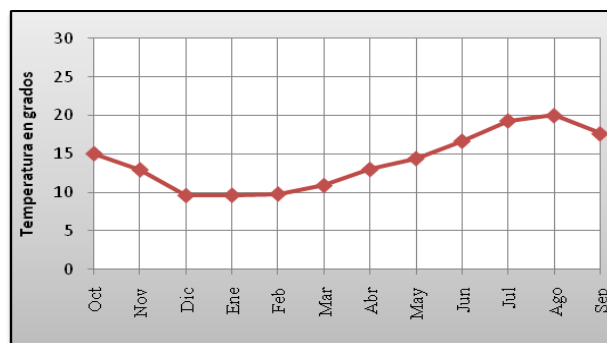


Figura 14. Resultados del análisis de temperatura mensual promedio en la estación Olivares Mexicanos

III.1.3 Evaporación potencial

La evaporación potencial mínima se presenta durante los meses de diciembre, enero y febrero, siendo la más baja el mes de diciembre con 67.71mm; la más alta se presenta durante los meses de junio, julio y agosto, siendo julio el más alto con 212.64mm; la media de este análisis es de 111.80mm (Fig. 15).

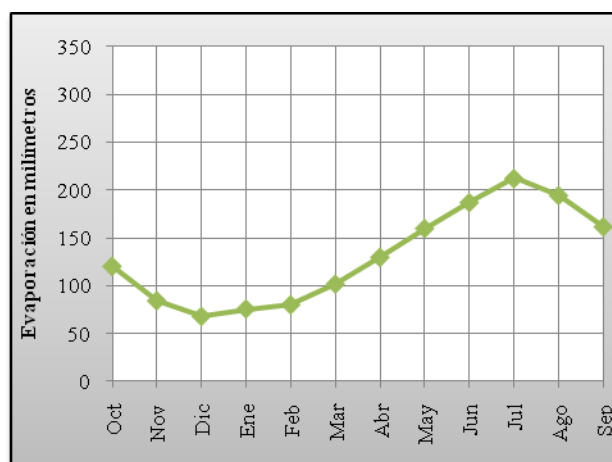


Figura 15. Resultados del análisis de evaporación potencial promedio mensual en la estación Olivares Mexicanos.

Finalmente lo que se observó en el análisis de estas variables climáticas es que la temperatura y la evaporación muestran un comportamiento similar, y la precipitación un comportamiento contrario a estos dos factores.

III.2 Trabajo de laboratorio

El análisis de laboratorio nos permitió tener un indicativo acerca de la influencia que pueden tener el tamaño de grano del suelo y el contenido de humedad gravimétrico para determinar la capacidad de campo y las condiciones previas de humedad.

III.2.1 Granulometría

Las muestras de los sedimentos presentan una tendencia hacia las arenas medias y gruesas; de un total de 38 muestras, 20 se clasificaron como arenas medias; 16 como arenas gruesas y de estas 2 se clasificaron como arenas muy gruesas; finalmente solo 2 muestras resultaron ser arenas finas (Tabla VII). El porcentaje en contenido de arenas fue mayor al 90% y menor al 6% en contenido de limos y arcillas, por lo que clasificar el suelo en tipo franco arenoso (mayor contenido de arena).

Tabla VII. Resultados del análisis textural para los sitios de muestreo.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
arena media	arena gruesa	arena media	arena gruesa	arena fina	arena gruesa	arena gruesa	arena gruesa	arena fina	arena media
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
arena gruesa	arena media	arena gruesa	arena gruesa	arena gruesa	arena gruesa	arena media	arena media	arena media	arena media
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
arena media	arena media	arena media	arena media	arena gruesa	arena gruesa	arena gruesa	arena muy gruesa	arena media	arena media
31	32	33	34	35	36	37	38		
arena gruesa	arena media	arena media	arena media	arena media	arena media	arena muy gruesa	arena media		

III.2.2 Contenido de humedad gravimétrico

El análisis de humedad de suelo de las muestras tomadas en diferentes fechas y con diferentes características del sitio muestra un porcentaje de humedad muy bajo, menor al 2% (Tabla VIII).

Tabla VIII. Resultados del contenido de humedad gravimétrico en las muestras de suelo tomadas antes del período de lluvia.

Muestra	Fecha de la muestra	%Humedad
1	10/oct/08	1.2
2	10/oct/08	1.8
3	10/oct/08	0.6
4	10/oct/08	1.4
5	10/oct/08	0.8

El mayor porcentaje de humedad se encontró en las muestras tomadas en los meses de febrero y marzo es decir, en la temporada de lluvias (Tabla IX); y nuevamente este porcentaje de humedad bajó considerablemente en las muestras que fueron tomadas durante el mes de mayo, después de la temporada de lluvias (Tabla X).

Tabla IX. Resultados del contenido de humedad gravimétrico en las muestras de suelo tomadas durante el período de lluvia.

Muestra	Fecha	%Humedad	Muestra	Fecha	%Humedad
6	27/feb/09	19.3	18	06/mar/09	4.2
7	27/feb/09	9.7	19	06/mar/09	4.2
8	27/feb/09	23.0	20	06/mar/09	4.0
9	27/feb/09	7.3	21	06/mar/09	5.6
10	27/feb/09	28.8	22	06/mar/09	7.3
11	27/feb/09	16.7	23	06/mar/09	1.3
12	27/feb/09	4.4	24	06/mar/09	5.3
13	27/feb/09	14.9	25	06/mar/09	5.1
14	27/feb/09	4.2	26	06/mar/09	9.2
15	27/feb/09	2.7	27	06/mar/09	10.4
16	06/mar/09	14.3	28	06/mar/09	18.9
17	06/mar/09	8.4			

Tabla X. Resultados del contenido de humedad gravimétrico de las muestras de suelo tomadas posteriormente al período de lluvias.

Muestra	Fecha	%Humedad	Muestra	Fecha	%Humedad
29	19/may/09	0.2	34	19/may/09	0.1
30	19/may/09	0.2	35	19/may/09	1.8
31	19/may/09	1.8	36	19/may/09	1.6
32	19/may/09	0.4	37	20/may/09	2.9
33	19/may/09	0.1	38	20/may/09	0.3

III.2.3 Capacidad de campo

La capacidad de campo quedó definida por la clase textural, el suelo resultó ser del tipo franco-arenoso (mayor porcentaje de arenas), por lo que tendrá una capacidad de campo de 7.5-20.5% de la humedad de suelo. En otras palabras, el 20.5% de humedad de suelo, significa que es el máximo de capacidad de campo (100%) y que arriba de este porcentaje, el agua comenzará a escurrir ya que el suelo no puede retener más agua; si por el contrario, la capacidad de campo es menor al 7.5% de la humedad de suelo significa que esta agua infiltrará en el suelo para satisfacer las necesidades del mismo o se perderá por evapotranspiración debido a las altas temperaturas. Los resultados de capacidad de campo de las muestras de suelo son los siguientes:

Las muestras tomadas antes del tiempo de lluvias mostraron una capacidad de campo muy baja, menor al 10% lo cual supone que esta agua se infiltra o bien se evapotranspira, con excepción de la muestra 2 (Tabla XI).

Tabla XI. Resultados de Capacidad de campo en las muestras de suelo tomadas antes del período de lluvia.

Muestra	Fecha de la muestra	Capacidad de campo
1	10/oct/08	6.0
2	10/oct/08	8.8
3	10/oct/08	2.8
4	10/oct/08	6.8
5	10/oct/08	3.9

Las muestras recabadas durante el tiempo de lluvias, aumentaron considerablemente la capacidad de campo, las muestras 8 y 10, sobrepasaron el 100% debido a que estas fueron tomadas en el cauce del arroyo (Tabla XII).

Tabla XII. Resultados de Capacidad de campo en las muestras de suelo tomadas durante el período de lluvias.

Muestra	Fecha	Cap. Campo %	Muestra	Fecha	Cap. Campo %
6	27/feb/09	93.9	18	06/mar/09	20.4
7	27/feb/09	47.5	19	06/mar/09	20.4
8	27/feb/09	112.1	20	06/mar/09	19.7
9	27/feb/09	35.6	21	06/mar/09	27.4
10	27/feb/09	140.4	22	06/mar/09	35.6
11	27/feb/09	81.5	23	06/mar/09	6.2
12	27/feb/09	21.5	24	06/mar/09	26.0
13	27/feb/09	72.9	25	06/mar/09	24.7
14	27/feb/09	20.5	26	06/mar/09	45.0
15	27/feb/09	13.1	27	06/mar/09	50.7
16	06/mar/09	69.8	28	06/mar/09	92.1
17	06/mar/09	40.8			

Las muestras tomadas en el mes de mayo posteriores a la época de lluvia bajaron la capacidad de campo, resultó ser menor al 10%, con excepción de la muestra 37 que fue de 14.2 % (Tabla XIII).

Tabla XIII. Resultados de capacidad de campo en las muestras tomadas después del período de lluvia.

Muestra	Fecha	Cap. Campo %	Muestra	Fecha	Cap. Campo %
29	19/may/09	1.0	34	19/may/09	0.4
30	19/may/09	1.2	35	19/may/09	8.9
31	19/may/09	8.9	36	19/may/09	7.8
32	19/may/09	1.8	37	20/may/09	14.2
33	19/may/09	0.7	38	20/may/09	1.3

III.3 Datos de satélite

El análisis de los datos de satélite permitió complementar la información obtenida en campo y definir las Curvas Numeradas.

III.3.1 Geología

En el mapa geológico se indica que una gran parte de la cuenca es roca ígnea (Rocas volcánicas, basalto, tonalita y granodiorita) y una parte menor en lugares cercanos al arroyo de Guadalupe se observó la presencia de rocas sedimentarias. Mediante la carta geológica y complementando con las observaciones tomadas en campo, se encontraron 2 grupos hidrológicos en la cuenca Santa Rosa: B para las rocas sedimentarias (Qal, Kfl, KfmR) y C para las rocas ígneas (Kpbv, KGd, Kt, Mba) (Fig. 16).

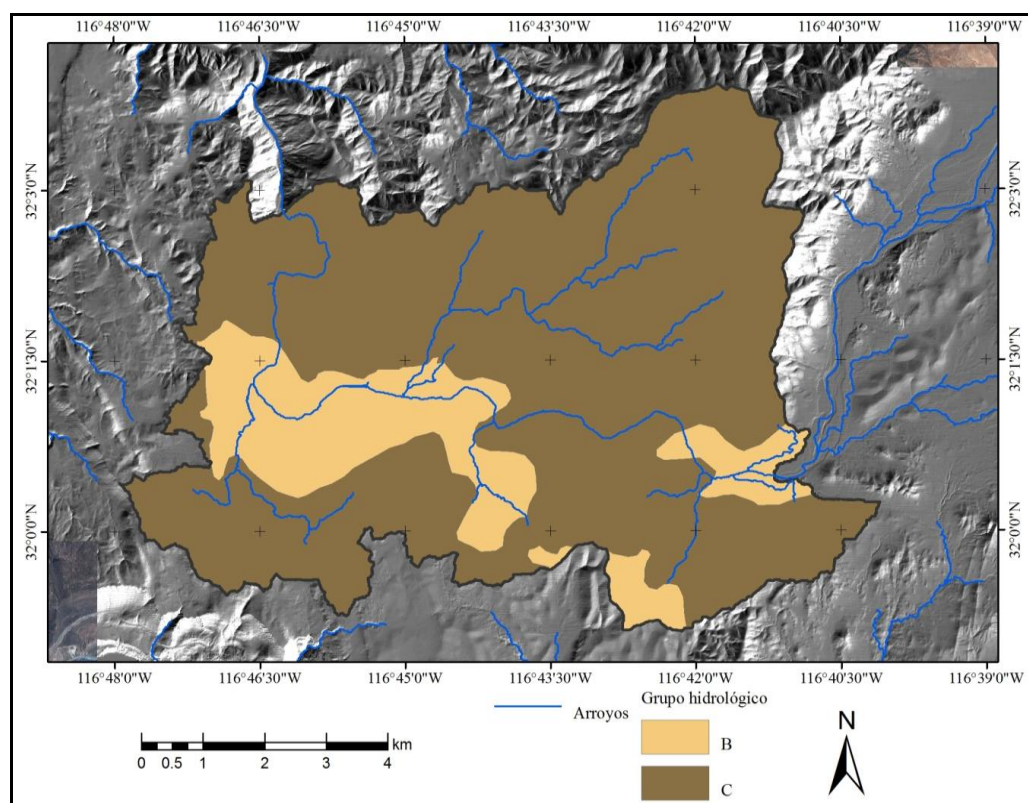


Figura 16. Resultados de la clasificación de Grupo Hidrológico de Suelos en la subcuenca Santa Rosa

III.3.2 Pendiente

Mediante el Modelo Digital de Elevación se determinó la pendiente del terreno. Las zonas en rojo muestran los valores de más alta pendiente cercanos al 100% se encuentran en la serranía y en la salida de la cuenca; en color verde se representaron las pendientes más bajas (<30%), se observó una zona de planicie en la zona del aluvión y depósitos inmaduros (Fig. 17).

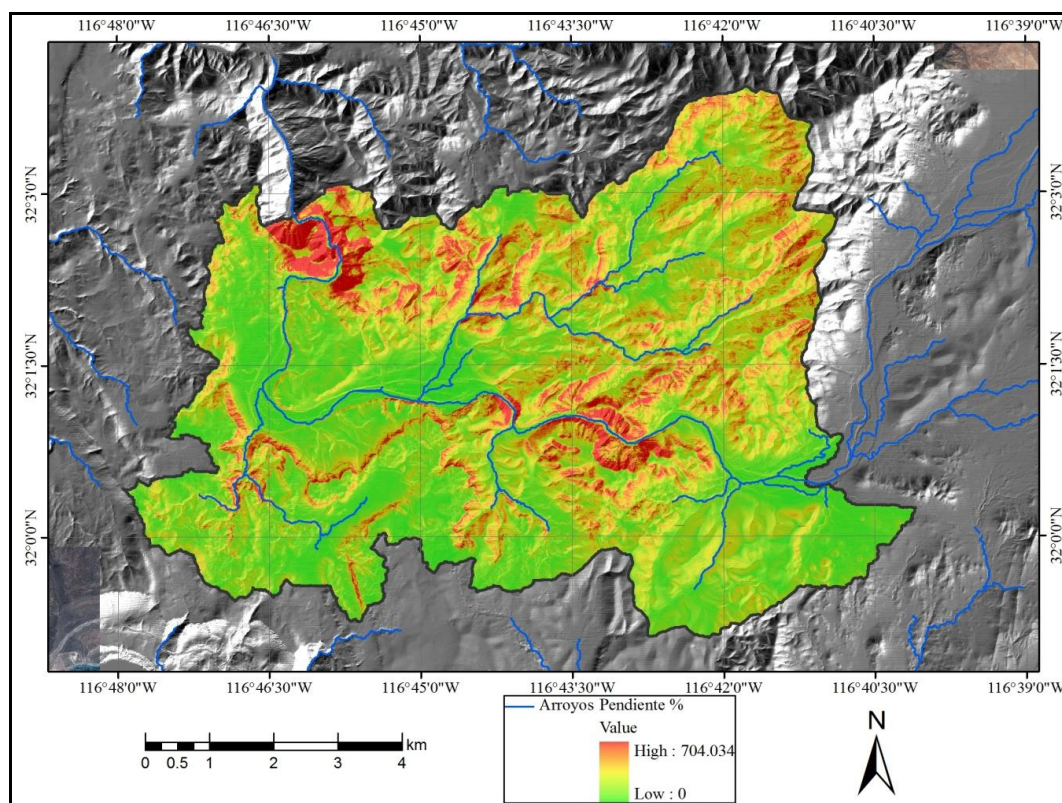


Figura 17. Resultados del análisis de pendiente en la subcuenca Santa Rosa

III.3.3 Índice de Vegetación Diferencial Normalizado

El índice de vegetación de diferencia normalizado, NDVI por sus siglas en ingles, muestra un rango de valores 0.05 a 0.58 como máximo, lo cual significa que a pesar de que la imagen es del mes de junio de 2008, un mes donde hay muy poca precipitación, hay presencia de vegetación en la mayor parte del área, aunque con valores muy bajos (0.005 a 0.2). Los valores más altos de NDVI >0.2

se encuentran en muy pocas partes de la cuenca distribuidos en la parte más alta de la cuenca y en la salida (Fig.18).

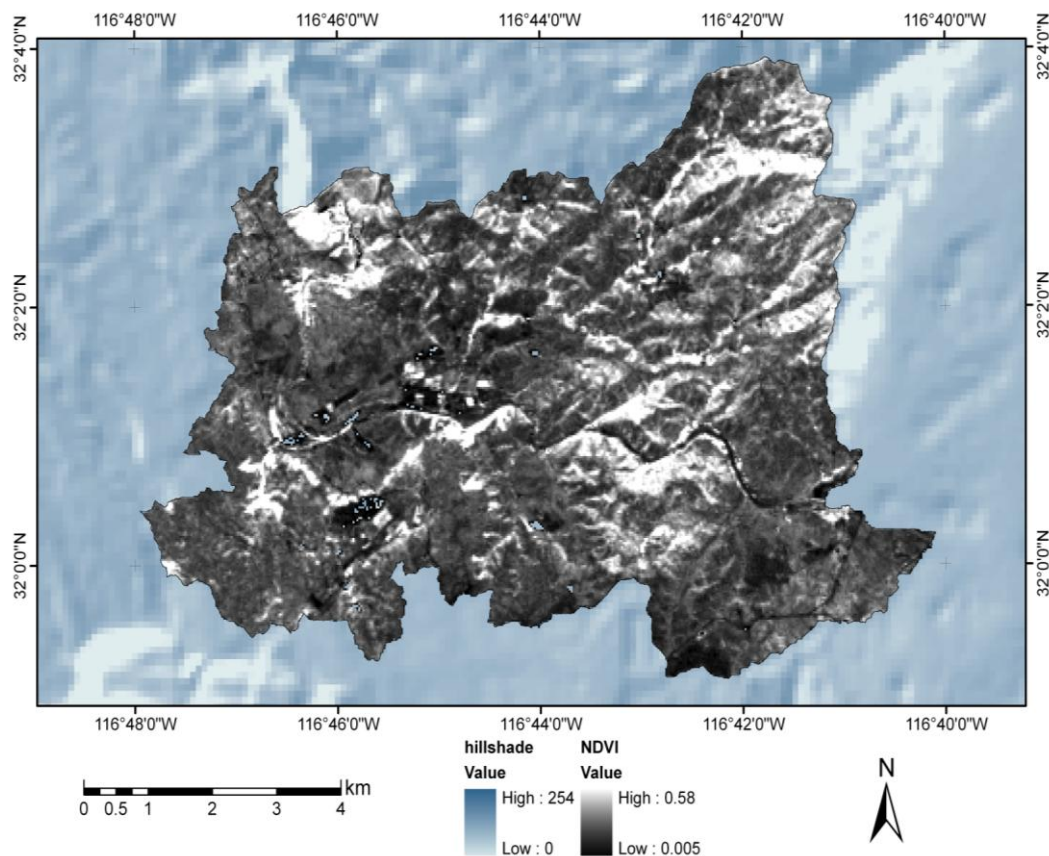


Figura 18. Resultados del análisis del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado

III.4 Aplicación del método de Curvas Numeradas

III.4.1 Obtención de las Curvas Numeradas

Una vez analizados los datos de satélite y siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior, se determinaron las Curvas Numeradas para el cálculo del escurrimiento (Fig. 19).

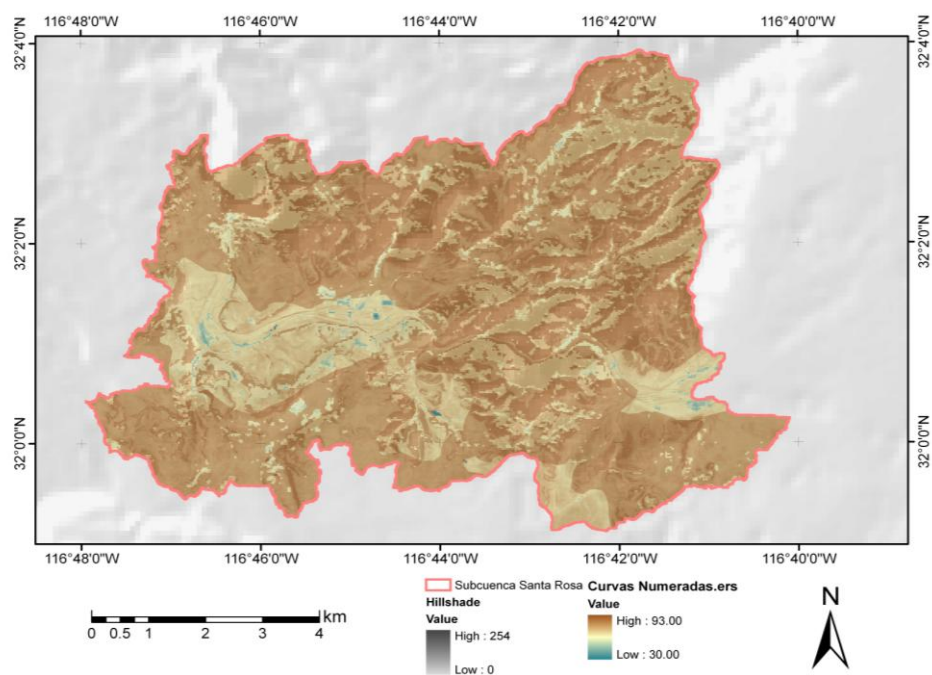


Figura 19. Resultados de la Obtención de Curvas Numeradas

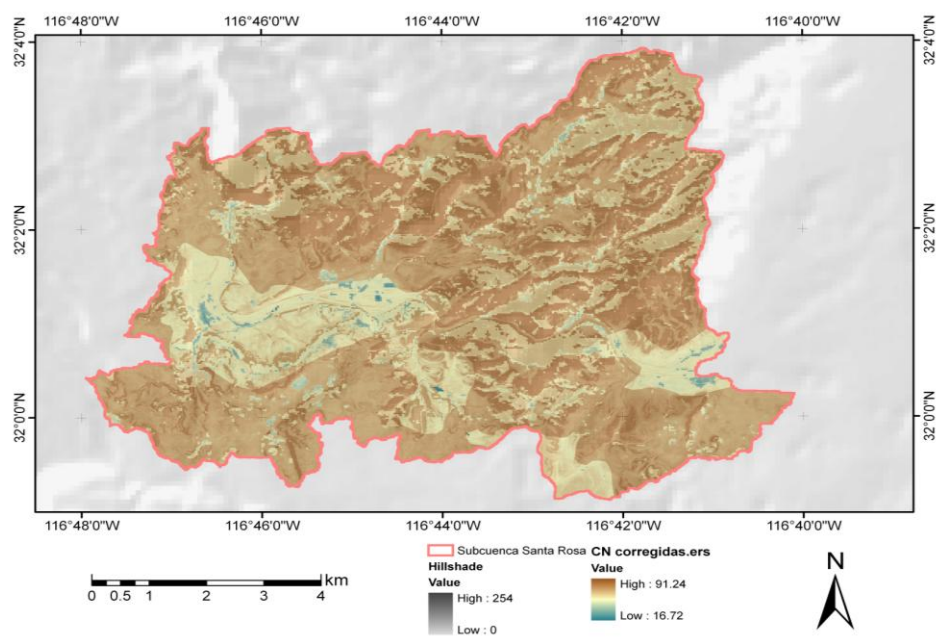


Figura 20. Correcciones de las CN por el cambio del factor de sustracción inicial

Los valores para las CN van de un mínimo de 30 a un máximo de 93. En esta figura 19 se observa la distribución espacial de las CN. Los valores mínimos en color azul se observan en mayor área en la región del aluvión, mientras que los valores máximos en las rocas ígneas se presentan en tonos café.

Posteriormente, se aplicó la ecuación (6) para volver a calcular las CN (Fig.20). Las CN van de un rango de 16.73 a un máximo de 91.24. En la figura 17 se observa que con esta nueva ecuación el potencial de escurrimiento es menor. La infiltración es mayor en la parte alta de la cuenca, son zonas que presentan baja pendiente y una cobertura vegetal mayor.

III.4.2. Correcciones debido a las Condiciones Previas de Humedad

Obtención de las Curvas Numeradas de acuerdo a la Condición Previa de Humedad clase I: aplicando la ecuación (10), las CN presentan un valor mínimo de 7.58 y un máximo de 80.89. En la figura 18 se observa que el potencial de infiltración es mayor en toda la región. Las zonas que presentan potencial de escurrimiento son debido a las altas pendientes (Fig. 21).

Curvas Numeradas de acuerdo a la Condición Previa de Humedad clase III: aplicando la ecuación (11), las CN presentan un valor mínimo de 29.19 y un máximo de 97.17. De acuerdo a la figura que muestra la distribución se observa que el potencial de escurrimiento aumenta considerablemente en toda la región (Figura 22).

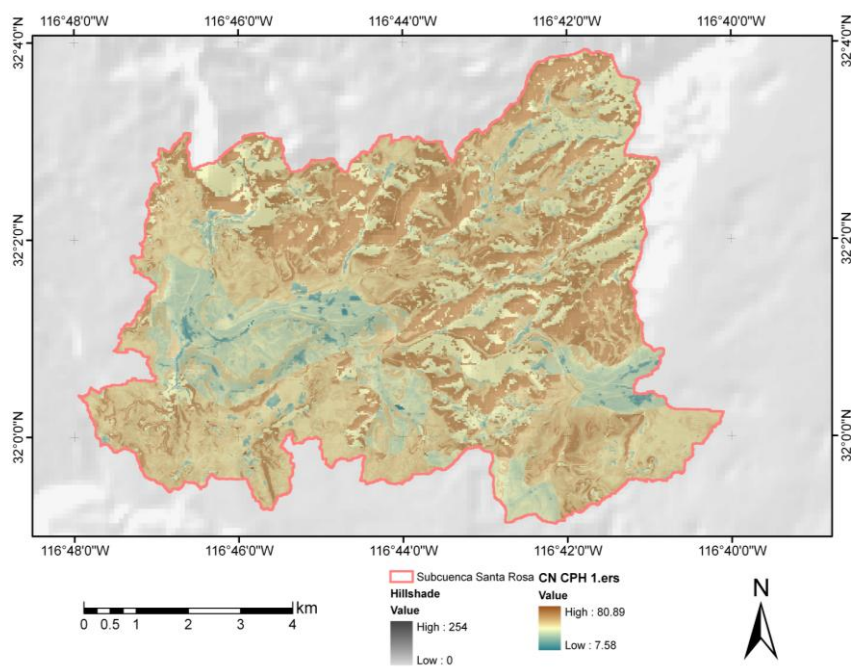


Figura 21. Curvas Numeradas para la Condición Previa de Humedad clase I.

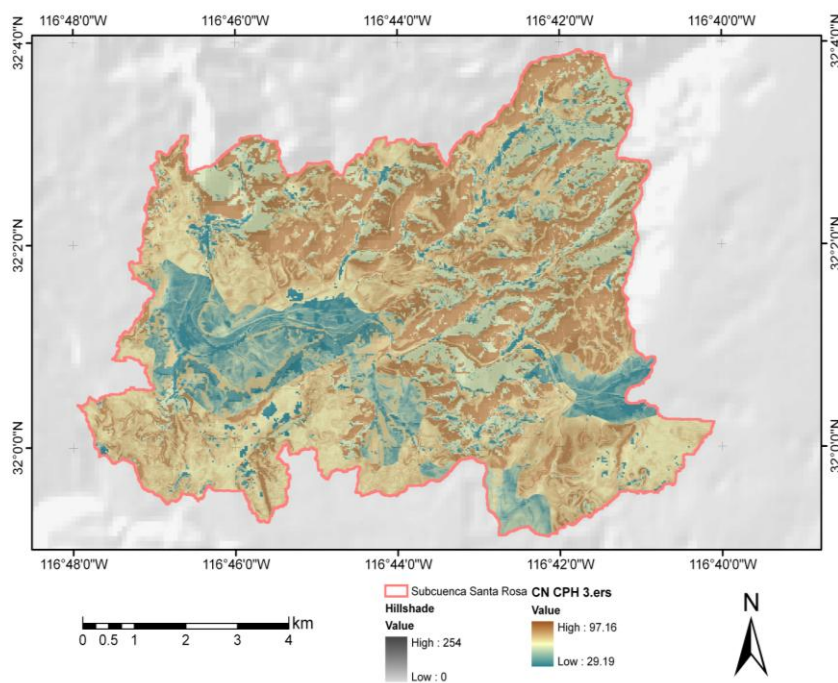


Figura 22. Curvas Numeradas para la Condición Previa de Humedad clase III.

III.5 Estimación de volúmenes de escurrimiento en la subcuenca Santa Rosa

Se realizó en primer lugar la estimación de escurrimiento para promedios mensuales de acuerdo a los datos analizados de la estación Olivares Mexicanos. Se tomaron además en consideración de los resultados de Capacidad de campo, el análisis de temperatura y de evaporación potencial para definir las CPH (Tabla XIV).

En el mes de octubre y noviembre se consideró como CPH clase I las consideraciones que se tomaron fueron las siguientes: en octubre hay muy poca precipitación y debido a que la temperatura y la evaporación potencial aún son elevados, la lluvia que cae en la cuenca se pierde por evapotranspiración; y durante noviembre la temperatura y la evaporación bajan considerablemente y la precipitación aumenta más del doble con respecto al mes de octubre, pero se considera que esta agua se infiltra la mayoría para satisfacer las necesidades del suelo.

Diciembre se le asignó CPH clase II (no reciben ajuste las CN) ya que en este mes se presenta la temperatura y evaporación potencial más bajas del año, además de que aumenta la precipitación. Enero, febrero y marzo se la asignó CPH clase III debido a lo siguiente: durante estos tres meses se presentan las precipitaciones más altas durante el año y los valores de temperatura y evaporación potencial siguen siendo bajos; se considera también que durante estos meses habrá mayor escurrimiento porque el suelo ya sobrepasó las necesidades de infiltración. En abril se le asignó CPH clase II ya que la precipitación baja considerablemente con respecto al mes de marzo, además de que la temperatura y la evaporación potencial aumentan. En los meses en que la precipitación es menor a 13.5 mm no se calculó volumen de escurrimiento porque estos valores salen del mínimo de precipitación aceptable para poder realizar el cálculo de escurrimiento.

Tabla XIV. Definición de las Condiciones Previas de Humedad

Mes	Condición Previa de Humedad
Octubre	Clase I
Noviembre	Clase I
Diciembre	Clase II
Enero	Clase III
Febrero	Clase III
Marzo	Clase III
Abril	Clase II
Mayo	Clase I
Junio	Clase I
Julio	Clase I
Agosto	Clase I
Septiembre	Clase I

El volumen de escurrimiento promedio mensual en la cuenca Santa Rosa fue de 952,000 metros cúbicos; (Fig.23) el valor más alto se presentó en el mes de febrero con un total de 2,600,000 y el más bajo durante octubre con 782. En los meses de mayo a septiembre no se calculó escurrimiento debido a que la precipitación es menor a 12.7 mm.

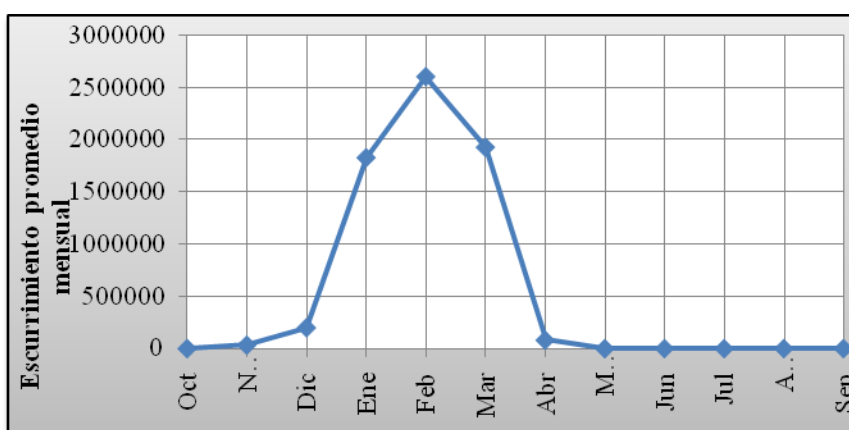


Figura 23. Resultados de escurrimiento mensual promedio en la subcuenca Santa Rosa.

Tabla XV. Resultados del escurrimiento superficial mensual promedio.

Mes	Precipitación media (mm)	Escurrimiento superficial()
Octubre	16.06	782
Noviembre	34.74	34,000
Diciembre	34.78	200,000
Enero	65.02	1,825,000
Febrero	79.85	2,600,000
Marzo	65.67	1, 925,000
Abril	24.49	81,000
Mayo	7.48	No se calculó escurrimiento
Junio	1.76	No se calculó escurrimiento
Julio	1.31	No se calculó escurrimiento
Agosto	3.26	No se calculó escurrimiento
Septiembre	8.52	No se calculó escurrimiento

En la estimación del escurrimiento total anual en la cuenca Santa Rosa se utilizaron los datos de precipitación en la estación Olivares Mexicanos. Se aplicaron los criterios antes mencionados para definir las CPH. El valor más alto de escurrimiento superficial se presentó durante el año 1995 con 30,366,000 m^3 ; el valor más bajo se presentó en 1972 con 395,000 m^3 (Fig. 24).

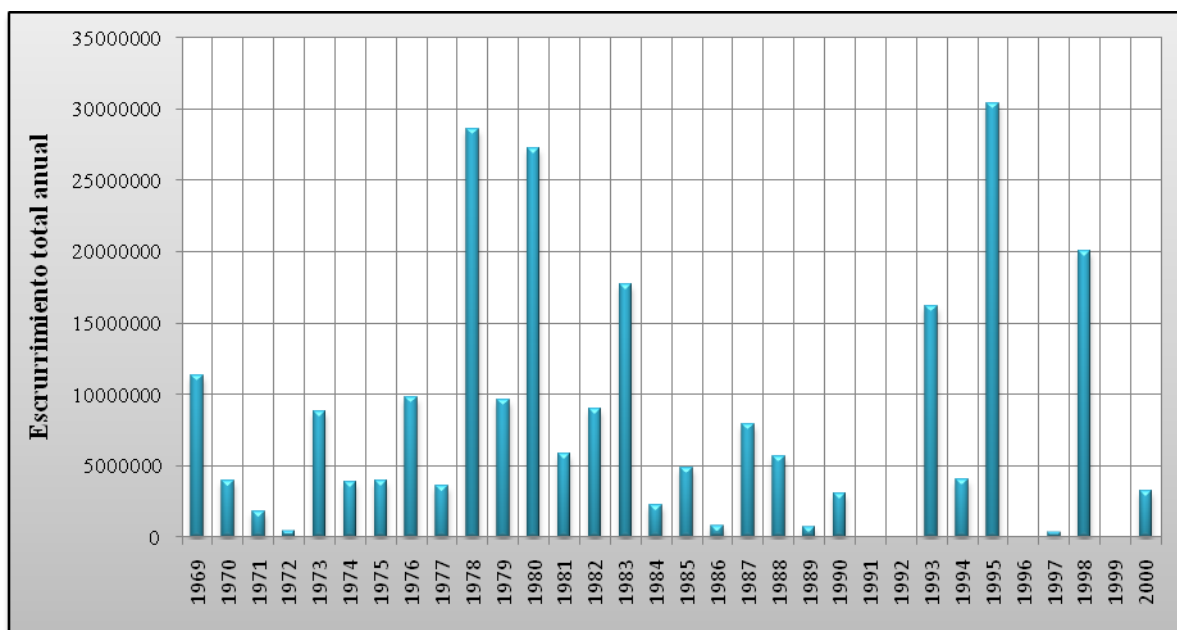


Figura 24. Resultados del escurrimiento total anual en la subcuenca Santa Rosa

Tabla XVI. Escurrimiento superficial anual en la subcuenca Santa Rosa

Año	Escurrencimiento total anual (m³)	Año	Escurrencimiento total anual (m³)
1969	11,353,000	1985	4,836,000
1970	3,899,000	1986	749,000
1971	1,819,000	1987	7,922,000
1972	395,000	1988	5,609,000
1973	8,761,000	1989	697,000
1974	3,852,000	1990	3,061,000
1975	3,974,000	1991	N/D
1976	9,803,000	1992	N/D
1977	3,536,000	1993	16,145,000
1978	28,579,000	1994	4,013,000
1979	9,637,000	1995	30,366,000
1980	27,229,000	1996	N/D
1981	5,809,000	1997	316,000
1982	9,015,000	1998	20,025,000
1983	17,739,000	1999	N/D
1984	2,257,000	2000	3,209,000

III.6 Evaluación del escurrimiento superficial mediante escenarios de precipitación

Las proyecciones (escenarios) mensuales de cambio de precipitación realizados por Arriaga-Ramírez y Cavazos, como parte del Plan Estatal de Acción Climática de Baja California (PEAC-BC; <http://peac-bc.cicese.mx>) para el siglo XXI indican que para el 2001-2030 la precipitación anual promedio en Olivares Mexicanos será posiblemente del orden de 218.20 mm, esto significa una disminución de casi 100 mm en promedio anual (Tabla XVII); la menor precipitación se proyecta para el año 2019 con 150.47 mm y la mayor en el 2021 con 305.57 mm (Fig. 25). Sin embargo, estas proyecciones no son precisamente pronósticos porque pueden tener muchas incertidumbres, por lo tanto es más acertado considerar los posibles cambios a escala decadal (Cavazos, comunicación personal).

Uniando los datos de precipitación anual de 1969-2000 y los de las proyecciones de precipitación 2001-2030 se pudo tener un indicativo de cómo podría ser el comportamiento de la precipitación (Fig. 26).

Tabla XVII. Resultados de precipitación total anual proyectada para el período 2001-2030 en la estación Olivares Mexicanos (basado en datos de Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2009)

Año	Precipitación total anual (mm)	Año	Precipitación total anual (mm)
2001	243.39	2016	227.76
2002	241.92	2017	174.26
2003	269.92	2018	177.8
2004	235.42	2019	150.47
2005	181.16	2020	203.7
2006	190.63	2021	305.57
2007	230.25	2022	194.65
2008	187.78	2023	196.23
2009	272.29	2024	237.42
2010	200.17	2025	302.09
2011	278.85	2026	197.2
2012	192.61	2027	210.67
2013	206.31	2028	176.51
2014	201.19	2029	235.14
2015	234.29	2030	190.34

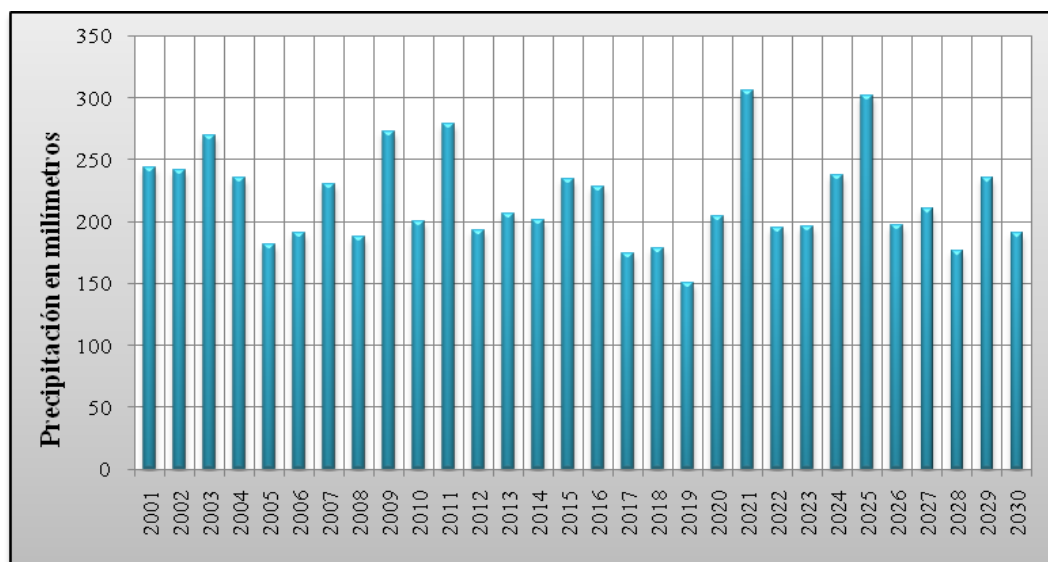


Figura 25. Resultados de precipitación total anual proyectada para el período 2001-2030 en la estación Olivares Mexicanos (basado en datos de Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2009)

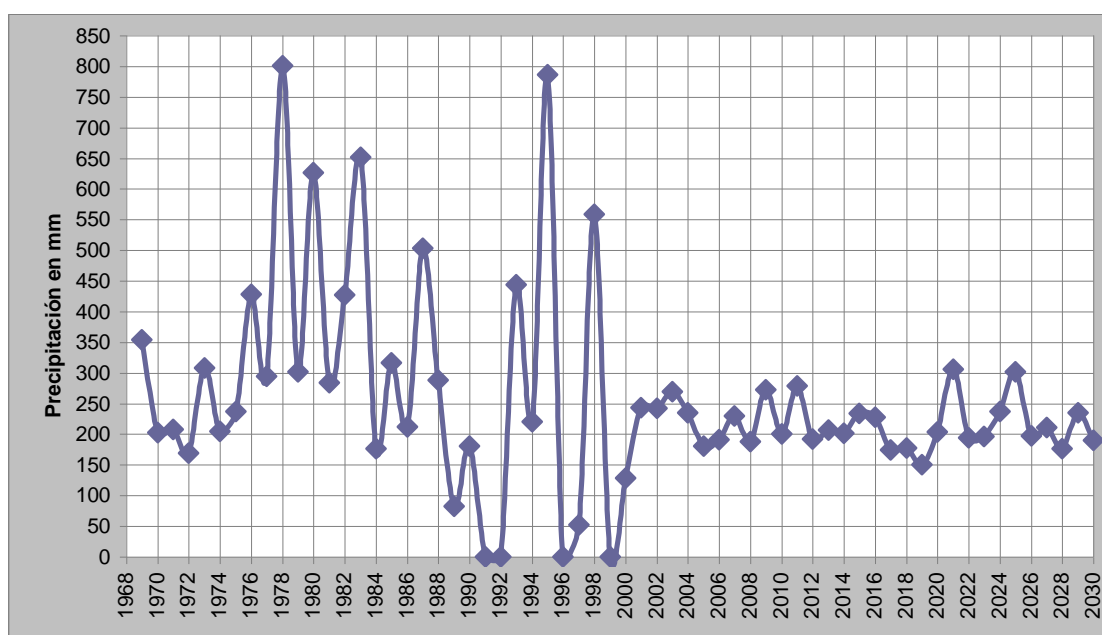


Figura 26. Precipitación anual en la estación Olivares Mexicanos para la serie 1969-2030. (CNA, 2000) y (Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2009)

Las proyecciones mensuales de precipitación indican que el ciclo anual de la precipitación podría comportarse de la siguiente forma en las próximas dos décadas: los meses que presentarán más lluvia son noviembre, enero, febrero y marzo, con el más alto valor en el mes de enero con 53.18 mm; los meses más secos durante mayo, junio, julio y agosto, presentando junio el valor más bajo con 0.64 mm. Además indica que la precipitación promedio mensual será de 18 mm (Fig. 27 y Tabla XVIII).

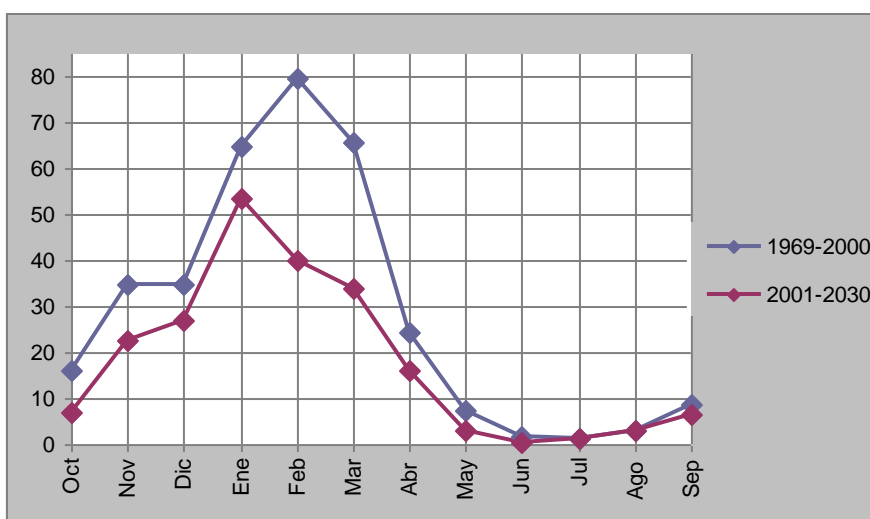


Figura 27. Precipitación promedio mensual promedio (ciclo anual) en la estación Olivares Mexicanos para 1969-200 y 2001-2030.

Tabla XVIII. Proyección de la precipitación mensual promedio en la estación Olivares mexicanos para 2001-2030

Mes	Precipitación mensual promedio (mm)
Octubre	7.11
Noviembre	22.74
diciembre	27.16
Enero	53.18
Febrero	40.07
Marzo	34.01
Abril	16.07
Mayo	3.25
Junio	0.64
Julio	1.43
Agosto	3.26
Septiembre	6.42

De acuerdo a las proyecciones obtenidas por Arriaga-Ramirez y Cavazos (2009) la temperatura mensual promedio para Olivares Mexicanos será del orden de 15.2 °C en 2001-2030 (Fig. 28).

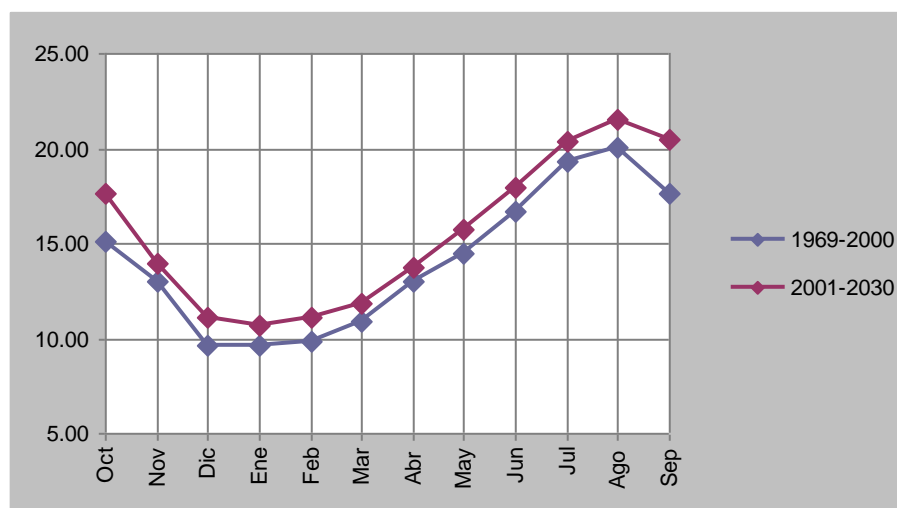


Figura 28. Proyección de temperatura media mensual (oC) en la estación Olivares Mexicanos para 2001-2030.

Tabla XIX. Proyección de la temperatura media mensual en la estación Olivares Mexicanos para 2001-2030.

Mes	Temperatura °C
Octubre	17.68
Noviembre	13.96
Diciembre	11.11
Enero	10.65
Febrero	11.13
Marzo	11.81
Abril	13.77
Mayo	15.69
Junio	17.97
Julio	20.41
Agosto	21.50
Septiembre	20.52
Temperatura promedio	15.52

Utilizando las proyecciones (o escenarios) de precipitación mencionadas arriba se calculó posible escurrimiento total anual para la serie 2001-2030. Los resultados de acuerdo a estos escenarios son que podría haber dos eventos

extremos, uno en el año 2021 con de $8,709,000 m^3$, y el otro en el año 2021 con $7,387,000 m^3$; y se proyecta además que el escurrimiento anual promedio podría ser del orden de $3,489,000 m^3$ (Fig. 29).

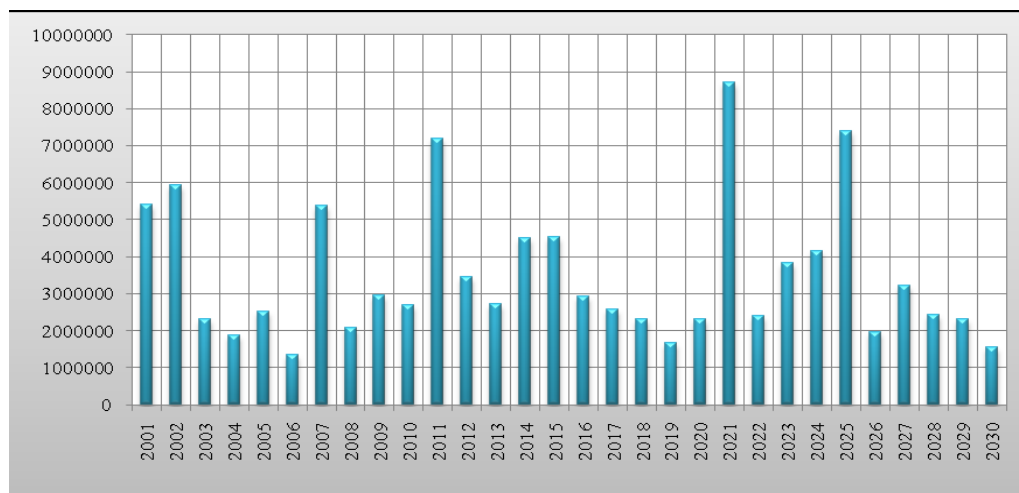


Figura 29. Proyección de escurrimiento total anual en la subcuenca Santa Rosa para la serie 2001-2030.

Tabla XX. Resultados de escurrimiento total anual en la subcuenca Santa Rosa para la serie 2001-2030.

Año	Escurrecimiento total anual (m^3)	Año	Escurrecimiento total anual (m^3)
2001	5,417,000	2016	2,934,000
2002	5,921,000	2017	2,587,000
2003	2,325,000	2018	2,306,000
2004	1,885,000	2019	1,674,000
2005	2,522,000	2020	2,309,000
2006	1,337,000	2021	8,709,000
2007	5,375,000	2022	2,410,000
2008	2,084,000	2023	3,817,000
2009	2,966,000	2024	4,142,000
2010	2,685,000	2025	7,387,000
2011	7,203,000	2026	1,949,000
2012	3,454,000	2027	3,223,000
2013	2,714,000	2028	2,431,000
2014	4,515,000	2029	2,321,000
2015	4,519,000	2030	1,552,000

Uniendo los resultados de estimación de escurrimiento total anual de las dos series 1969-2000 y 2001-2030 se observa una gran disminución en los volúmenes de escurrimiento en la segunda serie de datos (Fig. 30).

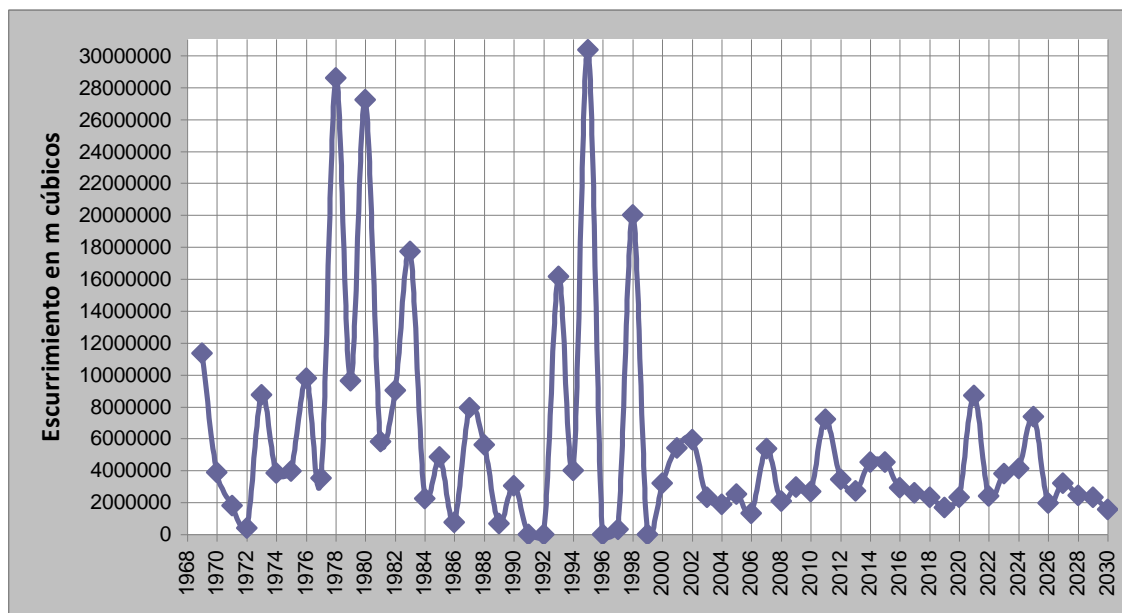


Figura 30. Escenario de escurrimiento anual 1969-2030 en la subcuenca Santa Rosa.

IV. DISCUSIÓN

El acceso a datos diarios de las variables hidrológicas permitió hacer un análisis con menor porcentaje de error por lo que los resultados obtenidos son más confiables. También estos nos permiten hacer un análisis para eventos semanales.

El trabajo de campo realizado fue útil para distinguir sitios favorables para el escurrimiento y la infiltración. Se tomaron notas acerca de la presencia de vegetación, espesor de suelo, geología y pendiente. Como resultados de las observaciones que se tuvieron fue la presencia de vegetación en toda el área, consistente de chaparral en la mayor proporción, y en una porción menor había cultivos de vid y presencia de vegetación de mayor altura. Cabe destacar la presencia de vegetación aún en época seca y se observó cómo esta vegetación aumenta en la temporada de lluvias. Esta información se corroboró con la imagen de satélite LANDSAT, que aunque no corresponde al período de muestreo, es decir, la imagen es de junio de 2008 y corresponde a época seca, también muestra presencia de vegetación en toda el área con valores muy bajos.

Uno de los factores que tiene más peso en el potencial de escurrimiento/infiltración es la pendiente. La zona de planicie presente cerca del arroyo Guadalupe fueron los sitios que se distinguieron como favorables a la infiltración debido a la baja pendiente que presentaba.

El análisis de datos de satélite reforzó los resultados de las observaciones hechas en campo y completó la información del área que no se pudo muestrear.

La determinación de las Curvas Numeradas mediante el empleo de imágenes satelitales permitió mostrar la variabilidad de la información de Pendiente y de cobertura vegetal, además de complementar la información obtenida en campo y permitió además obtener información de los lugares en los que no se pudieron tomar muestras por problemas de accesibilidad.

Comparando el análisis de temperatura media y precipitación dividido en dos períodos el primero de 1969-2000 con 12.46 °C y el segundo durante 2000-2030, con una temperatura promedio de 15.2 °C se puede pronosticar que se espera un aumento de 3 °C en promedio anual. En cuanto a la precipitación promedio mensual de 28.58mm para el periodo de 1969-2000, se pronostica que para la segunda la precipitación mensual será de 18.00 mm, lo cual implica que habrá una disminución de 10.58 mm aproximadamente. Se considera que el aumento de la temperatura y la disminución de precipitación tendrán consecuencias directas en la evapotranspiración y en el escurrimiento.

En la obtención de Curvas Numeradas de acuerdo a las Condiciones Previas de humedad nos permite observar cómo va cambiando el potencial de escurrimiento e infiltración; en la CPH clase I se observa que el potencial de infiltración es considerablemente mayor y en la CPH clase III el potencial de escurrimiento es mayor en toda el área.

Como resultado del análisis que se realizó, los escenarios indican que de 2001 a 2030 habrá solamente 2 eventos extremos; el primero en el año 2021 con 305 mm de precipitación y el segundo en el año 2025 con 302.09 mm generará un escurrimiento de 7 387 000 metros cúbicos, pero este valor sigue siendo muy bajo. Esta baja de precipitación y aumento de temperatura sugiere también que se incrementa la evapotranspiración.

El resultado de este trabajo en la subcuenca Santa Rosa es el primero que se realiza para evaluar la disponibilidad de agua en la región, tomando escenarios futuros y hacer un análisis del comportamiento de esta cuenca. No se encontró en bibliografía algún otro valor con el que se pueda comparar este resultado y verificar sus magnitudes.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación nos permite llegar a las siguientes conclusiones:

1. La combinación de información de campo y datos obtenidos de las imágenes de satélite nos permiten emplear el método de Curvas numeradas y de esta forma calcular el escurrimiento superficial en la subcuenca Santa Rosa.
2. El resultado del análisis de granulometría indica que el suelo de la zona de estudio es de tipo franco-arenoso, es decir, cuenta con un mayor contenido de arena. Su capacidad de campo va de 7.5 a 20.5% de la humedad de suelo.
3. El resultado del análisis de la capacidad de campo indican que el suelo puede sobrepasar el 20.5% de humedad de suelo que es el máximo de capacidad de campo, que generaría escurrimiento.
4. La pendiente es el factor dominante responsable del alto potencial de escurrimiento en la subcuenca Santa Rosa, aunque la zona presente vegetación en toda el área.
5. El volumen de escurrimiento anual aportado por la subcuenca Santa Rosa es de 8,900,000 metros cúbicos, cantidad obtenida de la serie de tiempo 1969-2000. De acuerdo a los datos de precipitación y tomando como base la serie 2001-2030 el pronóstico es de 3,500,000 metros cúbicos anuales. Esto significa que podría haber una disminución en la disponibilidad de agua de 5,400,000 metros cúbicos, es decir el 60.7% del volumen.
6. Se recomienda extender este trabajo hacia toda la cuenca de Guadalupe para evaluar el potencial de escurrimiento y así la disponibilidad de agua en esta región que es tan importante para el municipio de Ensenada.

VI REFERENCIAS

American Society of testing and materials (ASTM). ASTM D4959-00. Standard Test Method for Determination of Water (moisture) Content of soil By Direct Heating. ASTM Interational. 4pp.

Antuna Ibarra I. 2005. Desarrollo Hidrogeológico e Hidrogeoquímico del acuífero de La Misión, Baja California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada., Baja California (CICESE). Tesis de maestría. 94 pp.

Arriaga Ramírez S., Cavazos Pérez M.T. 2009. Proyecciones regionales de cambio climático para Baja California. Reporte técnico: Departamento de Oceanografía Física, CICESE. 17 pp.

Baltas E.A., Dervos N.A., Mimikou M.A.. 2007. Technical Note. Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. Hydrology and Earth System Sciences. 11. 5pp.

Campo A., García González R., Marinas A., Gartzia M. 2005. Relaciones entre el índice espectral de vegetación NDVI y la cobertura vegetal en pastos de puerto del pirineo occidental. Gestión eficiente y conservación del medio natural. 1. 8pp.

Campos Aranda D.F. 1992. Procesos del ciclo hidrológico. Segunda reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Campos Gaytán J.R. 2002. Actualización del modelo geohidrológico del acuífero del Valla de Ojos Negros, Baja California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 151 pp.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 1998. Abastecimiento de Agua para Ensenada, B.C.N. Presa Santa Rosa. Informe técnico. 51 pp.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 1999. Gerencia del Registro Público de Derechos de Agua. Título de Concesión. 9 pp.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2000. Datos de la estación meteorológica Olivares Mexicanos (número 2036). Olivares Mexicanos, municipio de Ensenada, B.C. Gerencia Regional en la Península de Baja California. Subgerencia Regional Técnica. Jefatura de p. de meteorología.

Consejo Nacional de Población (CONAPO). 2009. Perfil Sociodemográfico de Ensenada, 2009. Apuntes de Población de Baja California. 2. 6pp.

Custodio E. y Llamas M.R. 1976. Hidrología subterránea. 1 ed. Omega. D.L.

Digital Globe. 2004. Imagen tomada 2004-4-11 cortesía de Digital Globe accedida de su librería de imágenes vía interfaz Image Connect http://digitalglobe.com/index.php/48/Products?product_id=19

García E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F. 244 pp.

Gastil R.G., Phillips R.P., Allison E.C. 1975. Reconnaissance Geology of the state of Baja California. Geological Society of America. 170 pp.

Hawkins R.H., Ruiyun J., Woodward J.E., Hjetmmfelt T. Jr., Van Mullen J.E., Montana B. 2001. Runoff Curve Number Method: examination of the initial abstraction ratio. School of Renewable Natural Resources, University of Arizona. 12 pp.

INEGI. Cartas topográficas escala 1:50,000 con clave I11D81 y H11B11

INEGI. 2006. Modelo digital de elevación de alta resolución Lidar, tipo TERRENO.

Kurczyn Robledo J.A. 2005. Evaluación del potencial de escurrimiento superficial al noroeste del Valle de Guadalupe, B.C. usando el método de las Curvas numeradas e imágenes de satélite. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 90 pp.

Noyola Medrano M.C., Ramos Leal J.A., Domínguez Mariani E., Pineda Martínez L.F., López Loera H., Carbajal N. 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 26(2):395-410. <http://satori.geociencias.unam.mx/>

U.S Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service (NRCS). Engineering Division. Technical Release 55. 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds. (second edition). 210-VI-TR-55. Cap. 2, 1-6 pp.

U.S. Departament of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (NRCS). 2002. National Soil Survey Handbook.

Verdin James, Pedreros Diego, Eilerts Gary. 2003. Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI). FEWS-Red de Alerta Temprana Contra la Inseguridad Alimentaria, Centroamérica, USGS/EROS Data Center.

Weier J, D. Herring. 2000. Measuring Vegetation (NDVI & EVI) Earth Observatory, NASA. http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_4.php

Wentworth. C.R. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*. 30:377-392 p.

Zhan X., Huang M. 2004. Arc CN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environmental Modelling & Software*. 19:875-879.