

Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, B.C., México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite

Jorge Alejandro Kurczyn-Robledo, Thomas Kretzschmar* y Alejandro Hinojosa-Corona

Departamento de Geología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Km. 107 Carretera Tijuana–Ensenada, 22880 Ensenada, Baja California, México.

**tkretzsc@cicese.mx*

RESUMEN

Con el fin de conocer las características edafológicas y geomorfológicas del noreste del Valle de Guadalupe, Baja California, y sus implicaciones en los volúmenes de escurrimiento en esta región, se tomaron 59 muestras de los primeros 5 cm del suelo, observándose el relieve, la clasificación del sedimento y la cobertura superficial de los sitios de muestreo. En el laboratorio se realizaron análisis texturales y de contenido gravimétrico de humedad de dichas muestras. Los estudios geomorfológicos tuvieron como base los datos de tres matrices de información: una imagen del satélite Ikonos, una imagen del sensor Aster y la carta digital geológica del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática I11D82. Con la imagen Ikonos se calculó el índice de vegetación diferencial normalizado, con la imagen Aster se evaluó la pendiente del terreno, con la carta digital geológica se obtuvo la geología para el área de estudio. Siguiendo el método de las curvas numeradas para el escurrimiento se generó un algoritmo computacional (para el programa ERmapper 6.4) que utiliza la información de las tres matrices antes mencionadas y los datos de campo. Éste se empleó para estudiar el potencial de escurrimiento superficial en la Serranía Matcuatai y evaluar los volúmenes de escurrimiento aportados hacia el Valle de Guadalupe, para los cuales se estimó una media anual de $258,000 \pm 123,000 \text{ m}^3$. Además se encontró que el 88% del suelo en el área de estudio tiene un potencial favorable al escurrimiento y un 12% favorable a la infiltración.

Palabras clave: escurrimiento superficial, método de curvas numeradas, índice de vegetación diferencial normalizado, modelos digitales de elevación, Valle de Guadalupe, Baja California, México.

ABSTRACT

In order to recognize the soil and geomorphologic characteristics of the northeastern part of Valle de Guadalupe, Baja California, and its implications on the runoff volumes in the region, 59 soil samples were collected from the first 5 cm of the soil layer, taking into account the surface relief, soil classification and vegetation cover of each sampling point. Soil moisture content and textural analyses were carried out in the laboratory for each sample. Three raster images were used to complement field data: an Ikonos image, an Aster Image and the Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática digital geologic map I11D82. The Ikonos image was used to calculate the normalized differential vegetation index, the Aster image to evaluate the field slope, and the digital map to obtain geologic information for the study area. Following the runoff curve number method, a computational algorithm was developed (for Ermapper 6.4 software), by using the three raster images and the field data. The algorithm was employed to study

the surface runoff potential in the Serranía Matcuatai and to evaluate its runoff volume contributions to Valle de Guadalupe. The mean annual runoff volume contribution was estimated in $258,000 \pm 123,000$ m³. It was also found that 88% of the study area surface has a runoff potential and only 12% is favorable to infiltration.

Key words: runoff, curve number method, normalized differential vegetation index, digital elevation models, Valle de Guadalupe, Baja California, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La península de Baja California está caracterizada como una región con clima árido donde el agua se encuentra almacenada principalmente en acuíferos, cuya fuente principal de abastecimiento es la precipitación pluvial. Los pocos arroyos perennes que existen en la región tienen su origen en el desbordamiento de dichos acuíferos. El estudio de la relación entre el proceso de precipitación-escorrimento permite evaluar el comportamiento de los sitios donde los mantos freáticos son recargados por eventos de lluvia, lo cual permite comenzar a resolver la incertidumbre entre los volúmenes de entrada y salida de un acuífero.

El Valle de Guadalupe (VG) (Figura 1) ubicado en la parte noroeste de Baja California es una región con importancia histórica, social y económica para el estado de Baja California. Este valle es drenado por el Arroyo Guadalupe (Figuras 1 y 2) y en él se localiza un acuífero importante

que se usa para desarrollar diferentes actividades agrícolas de importancia nacional, la principal de ellas representada por la industria vitivinícola. Otro uso importante de este acuífero es el abastecimiento de agua para las poblaciones de Ensenada (con más de 450,000 hab., a la cual se destina el 42% de dicho recurso), Francisco Zarco, El Porvenir y San Antonio Necua (Beltrán-Gómez, 2001). Sin embargo, actualmente ha comenzado a observarse un abatimiento gradual de su nivel estático y aunque varios estudios (Andrade-Borbolla, 1997; Beltrán-Gómez, 1998 y 2001; Hernández-Rosas *et al.*, 2003) han evaluado su comportamiento y volumen de agua contenido, aún es necesario conocer con mayor precisión sus volúmenes de entrada y salida y reservas, a fin de garantizar un manejo sustentable para mayor beneficio de los usuarios. De acuerdo al Programa Hidráulico Regional 2002-2006 (CNA, 2003), el volumen de recarga de este acuífero es de 24 Mm³/año y su extracción es de 22 Mm³/año mostrando una condición

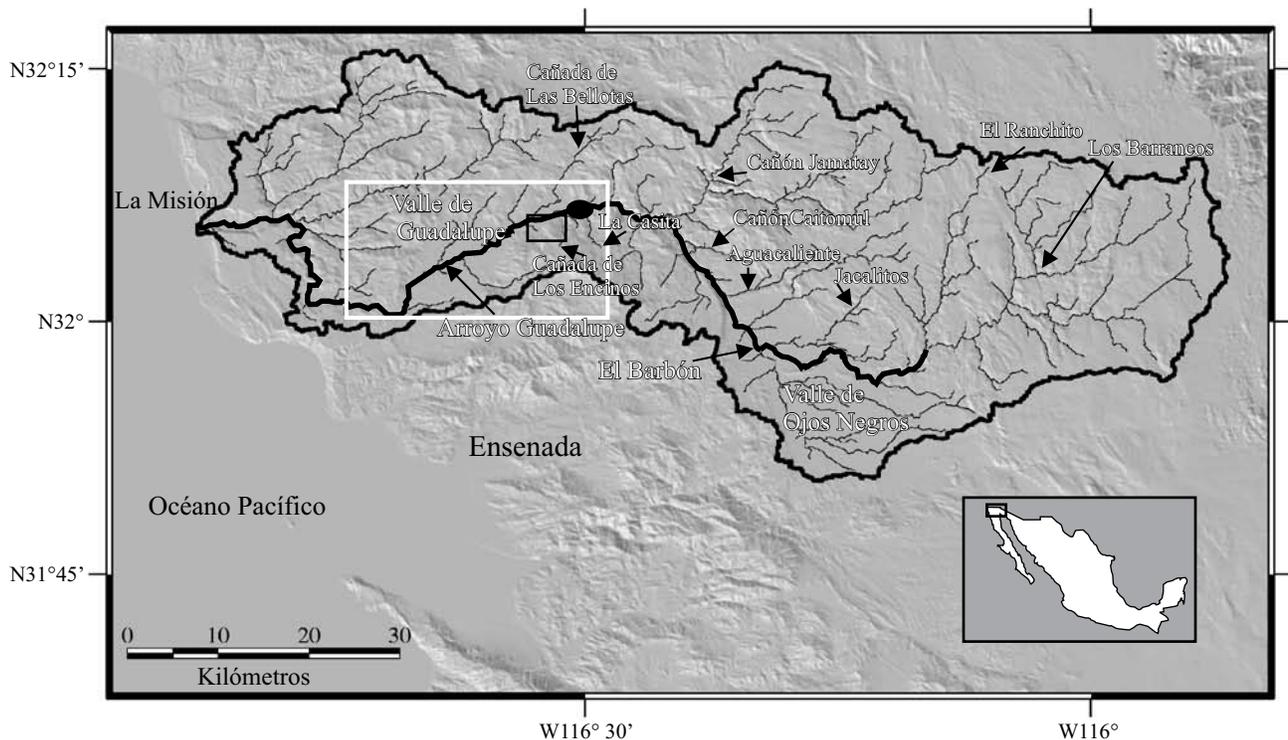


Figura 1. La cuenca Guadalupe. El recuadro blanco muestra la delimitación del Valle de Guadalupe, el recuadro negro la localización del área de estudio, y el círculo muestra la localización de la estación meteorológica Agua Caliente. Además se muestran los arroyos tributarios al colector principal El Barbón, llamado más adelante Arroyo Guadalupe.

geohidrológica de subexplotación.

En una cuenca hidrológica, el escurrimiento es la parte de la precipitación que fluye sobre la superficie hacia cuerpos de agua mayores. Antes de que el escurrimiento ocurra, la lluvia debe satisfacer las demandas inmediatas de infiltración, evaporación, intercepción, almacenamiento y/o detención superficial a través de estructuras geológicas (USDA-NRCS, 2002). La infiltración se define como el movimiento vertical del agua dentro de los estratos del suelo y rocas subyacentes y si la intensidad de la lluvia es mayor que la velocidad de infiltración, el agua tenderá a acumularse y el escurrimiento comenzará. La humedad superficial tiene influencia en los procesos de escurrimiento/infiltración. La velocidad de drenaje a través del suelo es particularmente dependiente del contenido de humedad superficial.

Este trabajo pretende evaluar el escurrimiento superficial de la cuenca Guadalupe tomando como criterio el análisis de un sector clave dentro de dicha cuenca, que

corresponde al área de la Serranía Matcuatai (Figuras 1 y 2). Con base en el análisis de parámetros como geología, morfología, índices de vegetación y datos obtenidos de textura y humedad de suelo, se considera que el potencial de escurrimiento del área de Matcuatai da información clave al entendimiento del escurrimiento del VG.

ÁREA DE ESTUDIO

El Valle de Guadalupe se localiza dentro de la cuenca Guadalupe, conformando una de sus tres sub-cuencas, y pertenece a la Región Hidrológica No.1 (RH 1) de la vertiente del Océano Pacífico. El VG está delimitado por las coordenadas geográficas: 32°07'N, 116°28'W y 32°02'N, 116°47'W y limita al norte con la cuenca Valle de las Palmas, al sur con la cuenca Ensenada, al este con la sub-cuenca Real del Castillo y al oeste con la sub-cuenca La

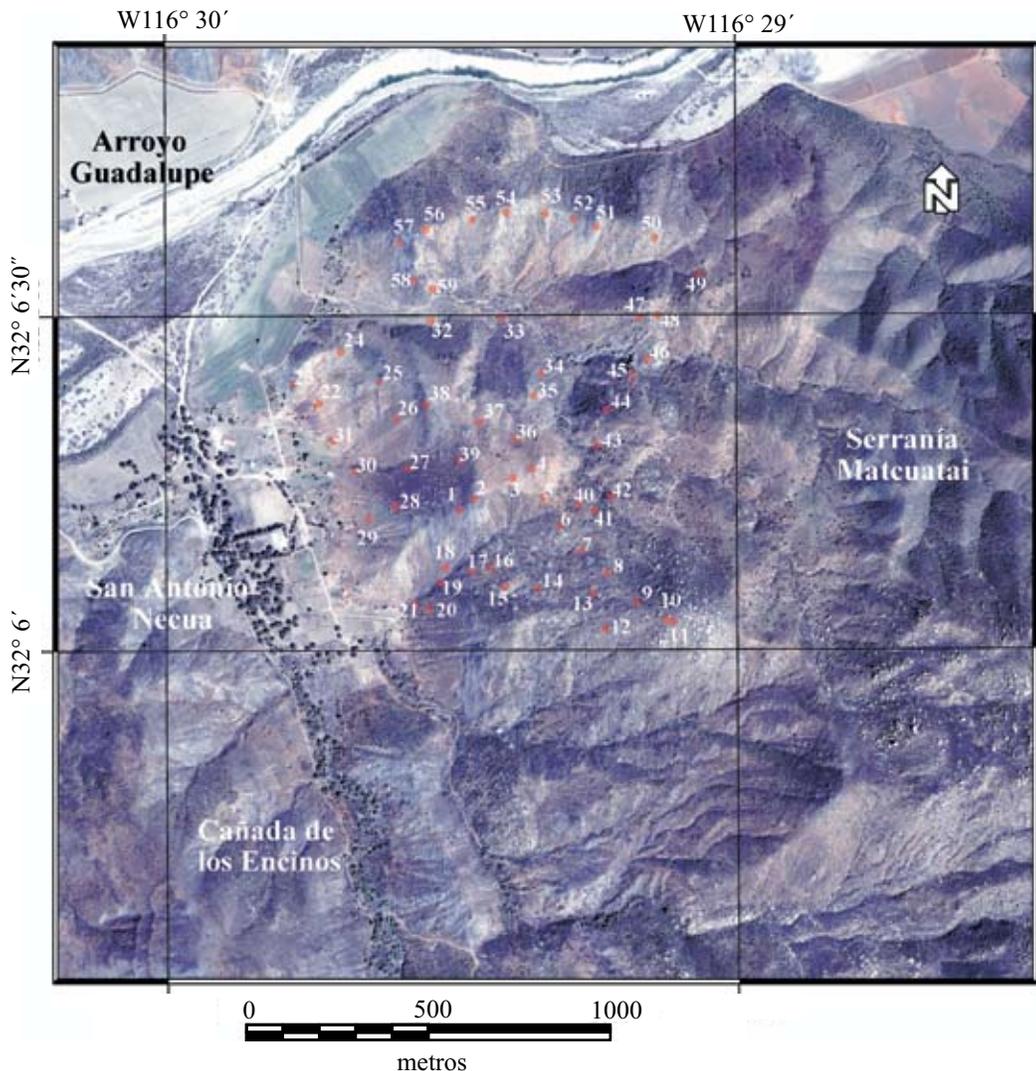


Figura 2. Imagen Ikonos del área de estudio. Al oeste de la figura se observa el poblado de San Antonio Necua (Cañada de los Encinos), al norte se observa el Arroyo Guadalupe. Los números en blanco muestran los sitios de muestreo.

Misión (Figura 1).

La cuenca Guadalupe tiene un área de casi 2,400 km², de los cuales 105 km² representan el relleno de sedimentos cuaternarios del Valle de Guadalupe que forman el acuífero local. En dicha cuenca drenan diversos arroyos que en su mayoría se originan al oeste de la Sierra Juárez, los cuales descienden con dirección hacia el suroeste desde una altura de 1,800 msnm. En conjunto integran una complicada red de drenaje en la que destacan los escurrimientos denominados Los Barrancos, El Ranchito y Jacalitos, los cuales se unen a un colector general perenne conocido como El Barbón (Figura 1), que corre hacia noroeste y drena el Valle de Ojos Negros (Figura 1). A la salida de éste, se unen los arroyos Cañón de Caitomul, Agua Caliente, Jamatay y La Casita. Pasando por la estación hidrológica Agua caliente (32°06'28"N, 116°27'14"W) este colector toma el nombre de Arroyo Guadalupe y corre con dirección suroeste hacia el Océano Pacífico. Antes de ingresar al VG se integran los arroyos Cañón Las Bellotas y Cañada de los Encinos. El Arroyo Guadalupe participa en forma directa en la recarga del acuífero del mismo Valle (Beltrán-Gómez, 1998).

El área de estudio seleccionada es una serranía de 3 km² localizada al noreste del VG en las coordenadas 32°06'18"N y 116°29'28"W (Figura 2). La litología presente en esta área es representativa para todo el valle y está formada por rocas ígneas intrusivas (dioritas, granodioritas), rocas metamórficas (esquistos) y depósitos sedimentarios granulares aluviales y fluviales. La zona muestra un clima semidesértico mediterráneo con una estación de escasa a mediana afluencia de lluvias durante las épocas de otoño e invierno y esporádicas e irregulares durante el resto del año. Según datos de la estación meteorológica Agua Caliente, el mayor volumen de lluvia se presenta durante los meses de noviembre a marzo, acusando promedios mensuales que varían de 25 a 61 mm (Figura 3) y un promedio anual de 278.3 mm, de acuerdo a datos tomados en 36 años de muestreo (CNA, 2003) (Figura 4).

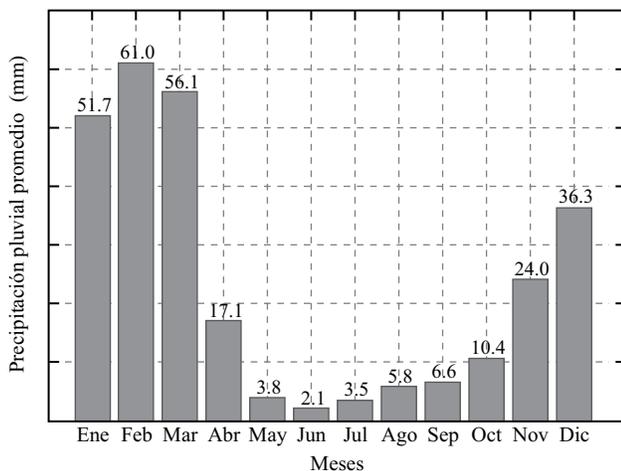


Figura 3. Precipitación media mensual para la serie de tiempo de 1967-2003 según datos de la estación Agua Caliente (CNA, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

El método de las curvas numeradas para el escurrimiento

El método de curvas numeradas (CN) para el escurrimiento fue desarrollado por el Servicio de Agricultura de los EE.UU. (USDA por sus siglas en inglés), a través del Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS por sus siglas en inglés) en la década de 1950 (Woodward *et al.*, 1999). Es un modelo hidrológico empírico que se utiliza para demostrar la relación entre el escurrimiento superficial y los volúmenes de precipitación para un evento de lluvia dado (Figura 5). El método se basa en la suposición de proporcionalidad entre la retención superficial y el escurrimiento:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (P > 0.2S) \quad (1)$$

donde Q = escurrimiento; P = Precipitación; S = potencial máximo de retención después de que el escurrimiento haya comenzado (unidades en mm).

S se relaciona con las condiciones del suelo y el tipo de cobertura superficial del acuífero a través de las CN:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Hawkins *et al.* (2001) realizaron un estudio para mejorar la ecuación de escurrimiento del NRCS (Ecuación 1) utilizando dos diferentes métodos de estudio: Análisis de Eventos y Método de Ajuste (mínimos cuadrados), encontrando la siguiente fórmula:

$$Q'' = \frac{(P - 0.05S'')^2}{(P + 0.95S'')} \quad (P > 0.05S'') \quad (3)$$

Donde las CN y S se recalculan usando las siguientes fórmulas:

$$CN'' = \frac{100}{1.879 \left[\frac{100}{CN - 1} \right]^{1.15} + 1} \quad (4)$$

$$S'' = 1.33S^{1.15} \quad (\text{a partir de la fórmula en mm}) \quad (5)$$

Dado que las condiciones climáticas del área de estudio muestran valores de poca precipitación, es recomendable utilizar la ecuación (4) debido a que ésta presenta una mejor relación de precipitación-escurrimiento en estas condiciones climáticas.

El método del NRCS (1986) muestra que los valores de CN son adimensionales y varían de 0 a 100, son determinados a partir de la Tabla 1 y de los resultados que arrojan los siguientes cuatro factores:

- I) Las clases de escurrimiento: A, B, C, D (Tabla 2).
- II) El tipo de cobertura superficial: suelo desnudo o

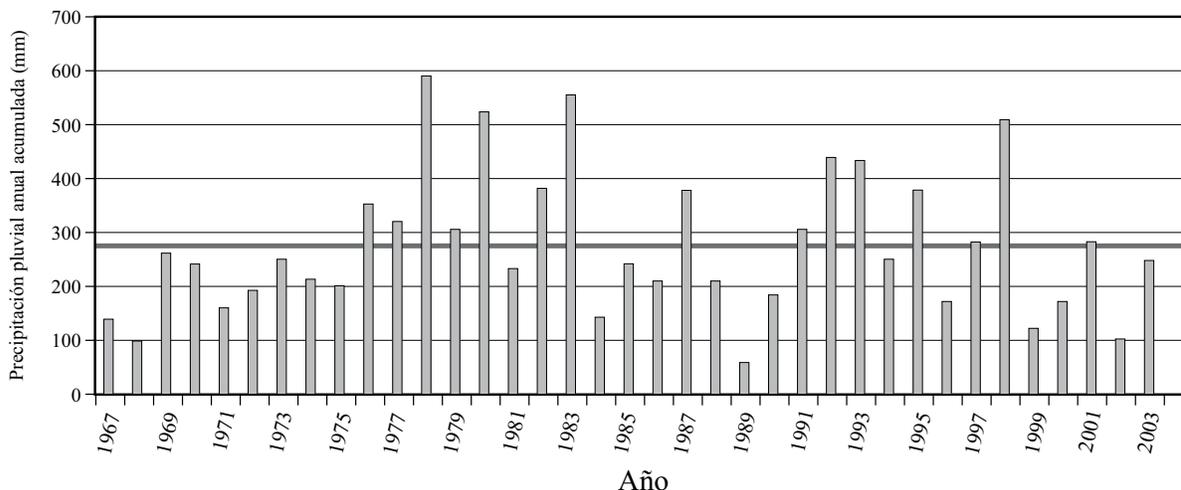


Figura 4. Precipitación anual acumulada de 1967-2003. Estación Agua caliente (CNA, 2003). La línea gruesa muestra el promedio anual acumulado (278 mm).

con cobertura vegetal.

III) La condición hidrológica: la cual indica los efectos que causa el tipo de cobertura superficial sobre el escurrimiento y/o la infiltración. Ésta se estima generalmente a partir de la densidad de la cobertura vegetal y la cobertura residual en las áreas de muestreo. Su clasificación prevé tres tipos de apreciaciones cualitativas y cuantitativas: buena

(favorable a la infiltración), regular o mala.

IV) La condición previa de humedad del suelo (CPH): es un intento por evaluar la variación en las CN en un sitio entre un evento de tormenta y otro, expresada en tres clases distintas de acuerdo con los límites de precipitación de la temporada durmiente y de crecimiento de la vegetación. Clase I: cuando la humedad del suelo es menor al 60% de

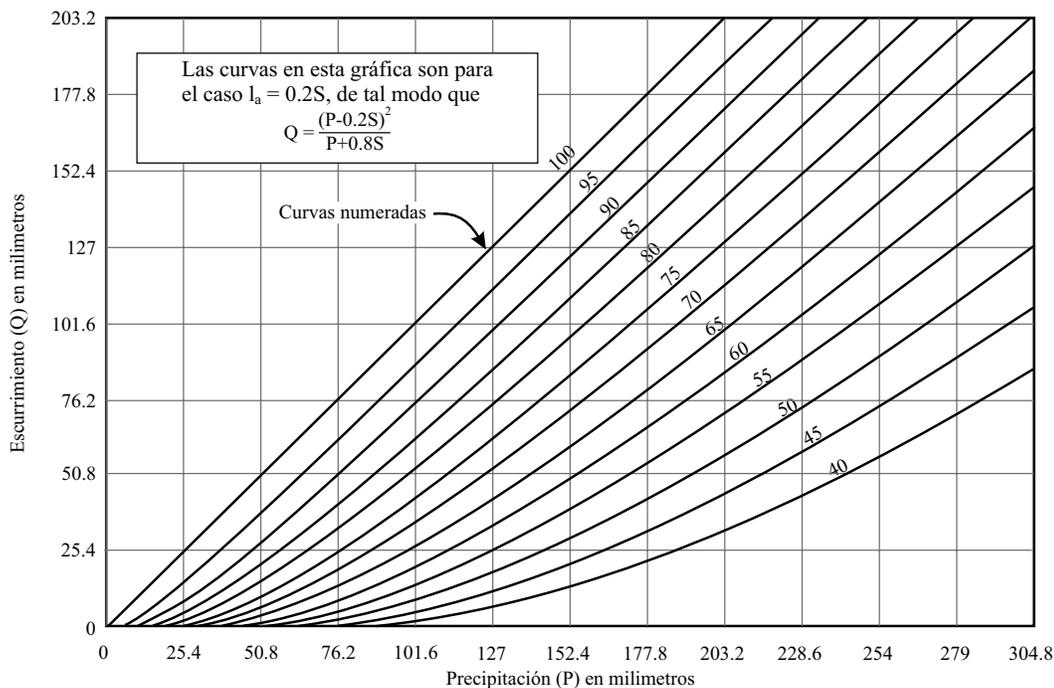


Figura 5. Curvas numeradas (CN) o relación entre escurrimiento-precipitación (NRCS, 1986). Estas curvas están basada en el análisis de un gran número de escurrimientos para distintos acuíferos y su fin es demostrar la relación entre la escorrenría diaria acumulativa y la precipitación diaria acumulativa. 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 escorrenría diaria y lluvia diaria es una línea recta a 45°, y a medida que las remociones se incrementan las curvas se alejan de dicha línea

Tabla 1. Curvas numeradas (CN) para regiones áridas y semiáridas (NRCS, 1986). Inf.: Infiltración; Ecur.: Escurrimiento.

Tipo de cobertura superficial	Condición hidrológica	Curvas numeradas para las clases de escurrimiento				
		A*	B	C	D	
		Inf.	→ Ecur.			
Herbácea: mezcla de maleza de pasto y hierbas, hierbas y arbustos pequeños (siendo los arbustos el menor elemento).	Mala	80	87	93	Ecur.	
	Regular	71	81	89	↑	
	Buena	62	74	85		
Encino-aspen: mezclas de maleza de montaña, formada por arbusto de encino, aspen, caoba de montaña, arce y otros arbustos.	Mala	66	74	79		
	Regular	48	57	63		
	Buena	30	41	48	Inf.	

*Las CN para la clase A sólo se han elaborado para arbustos del desierto.

la capacidad de campo, las CN se ajustan a la Ecuación 6; Clase II: cuando la humedad del suelo está entre el 60% y menos 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 a la Ecuación 7:

$$CN_{\text{menor}} = 0.39 * CN * e^{(0.009 * CN)} \quad (6)$$

$$CN_{\text{mayor}} = 1.95 * CN * e^{(-0.00663 * CN)} \quad (7)$$

Muestras de campo y análisis de laboratorio

En la zona de estudio se colectaron 59 muestras de suelo en sitios con diferentes características (pendiente, vegetación, geología, etc.) dentro de los primeros 5 cm del suelo (Figura 2) y se colocaron en bolsas sellables de plás-

tico con capacidad de 1 galón siguiendo los procedimientos establecidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (US-EPA; Mason, 1992). Además se reportó el relieve del terreno, la clasificación del sedimento y el tipo de cobertura superficial de cada sitio. En el laboratorio se realizaron análisis gravimétricos del contenido de humedad y análisis texturales. El primero consistió en separar 30 g de la muestra de suelo y ponerlos a secar en una estufa a 105°C por un periodo de 24 horas (Fetter, 2001). De la muestra seca se tomó de nuevo su peso y se calculó la diferencia entre el peso inicial (30 g) y el peso después del secado, donde la diferencia en peso representa el contenido de humedad gravimétrico. El análisis textural se realizó según el procedimiento que marca el Manual de Ingeniería Costera de la Armada de los EE.UU. (U.S. Army Corps of Engineers, 1998). Para este análisis se emplearon las muestras de suelo previamente secadas durante el análisis de humedad, las cuales se vertieron en un juego de tamices con un tamaño de malla de 0–4Φ. Durante este análisis se separaron detalladamente solamente las fracciones de arena, mientras que la fracción limo-arcilla se cuantificó de manera general.

El método de las CN y las imágenes de satélite

Para complementar la información de los datos de campo se utilizó la información de dos plataformas espaciales: (1) el satélite Ikonos, capaz de obtener imágenes a color de la superficie del suelo con una resolución espacial de hasta 1 m. Estas imágenes se usaron para determinar la geometría de la cuenca (siguiendo la metodología propuesta por Mann y Parson, 2004), y el espesor de cobertura vegetal a través del índice diferencial de la vegetación normalizado (IDVN) de acuerdo al método de Thenkabail (2002). (2) El satélite Terra con información obtenida mediante el radiómetro Aster, la cual es capturada y procesada para generar modelos digitales de elevación (MDE) de alta resolución

Tabla 2. Descripción de las clases de escurrimiento (NRCS, 1986).

Clases	Descripción	Velocidad de infiltración (mm/hr)
A	Potencial de escurrimiento bajo o alta infiltración. El suelo tiene una capacidad de infiltración alta estando saturado. Constituido principalmente por una capa gruesa de grava o arena con un velocidad de drenaje alta a excesiva. Tiene una alta capacidad de transmisión.	8-12
B	El suelo tiene una capacidad de infiltración moderada estando saturado. Consiste principalmente en una capa moderadamente gruesa a gruesa de textura medianamente fina a medianamente gruesa, con una velocidad de drenaje buena a moderadamente buena. Su capacidad de transmisión es moderada.	4-8
C	El suelo tiene una capacidad de infiltración lenta estando saturado. Está constituido principalmente por una capa que impide la absorción del agua o tiene una textura medianamente fina a fina. Su capacidad de transmisión es baja.	1-4
D	Potencial de escurrimiento alto o baja infiltración. El suelo tiene una capacidad de infiltración muy baja estando saturado. Consiste principalmente en arcillas con un gran potencial de expansión, suelos que tienen un nivel freático alto permanente, suelos con una capa de arcilla en o cerca de la superficie o suelos poco densos sobre un material casi impermeable. Tienen además una capacidad de transmisión muy lenta.	0-1

espacial (30 m en X y Y), cuyas imágenes fueron utilizadas en la elaboración de modelos topográficos de la superficie del suelo y en el cálculo del porcentaje de inclinación de las pendientes. En la Figura 6 se presenta el diagrama de flujo del procesamiento de la información. El procesamiento de las imágenes de satélite (Aster e Ikonos) se realizó con ayuda del programa ERmapper 6.4, con el cual se obtuvo la información de las pendientes del terreno y de cobertura vegetal. Además se añadió la información de la carta geológica digital de INEGI (carta I11D82, 1976) para generar tres matrices de datos o rasters, con los cuales se diseñó un algoritmo que calcula las CN (Tabla 3).

Estimación de los volúmenes anuales y mensuales de escurrimiento aportados por el área de estudio

En base a la determinación de los valores de CN para el área de estudio se estimaron los valores de escurrimiento (Q). Para analizar las diferencias en las estimaciones del escurrimiento se utilizaron las Ecuaciones 1 y 3. Las precipitaciones pluviales utilizadas corresponden a los registros mensuales tomados en la estación meteorológica de Agua Caliente (CNA, 2003). La suma de los valores mensuales de Q se emplearon para el cálculo del promedio anual \bar{Q} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de laboratorio

Mediante los análisis de laboratorio se obtuvo un diagnóstico general sobre el comportamiento del tamaño de grano y el contenido de humedad de los suelos y la influencia que pueden tener sobre el potencial de escurrimiento de la región de muestreo. El análisis textural mostró una tendencia general hacia las arenas medianas a gruesas (Tabla 4), lo cual es favorable para la infiltración. Esta tendencia se observó en toda la región de muestreo por lo que aporta poca ayuda en el establecimiento de las clases de escurrimiento, las cuales quedan mayormente definidas por la geología, geomorfología y condiciones climáticas del área de estudio. En la Figura 7 se muestra la distribución espacial del análisis textural del suelo donde se puede distinguir básicamente dos zonas determinadas por las diferencias en las pendientes.

Los mayores valores del contenido de humedad gravimétrico se encontraron en la región norte y este del área de estudio (Tabla 5, Figura 8). El valor mínimo, con un valor de 1%, se registró en la región norte y el máximo con una humedad de suelo del 18% en la región este en laderas con vista preferente hacia el norte. En general, la serranía mostró una bajo contenido de humedad del suelo (CPH

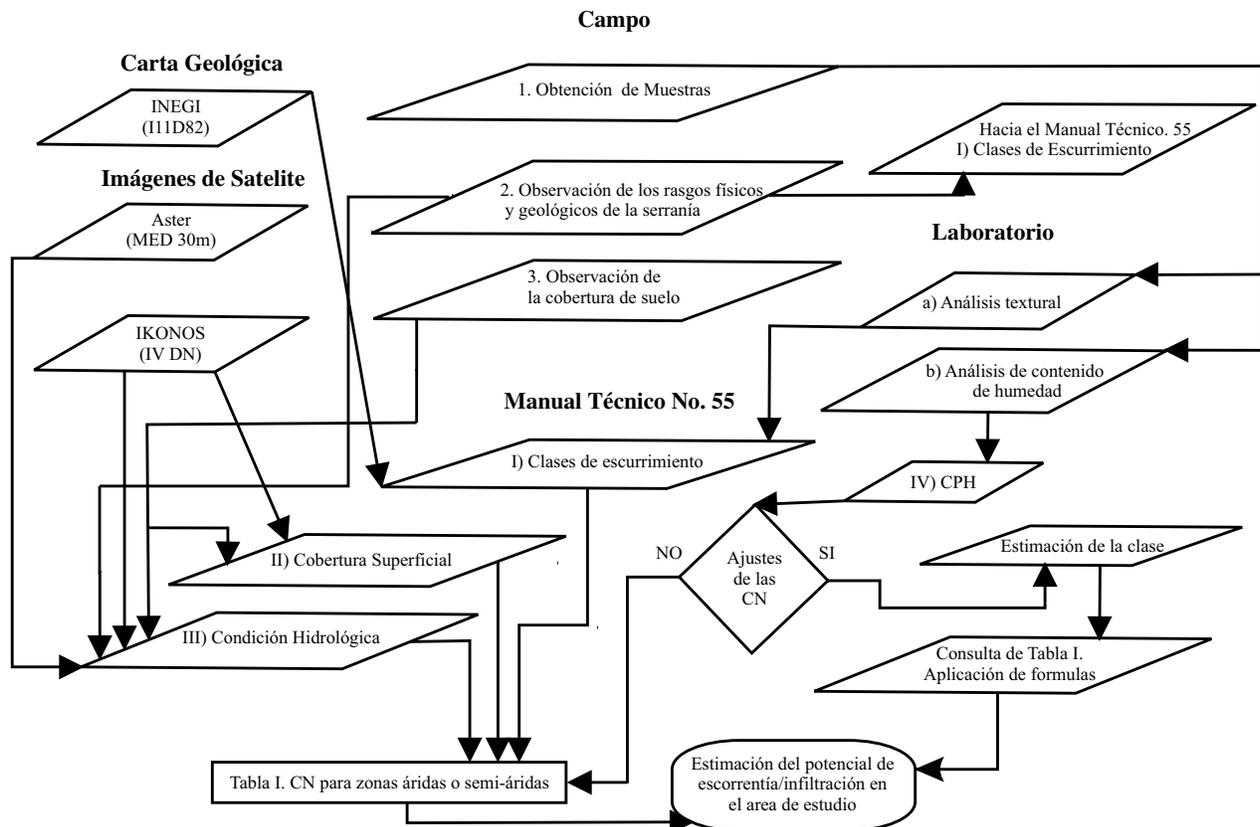


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de la información. A partir de los datos de campo, los datos de las imágenes de satélite y la carta geológica de INEGI (1976), el método de las curvas numeradas fue alimentado e implementado para estimar el escurrimiento potencial en el área de estudio.

Tabla 3. Determinación de las CN combinando la información de las tres matrices de datos: carta geológica, índice diferencial de la vegetación normalizado (IVDN) y porcentaje de pendientes.

Tipo de cobertura superficial	Valores IVDN	Condición hidrológica	Porcentaje de pendiente	B (aluvión)	C (rocas ígneas y metamórficas)	D* (rocas expuestas)
Herbácea: mezcla de maleza de pastos y hierbas.	0 – 0.2	Mala	>25%	80	87	93
		Regular	>8 – 25%	71	81	
		Buena	0 – 8%	62	74	
Encino-aspen: mezclas de maleza de montaña, formada por arbustos.	>0.2	Mala	>25%	66	74	
		regular	>8 – 25%	48	57	
		buena	0 – 8%	30	41	

*En la clase de escurrimiento D sólo se tomó en cuenta el valor máximo de escurrimiento pues esta clase está relacionada con las rocas expuestas superficialmente en la serranía, las cuales muestran un alto potencial de escurrimiento y una cobertura vegetal nula.

clase I), es decir menor al 60% de la capacidad de campo. Por este motivo se corrigieron los resultados de las CN clase II aplicando la ecuación 6.

Análisis de los datos de satélite

CN clase II, sin corrección por humedad

Siguiendo los procedimientos que marca el Manual Técnico no. 55 del USDA/NRCS (1986) para la aplicación del método de las CN para el escurrimiento y utilizando la información de la carta geológica de INEGI (1976), así como las imágenes Aster e Ikonos, se generó la Figura 9 en donde se observa la distribución espacial de las CN para la zona de estudio. En la región de la serranía Matcuatai se observan valores altos de CN (78–93) indicando un alto potencial de escurrimiento. En algunas área dentro de la serranía se observan valores medios de CN (61–73) con un potencial menor de escurrimiento, relacionados con zonas

de mayor cobertura vegetal (conformado por arbustos) y baja pendiente (0–25%). Los valores mínimos de CN se observaron en la región del aluvión, los cuales mostraron un alto potencial de infiltración principalmente en el arroyo Guadalupe y las zonas con encinos.

Una vez obtenidas las CN y conocido el valor de precipitación pluvial (P) se utilizó la Ecuación 1 para obtener los valores de escurrimiento (Q) en la serranía (Figura 10). Las regiones en tonos verdes están relacionadas con las laderas de serranía donde se muestra el valor máximo de Q (31.22 mm), presentan pendientes >25% y una vegetación predominante de maleza de pastos y hierbas. Este valor corresponde al 51.2% de 61 mm de lluvia. El valor mínimo (2.77 mm) se observó al este de la serranía en un área de abundante vegetación (conformada por arbustos de montaña y maleza de pastos y hierbas) y de pendiente media baja (8–15%). Aquí se obtuvo un porcentaje de escurrimiento de 4.54% con respecto a 61 mm de lluvia.

La Ecuación 1 muestra que la precipitación (P)

Tabla 4. Resultados del análisis textural de suelos para los sitios de muestreo.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
arena mediana	arena fina	arena mediana	arena mediana	arena mediana	arena mediana				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
arena mediana	arena fina	arena mediana							
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
arena gruesa	arena fina	arena mediana	arena fina	arena gruesa	arena mediana	arena fina	arena mediana	arena mediana	arena mediana
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
arena mediana	arena mediana	arena fina	arena mediana	arena fina					
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
arena fina	arena gruesa	arena gruesa	arena mediana	arena gruesa	arena mediana				
51	52	53	54	55	56	57	58	59	
arena mediana	arena mediana	arena mediana	arena gruesa	arena fina	arena mediana	arena mediana	arena mediana	arena gruesa	

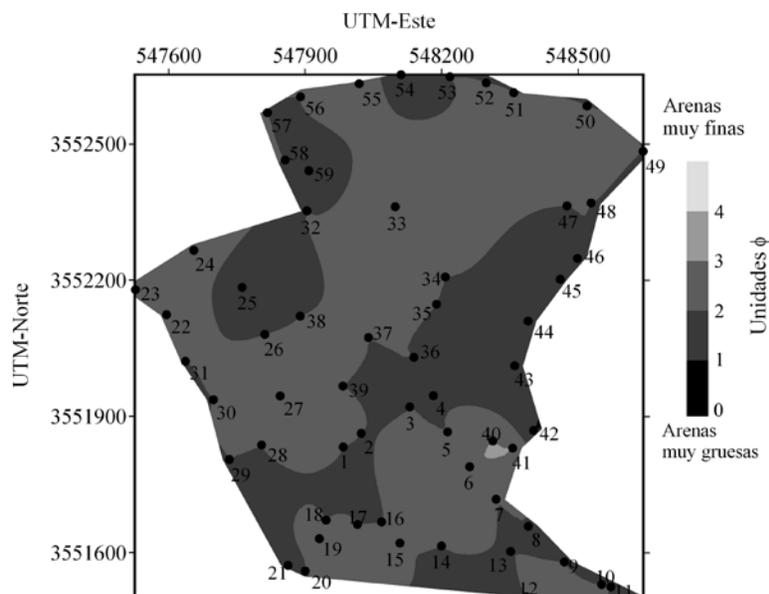


Figura 7. Distribución del análisis textural para el área de estudio. Los números indican los sitios de muestreo.

debe exceder 0.2 veces el potencial máximo de retención (S) antes de que el escurrimiento pueda ser generado. Consecuentemente, una lluvia acumulativa de $0.2S$ debe precipitarse antes de que inicie el proceso de escurrimiento. Por lo tanto, una precipitación acumulativa de 61 mm genera un proceso de escurrimiento en una CN igual a 45 (llamada también CN crítica o CN_{crit} que es el valor de CN a partir del cual se empieza a generar un escurrimiento para una precipitación acumulada determinada. El comportamiento natural de las CN muestra que con un aumento en la precipitación, CN_{crit} disminuye significativamente. En la Figura 11 se ve la relación de CN y escorrentía para una baja humedad de suelo (CPH Clase I). La Tabla 6 muestra el porcentaje de ocurrencia de las CN en el área de estudio, donde se puede observar una tendencia hacia un potencial de escurrimiento medio y alto, con valores de CN arriba de 62. Esto sugiere

que la capacidad de suelos en el área de estudio tiene un bajo potencial de infiltración. Esta reducción en la capacidad y áreas de infiltración tiene como consecuencia una disminución en la posible recarga de la zona de estudio.

CN clase I, con corrección por baja humedad

Los resultados del contenido de humedad gravimétrico indicaron la necesidad de aplicar la Ecuación 6 a las CN encontradas por la clase II, debido a la baja condición de humedad que se observó en el área de estudio (Figura 8). Esta condición aumenta la capacidad de infiltración para toda el área de estudio, inclusive en la serranía, donde el espesor de vegetación obtiene un peso mayor en el cálculo de las CN, principalmente en sitios con poca pendiente.

La variación espacial de Q para las CN corregidas por baja humedad se observa en la Figura 12. En general

Tabla 5. Contenido de humedad gravimétrico para los sitios de muestreo.

<i>Sitio</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
% Humedad	3.56	6.86	4.14	5.95	4.38	5.95	4.38	6.34	5.84	4.69
<i>Sitio</i>	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
% Humedad	4.65	3.28	3.56	3.88	4.42	4.98	3.6	4.36	2.74	3.16
<i>Sitio</i>	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
% Humedad	3.15	2.47	4.2	4.2	3.12	2.2	5.67	4.27	5.41	5.94
<i>Sitio</i>	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
% Humedad	3.53	1.35	3.94	3.87	2.05	4.23	3.29	3.23	3.9	5.67
<i>Sitio</i>	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
% Humedad	3.6	1.31	1.35	17.86	1.2	2.83	1.73	1.7	15.87	2.07
<i>Sitio</i>	51	52	53	54	55	56	57	58	59	
% Humedad	1.43	15.2	2.64	16.21	2.22	2.11	1.66	1.58	0.89	

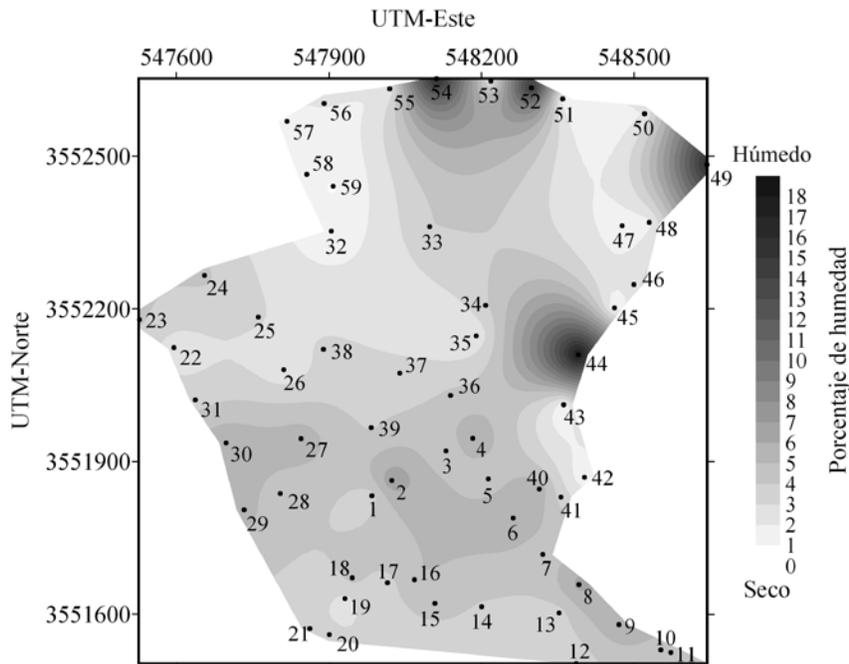


Figura 8. Distribución del contenido de humedad gravimétrica. Los números indican los sitios de muestreo.

se observa una disminución de Q en comparación con los valores observados para una CPH clase II. Los valores máximos se muestran nuevamente en la serranía con un valor igual a 14.30 mm correspondientes al 22.44% de 61 mm de lluvia. Con esta disminución del potencial de escurrimiento aumenta significativamente la posibilidad de recarga por la precipitación.

Estimación de los volúmenes de escurrimiento

Los valores de CN (clase II) para la serranía Matcuatai varían de 67 a 83 (escurrimiento medio-alto; Tabla 6). Para obtener los volúmenes de Q en el área de estudio se calculó primero el promedio del intervalo antes mencionado (igual a 78) y su desviación estándar (± 7), con lo cual se obtuvieron tres valores representativos de CN: CN (85, 78 y 71) y CN" (80, 70 y 60). Además se evaluó el escurrimiento para las diferentes condiciones de humedad del suelo: baja humedad (CPH clase I): CN (71, 61 y 52) y CN" (60, 47 y 37); alta humedad (CPH III): CN (97, 93 y 89) y CN" (97, 91 y 85).

Recordando que Q está en función de la precipitación pluvial (P) es necesario verificar que los valores de CN antes mencionados sean mayores a CN_{crit} para lograr un proceso de escurrimiento; además, es importante identificar los valores bajos de P promedio en el área de estudio (Figura 3). Por ejemplo, en abril ($P=17.1$ mm) se tendría un proceso de escurrimiento a partir de una CN_{crit} mayor que 75. En noviembre ($P=24.0$ mm) el valor de CN_{crit} es

68. Mientras que el valor de CN_{crit} para diciembre ($P=36.3$ mm) es de 58. Los valores de P de mayo a octubre quedan fuera del límite mínimo aceptable del método de las CN (12.7 mm) para el cálculo de Q . En la Tabla 7 se muestran los valores de CN que quedan fuera de los cálculos de Q por ser menores a CN_{crit} .

Con los valores mensuales aceptables de \bar{Q} se calculó el volumen de escurrimiento promedio para las CN mayores que CN_{crit} . Una vez más se calcularon los escurrimientos usando las Ecuaciones 1 y 3, para comparar sus resultados. Es importante destacar que para algunos meses sólo pudo realizarse el cálculo para un solo valor de CN, el cual fue mayor a CN_{crit} (Tabla 7). Por último, se transformaron los valores de Q (originalmente en mm) a unidades volumétricas, multiplicando por el tamaño del área de estudio (2,936,460 m²):

$$\bar{Q}(\text{mm}) * \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) * \text{Área}(\text{m}^2) = \bar{Q}(\text{m}^3) \quad (8)$$

Los volúmenes de Q mensuales y anuales aportados por la serranía Matcuatai al Valle de Guadalupe se muestran en la Tabla 8, en la cual se combinan diferentes condiciones de humedad. Los valores de Q anual del Valle de Guadalupe son: $Q = 350,000 \pm 83,000 \text{ Mm}^3$ y $Q'' = 258,000 \pm 123,000 \text{ Mm}^3$. Q'' es más precisa dado los bajos valores de precipitación presentes en el área de estudio, lo cual resulta en una disminución de más del 20% de Q anual e implica una reducción en la recarga de las planicies del Valle de Guadalupe. La cantidad de escurrimiento determinada de esta manera para el Valle de Guadalupe es solamente

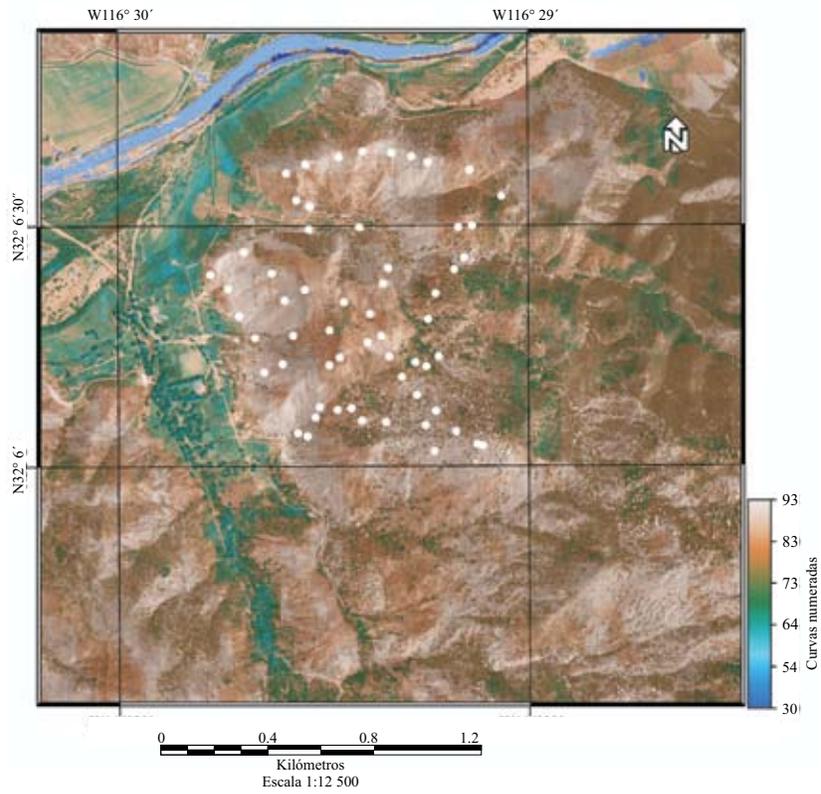


Figura 9. Curvas numeradas (CN) para el área de estudio suponiendo una humedad del suelo intermedia (CPH Clase II). En azul y verde se muestran las regiones de infiltración, en café las regiones de medio a alto escurrimiento. Los puntos blancos indican la localización de los sitios de muestreo.

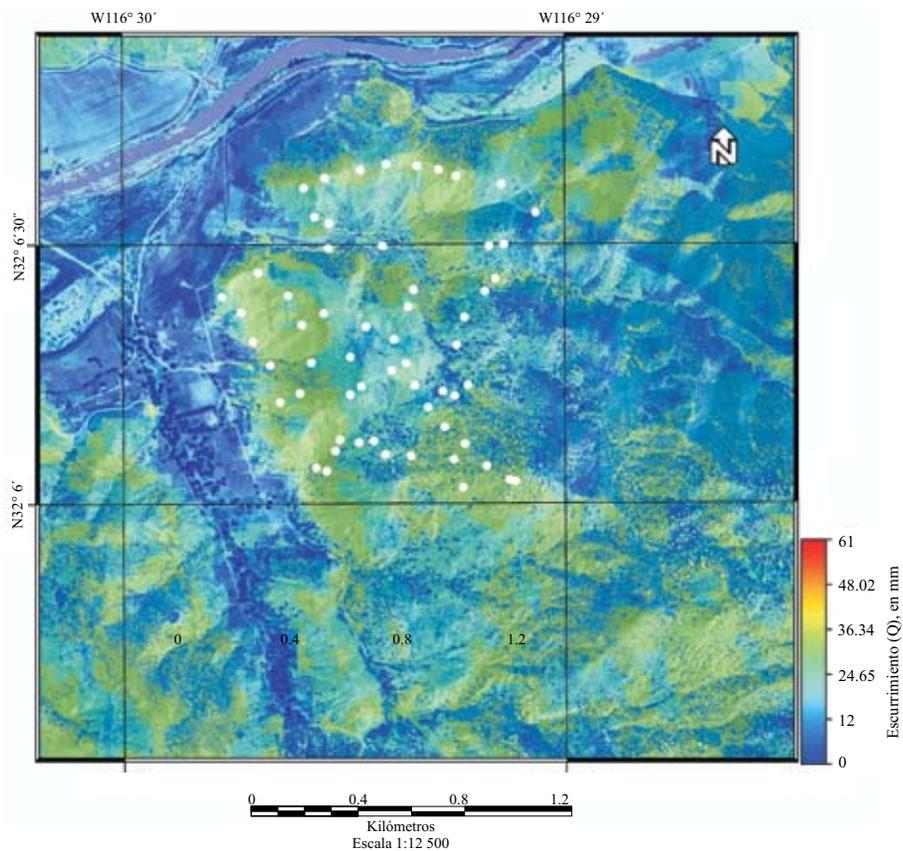


Figura 10. Estimación del escurrimiento (Q) suponiendo 61 mm de lluvia. Los puntos blancos indican la localización de los sitios de muestreo.

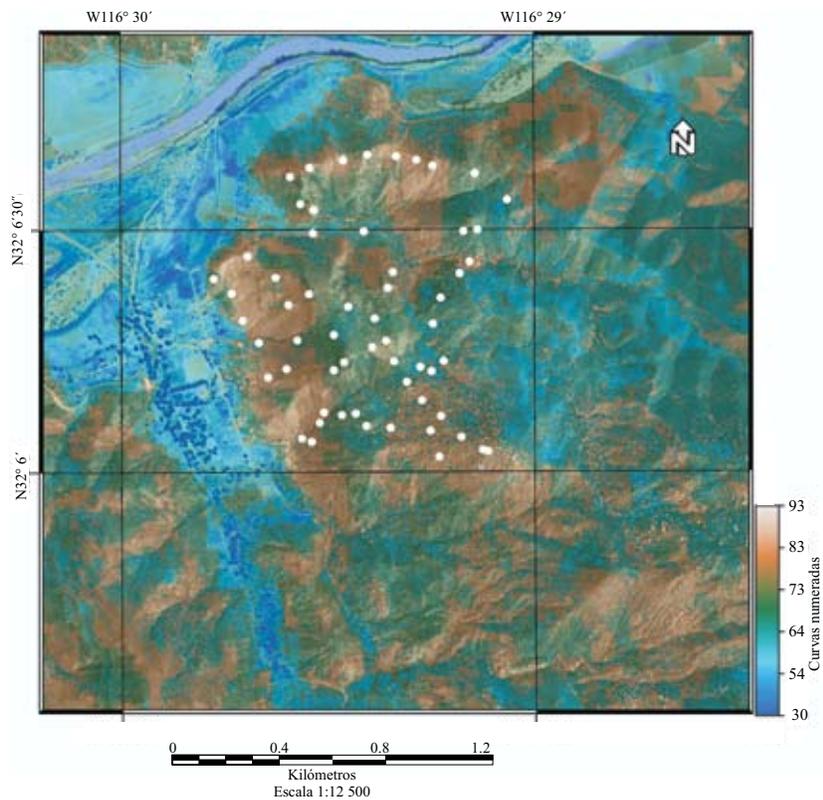


Figura 11. Curvas numeradas (CN) corregidas mostrando una baja humedad del suelo (CPH Clase I). En color azul y verde se muestran las regiones de infiltración de mayor a menor grado, respectivamente, en café las regiones de escorrentía media a alta, y en blanco los sitio de muestreo.

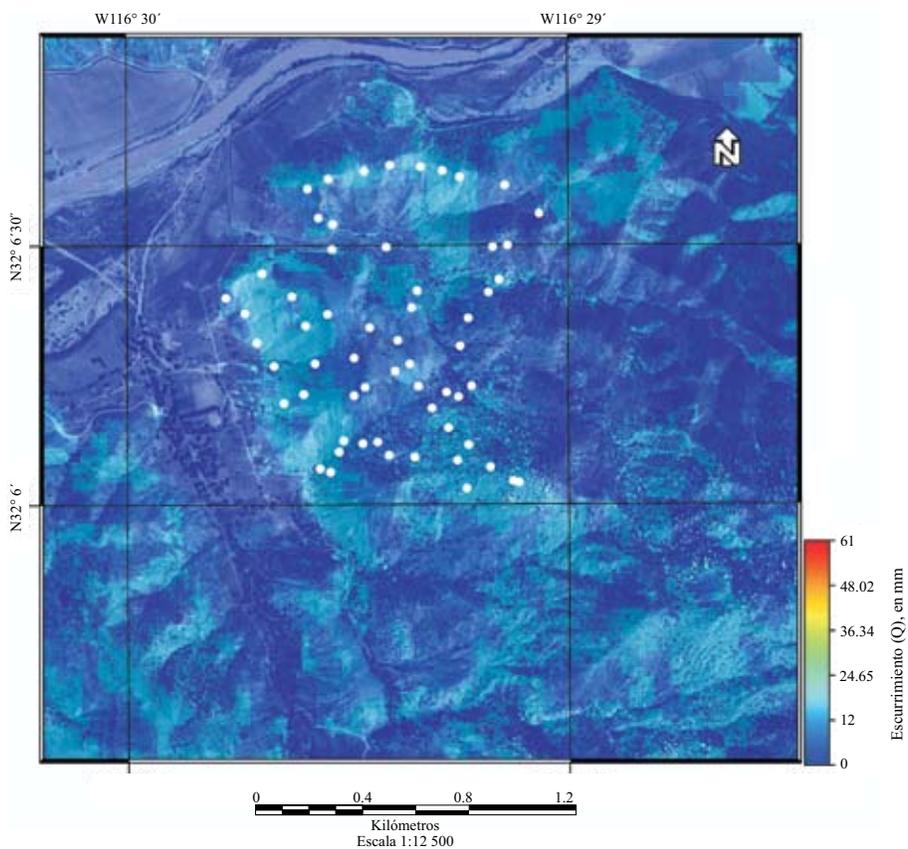


Figura 12 Estimación del escurrimiento (Q) con baja humedad del suelo (CPH Clase I). Los puntos blancos indican los sitios de muestreo.

Tabla 6. Porcentaje de ocurrencia de las distintas CN en el área de estudio.

Curva numerada	Infiltración		Escurrecimiento	
	30–44	45–61	62–77	78–93
Potencial de escurrimiento/ infiltración	alto	bajo	medio	alto
Porcentaje de ocurrencia de las CN en el área de estudio	4.71	7.42	36.96	50.89

una aproximación y requiere que sean determinadas las posibles pérdidas por evaporación, el uso antropogénico y el almacenaje temporal.

CONCLUSIONES

Los resultados del muestreo de campo y de los datos de satélite indican que la región noreste del Valle de Guadalupe presenta un alto potencial de escurrimiento en la parte de la serranía, mientras que el aluvión presenta un alto potencial de infiltración. Dentro de la serranía Matcuatai, aquellas áreas con una pendiente media-baja (0–25%) y un espesor rico de vegetación (conformado por arbustos de montaña) tienen un potencial de infiltración menor que el presente en el aluvión. Esta infiltración no necesariamente refleja una recarga del acuífero, ya que ésta está en función de la cantidad de lluvia que pueda precipitarse en la serranía.

La variabilidad espacial del potencial de escurrimiento/infiltración puede estudiarse en tres escenarios distintos de volúmenes de precipitación pluvial:

1) No saturación. Cuando el suelo se encuentra en condiciones de no saturación la capacidad de escurrimiento es de 0 mm en el aluvión y de 4.46 mm en la serranía para 61 mm de lluvia.

2) Etapa intermedia. En una etapa media de presencia de humedad en el suelo, la capacidad de escurrimiento es de 2.81 mm en el aluvión y de 18.41 mm en la serranía para 61 mm de lluvia, mostrando un ligero aumento de escurrimiento en las diferentes zonas del área de estudio.

3) Saturación. Cuando el suelo esté saturado, principalmente al final de la temporada de lluvias y/o al final de una tormenta invernal con suficiente duración, la capacidad de escurrimiento es de 19 mm en el aluvión y de 43 mm en la serranía para 61 mm de lluvia, mostrando una fuerte componente de escurrimiento.

Tabla 7. Valores de curvas numeradas (CN) menores que CN_{crit} .

P (mm)	Q			Q''		
	CPH II	CPH I	CPH III	CPH II	CPH I	CPH III
Abr = 17.1	71	71, 61 y 52	–	70 y 60	60, 47 y 30	–
Nov = 24.0	–	61 y 52	–	60	60, 47 y 30	–
Dic = 36.3	–	52	–	–	47 y 37	–

Tabla 8. Volúmenes de escurrimiento aportados por la serranía Matcuatai al Valle de Guadalupe suponiendo una CPH III en los meses de enero-marzo (en cursivas) y una CPH I de abril a diciembre. σ : Desviación estándar.

	Q			Q''	
	P media (mm)	Q mensual (m ³)	σ (m ³)	Q mensual (m ³)	σ (m ³)
<i>Ene</i>	<i>51.70</i>	<i>101,633</i>	<i>25,000</i>	<i>75,700</i>	<i>38,000</i>
<i>Feb</i>	<i>61.00</i>	<i>126,633</i>	<i>27,000</i>	<i>96,167</i>	<i>44,000</i>
<i>Mar</i>	<i>56.10</i>	<i>113,400</i>	<i>26,000</i>	<i>85,233</i>	<i>41,000</i>
Abr	17.10				
May	3.80				
Jun	2.10				
Jul	3.50				
Ago	5.80				
Sep	6.60				
Oct	10.40				
Nov	24.00	300			
Dic	36.30	6,200	4,000	800	
Escurrecimiento promedio anual		348,167	83,000	257,900	123,000

Estos tres escenarios tienen una implicación para el potencial de recarga del acuífero del Valle de Guadalupe, donde el mayor aporte de la precipitación a la recarga existe siempre y cuando el suelo esté saturado y la mayor cantidad de agua escurra hacia las planicies del valle, aumentando así la infiltración en el mismo.

El volumen de escurrimiento anual aportado por el área de estudio al VG es de $258,000 \pm 123,000$ m³. Sin embargo es necesario mencionar que estos resultados aumentan su certidumbre si los valores de (P) utilizados en la ecuación de escurrimiento corresponden a registros diarios (24 hrs.) de precipitación pluvial y si se consideran los factores de evaporación, el uso antropogénico y almacenaje temporal.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT, CICESE, a la vitivinícola Casa de Piedra y al comité ProVino por el apoyo económico brindado. Muy en especial a la comunidad indígena de San Antonio Necua por las facilidades brindadas para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- Andrade-Borbolla, M., 1997, Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Mpio. de Ensenada, B.C.: Ensenada, Baja California, Grupo Agroindustrial del Valle de Guadalupe, 60 pp.
- Beltrán-Gómez, L., 1998, Actualización hidrogeológica del acuífero del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California: Comisión Nacional del Agua (CNA), Gerencia Regional de la Península de Baja California, Subgerencia Técnica Regional, 24 pp.
- Beltrán-Gómez, L., 2001, Balance geohidrológico del acuífero BC-07, Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, B.C.: Comisión

- Nacional del Agua (CNA), Gerencia Regional de la Península de Baja California, Subgerencia Regional Técnica, 1-18 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2003, Programa Hidráulico Regional 2002-2006, Región I. Península de Baja California: Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Programación, Gerencia de Planeación Hidráulica, 192 pp.
- Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology, : EE.UU. Prentice Hall, 4a edición, 598 pp.
- Hawkins, R.H., Ruiyun J., Woodward, D.E., Hjelmmfelt, A.T Jr., VanMullen, J.E., Montana, B., 2001, Runoff Curve Number Method; examination of the initial abstraction ratio (en línea): University of Arizona, School of Renewable Natural Resources, <ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/support/water/hydrology/Hawkins.doc>, consulta: 1 de febrero de 2005, 12 pp.
- Hernández-Rosas, M.T., Mejía-Vázquez, R., 2003, Relación de las aguas superficiales y subterráneas del acuífero BC-07, Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, B.C.: Comisión Nacional del Agua (CNA), Gerencia Regional en la Península de Baja California, Subgerencia Regional Técnica, 13 pp.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), 1976, Carta Geológica I11-D82, Francisco Zarco, esc. 1:50,000: Aguascalientes, Ags., Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 1 mapa.
- Mann, M., Parsons, S., 2004, Integrating geospatial and watershed data using the watershed modeling system (WMS) to evaluate flooding Potential of the Clear Fork Watershed in Kentucky and Tennessee (en línea), *in* 2004 Advanced Integration of Geospatial Technologies in Mining and Reclamation, December 7-9, 2004, Atlanta, Ga.: U.S. Dept. of the Interior, Office of Surface Mining, <http://www.tips.osmre.gov/GeoSpatial/post-conference/Papers/Mann2-TN.pdf> consulta: 1 de febrero de 2005, 14 pp.
- Mason, B.J., 1992. Preparation of soil sampling protocols: sampling techniques and strategies. United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-92/128, 151 pp.
- Thenkabil, P.S., 2002, Inter-sensor relationships between IKONOS and Landsat-7 ETM+ NDVI data in three ecoregions of Africa (en línea): EE.UU, Yale University, Department of Geology and Geophysics, Center for Earth Observation (CEO), <http://www.geology.yale.edu/~smith/inter-sensor-calibration.pdf> consulta: 1 de febrero de 2005, 20 pp.
- U.S. Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), 1986, Urban Hydrology for Small Watersheds: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Engineering Division, Technical Release 55, 210-VI-TR-55, cap. 2, 2a edición, 1-16.
- U.S. Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2002, National Soil Survey Handbook (en línea): title 430-VI, <http://soils.usda.gov/technical/handbook/> consulta: 1 de abril de 2003
- U.S. Army Corps of Engineers, 1998, Coastal sediment properties, *en* Coastal Engineering Manual, part III, chapter 1, EM 1110-2-1100, III-1-1 – III-1-41.
- Woodward, D.E., Hawkins, R.H., Hjelmmfelt, A.T Jr., VanMullen, J.E., Quan, Q.D., 1999, Curve Number Method; Origins, applications and limitations (en línea): United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), <ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/support/water/hydrology/Woodward.doc> consulta: 1 de febrero de 2005, 10 pp.

Manuscrito recibido: Julio 1, 2005

Manuscrito corregido recibido: Agosto 1, 2006

Manuscrito aceptado: Agosto 4, 2006