

# MODELACIÓN ESPACIAL DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA Y ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DEL AGUA DE LLUVIA EN LA ZONA SUR DEL ESTADO DE PUEBLA, MÉXICO

- Gabriel Díaz-Padilla • Ignacio Sánchez-Cohen •
- Rafael Alberto Guajardo-Panes • Finlandia Barbosa-Moreno •
- Martín Gómez-Cárdenas • José Miguel Uribe-Bernal •

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México*

## Resumen

En la conservación de recursos naturales, el aprovechamiento racional y el manejo de recursos hídricos son prioritarios; bajo esta directriz, el escurrimiento superficial, la precipitación pluvial y la infiltración son condicionantes en la recarga de acuíferos y en la disponibilidad del agua. Este trabajo desarrolla una propuesta metodológica para delimitar e identificar las microcuencas que reúnan condiciones favorables para implementar obras en beneficio de la recarga de acuíferos en el sur de la Mixteca y Sierra Negra de Puebla. Se calcularon coeficientes de escurrimiento, considerando el uso y la textura de suelo, así como la pendiente del terreno para modelar los flujos y la dirección de corrientes de agua de lluvia. En poco más de dos millones de hectáreas se delimitaron 178 microcuencas; 125 inciden en 1.31 millones de hectáreas de la región de la Mixteca, en donde se captan aproximadamente 9 513 Hm<sup>3</sup> de precipitación total anual y de ésta escurre el 42% (4 030 Hm<sup>3</sup>); en la Sierra Negra, que comprende un área aproximada de 704 mil hectáreas, fueron delimitadas 53 microcuencas, las cuales captan 6 972 Hm<sup>3</sup> de precipitación total anual, de la cual se escurre el 54%. Se aplicó análisis de componentes principales para disminuir la dimensionalidad de la base de datos de microcuencas para realizar una clasificación de cinco tipos mediante la metodología Dalenius y Hodges, considerando la extensión territorial de cada microcuenca, su producción de agua, densidad poblacional y degradación de suelo. Finalmente, se identificaron once como de prioridad en la conservación y construcción de infraestructura hidroagrícola, como hoyas de agua, represas y/o lagunas de infiltración.

**Palabras clave:** acuíferos, microcuenca, precipitación, escurrimiento, Prevert.

## Introducción

El aprovechamiento racional y el manejo integral de los recursos hídricos son prioridades mundiales en el ámbito de la conservación de los recursos naturales. De las variables fundamentales del ciclo hidrológico sobresalen la precipitación pluvial, el escurrimiento superficial y la infiltración del agua de lluvia, ya que condicionan la recarga de acuíferos y el agua disponible en diferentes estructuras naturales o artificiales de captación y conducción del agua.

La modelación de dichas variables permite conocer los patrones temporales y espaciales de su comportamiento y, por tanto, el cálculo de la disponibilidad del agua para sus diversos usos: humano, agrícola e industrial, entre otros.

Por otra parte, es importante destacar que existe un consenso generalizado entre tomadores de decisiones, científicos y ciudadanos en general, de que el manejo de los recursos hídricos debe realizarse desde la perspectiva de cuenca, subcuenca o microcuenca; dependiendo del tipo y objetivo de los diferentes estudios, Sánchez y

Chebhouni (2007) concluye que es necesario considerar a la cuenca hidrológica como unidad básica de planeación, y Díaz (2001) cataloga a la microcuenca o subcuenca como unidades básicas de operación de proyectos relacionados con la conservación y el manejo integral del medio ambiente.

Con el advenimiento de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la modelación de procesos hidrológicos se ha facilitado enormemente, permitiendo el estudio de patrones espaciales y temporales de diversas variables. Otro aspecto importante a destacar es que con la actual disponibilidad de modelos de elevación digital incorporados a ambientes SIG, es posible modelar los escurrimientos naturales del agua de lluvia y delimitar espacialmente las unidades de drenaje en el nivel de cuenca, subcuenca y microcuenca, así como el flujo y la dirección de las corrientes, entre otros importantes procesos hidrológicos incorporados en los SIG.

Un aspecto fundamental en el estudio de la precipitación pluvial es definir el mejor método de interpolación espacial, el cual permite generar un continuo de valores, partiendo de valores puntuales, conocidos y disponibles en las estaciones climatológicas. De acuerdo con Díaz *et al.* (2008) y Díaz (2009), el mejor método de interpolación espacial para el caso de la lluvia es el Thin Plate Smoothing Splane (TPSS), el cual será utilizado en el presente trabajo para la obtención de un mapa de la distribución espacial de precipitación pluvial en la zona.

Referente a la cuantificación del escurrimiento superficial existen diversos métodos de cálculo, que van de los sumamente sencillos hasta los extremadamente complejos; dentro de los primeros destaca el Método Racional (Treviño *et al.*, 2002), el cual requiere como uno de los insumos principales los coeficientes de escurrimiento; varios autores (Treviño *et al.*, 2002; TRAGSA, 1998) proponen el uso de los coeficientes de escurrimiento desarrollados por Prevert (Martínez y Dal-Ré, 2003); en el presente estudio, dicho método y coeficientes

de escurrimiento fueron seleccionados por su simplicidad, bajo requerimiento de variables de entrada y buena adecuación a la modelación espacial en el ambiente SIG.

Una de las variables fuertemente correlacionada con el escurrimiento e infiltración es el uso actual del suelo; en este sentido será una de las variables fundamentales de entrada en la valoración de la producción de agua en la zona y para la modelación de escenarios futuros, variando, por ejemplo, ciertos grados de deforestación y de perturbación causados por el hombre.

Al realizar los cálculos e integración de las variables señaladas con anterioridad, se conforman bases de datos complejas y, en algunos casos, difíciles de interpretar; en este sentido, diversos autores indican que la utilización de métodos multivariados permite, entre otras cosas, la disminución de dimensiones de los datos y la derivación de nuevas variables que permiten la abstracción de resultados y hacen más sencilla su interpretación. Contribuye, entre otros aspectos, a conformar grupos de individuos con características similares, los cuales se diferencian claramente de los individuos contenidos en otros grupos (Dallas, 2000; Díaz *et al.*, 2007).

Es por lo anterior que los objetivos del presente trabajo han sido la modelación espacial de la precipitación pluvial anual, la delimitación espacial de las microcuencas mediante el uso de los SIG y el modelo de elevación digital, calcular el escurrimiento y producción de agua de cada una de ellas, para llegar a una clasificación de las zonas exportadoras y receptoras de agua de lluvia, y finalmente realizar una tipología de microcuencas mediante métodos multivariados. Los resultados encontrados y la metodología desarrollada servirá de base para posteriores estudios, como el de recarga de acuíferos, la definición de zonas prioritarias de conservación y el establecimiento de infraestructura hidráulica necesaria para la captación y conducción del agua de lluvia, así como para la evaluación de la vulnerabilidad o riesgo a fenómenos climatológicos adversos

que pudieran presentarse, lo anterior en dos de las más importantes zonas de producción y conducción de agua en el estado de Puebla, que son la Sierra Negra y la Sierra Mixteca.

## Metodología

### *Ubicación y descripción de la zona de estudio*

Espacialmente, el área de estudio queda comprendida en el cuadrante geográfico que va de los 96°40'08" a los 99°06'56" de longitud al oeste del meridiano de Greenwich y de los 17°45'10" a los 19°06'24" de latitud al norte del ecuador. Esta zona incluye las regiones de Sierra Negra y Sierra Mixteca; la primera se ubica al sureste del estado de Puebla, México; la mayor parte de su superficie se encuentra en la vertiente de la cuenca del Papaloapan, con una extensión aproximada de 910 mil hectáreas. La Región Sierra Mixteca se encuentra al suroeste del mismo estado, con una extensión territorial aproximada a las 477 mil hectáreas; colinda al este con la región de la Sierra Negra y la mayoría de su superficie forma parte de la cuenca del río Atoyac (figura 1).

### *Delimitación y caracterización de microcuencas*

En la delimitación de microcuencas se utilizaron las extensiones de análisis geoespacial y análisis hídrico de *ArcView 3.2* (ESRI, 1999), en donde a través de algoritmos matemáticos que evalúan la topografía del terreno es posible delimitar microcuencas a diferentes niveles de superficie promedio; en el caso de las generadas para la zona de estudio, se especificó que la superficie mínima de cada unidad fuera de seis mil hectáreas, por considerar que es un tamaño adecuado para implementar estrategias de conservación y/o almacenamiento de agua a pequeña escala y que de acuerdo con Díaz (2001) es el tamaño promedio de las microcuencas del estado de Veracruz.

El proceso de la generación de microcuencas tiene como base el uso del Modelo de Elevación Digital (MED), con resolución de un dato cada noventa metros (INEGI, 1995), al cual se aplica el proceso metodológico descrito por Maidment y Djokic (2000), y que se muestra en la figura 2.

Una vez delimitadas las microcuencas, se clasificaron en tres grupos, considerando la altitud promedio: a) zona alta, con altitud promedio mayor a los 1 500 msnm; b) zona intermedia, con altitud promedio entre los 1 000 y los 1 500 msnm, y c) zona baja, con altitud promedio menor a los 1 000 msnm.

### *Tratamiento de la información climatológica*

Se consideró emplear la información de registros diarios de la variable de precipitación, la cual se extrajo del Sistema de Información Climática (SICLIMA) desarrollado por Díaz y Cortina (2005); dicho sistema contiene información histórica entre los años 1961 y 2003.

De esta información fue posible generar información puntual de la precipitación media anual acumulada histórica (PMAAH).

### *Interpolación de precipitación media anual acumulada*

Con la información de PMAAH se realizó un proceso de interpolación para generar una capa continua, la cual se obtuvo con la versión 4.3 del *software ANUSPLIN* desarrollado por Hutchinson (2004), el cual aplica el método Thin Plate Smoothing Spline (TPSS); se empleó este *software* debido a que en el trabajo de Díaz et al. (2008) se demostró obtener el menor cuadrado medio del error (CME), en comparación con los métodos inverso de la distancia (IDW), kriging y co-kriging. El método TPSS emplea modelos *spline* en combinación con el modelo de elevación digital (MED) para generar una malla continua de valores de precipitación, obteniendo así una capa continua acorde con las características físicas del terreno.

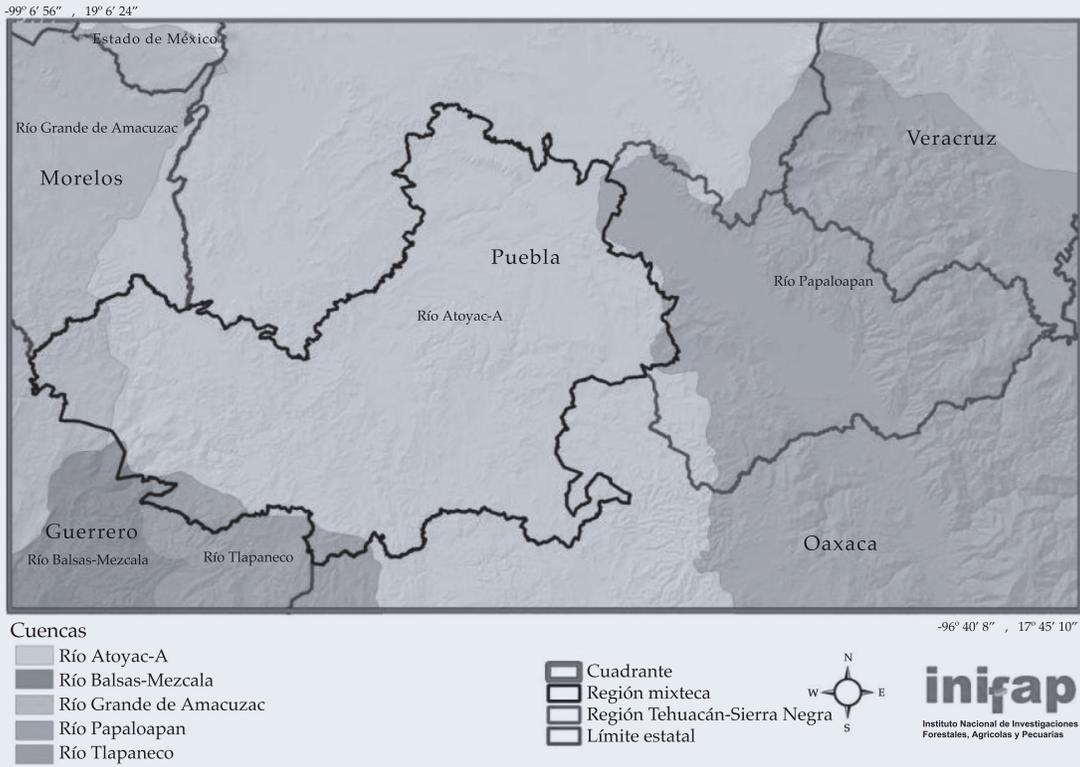


Figura 1. Delimitación de la zona de estudio y su incidencia en cuencas hidrológicas.

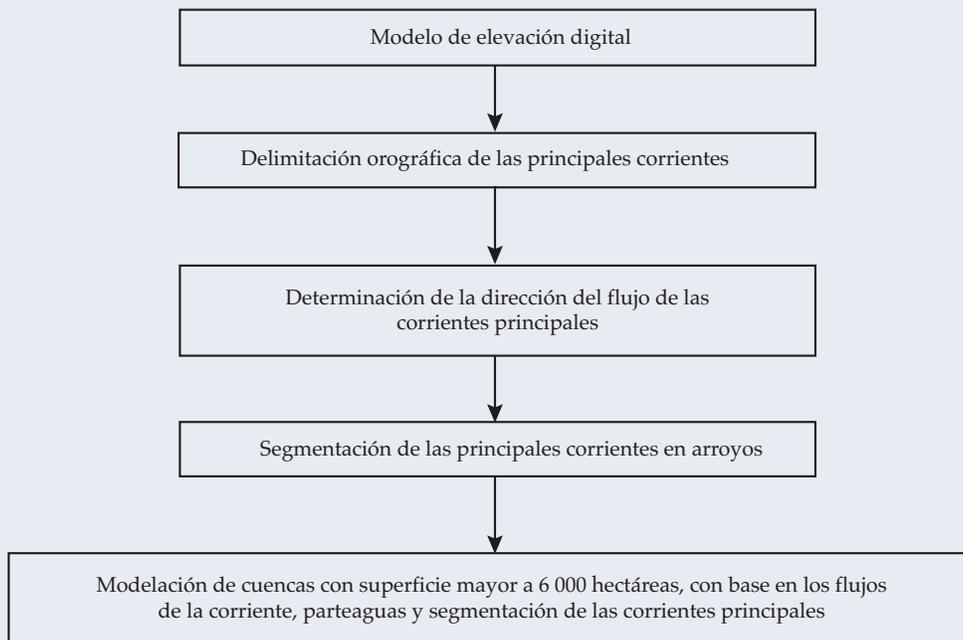


Figura 2. Modelo de procesamiento para la obtención de microcuencas en SIG.

### Cálculo de la escorrentía superficial

El ciclo de escorrentía es el término descriptivo que se aplica a aquella parte del ciclo hidrológico comprendida entre la caída de la precipitación sobre un área y la descarga posterior a través de los cauces superficiales. La escorrentía es la parte de precipitación que llega a la red hidrográfica de la cuenca y discurre por ella, dando lugar a los caudales líquidos. Existen diversas fórmulas empíricas basadas en datos experimentales que determinan la escorrentía de las cuencas de recepción (TRAGSA, 1998).

Este trabajo emplea la metodología propuesta por Treviño *et al.* (2002), en el cual se considera un modelo digital de pendientes, coberturas edafológicas y uso de suelo, para estimar el volumen medio escurrido mediante la siguiente ecuación:

$$Vm = (Cep)(A)(P_p) \quad (1)$$

Donde:

$Vm$  = volumen medio escurrido.

$Cep$  = coeficiente de escorrentía ponderado.

$P_p$  = precipitación pluvial media anual.

$A$  = superficie de la cuenca en kilómetros cuadrados.

Este es un método empírico que no involucra la intercepción de la lluvia por la vegetación ni la humedad del suelo, sólo toma en cuenta que para cada uso de suelo varía la cantidad del agua que escurre, considerando la pendiente del terreno, la textura del suelo, el uso actual del suelo y el coeficiente de escorrentía ponderado, el cual se calcula mediante la ecuación:

$$Cep = (Ce_1)(A_1) + (Ce_2)(A_2) + \dots + (Ce_n)(A_n) \quad (2)$$

Donde:

$Cep$  = coeficiente de escorrentía ponderado.

$Ce_n$  = coeficiente de escorrentía considerando pendiente del terreno, textura del suelo y uso actual del suelo.

$A_n$  = superficies de la cuenca en kilómetros cuadrados.

Los coeficientes de escorrentía considerados en el estudio fueron los de Prevert (TRAGSA, 1998), que son ampliamente difundidos en Europa y calculados mediante parcelas experimentales (cuadro 1).

### Procesamiento de material cartográfico

Para calcular la escorrentía fue necesario trabajar con información en formato raster, pues bajo este formato fue posible realizar procesos de álgebra de mapas. En primer lugar, del modelo de elevación digital con resolución de noventa metros (INEGI, 1995) se derivó el modelo de pendientes del terreno con la misma resolución. Posteriormente se realizó la transformación de las coberturas vectoriales de texturas (INEGI, 2004) e Inventario Nacional Forestal (Semarnat, 2001) a modelos raster, con la resolución que se ha venido mencionando. Estas tres coberturas ya transformadas fueron reclasificadas para obtener un mapa con las combinaciones asignadas con el correspondiente coeficiente de Prevert. El mapa resultante fue multiplicado con el mapa de la precipitación media anual histórica, resultado del proceso de interpolación, y posteriormente se multiplicó por 8 100 m<sup>2</sup> (superficie representada por un píxel) y cuya operación es necesaria para estimar un resultado que expresa la producción de litros producidos por píxel, para después dividirlo entre mil, para obtener metros cúbicos por píxel. Posterior a este proceso, junto con la delimitación de la microcuencas, fueron sumados los valores de los píxeles contenidos en cada una de ellas para cuantificar la cantidad de escorrentía anual expresada en metros cúbicos.

### Perspectiva del deterioro de suelos en las microcuencas

La calidad del agua, así como su dirección de flujo, se ven afectados por la condiciones del suelo y la cubierta vegetal; por lo anterior,

Cuadro 1. Coeficientes de escorrentía (*Cep*) propuestos por Prevert.

Uso de suelo	Pendiente %	Textura				
		Arenoso-limoso Limoso-arenoso	Limoso Limoso-arenoso	Arcilloso	Zona urbana	Cuerpo de agua
		Gruesa	Media	Fina	**	**
Bosques y selvas	0 - 5	0.10	0.30	0.40	0.99	0.00
	5 - 10	0.25	0.35	0.50	0.99	0.00
	10 - 30	0.30	0.40	0.60	0.99	0.00
	> 30	0.32	0.45	0.63	0.99	0.00
Pastizal, matorral y otros tipos de vegetación	0 - 5	0.15	0.35	0.45	0.99	0.00
	5 - 10	0.30	0.40	0.55	0.99	0.00
	10 - 30	0.35	0.45	0.65	0.99	0.00
	> 30	0.37	0.47	0.68	0.99	0.00
Agrícolas	0 - 5	0.30	0.50	0.60	0.99	0.00
	5 - 10	0.40	0.66	0.70	0.99	0.00
	10 - 30	0.50	0.70	0.80	0.99	0.00
	> 30	0.53	0.74	0.84	0.99	0.00
Zona urbana	**	0.99	0.99	0.99	0.99	0.00
Áreas sin vegetación	**	0.95	0.95	0.95	0.99	0.00
Cuerpo de agua	**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Treviño et al., 2002, y TRAGSA, 1998.

la degradación del suelo está directamente relacionada con la producción o cosecha de agua, pues las selvas y los bosques, así como la agro-biodiversidad de un sistema de producción regulan las vertientes de agua que escurren a través de una cuenca, subcuenca o microcuenca.

Brissio (2005) menciona que la degradación del suelo trae consigo importantes consecuencias, entre las cuales destacan:

1. Pérdida de nutrientes, como nitrógeno, fósforo, sodio y potasio, entre otros, por erosión o aguas que se infiltran y/o escurren.
2. Modificación de propiedades físico-químicas de los suelos, como la acidificación, desbasificación y bloqueo de oligoelementos.
3. Deterioro de su estructura, como la compactación, la cual produce disminución de porosidad, reduciendo el drenaje y pérdida de estabilidad, conduciendo a un encostramiento superficial y, por ende, aumento de la escorrentía.
4. Disminución de capacidad de retención de agua por degradación de la estructura o por pérdida de suelo.
5. Perdida física de materiales.
6. Incremento de toxicidad, la cual se da al modificar las propiedades del suelo, liberando sustancias nocivas.

Con la finalidad de tener una perspectiva del deterioro de los suelos en las microcuencas, se consideró sobreponer la capa de degradación de suelo realizado por la Semarnat (2008), mediante la cual se determinó el grado de degradación

de las microcuencas, tomando en cuenta el uso actual del suelo. El proceso consistió en seleccionar las áreas cuya degradación de suelo está categorizada como extrema, posteriormente fueron intersectadas con las microcuencas para evaluar el uso del suelo y de esta manera cuantificar cada característica de uso del suelo.

### *Tipología de microcuencas*

Uno de los problemas que frecuentemente enfrenta un investigador es definir grupos, en donde los elementos de cada conjunto posean las características más semejantes y, a la vez, los grupos significativamente contrastantes. Para resolver este problema, en el presente trabajo se decidió implementar los siguientes pasos:

1. Realizar el análisis de componentes principales como un método para disminuir la dimensionalidad de la base de datos de las microcuencas.
2. Definir cinco grupos de microcuencas, aplicando la metodología de Dalenius y Hodges (1959), la cual minimiza las varianzas dentro del grupo y las maximiza entre ellos.
3. Graficar los primeros dos componentes principales, ya que son los que explican la máxima variación en un sistema bidimensional, y aplicar el criterio de clasificación de los grupos para visualizar su comportamiento en dicha gráfica.
4. Analizar las estadísticas básicas de cada grupo y destacar las características entre ellos.

### **Resultados**

Para efectos prácticos, los resultados serán presentados en apartados, con la finalidad de que puedan ser relacionados con el proceso metodológico descrito en el apartado anterior.

### *Delimitación y caracterización de microcuencas*

El resultado de la delimitación de microcuencas no respetó los límites de las regiones contempladas en el estudio debido a que la delimitación de microcuencas se realiza considerando características topográficas sin respetar límites territoriales (figura 3).

Todas las microcuencas son receptoras de agua proveniente de la precipitación, sin embargo, con base en la clasificación, tomando la altitud promedio de cada una de las microcuencas, se observa que once de ellas están clasificadas en zona baja, haciéndolas parte de un sistema receptor de escurrimientos provenientes de la zona media y la zona alta, con 99 y 114 microcuencas, respectivamente, las cuales forman parte de un sistema de transporte y/o captación. Los valores de lluvia máximos (3 318 mm) se presentan básicamente en la zona límite con el estado de Veracruz, mientras que en las partes del altiplano de la parte sur del estado de Puebla se obtuvieron los valores mínimos (335 mm), lo anterior ocasionado por el efecto orográfico de las sierras, ya que los vientos del norte las impactan y vacían por enfriamiento del aire una gran cantidad de lluvia en la zona de barlovento; no así en la zona de sotavento, donde al existir una barrera orográfica natural, dichas serranías no permiten el paso de las nubes y por tanto la precipitación es menor en esa zona.

### *Tipología de microcuencas*

Con lo realizado hasta ahora se ha ido conformando una base de datos con características para cada microcuenca. Esta información permitirá contar con mayores elementos para llevar a cabo una tipología de éstas.

Por medio del análisis de componentes principales se determinó cuántos componentes pueden concentrar la mayor cantidad posible de las variables medidas en cada microcuenca. Los resultados se muestran a continuación.

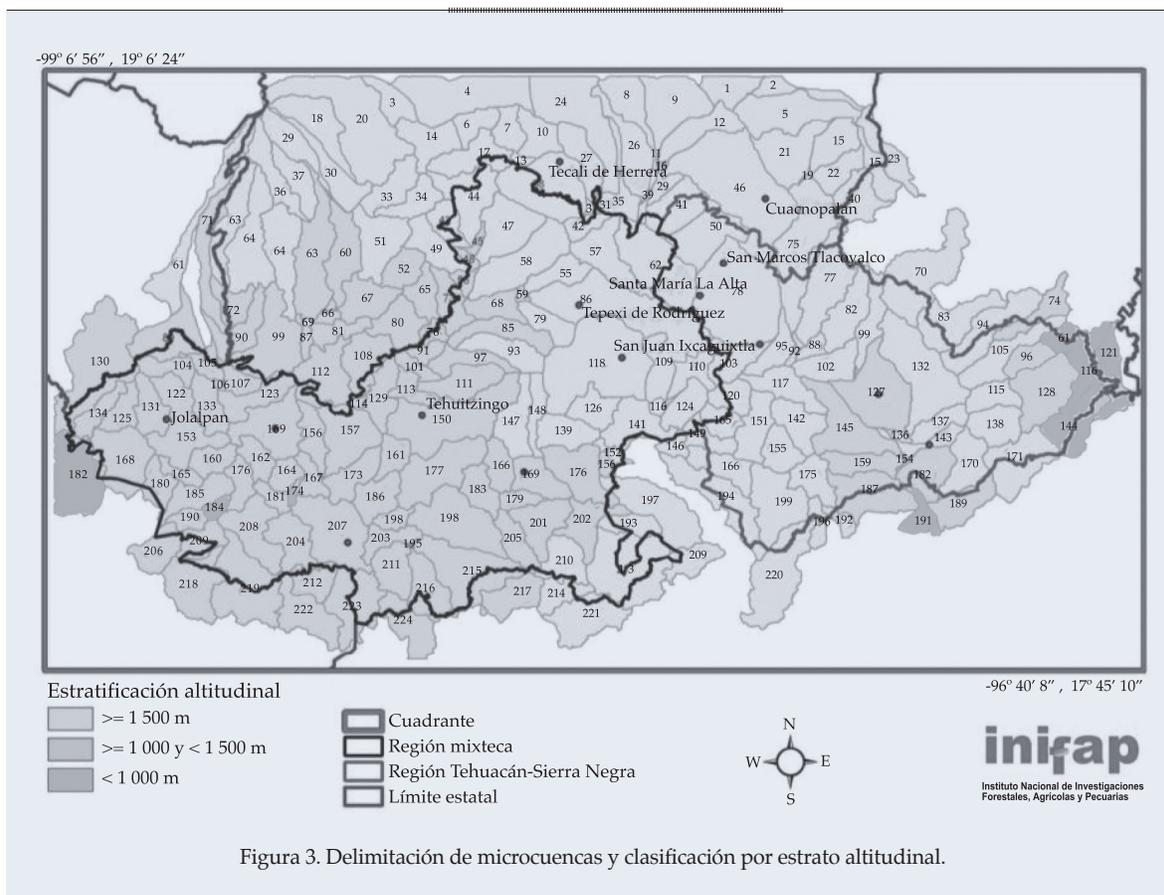


Figura 3. Delimitación de microcuencas y clasificación por estrato altitudinal.

El primer componente explica el 31% de la variabilidad total y el segundo componente explica el 19%, dando un total acumulado del 50%; se observó que los primeros cuatro componentes explican el 75% de la variabilidad total (figura 4).

En el primer componente principal, las variables que tienden a mostrar mayor relación son las siguientes: superficie de la microcuenca, escorrentía total anual, superficie de uso agrícola, superficie con bosque y superficie con ligera degradación del suelo (cuadro 2).

Para la situación del presente estudio, se utilizaron las puntuaciones factoriales (peso del individuo en el componente principal) para realizar una clasificación de grupos de microcuencas. Para ello se hizo una estratificación mediante el método de Dalenius y Hodges (1959), el cual tiene como objetivo conformar grupos de individuos con la mayor varianza posible entre ellos

y la mínima entre los elementos de cada grupo. Esta técnica se utiliza frecuentemente en estudios de Estratificación de Índices de Marginación (Conapo, 2002) y Estratificación del Índice de Rezago Social (Coneval, 2007), entre otros, donde consideran realizar la estratificación de los valores correspondientes a las puntuaciones factoriales de los individuos obtenidos del primer componente del análisis de componentes principales.

Inicialmente, se debe establecer el número de intervalos de clase de una amplitud no muy grande, pues podría perderse información importante, pero tampoco demasiado pequeña, ya que puede ser difícil de interpretar. Una guía para determinar el número de clases es la que propone Wilks (1995) en la cita de Emerson y Hoaglin (1983), quienes sugieren que la amplitud del rango puede calcularse como se indica a continuación:

Cuadro 2. Aportación de las variables a los dos primeros componentes principales.

Características de la microcuenca	Coefficiente del primer componente	Coefficiente del segundo componente
Superficie de la microcuenca (ha)	<b>0.482</b>	0.195
Escorrentía total anual (Hm <sup>3</sup> )	<b>0.402</b>	<b>-0.326</b>
Precipitación media anual (mm)	0.135	<b>-0.540</b>
Altitud media en la cuenca (msnm)	0.155	0.148
Superficie de uso agrícola (ha)	<b>0.415</b>	0.126
Superficie con bosque (ha)	<b>0.291</b>	<b>-0.294</b>
Superficie con matorral (ha)	0.162	<b>0.402</b>
Superficie con pastizal (ha)	0.159	0.221
Superficie con selva (ha)	0.097	0.066
Superficie con ligera degradación del suelo (ha)	<b>0.400</b>	-0.124
Superficie con moderada degradación del suelo (ha)	0.227	-0.081
Superficie con extrema degradación del suelo (ha)	0.181	<b>0.450</b>

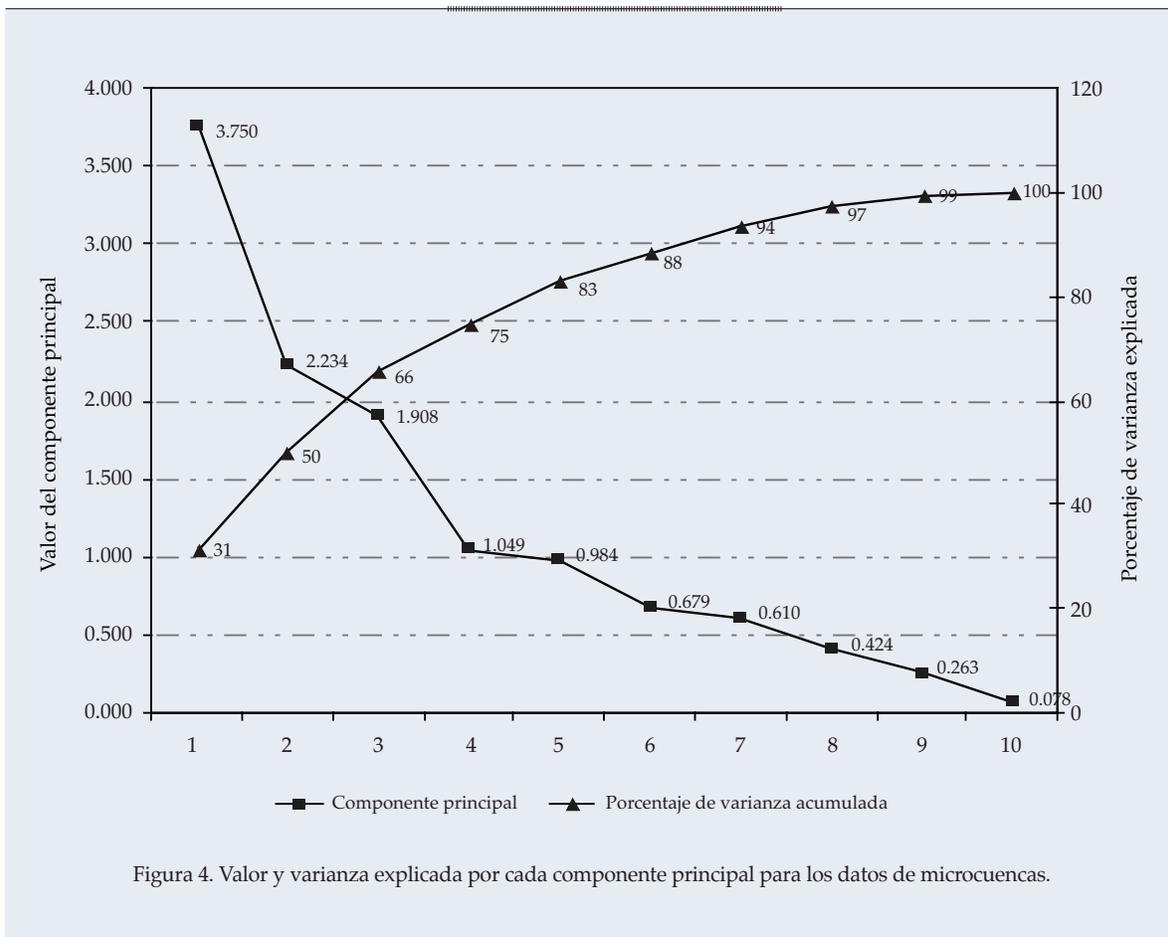


Figura 4. Valor y varianza explicada por cada componente principal para los datos de microcuencas.

$$w \cong \frac{c(IQR)}{n^{1/3}}$$

Donde:

- $w$  = número de intervalos en los que se agruparán los datos de las puntuaciones factoriales.
- $c$  = constante en el rango de 2.0 a 2.5.
- $IQR$  = rango intercuartílico que se obtiene de la diferencia entre el cuartil 75 y el cuartil 25.
- $n$  = número de datos.

Al aplicar la metodología de Dalenius y Hodges (1959) consideramos formar 14 intervalos de clase y calcular la raíz cuadrada de la frecuencia de valores que se encuentran dentro de cada intervalo, obtener la raíz acumulada de todos los intervalos y obtener los intervalos requeridos para delimitar cada estrato.

Para estratificar los valores de las puntuaciones factoriales en cinco estratos se realizó el cálculo  $Q = 47.6934 / 5 = 9.53874$ , para obtener los límites superiores de cada estrato

que quedaron definidos en 9.2327, 16.3741, 28.5218, 38.5725 y 47.6934, quedando los grupos como se muestran en el cuadro 3.

Cabe aclarar que la estratificación fue hecha con base en las puntuaciones factoriales del primer componente y que para visualizar la dispersión de los puntos en un plano bidimensional, se consideró usar las puntuaciones factoriales correspondientes al segundo componente principal; en conjunto, éstos explican el 50% de la variabilidad, y en dicho plano cada punto fue categorizado de acuerdo con el grupo establecido por el primer componente (figura 5).

En el eje  $X$  se observa la tendencia del primer componente, en donde hay una variación de izquierda a derecha y de menor a mayor en las variables de superficie de la microcuena, superficie de uso agrícola y superficie con ligera degradación del suelo, en tanto que para la escorrentía total anual y superficie con bosque, se presenta un patrón de variación (izquierda-derecha) de más a menos.

Para el eje  $Y$ , la tendencia del segundo componente es de menor a mayor en las variables superficie de matorral y en superficie

Cuadro 3. Estratificación de microcuencas de acuerdo con la metodología Dalenius y Hodges (1959).

Intervalos de clase	Frecuencia	Raíz de la frecuencia	Raíz de frecuencia acumulada	Grupo
- 1.54875 < x <= - 1.14752	11	3.3166	3.3166	1
- 1.14752 < x <= - 0.74627	35	5.9161	9.2327	1
- 0.74627 < x <= - 0.34503	51	7.1414	16.3741	2
- 0.34503 < x <= 0.05620	41	6.4031	22.7773	3
0.05620 < x <= 0.45744	33	5.7446	28.5218	3
0.45744 < x <= 0.85868	18	4.2426	32.7645	4
0.85868 < x <= 1.25992	10	3.1623	35.9267	4
1.25992 < x <= 1.66115	7	2.6458	38.5725	4
1.66115 < x <= 2.06239	8	2.8284	41.4009	5
2.06239 < x <= 2.46363	3	1.7321	43.1330	5
2.46363 < x <= 2.86487	3	1.7321	44.8650	5
2.86487 < x <= 3.26611	2	1.4142	46.2792	5
3.26611 < x <= 3.66735	0	0.0000	46.2792	5
3.66735 < x <= 4.06859	2	1.4142	47.6934	5





Cuadro 4 (continuación). Estadísticas descriptivas de las microcuencas por grupo.

Variable	Estadística	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
<b>Número de microcuencas</b>		<b>46</b>	<b>51</b>	<b>74</b>	<b>35</b>	<b>18</b>
Superficie con matorral (ha)	Media	80	987	676	1 237	3 271
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	913	7 121	8 656	11 274	16 836
Superficie con otros usos (ha)	Media	67	674	292	309	1 338
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	852	5 692	4 040	3 265	16 363
Superficie con pastizal (ha)	Media	200	621	957	1 357	2 225
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	1 397	3 049	8 231	11 928	9 439
Superficie con selva (ha)	Media	1 268	2 938	3 289	4 973	3 296
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	5 622	8 104	15 379	17 250	22 897
Superficie de uso urbano (ha)	Media	42	59	129	171	1 054
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	1 074	2 159	2 088	1 215	11 385
Superficie con ligera degradación del suelo (ha)	Media	526	1 813	4 716	9 394	13 826
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	3 577	7 091	13 045	20 518	27 171
Superficie con moderada degradación del suelo (ha)	Media	457	722	2 239	3 598	4 797
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	2 836	4 203	12 002	15 890	23 759
Superficie con extrema degradación del suelo (ha)	Media	1 585	5 005	4 082	5 868	11 117
	Mínimo	0	0	0	0	0
	Máximo	6 026	10 112	17 750	20 420	35 438

Cuadro 5. Resumen general en el nivel de la zona de estudio.

Variable	Sierra Mixteca		Sierra Negra		Total
Precipitación total anual (Hm <sup>3</sup> )	9 513		6 972		16 485
Cantidad anual de agua que escurre (Hm <sup>3</sup> )	4 030		3 747		7 777
Superficie (ha)	1 310 929		704 569		2 015 498
Categoría de Dalenius y Hodges	ha	núm.	ha	núm.	
1	95 216	33	18 543	7	113 760
2	297 671	38	75 556	10	373 227
3	407 278	33	151 449	15	558 727
4	283 085	14	217 487	12	500 572
5	227 681	7	241 535	9	469 216
Pendiente	Ha				
0 - 5%	587 512		254 418		841 930
5 - 10%	326 820		110 605		437 425
10 - 30%	387 448		307 235		694 683
> 30%	9 149		32 311		41 460
Microcuencas que forman la región hidrográficamente	125		53		178

medio, escurrimientos de 8 Hm<sup>3</sup> al año y precipitaciones que no sobrepasan los 694 mm anuales; cuentan con el 49% de superficie en promedio con selvas y pese a esto presentan grandes superficie con degradación extrema, por lo que sería urgente una estrategia de recuperación o conservación, así como algunas obras de ingeniería hidráulica, para conservar o captar el agua de lluvia.

- Grupo II. Este grupo cuenta con microcuencas con extensiones promedio de 7 539 ha, escurrimientos y precipitaciones anuales de 22 Hm<sup>3</sup> y 722 mm, respectivamente. Es importante señalar que, en promedio, el 23% de las superficies de estas microcuencas se destina al uso agrícola.
- Grupo III. En promedio cuentan con una extensión de 11 037 ha, escurrimiento superficial de 40 Hm<sup>3</sup> y precipitaciones cercanas a los 836 mm anuales; la conformación del uso del suelo es en promedio de 35% de uso agrícola, 15% de bosque y 29% de selva; no obstante, una característica relevante de este grupo de microcuencas es que, en promedio, el 42% de sus superficies registra niveles de degradación ligeros y 36% niveles extremos de degradación, lo cual indica que sería conveniente implementar estrategias de estímulo para que no se realicen actividades que degraden los recursos naturales y, a su vez, se promueva la conservación de los mismos.
- Grupo IV. Este grupo considera microcuencas con superficies de 18 862 ha en promedio; contiene zonas boscosas que alcanzan las 3 238 ha en promedio y degradación moderada en 3 598 ha en promedio; al igual que las anteriores, sería conveniente promover obras de conservación.
- Grupo V. Este grupo es de los más importantes debido a la superficie de sus microcuencas y por ser las de mayor aporte al escurrimiento superficial y las

que mayor precipitación media reciben; están ubicadas en las alturas medias más altas, de considerables superficies de bosque y baja degradación; deberían considerarse como las principales cuencas exportadoras de agua y las prioritarias para la conservación y el manejo integral de los recursos naturales.

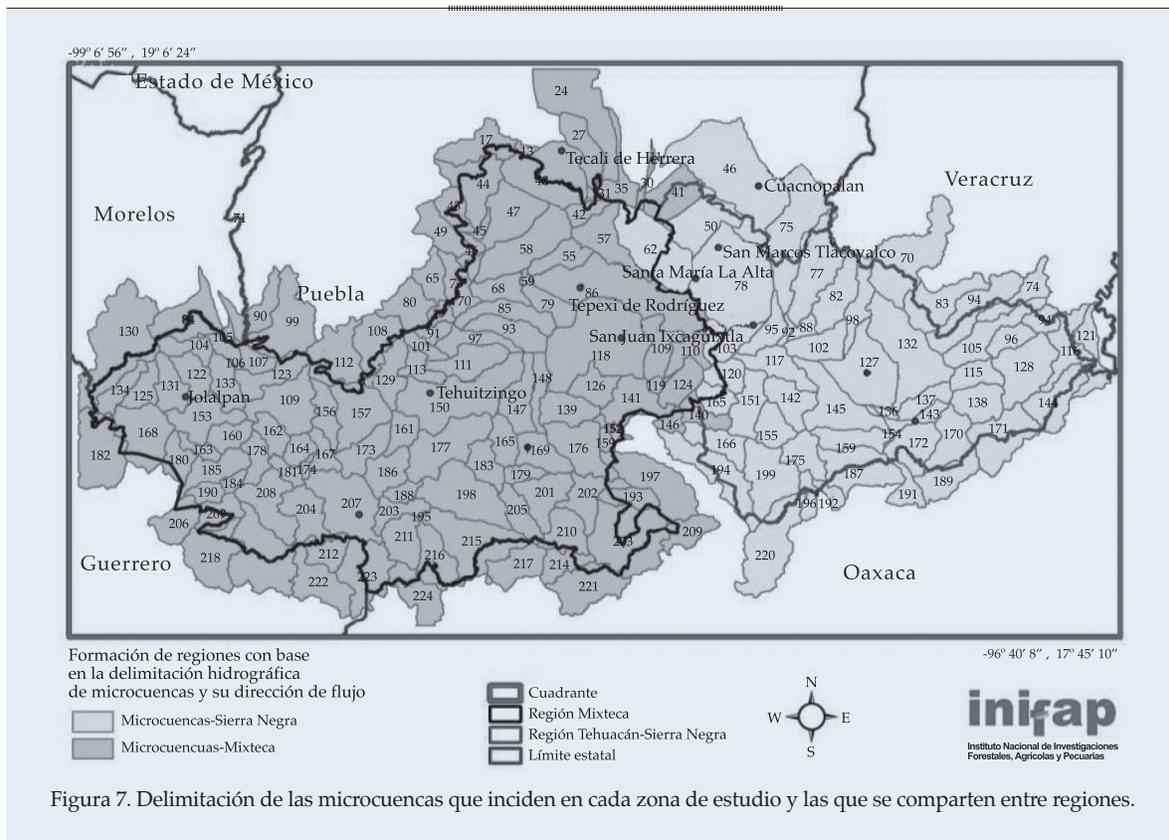
Considerando el límite de las microcuencas, en la figura 7 se muestra cuáles son las que pertenecen a cada región.

## Conclusiones

En el presente estudio se desarrolló una metodología que integra el uso de los sistemas de información geográfica, técnicas multivariadas y geoestadísticas para delimitar geográficamente las microcuencas, estimar su escurrimiento superficial y clasificarlas de acuerdo con su producción de agua en zonas exportadoras y receptoras de agua de lluvia.

La metodología desarrollada en el presente estudio es de fácil aplicación y puede emplearse en cualquier zona y a cualquier escala de estudio, para conocer y definir en tiempo y espacio algunas de las variables fundamentales del ciclo hidrológico, así como para la planeación del manejo integral del agua de lluvia en el nivel de microcuenca.

Los resultados encontrados y la metodología desarrollada servirá de base para posteriores estudios relacionados con la recarga de acuíferos, la definición de zonas prioritarias de conservación y el establecimiento de infraestructura hidráulica necesaria para la captación y conducción del agua de lluvia, así como evaluación de la vulnerabilidad o riesgo a fenómenos climatológicos adversos que pudieran presentarse, lo anterior en dos de las más importantes zonas de producción y conducción de agua en el estado de Puebla: la Sierra Negra y la Sierra Mixteca.



Recibido: 09/12/10  
Aprobado: 28/11/11

## Referencias

BRISSIO, P.A. *Evaluación preliminar del estado de contaminación en suelos de la provincia del Neuquén donde se efectúan actividades de explotación hidrocarbúrferas* [en línea]. Diciembre de 2005 [consultado el 15 de enero de 2010]. Disponible en *World Wide Web*: <http://www.tesis.bioetica.org/pab.htm>.

CONEVAL. *Los mapas de pobreza en México*. México, D.F.: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social, 2007.

CONAPO. *Índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos*. México, D.F.: Consejo Nacional de Población, 2002, 193 pp.

DALINIUS, T. and HODGES, J. L. JR. Minimum variance stratification. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 54, 1959, pp. 88-101.

DALLAS, E.J. *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. México, D.F.: International Thomson Editores, 2000.

DÍAZ, P.G. *Variación espacio temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos*. Tesis

de doctorado. Ciudad Obregón, México: Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, 2009.

DÍAZ, P.G., SÁNCHEZ, C.I., QUIROZ, R., GARATUZA, P.J., WATTS, T.C. y CRUZ, M.I.R. Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del Golfo de México. *Agricultura Técnica en México*. Vol. 34, núm. 3, julio-septiembre de 2008, pp. 279-287.

DÍAZ, P.G., DEL ÁNGEL, P.A.L. y MENDOZA, B.M.A. Pago o estímulo a proveedores de servicios ambientales hídricos de la Cuenca de Coatepec, Veracruz, México. *Avances de investigación en agricultura sostenible IV: Bases metodológicas para el manejo integral de cuencas hidrológicas*. Sánchez, C., Bravo, M., Fregoso, L.E. y Rulfo, F.O. (editores). Uruapan, México: INIFAP, Centro de Investigación Regional Pacífico Centro, C.E., 2007, pp. 443-462.

DÍAZ, P.G. y CORTINA, C.M.F. *Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México*. Xalapa, México: Centro de Investigación Regional Golfo-Centro, Campo Experimental Xalapa, 2005.

DÍAZ, P.G. *Delimitación y digitalización de microcuencas hidrográficas del estado de Veracruz*. Informe final de proyecto. Xalapa, México: Centro de Investigación

- Regional Golfo-Centro, Campo Experimental Xalapa, 2001.
- ESRI. *Software ArcView GIS 3.2*. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 1999.
- EMERSON, J.D. and HOAGLIN, D.C. Stem-and-left displays. In *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. Hoaglin, C., Mosteller, F., and Tukey, J.W. (editors). New York: Wiley, 1983, pp. 7-32.
- HUTCHINSON, M.F. *Anusplin Version 4.3*. Camberra, Australia: Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, 2004.
- INEGI. *Mapa nacional edáfico. Unidades de suelo clasificadas por FAO/UNESCO. Escala 1:250,000*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2004.
- INEGI. *Modelo de elevación digital en formato raster con resolución de pixel de 90 metros*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1995.
- MAIDMENT, D. and DJOKIC, D. *Hydrologic and Hydraulic Modeling support*. Redlands, USA: ESRI-PRESS, 2000.
- MARTÍNEZ, A.V. y DAL-RÉ, T.R. Escorrentía. *Pequeños embalses de uso agrícola*. Dal-Ré, R. (editor). Madrid: Mundi-Prensa, 2003, pp. 79-111.
- SÁNCHEZ, C.I. y CHEBHOUNI, G. *Procesos hidrológicos en zonas áridas y semiáridas: de la investigación a la acción*. Gómez Palacio, México: INIFAP, 2007, 197 pp.
- SEMARNAT. *Mapa digital de la degradación del suelo. Escala 1:250,000*. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
- SEMARNAT. *Mapa digital del inventario nacional forestal del año 2000. Escala 1:250,000*. México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2001.
- TRAGSA. *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión*. Madrid: Dirección F. López Cadenas, Tragsatec, Ministerio del Medio Ambiente, Mundi-Prensa, 1998, pp. 89.
- TREVIÑO, G.E., MUÑOZ, R.C., CAVAZOS, C. y BARAJAS, C.L. Evaluación del flujo hídrico superficial en la sierra de San Carlos, Tamaulipas. *Ciencia UANL*. Vol. V, núm. 4, 2002, pp. 525-530.
- WILKS, D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. San Diego: Academic Press, 1995, pp. 467.

## Abstract

DÍAZ-PADILLA, G., SÁNCHEZ-COHEN, I., GUAJARDO-PANES, R.A., BARBOSA-MORENO, F., GÓMEZ-CÁRDENAS, M. & URIBE-BERNAL, J.M. *Spatial modeling of water production and surface rainwater run-off in the southern zone of the state of Puebla, Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, Special Number TyCA-RETAC, February-March, 2012, pp. 69-85.*

*Rational use and management of water resources is a priority for conserving natural resources. Surface runoff, rainfall and infiltration are factors in the recharge of aquifers and water availability. This work develops a methodology to define and identify watersheds that meet conditions for implementation of projects to aid groundwater recharge in the Mixteca and Sierra Negra region of the state of Puebla. Runoff coefficients were calculated taking into account the use and texture of the soil, as well as the slope of the terrain to model the flow and direction of rainwater. In just over 2 million hectares, 178 watersheds were identified, 125 of which affect 1.31 million hectares in the Mixteca region where approximately 9.513 Hm<sup>3</sup> total annual precipitation is captured; 42% of this drains off (4.030 mm<sup>3</sup>). In Sierra Negra, which comprises an approximate area of 704 hectares, 53 watersheds were identified with 6.972 Hm<sup>3</sup> annual total precipitation captured, 54% of which is run-off. We applied principal component analysis to reduce the dimensionality of the micro database, for a classification of 5 types using the Dalenius and Hodges method, considering the land area of each watershed, its water production, population density and soil degradation. Finally, 11 were identified as priorities for conservation and construction of irrigation infrastructure, including water holes, dams and/or infiltration ponds.*

**Keywords:** *aquifer, watershed, precipitation, runoff, Prevent.*

## Dirección institucional de los autores

*Dr. Gabriel Díaz Padilla*

*Lic. Rafael Alberto Guajardo Panes*

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
Sitio Experimental Teocelo  
Carretera Xalapa-Veracruz km. 3.5 (edificio SAGARPA),  
Colonia Ánimas  
91100 Xalapa, Veracruz, MÉXICO  
Teléfono: +52 (228) 8125 744  
Fax: +52 (228) 8129 441  
diaz.gabriel@inifap.gob.mx  
guajardo.rafael@inifap.gob.mx

*Dr. Ignacio Sánchez Cohen*

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
CENID-Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera  
35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO  
Teléfono y fax: +52 (871) 1590 104  
sanchez.ignacio@inifap.gob.mx

*Ing. Finlandia Barbosa Moreno*

*Dr. Martín Gómez Cárdenas*

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
Campo Experimental Valles Centrales  
68200 Oaxaca, Oaxaca, MÉXICO  
Teléfono y fax: +52 (951) 5215 502  
barbosa.finlandia@inifap.gob.mx  
gomez.martin@inifap.gob.mx

*Ing. José Miguel Uribe Bernal*

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias  
Campo Experimental San Martinito  
74100 Tlahuapan, Puebla, MÉXICO  
Teléfono: +52 (968) 6882 915 al 18  
Fax: +52 (968) 6882 917  
uribe.jose@inifap.gob.mx