



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN EL NÚMERO DE CURVA EN UNA CUENCA, CON DIVERSOS USOS DE SUELO, DEL CENTRO DE MÉXICO

AKETZALLI ESPEJEL RODRÍGUEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: **FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN EL NÚMERO DE CURVA EN UNA CUENCA, CON DIVERSOS USOS DE SUELO, DEL CENTRO DE MÉXICO**, realizada por la alumna: **Aketzalli Espejel Rodríguez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
Dr. ADOLFO ANTENOR EXEBIO GARCÍA

ASESOR: 
Dr. DEMETRIO SALVADOR FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR: 
Dr. RODRIGO ROBLERO HIDALGO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, abril de 2020

FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN EL NÚMERO DE CURVA EN UNA CUENCA, CON DIVERSOS USOS DE SUELO, DEL CENTRO DE MÉXICO

Aketzalli Espejel Rodríguez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

El método del Número de Curva del SCS es un método utilizado mundialmente para el cálculo de escurrimientos, no obstante, su principal parámetro (CN) se basa en algunos factores que afectan el escurrimiento (tipo de suelo, uso y manejo del suelo, condición hidrológica y condición de humedad antecedente). La presente investigación busca identificar los factores ambientales que influyen en el CN en la cuenca del río Chapingo, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y el análisis de regresión Lineal múltiple (MLR) de los factores que influyen en el proceso lluvia-escurrimiento.

La selección de factores ambientales se realizó aplicando el método Stepwise de regresión lineal múltiple con el estadístico F. De este proceso, resultaron seleccionados nueve factores ambientales obteniendo un R^2 de 0.838 en la ecuación de regresión. Dicha ecuación se aplicó a las diferentes capas seleccionadas para obtener a nivel cuenca un mapa en formato ráster con valores de CN. Este mapa, fue verificado en campo con un nuevo conjunto de puntos. En el proceso de verificación se obtuvieron valores en los estadísticos R^2 (0.679), NSE (0.607), PBIAS (2.38) y RSR (0.606), clasificando al modelo según el NSE, PBIAS y RSR en satisfactorio, bueno y satisfactorio-bueno, respectivamente. Se concluyó que los principales factores que influyen en el Número de Curva de la cuenca del río Chapingo son: altitud, pendiente, curvatura general, longitud de pendiente, densidad de drenaje, número de rugosidad, índice topográfico de humedad, temperatura e índice de área foliar.

Palabras clave: escurrimiento superficial, cuenca hidrográfica, geomorfología, regresión lineal múltiple.

FACTORES AMBIENTALES QUE INFLUYEN EN EL NÚMERO DE CURVA EN UNA CUENCA, CON DIVERSOS USOS DE SUELO, DEL CENTRO DE MÉXICO

Aketzalli Espejel Rodríguez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

The SCS Curve Number (CN) is a widely used method to estimate runoff from rainfall events. However, its main parameter (CN) only considers land use, soil type, hydrologic and antecedent soil moisture conditions as a factor that affect runoff. Therefore, this research aims to identify environmental factors influencing on Chapingo Watershed Curve Number, by applying Geographic Information Systems (GIS) and a multiple linear regression (MLR).

A Stepwise regression analysis was carried out so as to select the environmental factors, resulting on a nine-factor selection, whose R^2 is equal to 0.838. The regression equation was applied for each environmental factor raster data, in order to obtain a CN watershed map, which was afterwards field verified with a new sampling data set.

Results show the values of each model evaluation statistics R^2 (0.679), NSE (0.607), PBIAS (2.38) and RSR (0.606), classifying the performance as satisfactory, good and Satisfactory-good, respectively.

These findings suggest that the main factors that influence on the research area of study Curve Number are: altitude, slope, general curvature, slope length, drainage density, roughness number, topographic wetness index, temperature and leaf area index.

Keywords: Runoff, watershed, geomorphology, multiple linear regression.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados, por todos los conocimientos que adquirí durante mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de la maestría.

Al Dr. Demetrio Salvador Fernández Reynoso por ser mi guía en dicha investigación. Gracias por la confianza brindada, accesibilidad, consejos, observaciones y pláticas.

Al Dr. Adolfo Exebio García, Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo y M.C Ma. Eugenia Delgadillo Piñón, por el apoyo y tiempo brindado, así como sus oportunos consejos y observaciones.

A mis profesores, por ser parte fundamental durante mi formación académica.

Al personal académico y administrativo quienes me ayudaron a la realización de trámites.

A todos aquellos que me apoyaron en la fase de campo.

DEDICATORIA

A Dios

Por tantas bendiciones, por la familia que me ha dado y por permitirme culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres

Por el inconmensurable amor y apoyo que siempre me han brindado. Mi admiración y respeto a las personas que me han mostrado que puedes lograr tus sueños con fe y con trabajo diario. Gracias por dejarme soñar y volar alto.

A mis hermanos

Ponchito y Aldo, por su cariño y apoyo incondicional. Por ser una parte fundamental de esta historia a la que llamamos vida.

A mis abuelos

Alfonso, David y Alicia, quienes, a pesar de no estar en este mundo terrenal, dentro de mí, su recuerdo sigue latente.

A mi abuelita Aurelia

Por sus sabios consejos y anécdotas que siempre dejan un aprendizaje.

A mis tíos y primos:

Por sus deseos de superación.

Al Dr. Mario Martínez Menes

Por esas enseñanzas y charlas que ahora guardo en mi mente y corazón. Mas que un profesor, un gran amigo Un abrazo hasta la eternidad mi Wildcat.

Con amor, Ake

Haz lo que tengas que hacer, vive la vida y ante todo recuerda que para ser feliz solo se necesita quererlo ser..... (AEM)

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE CUADROS.....	xiii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 General.....	3
2.2 Particular.....	3
3 HIPÓTESIS.....	4
4 REVISIÓN DE LITERATURA.	5
4.1 Número de curva del Servicio de Conservación de suelos.....	5
4.1.1 Correcciones al CN por pendiente y por humedad antecedente.....	10
4.1.2 Número de curva basado en datos de precipitación y escurrimiento (Aproximación asintótica).....	12
4.2 Factores que influyen en el escurrimiento.....	13
4.2.1 Factores climáticos.....	14
4.2.2 Factores Fisiográficos.....	14
4.3 Propiedades físicas de los suelos.....	22
4.3.1 Textura.....	22
4.3.2 Conductividad Hidráulica (Ks):	25
4.4 Regresión lineal múltiple.....	25
4.4.1 Selección de variables independientes.....	27
4.4.2 Evaluación del Modelo de Regresión.....	27
4.5 Indicadores de eficiencia del modelo.....	28
4.5.1 Coeficiente de determinación.....	28
4.5.2 Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE).....	29
4.5.3 Sesgo porcentual (PBIAS).....	29
4.5.4 Relación de la desviación estándar de las observaciones (RSR).....	30
4.6 Estudios previos.....	30

5	MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
5.1	Descripción de la zona de estudio.	34
5.1.1	Ubicación geográfica.....	34
5.1.2	Clima.	35
5.1.3	Hidrografía.....	36
5.1.4	Suelos.	37
5.1.5	Geología.	40
5.1.6	Usos de suelo.....	41
5.2	Materiales.	42
5.3	Metodología.....	44
5.3.1	Recopilación de información.....	44
5.3.2	Delimitación de la cuenca.....	44
5.3.3	Obtención de las HRU y elección de sitios de muestreo.....	44
5.3.4	Fase de campo (muestreo).	46
5.3.5	Análisis de muestras de suelo en laboratorio.....	47
5.3.6	Obtención de variables ambientales.	48
5.3.7	Matriz de regresión.....	50
5.3.8	Selección de variables independientes y Regresión Lineal Múltiple. ..	50
5.3.9	Obtención del mapa de CN.....	50
5.3.10	Verificación del modelo.	50
6	RESULTADOS Y ANÁLISIS	51
6.1	HRU's y sitios de muestreo.....	51
6.2	Variables ambientales.....	53
6.2.1	Altitud.....	53
6.2.2	Pendiente.	53
6.2.3	Curvatura.	54
6.2.4	Curvatura horizontal o plana.	55
6.2.5	Curvatura vertical o de perfil.....	56
6.2.6	Longitud de pendiente.	57
6.2.7	Densidad de drenaje.....	58
6.2.8	Número de rugosidad.	59

6.2.9	Índice de Potencia de Flujo.	60
6.2.10	Índice de Transporte de Sedimentos.....	61
6.2.11	Índice topográfico de humedad.	62
6.2.12	Índice de Posición Topográfica.	63
6.2.13	Temperatura.....	64
6.2.14	Altura de vegetación.	65
6.2.15	NDVI.	67
6.2.16	IAF.....	67
6.2.17	Radiación.....	68
6.3	Matriz de regresión completa.	69
6.4	Selección de variables ambientales.	74
6.5	Modelo de regresión lineal múltiple.....	75
6.6	Mapa de CN.....	77
6.7	Verificación del modelo.	80
7	CONCLUSIONES	83
8	RECOMENDACIONES	84
9	LITERATURA CITADA.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación gráfica del CN obtenido mediante aproximación asintótica.	13
Figura 2. Triángulo de texturas, mostrando los porcentajes de arena, limo y arcilla en clases texturales.	24
Figura 3. Ubicación de la cuenca del río Chapingo.....	34
Figura 4. Climatología de la cuenca del río Chapingo.	35
Figura 5. Hidrografía de la cuenca del río Chapingo.	37
Figura 6. Tipos de suelos, presentes de la cuenca del río Chapingo.	38
Figura 7. Geología de la cuenca del río Chapingo.	40
Figura 8. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Chapingo.	41
Figura 9. Diagrama de flujo.....	45
Figura 10. Colección de muestra de suelo para análisis de textura y para conductividad hidráulica.....	46
Figura 11. Usos de suelo representativos en la cuenca.	47
Figura 12. Mapa de las 35 Unidades de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Chapingo.....	51
Figura 13. Mapa de altitud de la cuenca del río Chapingo.	53
Figura 14. Mapa de pendiente de la cuenca del río Chapingo.....	54
Figura 15. Mapa de curvatura general de la cuenca del río Chapingo.	55
Figura 16. Mapa de curvatura horizontal de la cuenca del río Chapingo.....	56
Figura 17. Mapa de curvatura vertical de la cuenca del río Chapingo.	57
Figura 18. Mapa de longitud de pendiente de la cuenca del río Chapingo.....	58
Figura 19. Mapa de densidad de drenaje de la cuenca del río Chapingo.	59
Figura 20. Mapa de número de rugosidad de la cuenca del río Chapingo.	60
Figura 21. Mapa del Índice de Potencia de Flujo de la cuenca del río Chapingo.	61
Figura 22. Mapa del índice de Transporte de Sedimentos de la cuenca del río Chapingo.....	62
Figura 23. Mapa de Índice Topográfico de humedad en la cuenca del río Chapingo.	63
Figura 24. Mapa de clasificación del relieve según el Índice de Posición Topográfica.	64

Figura 25. Mapa de temperatura de superficie (°C) de la cuenca del río Chapingo.....	65
Figura 26. Mapa de altura de vegetación de la cuenca del río Chapingo.	66
Figura 27. Mapa de NDVI de la cuenca del río Chapingo.	67
Figura 28. Mapa de Índice de Área Foliar de la cuenca del río Chapingo.	68
Figura 29. Radiación de la cuenca del río Chapingo.....	69
Figura 30. Representación gráfica de valores de CN estimado contra los CN observados.	77
Figura 31. Histograma de frecuencias del CN en la cuenca del río Chapingo.	78
Figura 32. CN ajustado en la cuenca del río Chapingo y 136 puntos de muestreo.	79
Figura 33. CN ajustado en la cuenca del río Chapingo y 40 puntos de muestreo.	79
Figura 34. Comparación del estadístico R^2 considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.	80
Figura 35. Comparación del estadístico NSE considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.	81
Figura 36. Comparación del estadístico PBIAS considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.	81
Figura 37. Comparación del estadístico RSR considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.	82
Figura 38. CN asintótico para una $k= 0.44$	84
Figura 39. CN asintótico para una $k=0.38$	85
Figura 40. CN asintótico para una $k=0.37$	85

LISTA DE CUADROS.

Cuadro 1. Clasificación de los diferentes grupos hidrológicos de suelos, según el SCS.	6
Cuadro 2. Condición hidrológica y porcentaje de cobertura vegetal.	6
Cuadro 3. Condición hidrológica para bosques y pastos.	7
Cuadro 4. Número de curva para localidades y zonas urbanas.	8
Cuadro 5. Número de curva para uso agrícola.	9
Cuadro 6. Número de curva para otras tierras agrícolas.	10
Cuadro 7. Condición de humedad antecedente.	11
Cuadro 8. Clasificación de pendientes.	15
Cuadro 9. Clasificación del Índice de Posición Topográfica en formas del relieve.	17
Cuadro 10. Clasificación de las partículas del suelo.	23
Cuadro 11. Rendimiento general de los modelos.	30
Cuadro 12. Descripción de la temperatura y precipitación de acuerdo con el tipo de clima.	36
Cuadro 13. Descripción de los tipos de suelo presentes en la cuenca del río Chapingo.	39
Cuadro 14. Unidades de respuesta hidrológica en la cuenca del río Chapingo.	52
Cuadro 15. Matriz con las 18 variables ambientales consideradas para los 136 puntos de muestreo.	70
Cuadro 16. Resumen de estadísticos ($p \leq 5\%$) entre valores observados y simulados por diferentes modelos de regresión lineal múltiple (RLM).	74
Cuadro 17. Coeficientes de regresión y VIF de las 9 variables ambientales elegidas.	76
Cuadro 18. Comparación de los estadísticos de error entre los datos observados y los ajustados.	77
Cuadro 19. Estadísticos de error, considerando 40 puntos para verificación.	80
Cuadro 20. CN representativo de la cuenca del río Chapingo para diferentes k.	85

1 INTRODUCCIÓN.

El ciclo hidrológico dentro de una cuenca se puede esquematizar como un estímulo, donde la variable de entrada es la precipitación y la variable de respuesta es el escurrimiento (Aparicio, 2010)

Una vez que precipita la lluvia sobre la cuenca, el agua se distribuye en aquella interceptada por la vegetación, la evaporada, la infiltrada y la almacenada en depresiones superficiales (McCuen, 2004). Cuando las depresiones comienzan a llenarse y la intensidad de precipitación es superior a la capacidad de infiltración, aparece escurrimiento superficial; esta precipitación en exceso fluye en un inicio como escurrimiento laminar y posteriormente como escurrimiento concentrado en cauces (Chow *et al.* 1994).

Mccuen et al. (2002) mencionan que el escurrimiento a la salida de una cuenca no solo depende de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y procesos de abstracción, sino también de la hidráulica de la red natural de drenaje. Algunos factores que determinan el carácter hidráulico del sistema natural de drenaje de una cuenca son el área de drenaje, pendiente, rugosidad, almacenamiento, densidad de drenaje, longitud de cauce, condiciones de humedad antecedente, urbanización, vegetación, entre otros factores. Campos (1998) clasifica los factores que influyen en el escurrimiento en factores climáticos, entre ellos clase de precipitación, intensidad, duración y distribución, interceptación, evapotranspiración, humedad del suelo, temperatura; los fisiográficos, haciendo referencia a los que dependen de la topografía del terreno, geología, suelos, cubierta vegetal, red de drenaje; y los factores humanos, por estructuras hidráulicas, prácticas agrícolas y urbanización. En términos generales, Falahi *et al.* (2013) hacen énfasis en las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización, como los principales factores que influyen en la relación precipitación-escurrimiento, dando como resultado una relación compleja y difícil de cuantificar.

Para simplificar la influencia de los diferentes factores que influyen en el escurrimiento superficial, en un valor numérico, en la década de 1950's, el entonces Servicio de Conservación de Suelos (SCS), ahora conocido como Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos (NRCS), desarrolló un método para calcular el escurrimiento de una tormenta particular, denominado método del Número de Curva del

SCS. El parámetro principal de este método es el Número de Curva (CN), mismo que considera algunos factores que influyen en el proceso lluvia- escurrimiento tales como tipo de suelo, uso y manejo del suelo, condición hidrológica y condición de humedad antecedente. Entre más alto sea CN mayor es el volumen escurrido (Hawkins, 1993).

El valor CN es usualmente determinado por tablas (NRCS, 1972), pero también es posible determinarlo a partir del método propuesto por Hawkins et al. (1985) quienes obtienen un CN representativo a la salida de la cuenca a partir de datos diarios de lluvia y escurrimiento.

Debido a la complejidad del proceso lluvia-escurrimiento, la presente investigación utilizó herramientas de Sistemas de Información Geográfica y sensores remotos para identificar los factores ambientales que influyen en CN, mediante la implementación de un modelo de regresión lineal múltiple.

2 OBJETIVOS

2.1 General.

Identificar las variables ambientales que influyen en la magnitud de CN en la cuenca del río Chapingo.

2.2 Particular.

Identificar las variables topográficas, hidrológicas, climáticas y de cobertura que influyen en el CN a través de tecnología SIG y el método de regresión lineal *Stepwise*.

Verificación del modelo con un conjunto independiente de datos de CN.

3 HIPÓTESIS.

Las variables topográficas, hidrológicas, climatológicas y de cobertura, influyen en el CN.

4 REVISIÓN DE LITERATURA.

4.1 Número de curva del Servicio de Conservación de suelos.

La ecuación del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), estima el escurrimiento total de una tormenta a partir de la lluvia (NRCS, 1972).

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

$$\text{Para } I_a \leq P, \text{ de otra forma } Q = 0 \quad (2)$$

$$\text{Donde } I_a = 0.2S \quad (3)$$

Sustituyendo la ecuación (3) en (1), y resolviendo para Q se tiene:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (4)$$

Donde Q es el escurrimiento (mm), P es la altura de lluvia total (mm); I_a son las abstracciones iniciales (mm), S es la retención potencial (mm). El parámetro de retención varía debido a los cambios en el suelo, uso de suelo, manejo y pendiente, así como en el contenido de agua en el suelo. El parámetro de retención S (mm) se define como:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

Donde CN es el número de curva y S es la retención potencial (mm).

Clasificación Hidrológica del Suelo: El SCS clasificó hidrológicamente más de 4,000 tipos de suelos basándose en su potencial de escurrimiento fueron agrupados en cuatro grupos de suelos cuya identificación fue con las letras A, B, C y D (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de los diferentes grupos hidrológicos de suelos, según el SCS.

Grupo hidrológico de suelo	Características
A	Potencial de escurrimiento bajo, suelos con altas capacidades de infiltración cuando están completamente húmedos. Son principalmente arenas y gravas profundas muy bien drenadas. Suelos con alta transmisión de agua.
B	Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos. Principalmente son suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a biendrenados. Suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Presentan velocidades medias de transmisión de agua.
C	Suelos con capacidades de infiltración baja cuando están completamente húmedos, son suelos que contienen una capa que impide el movimiento hacia abajo o suelos con textura fina o moderadamente fina. Tienen baja transmisión de agua
D	Potencial de escurrimiento alto. Suelos con capacidades de infiltración muy bajas cuando están completamente húmedos, se expanden significativamente cuando se mojan, consiste en arcillas altamente plásticas. Suelos con transmisión de agua muy baja.

Condición hidrológica: El tipo de vegetación y cobertura de la cuenca tiene una gran influencia en la capacidad de infiltración del suelo. El porcentaje se estima cualitativamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Condición hidrológica y porcentaje de cobertura vegetal.

Condición Hidrológica	Cobertura
Buena	> 75% cubierta por pasto y/o árboles.
Regular	50%- 75% del área cubierta por pasto y/o árboles.
Mala	<50 % del área cubierta por pasto y/o árboles.

Fuente: Mc Cuen, (2004)

Condición hidrológica para bosques y pastos: se determina también cualitativamente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Condición hidrológica para bosques y pastos.

Condición Hidrológica	Cobertura
Buena	Protegido con pasto, con alta cantidad de humus vegetal y muchos arbustos cubiendo la superficie.
Regular	Con algunos arbustos, moderada cantidad de humus vegetal y pastos.
Mala	Bosque regularmente quemado con pocos arbustos y poco humus vegetal.

Fuente: Mc Cuen, (2004).

Uso y Tratamiento del Suelo: El uso de suelo está asociado a las coberturas forestales y uso del suelo en la cuenca como son las superficies forestales, agrícolas, las tierras en descanso, superficies impermeables y áreas urbanas. El SCS obtuvo números de curva para diferentes usos de suelo para una condición de humedad antecedente tipo dos (Cuadro 4, Cuadro 5, y Cuadro 6).

Cuadro 4. Número de curva para localidades y zonas urbanas.

Descripción de Uso de Suelo	% de Permeabilidad	Grupo Hidrológico del Suelo			
		A	B	C	D
Áreas urbanas totalmente desarrolladas^a (vegetación establecida).					
Césped, espacios abiertos, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
Óptimas condiciones: cubierta de pastos en un 75% o más del área.		39	61	74	80
Condiciones aceptables: cubierta de pastos en un 50% a 75% del área.		49	69	79	84
Condición pobre; cubierta de pastos menor del 50% del área.		68	79	86	89
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
Calles y Carreteras					
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		83	89	92	93
Áreas empresariales y comerciales	85	89	92	94	95
Distritos industriales	72	81	88	91	93
Hileras de casas, poblados y áreas residenciales con tamaño de 1/8 de acre o menos	65	77	85	90	92
Residencial: tamaño de lote promedio					
1/4 de acre	38	61	75	83	87
1/3 de acre	30	57	72	81	86
1/2 de acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
2 acre	12	46	65	77	82
El desarrollo de áreas urbanas^c (ninguna vegetación establecida)					
Área recién clasificada		77	86	91	94
Áreas urbanas del desierto occidental					
Paisajes desérticos Naturales ^f		63	77	85	88
Paisajes desérticos Artificiales		96	96	96	96

Fuente: NRCS, (1986).

^a Para usos de suelo con áreas impermeables, los números de curva son calculados asumiendo que 100% de las áreas impermeables son conectadas directamente al sistema de drenaje. Las áreas permeables (césped) son consideradas como equivalentes a los céspedes en buenas condiciones. Áreas impermeables tienen un NC de 98.

^b Incluye calles pavimentadas.

^c Use para el diseño de medidas provisionales durante clasificación y construcción. El porcentaje de área impermeable para las zonas urbanas en desarrollo varía bastante. El usuario determinará el porcentaje impermeable.

^f Los números de curva para el grupo A se han desarrollado sólo para arbusto del desierto.

Cuadro 5. Número de curva para uso agrícola.

Cobertura		Condición Hidrológica	Grupo Hidrológico del Suelo			
Uso de Suelo	Tratamiento o Práctica		A	B	C	D
Suelo Agrícola Cultivado						
Barbecho	Surcos Rectos		77	86	91	94
	Labranza de conservación	Pobre	76	85	90	93
	Labranza de conservación	Buena	74	83	88	90
Cultivos en línea	Surcos continuos	Pobre	72	81	88	91
	Surcos continuos	Buena	67	78	85	89
	Labranza de conservación	Pobre	71	80	87	90
	Labranza de conservación	Buena	64	75	82	85
	Contorneado	Pobre	70	79	84	88
	Contorneado	Buena	65	75	82	86
	Contorneado y conservación	Pobre	69	78	83	87
	Contorneado y conservación	Buena	64	74	81	85
	Contorneado y terrazas	Pobre	66	74	80	82
	Contorneado y terrazas	Buena	62	71	78	81
	Contorneado y terrazas	Pobre	65	73	79	81
	Cultivos de conservación	Buena	61	70	77	80
Granos pequeños	Surcos continuos	Pobre	65	76	84	88
	Surcos continuos	Buena	63	75	83	87
	Cultivos de conservación	Pobre	64	75	83	86
	Cultivos de conservación	Buena	60	72	80	84
	Contorneado	Pobre	63	74	82	85
	Contorneado	Buena	61	73	81	84
	Contorneado y conservación	Pobre	62	73	81	84
	Cultivos	Buena	60	72	80	83
	Contorneado y terrazas	Pobre	61	72	79	82
	Contorneado y terrazas	Buena	59	70	78	81
	Contorneado y terrazas	Pobre	60	71	78	81
	Y cultivos de conservación	Buena	58	69	77	80
Leguminosas praderas con rotación de cultivos	Surcos rectos	Pobre	66	77	85	89
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Contorneo	Pobre	64	75	83	85
	Contorneo	Buena	55	69	78	83
	Contorneado y terrazas	Pobre	63	73	80	83
	Contorneado y terrazas	Buena	51	67	76	80

Fuente: NRCS, (1986).

Cuadro 6. Número de curva para otras tierras agrícolas.

Cobertura		Condición Hidrológica	Grupo Hidrológico del Suelo			
Uso de Suelo	Tratamiento o Práctica		A	B	C	D
Tierra agrícola no cultivada						
Pasto o variedad	Tratamiento no mecanizado	Pobre	68	79	86	89
	Tratamiento no mecanizado	Media	49	69	79	84
	Tratamiento no mecanizado	Buena	39	61	74	80
	Contorneado	Pobre	47	67	81	88
	Contorneado	Media	25	59	75	83
	Contorneado	Buena	6	35	70	79
Pradera permanente		-	30	58	71	78
Tierra forestal, céped o huertos siempre verdes o deciduos		Pobre	55	73	82	86
		Media	44	65	76	82
		Buena	32	58	72	79
Matorral		Pobre	48	67	77	83
		Media	35	56	70	77
		Buena	30	48	65	73
Bosque o Selva		Pobre	45	66	77	83
		Media	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
Granjas		-	59	74	82	86

Fuente: NRCS, (1986).

4.1.1 Correcciones al CN por pendiente y por humedad antecedente.

Los diferentes valores del Número de Curva (CN), fueron obtenidos para una condición de humedad antecedente 2 y pendientes menores del 5% para obtener el valor de CN con condiciones diferentes a las mencionadas:

La ecuación (6) ajusta el valor a otras pendientes:

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} [1 - 2e^{(-13.86*slp)}] + CN_2 \quad (6)$$

En donde, CN_1 y CN_3 se calculan según la ecuación (7), respectivamente:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + e^{[2.533 - 0.0636(100 - CN_2)]}} \quad (7)$$

$$CN_3 = CN_2 e^{[0.00673(100 - CN_2)]} \quad (8)$$

Donde CN_1 , CN_2 y CN_3 son los números de curva para condición de humedad 1, 2,3 respectivamente y para una pendiente de 5 % como máximo; y Slp es la pendiente promedio de la cuenca (m/m). CN_{2s} es el valor ya ajustado por pendiente, para una condición de humedad 2.

La humedad antecedente es conocida por tener un efecto significante tanto en el volumen como en la velocidad del escurrimiento. Reconociendo que es un factor muy importante, el Servicio de Conservación de Suelo desarrolló tres condiciones de humedad antecedente en el suelo, mismas que están etiquetadas como 1, 2,3.

- **Condición 1:** Suelos secos, pero sin llegar al punto de marchitez; se han establecido cultivos satisfactoriamente.
- **Condición 2:** Condiciones promedio.
- **Condición 3:** Mucha lluvia, o lluvia ligera con temperaturas bajas han ocurrido dentro de los últimos cinco días; suelos saturados.

Se hace una corrección por humedad antecedente, según la altura de precipitación acumulada cinco días antes de la fecha en cuestión (Cuadro 7).

Cuadro 7. Condición de humedad antecedente.

Condición de humedad antecedente	Precipitación acumulada cinco días previos al evento en consideración
CN ₁ - Seca	0-25 mm
CN ₂ - Normal	25-50 mm
CN ₃ - Humedad	> 50 mm

Fuente: Aparicio Mijares, (2010).

Se corrige CN_{2s} por humedad antecedente para obtener CN_{1s} y CN_{3s} , ecuación (9) y (10), respectivamente.

$$CN_{1S} = CN_{2S} - \frac{20(100 - CN_{2S})}{100 - CN_{2S} + e^{[2.533 - 0.0636(100 - CN_{2S})]}} \quad (9)$$

$$CN_{3S} = CN_{2S} e^{[0.00673(100 - CN_{2S})]} \quad (10)$$

Donde CN_{1S} , CN_{2S} y CN_{3S} son los valores previamente por pendiente, para una condición de humedad 1, 2, 3, respectivamente.

4.1.2 Número de curva basado en datos de precipitación y escurrimiento (Aproximación asintótica).

Hawkins (1993), desarrolló un método, el cual obtiene un número de curva general a partir de datos diarios de precipitación y escurrimiento. El CN empírico es estimado de acuerdo con la ecuación (11).

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad (11)$$

Donde S es el parámetro de retención en mm (ecuación (12)).

$$S = 5(P + 2Q - (4Q^2 + 5PQ)^{0.5}) \quad (12)$$

Donde P es la profundidad de la precipitación (mm) y Q es el escurrimiento o también llamado precipitación efectiva (mm).

Una vez que se tiene el valor de CN, para cada par de P y Q, se ordenan de forma descendente. El CN obtenido a partir de la ecuación (11) y (12) se aproxima a un valor constante cuando se incrementa la precipitación y el CN tiende a decrecer, entonces el valor asintótico corresponde al valor representativo de la cuenca de estudio (ecuación (13) y Figura 1).

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty})\exp\left(-\frac{P}{b}\right) \quad (13)$$

Donde CN_{∞} es una constante aproximada que sucede cuando la precipitación (P , mm) tiende a ∞ ; y b es una constante de ajuste.

La Figura 1 muestra la representación gráfica de la obtención del CN por el método asintótico en los estudios de Banasik y Woodward, (2010).

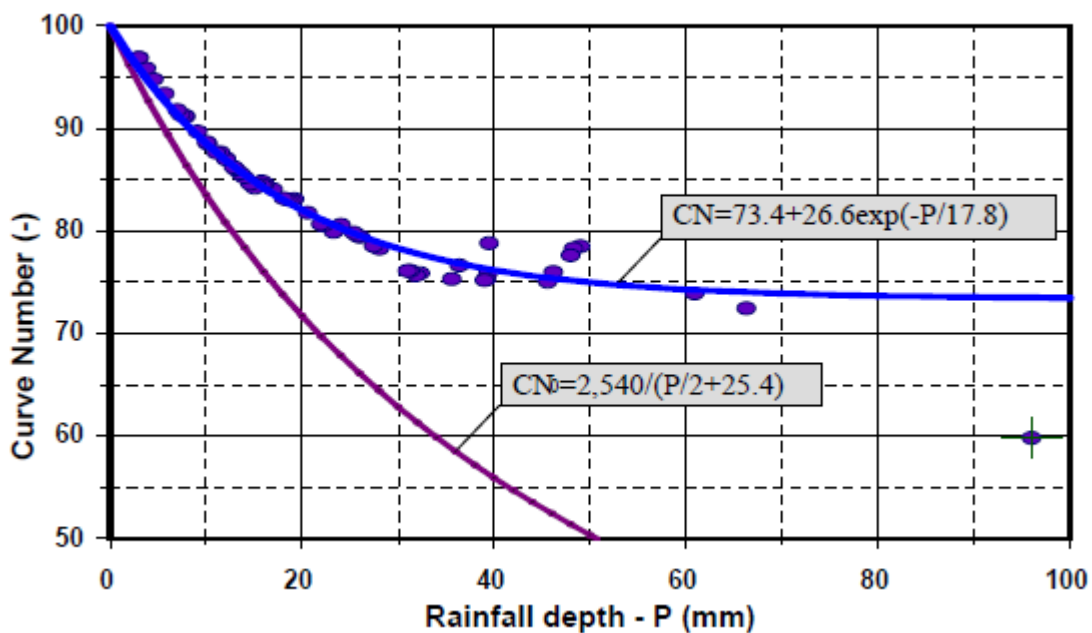


Figura 1. Representación gráfica del CN obtenido mediante aproximación asintótica.

Fuente: Banasik y Woodward, (2010).

4.2 Factores que influyen en el escurrimiento.

Las variables más relacionadas con el escurrimiento de una cuenca son la topografía, propiedades físicas del suelo, uso de suelo y clima (Sefton y Howarth, 1998).

Campos (1998), clasifica los factores que influyen en el escurrimiento en: climáticos, fisiográficos y factores humanos. A continuación, se describirán algunos.

4.2.1 Factores climáticos.

Dentro de los factores climáticos que afectan el escurrimiento, se encuentran: precipitación (intensidad, duración y distribución), intercepción, evapotranspiración, humedad del suelo, temperatura, radiación, entre otros.

4.2.1.1 Radiación solar.

La radiación solar entrante (insolación) es la principal fuente de energía que impulsa muchos de los procesos físicos y biológicos que existen en la superficie de la tierra. Comprender su importancia para las escalas de paisajes es clave para comprender una gran variedad de procesos naturales y de actividades humanas (Kumar, Skidmore, y Knowles, 1997).

La topografía es un factor principal que determina la variabilidad espacial de la insolación. Rich *et al.* (1994) desarrollaron el modelo SOLAR FLUX basada en métodos de algoritmo de cuenca visual hemisférica y considera la variación en la altura, la pendiente, orientación (aspecto), así como las sombras producidas por entidades topográficas como los factores influyentes en la cantidad de insolación. Estos modelos han sido desarrollados para la plataforma Arc GIS. y han sido ampliados por Fu y Rich (2002).

4.2.2 Factores Fisiográficos.

Los factores fisiográficos refieren a aquéllos que dependen de la topografía y características físicas del terreno (Zevenbergen y Thorne, 1987).

Según Ahmad, (2018) el tamaño y forma de un área de drenaje, grado de la pendiente, curvatura, densidad de drenaje, índice de potencia de flujo, índice de transporte de sedimentos son variables que influyen en la erosión y velocidad de escorrentía. Además, Bishop *et al.* (2012) menciona que el estudio de la geomorfometría ayuda a entender diferentes procesos que relacionan la superficie y el relieve. Garcia y Grohmann (2019) indica que ésta, se relaciona con procesos de erosión.

4.2.2.1 Geomorfometría y variables topográficas.

La geomorfometría es la ciencia del análisis cuantitativo de la superficie terrestre, la cual evolucionó directamente de la geomorfología (estudio de la clasificación, descripción, naturaleza, origen y desarrollo de las formas del relieve en la superficie terrestre) y del

análisis cuantitativo del terreno, dos disciplinas que se originaron en la geometría del siglo XIX, la geografía física y la medición de las montañas (Pike, Evans, y Hengl, 2009) .

La geomorfometría moderna aborda el refinamiento y el procesamiento de datos de elevación, la descripción y la visualización de la topografía, y una amplia variedad de análisis numéricos. Se centra en la superficie terrestre continua, aunque también incluye el análisis de los accidentes geográficos, características discretas, como las cuencas hidrográficas.

A continuación, se describen algunos parámetros del terreno.

4.2.2.1.1 Pendiente.

Es una medida que denota el cambio en la inclinación de la superficie sobre el plano horizontal. Según la guía de descripción de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura (FAO), la pendiente puede ser clasificada en 10 clases según FAO (2009) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Clasificación de pendientes.

Clase de pendiente	Porcentaje%
Plano	0-0.2
Nivel	0.2-0.5
Cercano al nivel	0.5-1.0
Muy ligeramente inclinado	1.0-2.0
Ligeramente inclinado	2.0-5.0
Inclinado	5.0-10.0
Fuertemente inclinado	10.0-15.0
Moderadamente escarpado	15.0-30.0
Escarpado	30.0-60.0
Muy escarpado	>60.0

Fuente: FAO, 2009.

4.2.2.1.2 Curvatura.

La curvatura (C) es una medida de qué tan doblada está una superficie en un punto particular y está relacionada con la segunda derivada; es decir la segunda derivada ayuda a definir si en un punto la superficie es cóncava o convexa. Dicho en otras palabras, la curvatura es la tasa de cambio de la pendiente (Wilson y Gallant, 2000).

La curvatura se puede calcular en cualquier dirección, sin embargo, las dos direcciones más importantes son la dirección en el sentido de la máxima pendiente y la dirección perpendicular a ésta. La primera, es definida mediante la curvatura vertical; y la segunda, mediante la curvatura horizontal.

4.2.2.1.3 Curvatura Horizontal.

La curvatura horizontal (C_H) o tangencial, es perpendicular a la pendiente máxima.

Esta variable puede ser positiva, negativa o cero. Según Florinsky, (2017) menciona que es una medida de la convergencia del flujo. El flujo superficial y el flujo subsuperficial lateral convergen cuando $C_H < 0$ (superficie lateralmente cóncava, el escurrimiento se concentra a lo largo de una ladera), y diverge cuando $C_H > 0$ (superficie lateralmente convexa, escurrimientos superficiales tienden a dispersarse a lo largo de la ladera).

Valores iguales a 0 indican que lateralmente la curva de nivel es lineal y entonces, los escurrimientos bajan paralelos a lo largo de la ladera.

4.2.2.1.4 Curvatura Vertical.

La curvatura vertical (C_V), es la curvatura de una sección normal que tiene una línea tangente en común con la pendiente de la línea en un punto dado de una superficie topográfica.

Esta variable puede ser positiva, negativa o cero y sus unidades están en (m^{-1}). La curvatura vertical (C_V) es una medida de la desaceleración y aceleración relativa del flujo. El flujo superficial y el flujo subsuperficial lateral del suelo son acelerados (superficie convexa) cuando $C_V < 0$, y son desacelerados cuando $C_V > 0$ (superficie cóncava). Un valor igual a 0 indica una superficie lineal sin cambios en las condiciones de erosión y depositación. (Zevenbergen y Thorne, 1987)

4.2.2.1.5 Índice de Posición Topográfica.

El Índice de Posición Topográfica (IPT) mide la diferencia entre el valor de la elevación de un punto central de una vecindad y el promedio de la elevación alrededor de éste, dentro de un radio predeterminado (Weiss, 2001). Valores altos del índice, representan áreas con elevaciones más altas que los pixeles de su alrededor; y los valores bajos, caracterizados

como valles presentan elevaciones más bajas que sus pixeles vecinos; valores igual a cero corresponden a áreas planas o de pendiente constante.

El IPT puede ser calculado de acuerdo con la ecuación (14).

$$IPT = T_0 - \frac{(\sum_{n-1} T_n)}{n} \quad (14)$$

Donde *IPT* es el Índice de Posición Topográfica, T_0 es la elevación del punto que se está evaluando (m), T_n es la elevación del grid (m) y “n” el número total de puntos alrededor (vecindad) empleados en la evaluación.

El IPT puede ser clasificado en diferentes formas del relieve, según muestra el Cuadro 9.

Cuadro 9. Clasificación del Índice de Posición Topográfica en formas del relieve.

Descripción	IPT		Pendiente %
	Vecindad pequeña	Vecindad grande	
Cañones	$IPT \leq -1$	$IPT \leq -1$	
Drenajes en pendiente media, valles poco profundos	$IPT \leq -1$	$-1 < IPT < 1$	
Cabeceras, drenajes altos	$IPT \leq -1$	$IPT \geq 1$	
Valles en U	$-1 < IPT < 1$	$IPT \leq -1$	
Planos	$-1 < IPT < 1$	$-1 < IPT < 1$	Pendiente ≤ 5
Pendientes medias abiertas	$-1 < IPT < 1$	$-1 < IPT < 1$	Pendiente > 5
Pendientes muy abiertas, mesas	$-1 < IPT < 1$	$IPT \geq 1$	
Crestas locales/ Colinas en valles	$IPT \geq 1$	$IPT \leq 1$	
Crestas de pendiente media/Pequeñas colinas en planicie	$IPT \geq 1$	$-1 < IPT < 1$	
Cimas de montañas	$IPT \geq 1$	$IPT \geq 1$	

Fuente: Weiss, (2001).

4.2.2.1.6 Índice Topográfico de humedad.

El Índice Topográfico de Humedad (ITH) fue desarrollado por Beven y Kirby (1979) dentro del modelo de escurrimiento TOPMODEL; y hoy en día es uno de los índices topográficos ampliamente utilizados. Dicho índice está relacionado con la humedad edáfica ya que permite identificar los lugares potenciales donde se concentra la humedad o las zonas de acumulación

de agua y refleja la tendencia del suelo a generar escurrimiento ya que la precipitación efectiva que llega al suelo, al ser saturado puede escurrir con mayor facilidad (Roa Lobo y Kamp, 2012).

El cálculo del Índice Topográfico de Humedad se basa en una secuencia de análisis de Modelos Digitales de Elevación (DEM), partiendo análisis de direcciones de flujo, pendiente y una corrección del DEM. Valores altos de este índice indican mayor humedad de la celda en función de su configuración topográfica (Sorensen, Zinko, y Seibert, 2005).

$$ITH = \ln\left(\frac{a_s}{\tan \beta}\right) \quad (15)$$

Donde *ITH* es el Índice Topográfico de Humedad ($m^2 m^{-1}$), a_s es la acumulación del flujo para un punto de cálculo y $\tan B$ es la pendiente direccional de la celda de interés y de las celdas vecinas.

El modelo expresa parcialmente volumen relativo y la cantidad del movimiento de flujo que pasará por cada punto del terreno. A medida que aumente el área drenada y la pendiente disminuya aumentará la concentración y saturación hídrica; es decir, valores altos de ITH corresponde a zonas de concentración de escurrimiento.

4.2.2.1.7 Índice de Potencia de Flujo.

El Índice de Potencia de flujo (IPF) mide el poder erosivo de una corriente de agua, basado en la suposición que la descarga es proporcional al área de la cuenca (Ahmad, 2018). El IPF determina la habilidad de transferir sedimentos y expresa el potencial topográfico para que ocurra la deposición (valores cercanos a cero y/o valores negativos) y erosión por arrastre (valores positivos) (Bannari *et al.*, 2017).

El IPF se calcula según la ecuación (16), (Moore *et al.*, 1991).

$$IPF = \ln\left((A_s + 0.001) * \left(\left(\frac{\beta}{100}\right) + 0.001\right)\right) \quad (16)$$

Donde IPF es el Índice de Potencia del Flujo, \ln es el logaritmo Natural, A_s es la acumulación del flujo, B es la pendiente (%).

4.2.2.1.8 Índice de transporte de sedimentos.

El Índice de Transporte de Sedimentos (ITS) calcula la capacidad de transporte de sedimentos espacialmente distribuida. Este índice es una función no lineal de la descarga específica y la pendiente del terreno. Se basa en el concepto de la fuerza unitaria de la corriente, en cómo la capacidad de transporte limita el flujo de sedimento y las teorías sobre la evolución de la erosión en una cuenca (Moore y Burch, 1986).

El ITS puede ser calculado según la ecuación (17) (Ahmad *et al.*, 2019).

$$ITS = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22.13} \right)^m \left(\text{sen} \frac{\beta}{0.0896} \right)^n \quad (17)$$

Donde ITS es el Índice de Transporte de Sedimentos, A_s es la acumulación del flujo, β es la pendiente, m y n son constantes que equivalen a 0.4 y 1.3, respectivamente.

Este índice es un factor fundamental de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978).

4.2.2.1.9 Longitud de la Pendiente.

La longitud de la pendiente es la distancia desde el punto en donde se origina el flujo en ladera, y el punto donde la pendiente disminuye lo suficiente hasta dar comienzo la deposición de sedimentos, o bien, cuando el agua en forma de escurrimiento entra a un cauce bien definido, mismo que será parte de una red de drenaje o de un canal de desvío o colector. Entre mayor sea la longitud de pendiente, mayor la acumulación de escurrimiento que ocurre (Wischmeier y Smith, 1978).

4.2.2.2 Red de drenaje.

4.2.2.2.1 Densidad de Drenaje.

La densidad de drenaje es la proporción que existe entre las longitudes de la corriente y el área de la cuenca (Horton, 1932), citado por Saha, Paul, y Hembram (2019). La densidad de

drenaje está influenciada por diferentes factores, tales como el clima, tipo de roca, relieve topográfico, capacidad de infiltración, cobertura vegetal, rugosidad de la superficie (Das, 2016)

La densidad de drenaje está dada por la ecuación (18).

$$Dd = \frac{L_c}{A_c} \quad (18)$$

Donde D_d es la densidad de drenaje (adimensional), L_c es la longitud total de corrientes y A_c es el área de la cuenca.

4.2.2.2 Número de Rugosidad.

Generalmente la rugosidad significa el grado de corrugación de la topografía. El número de rugosidad según Strahler (1957) está dado por la ecuación (19).

$$Nr = \frac{R_r * D_d}{K} \quad (19)$$

Donde R_r es el relieve relativo, D_d es la densidad de drenaje y K es una constante de conversión igual a 1000.

4.2.2.3 Cubierta vegetal.

Kuchment (2004) alude a que la vegetación y/ u otros tipos de cobertura como los bosques, interceptan parte de la precipitación, por lo cual está relacionado con el proceso lluvia-escurrimiento.

Para la cuantificación de la cubierta vegetal, el uso de tecnologías SIG y sensores remotos han ayudado a la implementación de índices de vegetación. Estos índices se basan en valores de reflectancia en las zonas espectrales del rojo (RED) y el infrarrojo cercano (NIR). Algunos de los índices utilizados son el índice de vegetación de diferencias Normalizadas (NDVI) y el índice de área Foliar (IAF) (Chen, 2018; Gandini, 2004).

4.2.2.3.1 Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas.

Uno de los índices ampliamente utilizados es el Índice de vegetación de Diferencias Normalizadas (NDVI). Se define al NDVI como una medida de la capacidad fotosintética de las plantas y la resistencia estomática con respecto a la transferencia de vapor de agua. Los valores altos no solo indican presencia de vegetación, sino también a una vegetación más desarrollada, o bien, más densa (Tucker y Sellers, 1986). Los valores de NDVI pueden ser obtenidos según (Rouse *et al.*, 1974), ecuación (20).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (20)$$

En donde *NDVI* es el Índice de vegetación de diferencias Normalizadas el cual puede variar de -1 a 1, *NIR* es la banda correspondiente al infrarrojo cercano, *RED* es la banda correspondiente al rojo.

4.2.2.3.2 Índice de Área Foliar.

El índice de área Foliar (IAF) es la cantidad de superficie foliar (m²) que se encuentra en una determinada superficie de terreno (m²) y varía de acuerdo al tipo de vegetación (Chen, 2018).

La medición directa del IAF implica altos costos y tiempo, por eso diversos autores han buscado obtener dicho índice a partir de sensores remotos.

Fan *et al.* (2009) estudiaron la relación del NDVI y el IAF en Mongolia Interior, China. Relacionaron datos medidos en campo en pastizales con el NDVI obtenido a partir de imágenes Landsat TM. Con un coeficiente de correlación de 0.79 encontraron que el NDVI puede ser un buen estimador del IAF.

La ecuación (21), muestra la relación lineal encontrada para la obtención del IAF en pastizales, a partir del NDVI.

$$IAF_{Pastizal} = -0.0897 + 1.424 * NDVI \quad (21)$$

Donde $IAF_{Pastizal}$ es el índice de área foliar en pastizales y $NDVI$ es el índice de vegetación de diferencias Normalizadas.

Asimismo, para bosques de *Pinus pátula* en Hidalgo México, Aguirre-Salado *et al.* (2011), con un R^2 de 0.92, encontraron que el IAF en bosque puede ser calculado con la ecuación (22).

$$IAF_{bosque} = 17.25 - 74.04 * RED \quad (22)$$

Donde RED es la banda correspondiente al rojo.

Finalmente, Gitelson *et al.* (2003), propusieron un índice para estimar el IAF en maíz a partir de bandas espectrales, ecuación (23).

$$IAF_{maíz} = \frac{NIR}{GREEN} - 1 \quad (23)$$

Donde $IAF_{maíz}$, es el índice de área foliar en maíz, NIR es la banda correspondiente el infrarrojo cercano y $GREEN$ es la banda correspondiente al canal verde.

4.3 Propiedades físicas de los suelos.

Las propiedades físicas más importantes según Ortiz-Villanueva y Ortíz-Solorio, (1980) son: textura, estructura, color, densidad aparente, densidad real, porosidad, distribución de poros por el tamaño, infiltración, permeabilidad y conductividad hidráulica.

A continuación, se describen algunas propiedades físicas que influyen en el proceso lluvia-escurrimiento.

4.3.1 Textura.

La textura se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla en el suelo.

Las fracciones según el tamaño (arena, limo y arcilla) se denominan separados del suelo. Los límites de tamaño de acuerdo con los sistemas americano e internacional se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Clasificación de las partículas del suelo.

Fracción del suelo	Sistema del Departamento de Agricultura de EE.UU.		Sistema Internacional
	Diámetros límites (mm)		
Arena muy gruesa	2.0-1.0		
Arena gruesa	1.0-0.5		2.0-0.2
Arena media	0.5-0.25		
Arena Fina	0.25-0.1		0.2-0.002
Arena muy Fina	0.1-0.05		
Limos	0.05-0.002		0.02-0.002
Arcilla	menos de 0.002		menos de 0.002

Fuente: Ortiz-Villanueva y Ortíz-Solorio, (1980).

Para representarlas se puede utilizar la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, según el triángulo de texturas mostrado en la Figura 2.

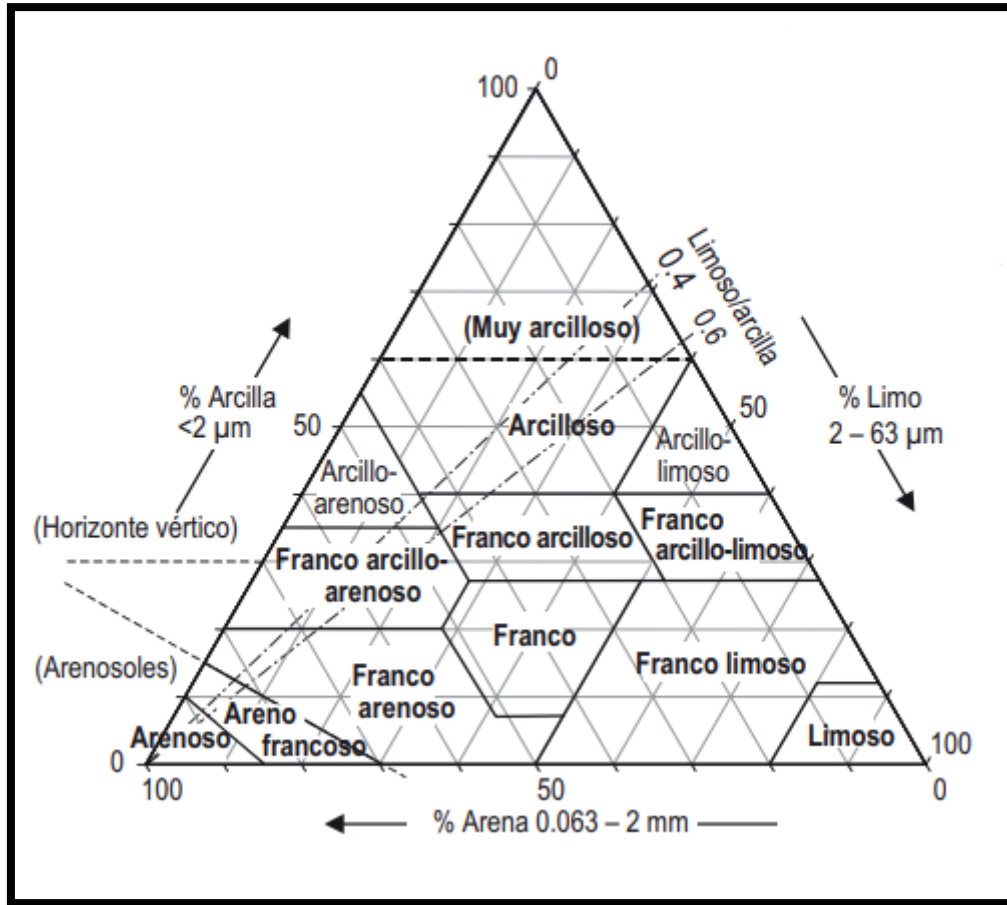


Figura 2. Triángulo de texturas, mostrando los porcentajes de arena, limo y arcilla en clases texturales.

Fuente: FAO (2009).

En términos generales, los suelos se dividen en suelos de textura fina y suelos de textura gruesa. En los primeros, predomina la arcilla y presentan una mayor capacidad de adsorción de nutrientes; usualmente son más fértiles; los segundos, al ser suelos arenosos tienen poros grandes lo cual permite una velocidad de infiltración mayor. No obstante los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua debido a su mayor área superficial y un volumen total de vacíos mayor que los suelos arenosos (Ortiz-Villanueva y Ortíz-Solorio, 1980).

4.3.2 Conductividad Hidráulica (K_s):

La conductividad hidráulica expresa la facilidad con que el suelo, a través del medio poroso, permite el tránsito de un fluido en particular. Puede ser definida como el volumen de agua por unidad de tiempo que pasa a través de un área transversal unitaria bajo el efecto de un gradiente hidráulico unitario. Se determina tanto por el tipo de suelo como por el fluido que transmite (Şen, 2015).

Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua y se denomina conductividad hidráulica saturada.

La conductividad hidráulica puede ser representada según la ecuación (24).

$$K_s = \frac{Qe}{A * i} \quad (24)$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica (m/s), Qe es el gasto del fluido (m^3/s) y A es el área de la sección transversal (m^2) y i es el gradiente hidráulico.

4.4 Regresión lineal múltiple.

Maity (2018), menciona que el modelo general de regresión múltiple (MLR) puede ser representado con la ecuación (25) :

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_p X_p + \varepsilon \quad (25)$$

Donde Y es la variable dependiente, X_1, X_2, \dots, X_p son las variables independientes (también llamadas regresores); $B_0, B_1, B_2, \dots, B_p$ son los parámetros desconocidos (coeficientes de regresión) y ε se conoce como error.

Este tipo de modelo es de mucha utilidad, ya que muchas variables aleatorias de interés se explican en función del efecto de dos o más factores cuantificables, los regresores, así como una función lineal, del tipo anterior, que relaciona a la respuesta Y con tales factores.

En el ajuste de la MLR, las asunciones de la regresión lineal múltiple se deben mantener y adicionalmente los datos no deben tener multicolinealidad. La multicolinealidad representa una situación en el cual la combinación lineal de diferentes entradas (variables independientes) resulta en cero.

Ahora, un conjunto de datos observados, consistirán en “n” observaciones de “Y” y corresponde a “n” observaciones de “p” variables independientes. Consecuentemente la ecuación (25) puede ser escrita como la ecuación (26).

$$Y_i = B_0 + \sum_{j=1}^p B_j X_{i,j} \quad (26)$$

Donde Y_i es la “i-ésima” observación de la variable dependiente, $X_{i,j}$ es la “i-ésima” observación de la “j-ésima” variable independiente. En la forma matricial puede ser escrita, tal como lo muestra la ecuación (27).

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{1,1} & X_{1,2} & X_{1,3} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{1,p} \\ 1 & X_{2,1} & X_{2,2} & X_{2,3} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{2,p} \\ 1 & X_{3,1} & X_{3,2} & X_{3,3} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{3,p} \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & X_{n,1} & X_{n,2} & X_{n,3} & \cdot & \cdot & \cdot & X_{n,p} \end{bmatrix} \quad (27)$$

O bien, la ecuación (28).

$$Y = X \beta \quad (28)$$

Donde “Y” es un vector $n \times 1$ de la variable dependiente, X es una matriz $n \times (p+1)$ de las variables independientes, y β es un vector $(p+1) \times 1$ de los parámetros desconocidos. De manera que, si se requiere encontrar los valores de dichos parámetros, se puede utilizar el método de los mínimos cuadrados. Consecuentemente, minimizando la función se puede

encontrar el valor de β . En forma matricial, la suma del cuadrado del error puede ser escrito según la ecuación (29),

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = e^T e = (Y - X\hat{\beta})^T (Y - X\hat{\beta}) \quad (29)$$

Diferenciando la ecuación anterior con respecto de $\hat{\beta}$ y colocando el valor de la expresión a cero, se obtiene la ecuación (30):

$$X^T Y = X^T X \hat{\beta} \quad (30)$$

Finalmente, la solución de $\hat{\beta}$ puede ser obtenida mediante la multiplicación de ambos lados de la ecuación con $(X^T X)^{-1}$ y así finalmente se obtiene la ecuación (31):

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (31)$$

4.4.1 Selección de variables independientes.

El método *Stepwise* fue introducido por Braux (1967). El modelo comienza con un modelo nulo e introduce las variables una por una. La selección de cada variable paso a paso se realiza con diferentes criterios. Uno de ellos es con el valor p más bajo ($p < 0.005$) (reducción estadísticamente más significativa de la suma de los cuadrados residuales y con el coeficiente de determinación ajustado más alto).

Para cada paso, se prueba si las variables son significativas y si encuentra alguna que no lo es, se desecha. El proceso termina cuando ya no hay variables independientes por agregar al modelo (Desboulets, 2018).

4.4.2 Evaluación del Modelo de Regresión.

La adecuación del modelo ajustado de regresión se puede llevar a cabo mediante la determinación de que tanto la variable dependiente es explicada por el modelo de regresión. La variabilidad total es la suma de la variabilidad explicada por el modelo de regresión y la

debido a los errores/residuales. La adecuación del modelo de regresión puede ser expresada como el ratio de la variabilidad explicada por el modelo de regresión y la variabilidad total observada en la variable dependiente. Dicho ratio es denominado coeficiente de determinación y es representado como R^2 ecuación (32) y (33).

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Suma del error cuadrado}}{\text{Variabilidad total en la variable dependiente}} \quad (32)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(\hat{y}_i - \bar{Y})^2} \quad (33)$$

Donde R^2 es el coeficiente de determinación, $\sum(y_i - \hat{y}_i)^2$ sumatoria del error cuadrado y $\sum(\hat{y}_i - \bar{Y})^2$ la variabilidad total en la variable dependiente.

El ratio de la variabilidad explicada por el modelo de regresión nunca puede ser mayor que la variabilidad total de la variable dependiente. Consecuentemente el coeficiente de determinación se encuentra dentro del rango de 0 a 1. Entre más cercano sea R^2 a 1, el modelo es mejor.

4.5 Indicadores de eficiencia del modelo.

Existen diferentes índices que permiten cuantificar el grado de ajuste entre los datos medidos y los resultados del modelo.

4.5.1 Coeficiente de determinación.

Mide la variación de los datos observados con respecto a los simulados por el modelo (valores de 0 a 1) (Santhi *et al.*, 2001).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})(y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - \bar{y}^{sim})^2}} \right)^2 \quad (34)$$

Donde r^2 es el coeficiente de determinación, y_i^{obs} es el valor observado, $y_i^{simulado}$ el valor simulado, \bar{y}^{obs} el valor medio observado, \bar{y}^{sim} el valor medio simulado y n el número total de observaciones.

4.5.2 Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE).

Nash y Sutcliffe (1970) mencionan que el NSE es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual (“ruido”) en comparación con la variación de los datos medidos (“información”), de acuerdo con la ecuación (35).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})^2} \right] \quad (35)$$

Donde NSE es el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe, y_i^{obs} es el valor observado, $y_i^{simulado}$ el valor simulado, \bar{y}^{obs} el valor medio observado, y n el número total de observaciones.

El NSE varía de $-\infty$ a 1, donde el valor óptimo sería 1. Valores entre 0 y 1 generalmente son aceptables, mientras que <1 indican que el valor de la media observada es mejor predictor que el simulado, indicando un rendimiento no aceptable.

4.5.3 Sesgo porcentual (PBIAS).

Mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los observados, es decir a sobreestimar (valores negativos) o subestimar (valores positivos) la variable de interés (Gupta, Sorooshian, y Yapo, 1999). (ecuación (36)).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n y_i^{obs}} \right] \quad (36)$$

Donde $PBIAS$ es el sesgo porcentual, y_i^{obs} es el valor observado, $y_i^{simulado}$ el valor simulado, y n el número total de observaciones.

4.5.4 Relación de la desviación estándar de las observaciones (RSR).

Según Singh, Knapp y Demissie (2005), el RSR estandariza la raíz del error cuadrático medio (RMSE), utilizando la desviación estándar de las observaciones. El valor óptimo es cero, lo que indicaría una simulación perfecta. Entre más bajo el RSR es mejor la simulación del modelo (ecuación (37)).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - \bar{y}^{obs})^2}} \quad (37)$$

En base a recopilación de modelos calibrados y validados Moriasi *et al.*, (2007), presenta una clasificación o rendimiento general de los modelos, para diferentes indicadores de eficiencia (Cuadro 11).

Cuadro 11. Rendimiento general de los modelos.

Rendimiento	RSR	NSE	PBIAS %
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.5$	$0.75 \leq NSE \leq 1.0$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.6$	$0.65 < RSR \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactorio	$0.6 < RSR \leq 0.7$	$0.50 < RSR \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfactorio	$RSR > 0.7$	$RSR \leq 0.5$	$PBIAS \geq \pm 25$

4.6 Estudios previos.

Visessri y McIntyre (2016) utilizaron datos de 44 subcuencas en el norte de Tailandia del periodo de 1995-2006 para regionalizar tres índices de respuesta de flujo (coeficiente de escurrimiento, índice de flujo base y la elasticidad estacional). Los índices fueron obtenidos a partir de datos de precipitación y escurrimiento y mediante análisis de regresión lineal “Stepwise” fueron relacionados con las propiedades de la cuenca (área de la cuenca, elevación, longitud del canal, densidad de drenaje, porcentajes de usos de suelo, precipitación media anual en periodo seco y húmedo). El coeficiente de escurrimiento fue el mejor regionalizado con un coeficiente de regresión de 0.81; seguido del índice de flujo y la elasticidad estacional ($r^2 = 0.42$).

Wu y Dong (2017) estudiaron los factores que afectan el escurrimiento, mediante análisis de regresión lineal de precipitación, temperatura del aire, minería del carbón en la cuenca del río Kuye, medidas de conservación del suelo y del agua, y consumo del agua. Encontrando que la lluvia, temperatura y minería del carbon fueron los factores más importantes en la generación de escurrimientos durante el periodo de 1961 a 2010, alcanzando un r^2 de 0.84 entre los valores de escurrimientos simulados y los medidos.

Zhang *et al.* (2018) predicen la firma de escurrimiento mediante análisis de regresión lineal múltiple y enfoques de modelación hidrológica utilizando datos de 605 cuencas en Australia. Para ello, definen a la firma de escurrimiento como un conjunto de índices de escurrimiento que describen el comportamiento de las características del flujo en corriente en un periodo largo de tiempo. Dichas firmas son una función lineal de los atributos de la cuenca (latitud, longitud, área de la cuenca, elevación, pendiente, capacidad de retención de agua, conductividad hidráulica, precipitación media anual, desviación estándar de la precipitación diaria, promedio de la precipitación invernal, promedio de la precipitación en verano, etcetc.). Los resultados muestran que la precipitación media anual y el índice de aridez tienen mayor influencia sobre las firmas de escurrimiento y que los atributos que tienen una influencia significativa son: relación del bosque, pendiente y capacidad de retención del suelo. Los enfoques de regresión lineal múltiple pueden predecir la mayoría de las firmas de escurrimiento con un NSE mayor a 0.6. Por otro lado, la modelación hidrológica no predice varias firmas de escurrimiento, especialmente aquellas con un flujo bajo.

Chong y Teng (1986) estudiaron la relación entre la sortividad y conductividad hidráulica con el CN. Calcularon las abstracciones iniciales utilizando la intensidad de precipitación y el tiempo en que tardaba en darse el escurrimiento y resolvían para el parámetro de retención potencial máxima. Encontraron que la conductividad hidráulica saturada está altamente relacionada con la retención máxima del suelo con un coeficiente de correlación de 0.876, y la estimación del parámetro de retención mejora su coeficiente de correlación a 0.92 si se agrega la sortividad. Obtuvieron un coeficiente de correlación de 0.82 entre los CN de datos observados y los calculados a partir del ajuste del parámetro de retención; mostrando que es posible estimar el CN de un mismo tipo de suelo a partir de datos de conductividad hidráulica saturada y sortividad.

Christianson, Hutchinson, y Brown (2016) buscaron obtener un CN a partir de la conductividad hidráulica saturada, sortividad, suelos y usos de suelo. Tomaron 331 pruebas de infiltración con infiltrómetro de doble anillo. La conductividad hidráulica fue asumida como la infiltración básica y la sortividad fue obtenida según la relación de Chong y Teng (1986) . Se evaluaron 4 métodos: el primero solo consideraba el CN dependiendo de la conductividad hidráulica saturada; el segundo, consideraba la conductividad hidráulica saturada y la sortividad; mientras que el tercero, toma en cuenta el CN dependiendo del grupo hidrológico de suelo de acuerdo con los mapas de suelos del USDA 2011 y el uso del mismo; finalmente, el cuarto método se basa en datos de escurrimiento. La conductividad hidráulica mostró un comportamiento esperado en los usos de suelos rurales o no alterados, contrario a los urbanos, en donde varía hasta un 91%. El tercer método fue el mejor predictor para el CN basado en precipitación y escurrimientos cuando el uso de suelo corresponde a una pradera; mientras que la mediana de CN obtenido por el método 1 fue el mejor predictor para zonas urbanas o usos de suelo alterados.

Thompson, Harle, y Keister (2003) ajustaron CN en Texas para direccionar las influencias climáticas sobre el método.

Chin (2017), demostró que el Número de Curva depende significativamente de la distribución y profundidad de la precipitación poniendo énfasis en la humedad inicial y la capacidad de infiltración de los suelos. Esto lo realizó, a partir de mediciones en campo de las propiedades de la infiltración, y características de la precipitación y aplicando los modelos de infiltración de Horton Green y Ampt. Cabe recalcar que es válido para lugares donde el proceso dominante de abstracción sea la infiltración, ya que no considera la intercepción, almacenamiento del suelo, evapotranspiración.

Beck *et al* (2009) demostraron que, ajustando la CN a la variabilidad de humedad de los suelos, o la abstracción inicial, mejora la estimación de los escurrimientos.

Fan *et al.* (2013) desarrollaron un método para obtener un CN compuesto en áreas urbanas a partir de la extracción del porcentaje de vegetación, superficie impermeable y suelo, por pixel, generando un CN ponderado, mediante técnicas de combinación lineal espectral.

Muche *et al.* (2019) se enfocaron en la variación estacional del NDVI como indicador de la vegetación. Para ello, relacionaron linealmente el CN calculado a partir de datos de precipitación y escurrimiento con NDVI de imágenes MODIS, para periodos similares. Encontraron que el CN obtenido a partir de NDVI presenta un mejor NSE (0.53) y PBIAS (4.22) comparado con el método normal (-0.87 y -94.86, respectivamente).

Shi *et al.* (2009) mencionan que el valor de 0.2, del radio de la abstracción inicial del método del CN, es una asunción que debe ser refinada. Por lo tanto, trataron de mejorar el radio de la abstracción inicial del método de CN a partir de datos de precipitación y escurrimiento. Encontraron que el radio de la abstracción inicial que mejor predice los escurrimientos en el área Tres gargantas, China, presenta un valor de 0.05 con un coeficiente de eficiencia del modelo de 0.768 comparado con el valor tradicional (0.482).

5 MATERIALES Y MÉTODOS.

5.1 Descripción de la zona de estudio.

5.1.1 Ubicación geográfica.

El área de estudio de la presente investigación corresponde a la cuenca del río Chapingo, que se localiza en el municipio de Texcoco, estado de México, México (Figura 3), específicamente entre las coordenadas geográficas $19^{\circ} 29' 34.44''$ N, $98^{\circ} 53' 7.799''$ W y $19^{\circ} 25' 22.08''$ N, $98^{\circ} 45' 41.399''$ W. La cuenca abarca un área de 17.84 km^2 y presenta elevaciones desde los $2\,251.51 \text{ m}$ hasta los $3\,587.18 \text{ m}$.

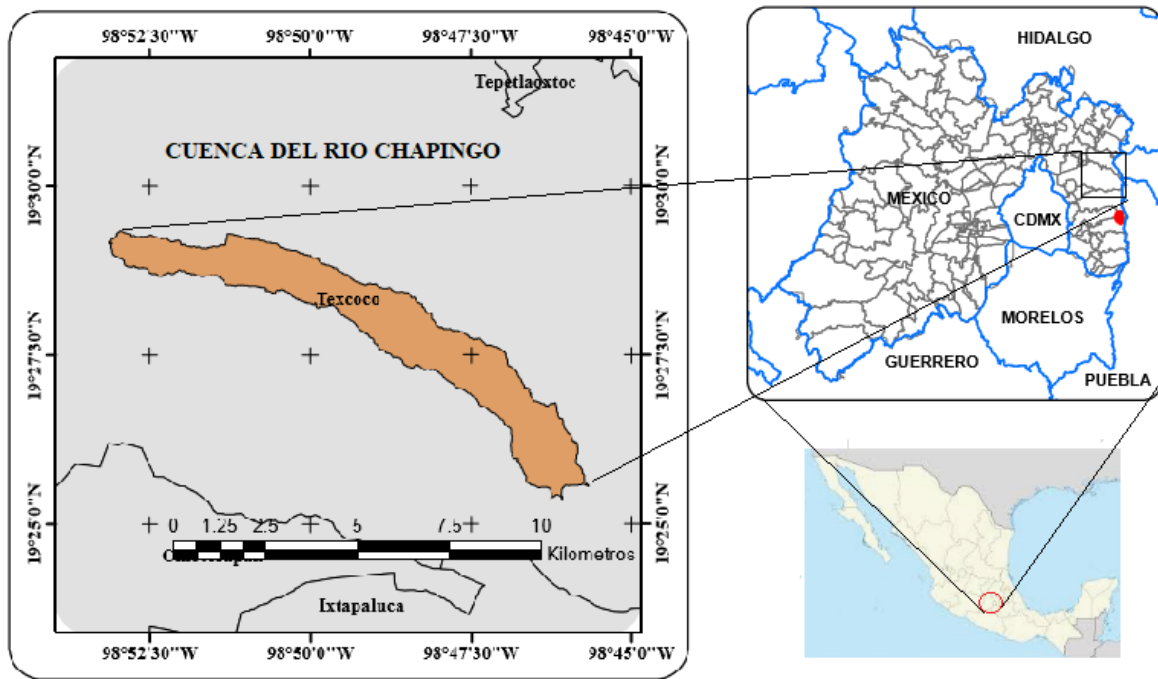


Figura 3. Ubicación de la cuenca del río Chapingo.

5.1.2 Clima.

El 77.74% del área de estudio presenta un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y precipitaciones que varían de 600 mm a 800 mm, una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C con una temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C. El 22.26% del área corresponde a un clima semifrío subhúmedo con precipitaciones de 800 mm a 1000 mm y una temperatura media anual entre 5 °C y 12 °C con una temperatura del mes más frío entre -3 °C y 18 °C (INEGI, 2008) (Figura 4). Las características de cada tipo de clima se muestran en el Cuadro 12.

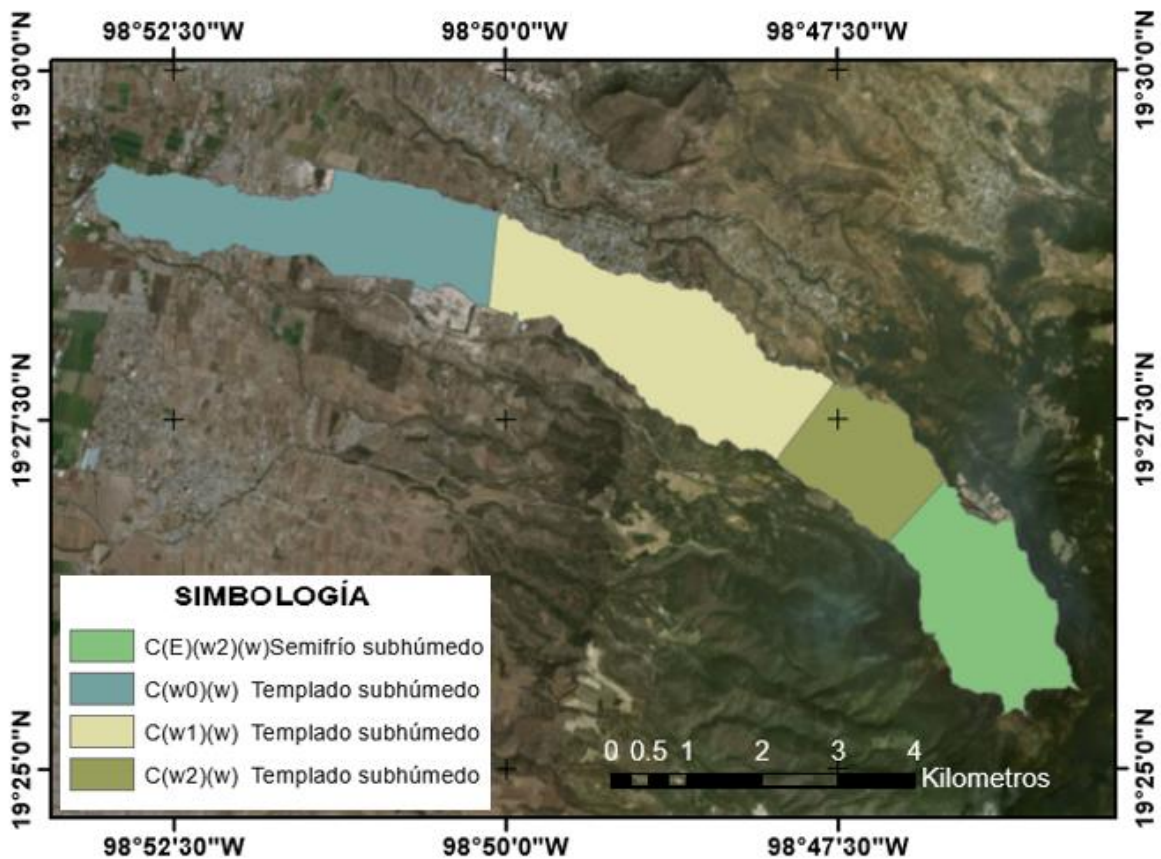


Figura 4. Climatología de la cuenca del río Chapingo.

Cuadro 12. Descripción de la temperatura y precipitación de acuerdo con el tipo de clima.

Tipo de clima	Descripción de la temperatura	Descripción de la precipitación
C(E)(w ₂)(w)	Semifrio subhúmedo , temperatura media anual entre 5 °C y 12°C, temperatura del mes mas frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C	Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual
C(w ₀)(w)	Templado subhúmedo , temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes mas frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C	Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual
C(w ₁)(w)	Templado subhúmedo , temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes mas frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C	Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y 55 porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual
C(w ₂)(w)	Templado subhúmedo , temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, temperatura del mes mas frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C	Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual

5.1.3 Hidrografía.

El río Chapingo tiene su origen en los cerros Tearco y Tecorral, desde una altitud del orden de los 3500 msnm y desemboca en el Ex-lago de Texcoco, no obstante, para la presente investigación solo se consideró hasta la estación de aforo “26 183 Chapingo” (Figura 5). El cauce principal realiza un recorrido de oriente a poniente y solo conduce agua cuando llueve y cuando descargan los sistemas de drenaje de las zonas urbanas aledañas.

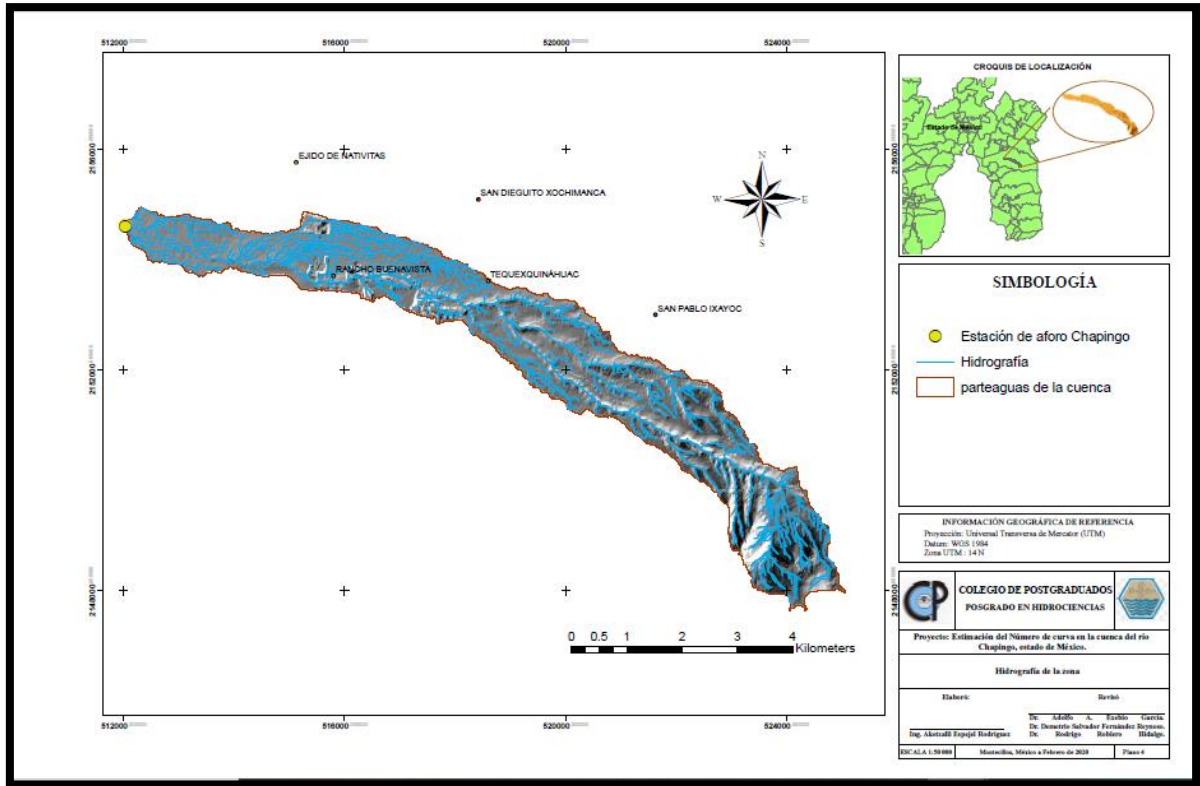


Figura 5. Hidrografía de la cuenca del río Chapingo.

5.1.4 Suelos.

Los suelos presentes en el área de trabajo, según INEGI (1983), se agrupan en Cambisoles (35.41%), Feozem (35.25%), Litosoles (24.47%), Andosoles (4.86%) y Vertisoles (0.01%).

De acuerdo con la Figura 6, se logra observar que en la parte alta predominan los suelos Cambisoles y Andosoles; en la parte media, Litosoles y Cambisoles; y en la parte baja, Feozem y Vertisoles.

El Cuadro 13, describe las unidades de suelo presentes en el área de estudio.

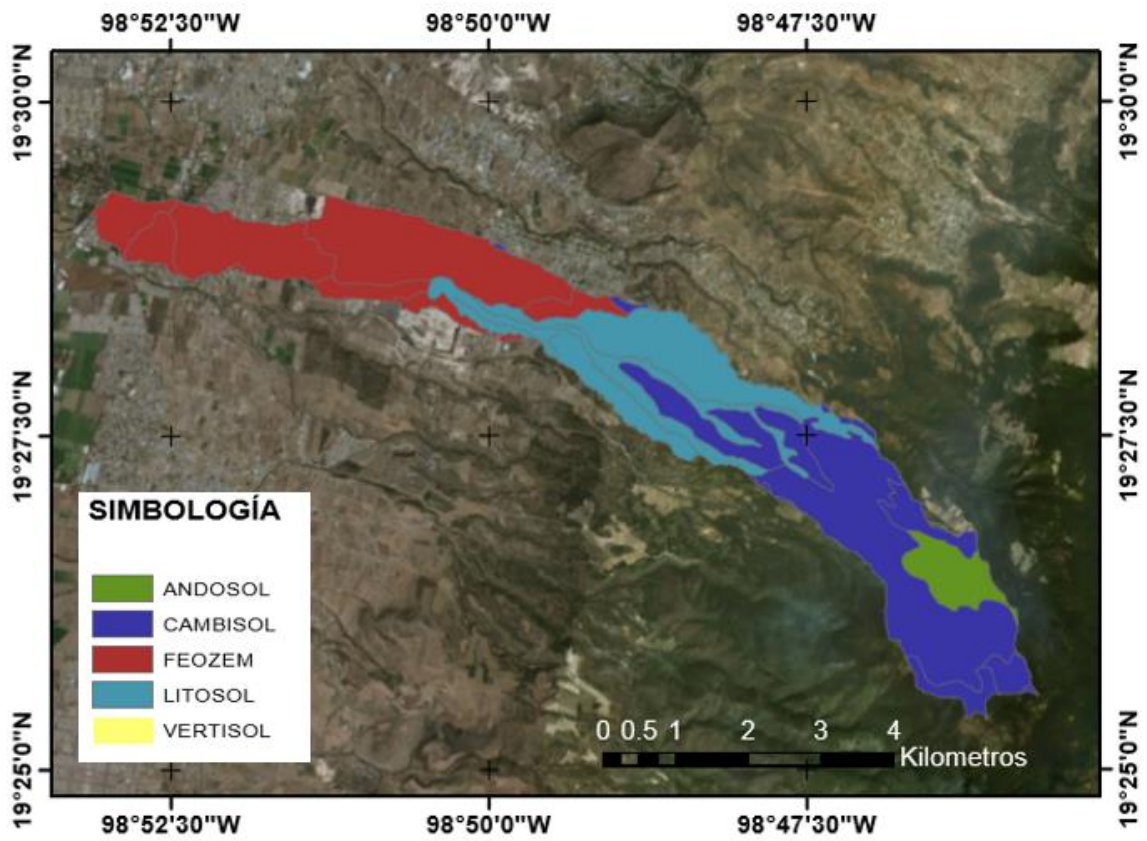


Figura 6. Tipos de suelos, presentes de la cuenca del río Chapingo.

Cuadro 13. Descripción de los tipos de suelo presentes en la cuenca del río Chapingo.

Clave	Unidades de suelo	Descripción
B	Cambisol	Los suelos cambisoles tienen un subsuelo muy diferente a simple vista en color y textura a la capa superficial. La capa superficial puede ser oscura, con más de 25 cm de espesor pero pobre nutrientes y en ocasiones no existe.
Bd(SF)	Cambisol déstrico, sin fase	Presencia de un suelo pobre o muy pobre en nutrientes.
Be(Du)	Cambisol eútrico, fase dúrica	Suelos con presencia de un subsuelo rico o muy rico en nutrientes. La fase dúrica indica una capa endurecida de material resistente al agua y al ácido. Esta capa está a menos de 50 cm de profundidad.
Be(LP)	Cambisol eútrico, fase lítica profunda	Suelos con presencia de un subsuelo rico o muy rico en nutrientes. La fase lítica profunda indica que es un suelo con roca continua entre 50 y 100 cm de profundidad.
Be(SF)	Cambisol eútrico, sin fase	Suelos con presencia de un subsuelo rico o muy rico en nutrientes. La ausencia de fase indica que son suelos profundos.
Bh(SF)	Cambisol húmico, sin fase	Suelos con presencia de una capa superficial oscura, a veces gruesa, de regular a buen contenido de materia orgánica pero pobre en nutrientes. La ausencia de fase indica que son suelos profundos.
H	Feozem	Suelos con una capa superficial oscura, algo gruesa, rica en materia orgánica y nutrientes.
Hh(DP)	Feozem háplico, fase dúrica profunda	Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo. La fase dúrica profunda indica una capa subsuperficial fuertemente cementada por sílice entre los 50 y 100 cm de profundidad.
Hh(Du)	Feozem háplico, fase dúrica	Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo. La fase dúrica indica una capa endurecida de material resistente al agua y al ácido. Esta capa está a menos de 50 cm de profundidad.
Hh(SF)	Feozem háplico, sin fase	Suelos que no presentan características de otras subunidades existentes en ciertos tipos de suelo. La ausencia de fase, indica que son suelos profundos.
I	Litosol	Suelo de piedra. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido.
I(Du)	Litosol, fase dúrica	La fase dúrica indica una capa endurecida de material resistente al agua y al ácido. Esta capa está a menos de 50 cm de profundidad.
I(SF)	Litosol, sin fase	La ausencia de fase, indica que son suelos profundos.
T	Andosol	Los andosoles son suelos oscuros muy ligeros, con alto contenido de ceniza y otros materiales de origen volcánico.
Tm(SF)	Andosol mólico, sin fase	Suelos con presencia de una capa superficial oscura, gruesa, rica en nutrientes y con buen contenido de materia orgánica.
V	Vertisol	Suelos muy arcillosos en cualquier capa a menos de 50 cm de profundidad; en época de secas tienen grietas muy visibles a menos de 50 cm de profundidad, siempre y cuando no haya riego artificial. Estos suelos se agrietan en la superficie cuando están muy mojados.
Vc(SF)	Vertisol crómico, sin fase	Vertisol oscuro pero no tanto como el vertisol pélico. La ausencia de fase, indica que son suelos profundos.

5.1.5 Geología.

La cuenca del río Chapingo se encuentra en el eje Volcánico Transversal. En la Figura 7 se puede observar que, en la parte alta de cuenca, predominan las andesitas y brechas sedimentarias, mientras que en la parte baja corresponde a suelos aluviales y lacustres.

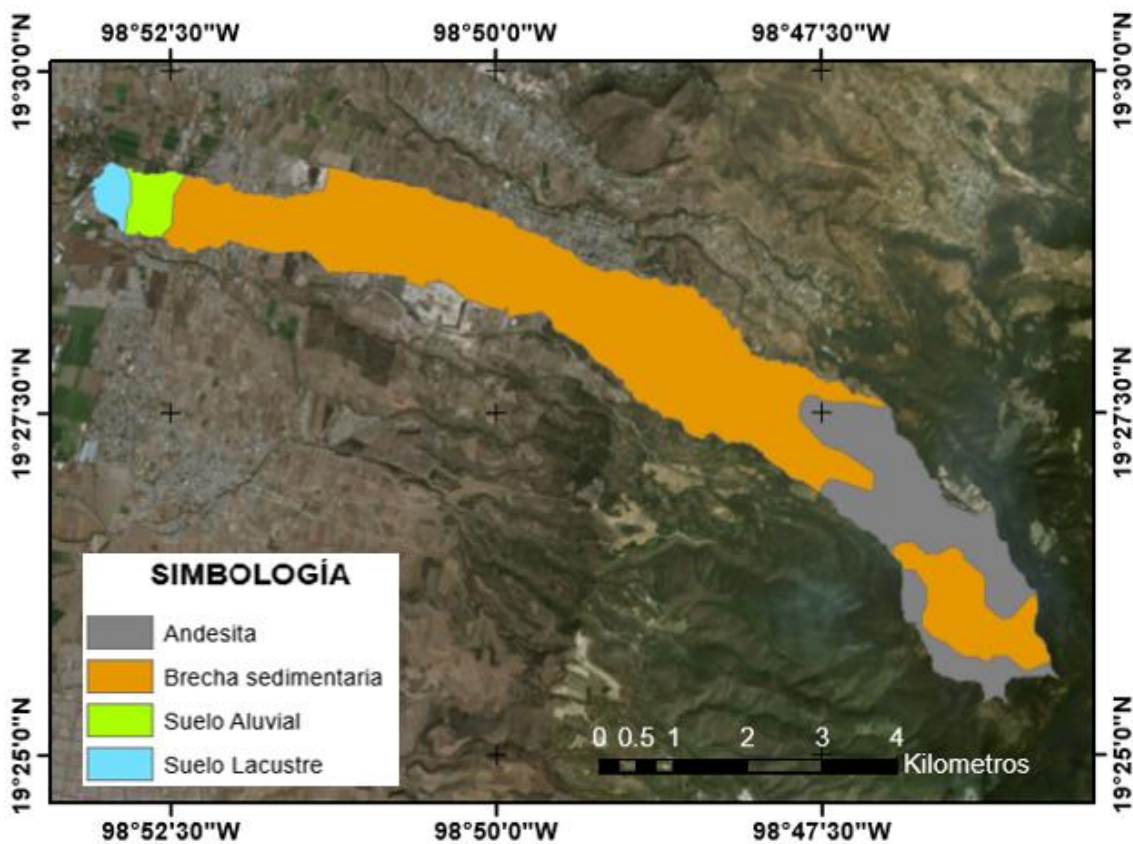


Figura 7. Geología de la cuenca del río Chapingo.

5.1.6 Usos de suelo.

De acuerdo con la clasificación obtenida y proporcionada por Márquez (2013), la cuenca de estudio presenta 12 tipos de uso de suelo (Figura 8). La agricultura de temporal ocupa el primer lugar (23.05%). El segundo lugar corresponde al bosque de pino (20.77%), seguido por reforestación (17.61%), áreas urbanas (16.11%), y otras cubiertas con una proporción menor al 7%.

En la parte alta predominan los bosques; en la parte media, zonas agrícolas, reforestación y algunas zonas urbanas; y en la zona baja, zona urbana y zonas agrícolas.

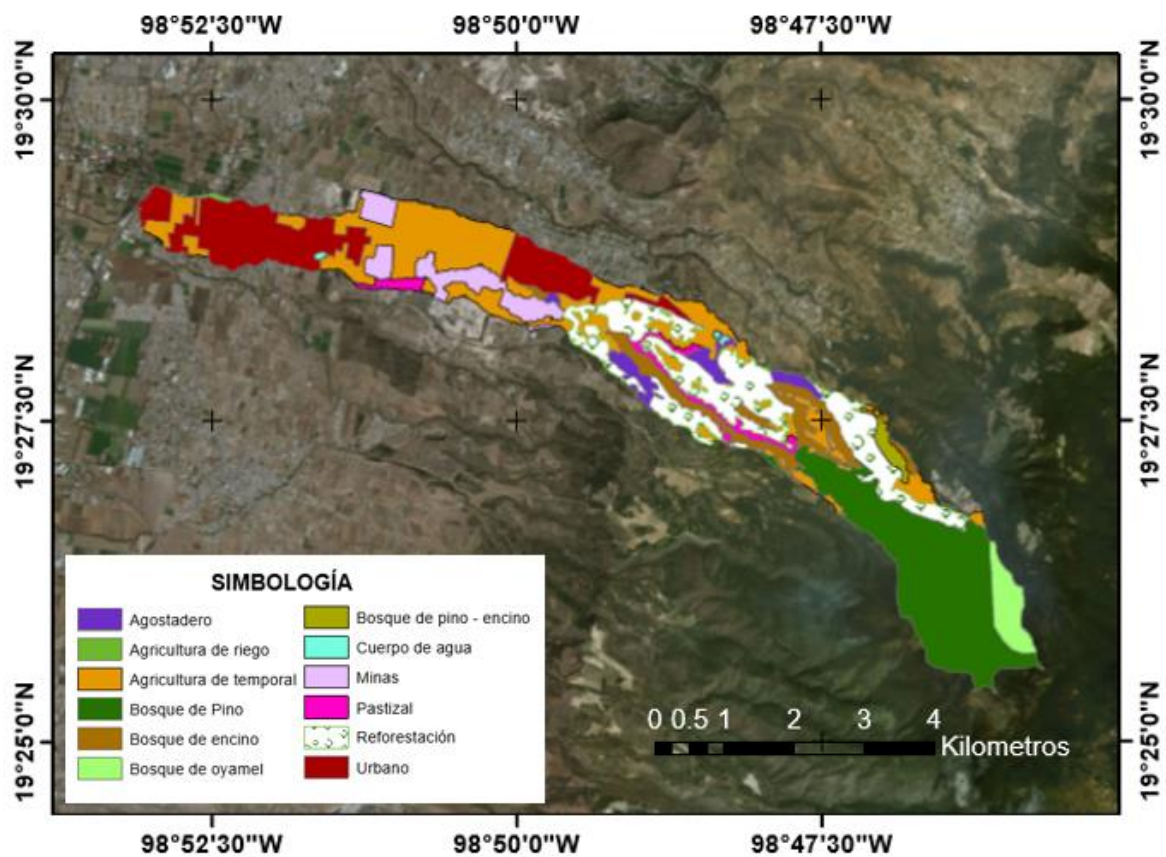


Figura 8. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Chapingo.

5.2 Materiales.

A continuación, se muestran los materiales utilizados en la presente investigación.

Cartográfico.

- Carta edafológica (INEGI, 1983).
- Conjunto de datos vectoriales geológicos (INEGI, 2011).
- Conjunto de datos vectoriales de Unidades climáticas (INEGI, 2008).
- Carta de Uso de Suelo y vegetación (Márquez, 2013).

Relieve

- Modelo digital de elevación de alta resolución (5m) LIDAR (INEGI, 2016).
- Modelo Digital tipo superficie con resolución 5m (INEGI, 2016).

Imágenes satelitales

- Imágenes Satelitales Sentinel 2 y Sentinel 3, fechas de toma 08 de noviembre, 13 de octubre, respectivamente (ESA, 2019).

Datos de estaciones convencionales e hidrométricas.

- Datos de precipitación diaria (1954-2014) estación meteorológica con clave 15 021 Chapingo. (ERIC III).
- Datos de escurrimiento diario (1954-2014) de la estación de aforo cuya clave es 26183 Chapingo (BANDAS).

Software utilizado

Para la elaboración de los resultados y procesamiento de los mismos, se utilizarán los siguientes paquetes de cómputo.

- ✓ Arc GIS 10.3 (ESRI, 2010).
- ✓ QGIS 3.2.3 (OS GEO, 2015).
- ✓ Microsoft Office 2013.

- ✓ Google Earth Pro.
- ✓ SNAP 7.0.0.
- ✓ Extractor rápido de información climatológica (ERIC III).
- ✓ Real Statistics Source Pack para Microsoft Excel®.

Materiales en campo

- ✓ Libreta de campo
- ✓ Maceta
- ✓ GPS Garmin.
- ✓ Cámara fotográfica.
- ✓ Ligas
- ✓ Bolsas de plástico
- ✓ Cilindros de PVC con diámetro 7.5 cm y 10 cm de alto.

5.3 Metodología.

La Figura 9, muestra en forma generalizada, la metodología seguida en esta investigación. A continuación, se describen las diferentes etapas que se abordaron.

5.3.1 Recopilación de información.

El sistema de información geográfica se integró con el modelo digital de elevaciones (INEGI, 2016), distribución de suelos (INEGI, 1983), registros climáticos (INEGI, 2008), vegetación, uso de suelo e imágenes de satélite (Figura 3). Las imágenes satelitales empleadas corresponden a los satélites Sentinel 2 (8 noviembre de 2019) y Sentinel 3 (13 de octubre de 2019) que fueron obtenidas de la agencia espacial europea (ESA) a través de su sitio Copernicus Open Access Hub¹.

5.3.2 Delimitación de la cuenca.

La delimitación de la cuenca del río Chapingo se realizó a partir del procesamiento del DEM y con la extensión Arc. SWAT 2012.10.21 para ArcGIS 10.3, siguiendo la metodología descrita por Neitsch *et al.* (2002).

5.3.3 Obtención de las HRU y elección de sitios de muestreo.

Se interseccionaron el mapa de uso de suelo y vegetación con la carta edafológica (INEGI, 1983) para la obtención de las unidades de respuesta hidrológica (HRU's) presentes en la cuenca. Se obtuvieron 78 HRU's, pero solo se eligieron 35 las cuales representan el 90% del área total de la cuenca. Para cada HRU se propusieron 4 puntos de muestreo aleatorio dando un total de 140 puntos.

¹ Copernicus Open Access Hub (2019). Descarga de imágenes satelitales de la zona de estudio. Disponible en línea en: <https://scihub.copernicus.eu/>. Noviembre de 2019.

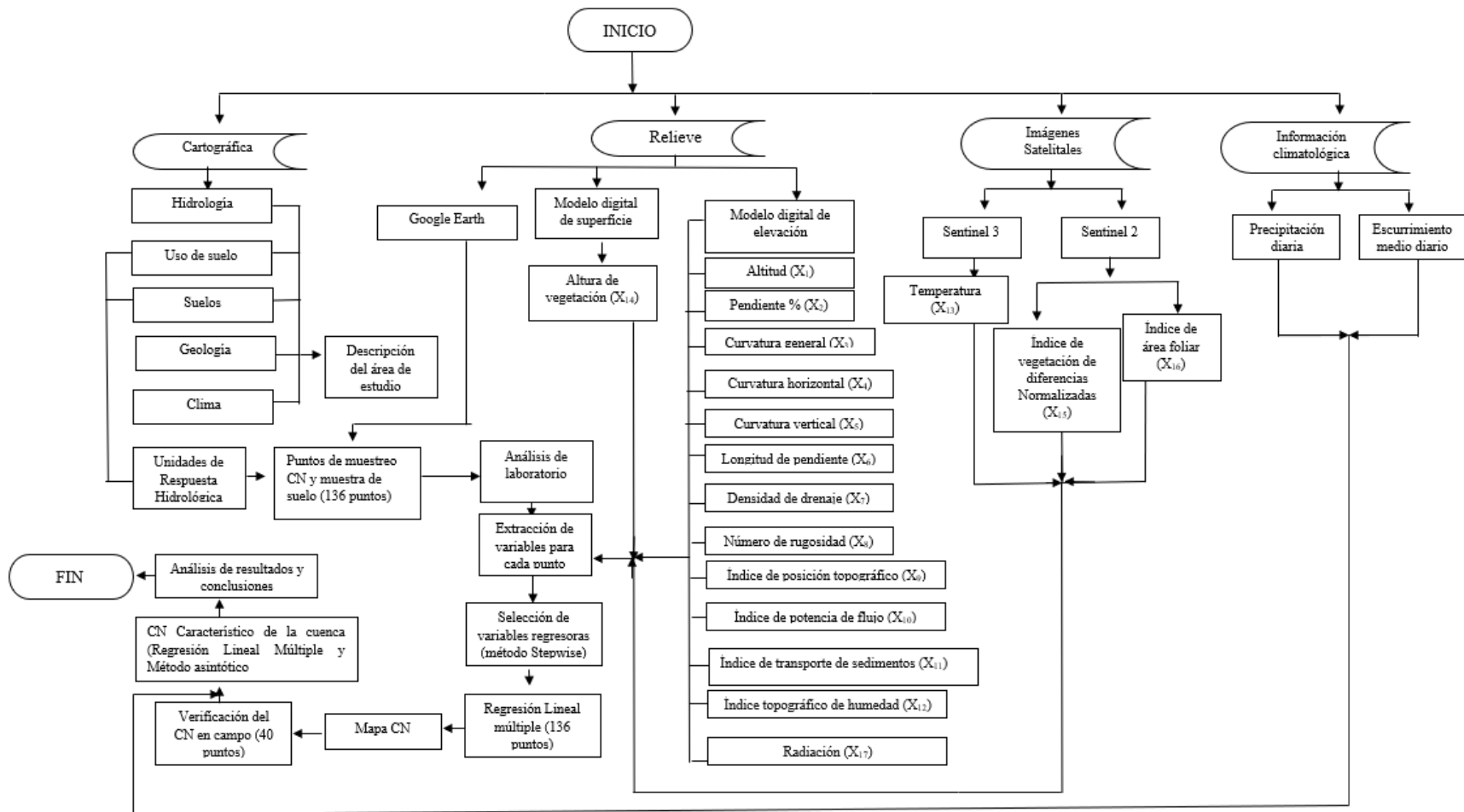


Figura 9. Diagrama de flujo.

5.3.4 Fase de campo (muestreo).

El muestreo se realizó entre septiembre y noviembre de 2019 y por cuestiones de accesibilidad se muestrearon 136 sitios en total. Para cada punto de muestreo se tomaron dos muestras de suelo, una para análisis de textura y otra para conductividad hidráulica a través de un cilindro de PVC de 7.5 cm de diámetro, anclado a 10 cm de profundidad (Figura 10).



Figura 10. Colección de muestra de suelo para análisis de textura y para conductividad hidráulica.

Además, para los sitios visitados, se asignó un valor de CN con base en tablas (NRCS, 1986) para el tipo de cobertura vegetal encontrada, condición hidrológica observada y la textura del suelo obtenida en laboratorio. La Figura 11 muestra algunas fotografías de los usos de suelo y coberturas vegetales representativos de la cuenca del río Chapingo, así como los correspondientes valores de CN obtenido a partir de tablas.



Figura 11. Usos de suelo representativos en la cuenca.

5.3.5 Análisis de muestras de suelo en laboratorio.

Las muestras fueron analizadas en laboratorio para la determinación de textura por el método de la pipeta (Day, 1965) y a las muestras del cilindro se les determinó la conductividad hidráulica a saturación a través del permeámetro de carga constante (Klute *et al.*, 1986).

5.3.6 Obtención de variables ambientales.

La identificación de factores ambientales, que influyen en el CN, se realizó con base en la revisión bibliográfica. Los factores seleccionados para el análisis fueron dieciocho: pendiente, curvatura general, curvatura vertical, curvatura horizontal, índice de posición topográfica, índice topográfico de humedad, índice de potencia de flujo, índice de transporte de sedimentos, longitud de la pendiente y conductividad hidráulica saturada. A continuación, se describe como se generó cada variable ambiental:

- **Altitud (X₁)** se obtuvo a partir del modelo digital de elevaciones (DEM) (INEGI, 2016) con una resolución de 5 m. Es reportada en metros.
- **Pendiente del terreno (X₂)** acorde a Burrough y McDonnell (1998) se obtuvo con el comando *3D Analyst Tools>Raster Surface>Slope* de ArcGis 10.3. y se reporta en porcentaje.
- **Curvaturas: curvatura general (X₃), curvatura plana u horizontal (X₄) y curvatura perfil o vertical (X₅)** según Moore y Burch (1986) se generaron con el comando *3D Analyst Tools>Raster Surface>Curvature* de ArcGis 10.3.
- **Longitud de la pendiente (X₆)**, de acuerdo con Moore y Burch (1986) , se calculó con el comando *Terrain Analysis >Hydrology>Slope Length* de Qgis 3.1 y se reporta en metros.
- **La densidad de drenaje (X₇)** se obtuvo por hectárea, en ArcGis 10.3. Sus unidades son metros por hectárea.
- **El número de rugosidad (X₈)** se obtuvo según Strahler (1957) con ayuda de ArcGis 10.3. Este es adimensional.
- **Índice de posición topográfica (X₉)**, según Weiss (2001), se determinó con el comando de ArcGis10.3 *Topographic Tools>Upland>Topographic Position Index*.
- **Índice de potencia de flujo (X₁₀)** se calculó en Arc.Gis 10.3 de acuerdo con Moore *et al.* (1991).
- **Índice de transporte de sedimentos (X₁₁)** se calculó en ArcGis10.3 de acuerdo a Moore y Burch (1986).
- **Índice topográfico de humedad (X₁₂)** se calculó en ArcGis 10.3 basado en lo propuesto por Beven y Kirby (1979). Sus unidades son m²/m °

- **Temperatura de superficie (X₁₃)** se obtuvo a partir de imágenes Sentinel 3, las cuales fueron analizadas en el entorno de SNAP y exportadas a formato TIFF. Como los mapas de temperatura superficial de Sentinel 3 están medidos en grados Kelvin, se realizó la conversión a grados Celsius, recordando que un grado Celsius, equivale a 274.15 grados Kelvin. Además, como la resolución de la imagen es de 1 km, se relacionó la altitud y la temperatura encontrándose una función de ajuste (ecuación (38)) con un R² de 0.597.

$$X_{13} = \frac{X_1 - 5289.82}{-96.2534} \quad (38)$$

- **Altura de vegetación (X₁₄)** se obtuvo mediante la diferencia entre el modelo digital de superficie (DSM) de 5 m de resolución y el de terreno. Está reportada en metros.
- **Índice de vegetación de diferencia normalizada (X₁₅)** como indicador de la densidad de la cobertura vegetal (Rouse et al., 1974), se obtuvo de imágenes Sentinel 2A, las cuales ya están corregidas radiométrica y atmosféricamente. La banda del canal rojo corresponde a la Banda 4, mientras que la del Infrarrojo cercano corresponde a la Banda 8.
- **Índice de área foliar (X₁₆)**, según el tipo de vegetación existente en la cuenca, se obtuvo según las investigaciones de Fan *et al.* (2009); Aguirre-Salado *et al.* (2011) y Gitelson *et al.* (2003) para pastizal, bosque y zonas agrícolas, respectivamente y es la cantidad de superficie foliar en un metro cuadrado.
- **La radiación (X₁₇)** se obtuvo con la herramienta comandos Spatial Analysts Tools>Solar Radiation> Area Solar Radiation, basada en métodos de algoritmo de cuenca visual hemisférica desarrollados por Rich *et al.* (1994) y ampliados por Fu y Rich (2002). La radiación fue convertida a unidades Langley (Ly).
- **Conductividad hidráulica saturada (X₁₈)**, se determinó en laboratorio a través de los cilindros levantados en cada uno de los 136 sitios visitados y está expresada en centímetros por hora.

5.3.7 **Matriz de regresión.**

Para los 136 puntos de muestreo, con ayuda de Arc. GIS 10.3 se extrajeron las diecisiete variables espaciales arriba indicadas y junto con los valores de conductividad hidráulica (X_{18}) obtenidos en laboratorio, se conformaron las 18 variables ambientales independientes para el análisis de regresión lineal múltiple. Por otra parte, los CN observados, después de corregirse por la pendiente topográfica (NRCS, 1972), se asignaron como la variable dependiente.

5.3.8 **Selección de variables independientes y Regresión Lineal Múltiple.**

Con el uso del *software Real Statistics Source Pack*², para Microsoft Excel®, se realizó la selección de variables independientes mediante el método *Stepwise* con el estadístico F (Murtaugh, 1998), para un nivel de significancia del 5 %.

Con las variables seleccionadas, se realizó la regresión lineal múltiple y se obtuvieron los indicadores de eficiencia. Se seleccionó la ecuación que mejor replicaba los valores de CN observados en campo.

5.3.9 **Obtención del mapa de CN.**

Con la combinación de variables ambientales, que resultaron con los mejores indicadores de eficiencia, se seleccionó la ecuación que mejor replicaba los valores de CN observados en campo. La ecuación resultante se aplicó a las diferentes capas seleccionadas para obtener a nivel cuenca un mapa con valores de CN. Este mapa en formato ráster cual fue verificado en campo con un nuevo conjunto de puntos.

5.3.10 **Verificación del modelo.**

El proceso de verificación se realizó en enero de 2020, para ello se seleccionaron 40 puntos al azar sobre toda la cuenca. Para cada punto de validación visitado se asignó un CN de tablas a partir de la observación de la cobertura vegetal, pendiente del terreno, condición hidrológica y textura del suelo al tacto.

² Real Statistics Resource Pack software (Release 6.8). Copyright (2013 – 2020) Charles Zaiontz. Obtención de variables regresoras independientes. Enero de 2019. Disponible en línea www.real-statistics.com

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 HRU's y sitios de muestreo.

Se obtuvieron 35 HRU's. La Figura 12 muestra la distribución de cada una de las Unidades de Respuesta Hidrológica y el Cuadro 14 la descripción de cada una.

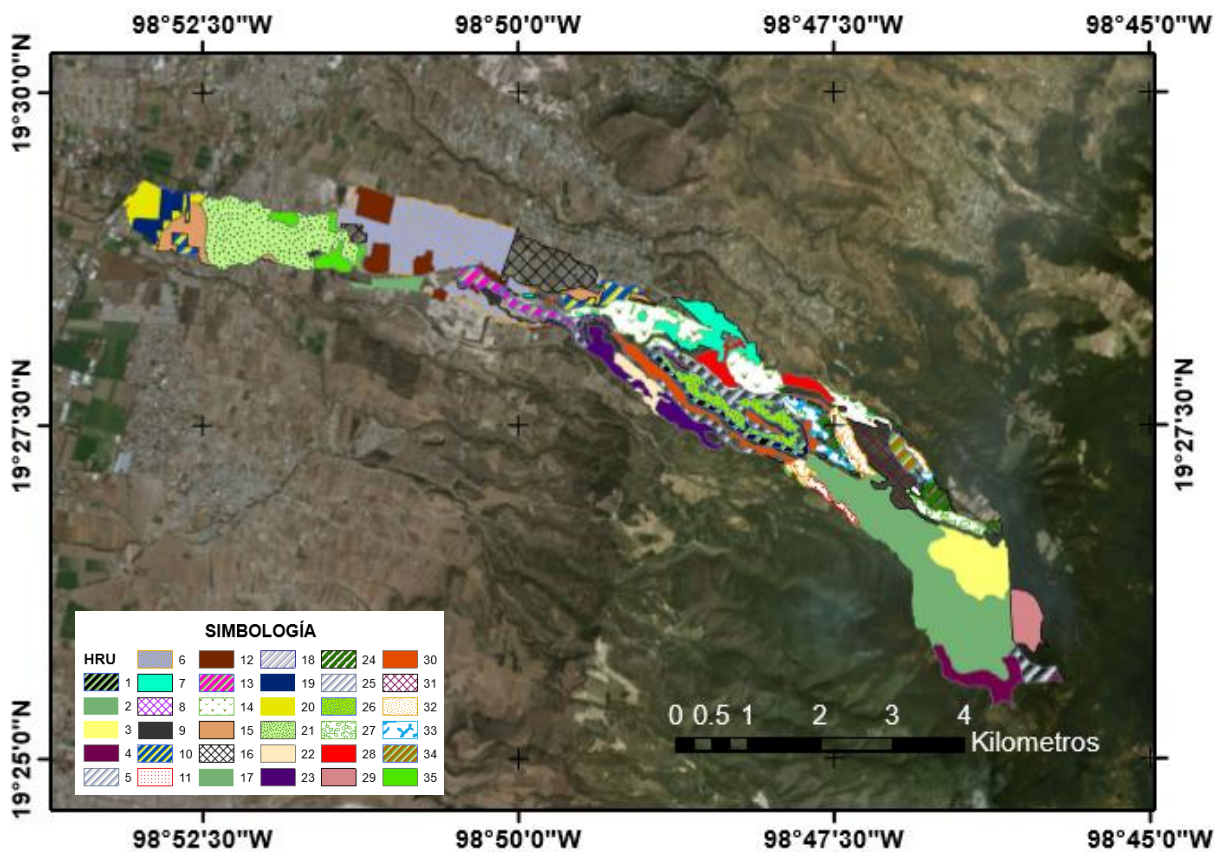


Figura 12. Mapa de las 35 Unidades de Respuesta Hidrológica en la cuenca del río Chapingo.

Cuadro 14. Unidades de respuesta hidrológica en la cuenca del río Chapingo.

HRU	Uso suelo	Unidad	Subunidad	Unidad secundaria	Subunidad secundaria	Textura	Fase	Clave total
1	Pastizal	CAMBISOL	Eútrico	LITOSOL		Media (2)	Dúrica (Du)	Pastizal+Be + I +2 + Du
2	Bosque de pino	CAMBISOL	Dístrico			Fina (3)	Sin fase (SF)	Bosque de pino+Bd+ 3 + SF
3	Bosque de pino	ANDOSOL	Mólico	FEOZEM	Háplico	Media (2)	Sin fase (SF)	Bosque de pino+ Tm + Hh + 2 +SF
4	Bosque de pino	CAMBISOL	Eútrico	LITOSOL		Media (2)	Lítica profunda (LP)	Bosque de pino+ Be + I + 2 + LP
5	Bosque de pino	CAMBISOL	Húmico	ANDOSOL	Mólico	Gruesa (1)	Sin fase (SF)	Bosque de pino+ Bh + Tm + 1 + SF
6	Agricultura de temporal	FEOZEM	Háplico	CAMBISOL	Eútrico	Media (2)	Dúrica Profunda (DP)	Agricultura de temporal+ Hh + Be +2 + DP
7	Agricultura de temporal	LITOSOL		CAMBISOL	Eútrico	Media (2)	Dúrica (Du)	Agricultura de temporal+ I + Be+ 2 + Du
8	Agricultura de temporal	LITOSOL		FEOZEM	Háplico	Media (2)	Sin fase (SF)	Agricultura de temporal+ I +Hh + 2 + SF
9	Agricultura de temporal	LITOSOL		FEOZEM	Háplico	Media (2)	Dúrica (Du)	Agricultura de temporal+ I + Hh + 2 + Du
10	Agricultura de temporal	FEOZEM	Háplico			Media (2)	Sin fase (SF)	Agricultura de temporal+ Hh+ 2 + SF
11	Agricultura de temporal	CAMBISOL	Dístrico			Fina (3)	Sin fase (SF)	Agricultura de temporal+ Bd+ 3 + SF
12	Minas	FEOZEM	Háplico	CAMBISOL	Eútrico	Media (2)	Dúrica Profunda (DP)	Minas+ Hh + Be +2 + DP
13	Minas	LITOSOL		FEOZEM	Háplico	Media (2)	Sin fase (SF)	Minas+ I +Hh + 2 + SF
14	Reforestación	LITOSOL		CAMBISOL	Eútrico	Media (2)	Dúrica (Du)	Reforestación+ I + Be+ 2 + Du
15	Urbano	FEOZEM	Háplico			Media (2)	Sin fase (SF)	Urbano+ Hh+ 2 + SF
16	Urbano	FEOZEM	Háplico	CAMBISOL	Eútrico	Media (2)	Dúrica Profunda (DP)	Urbano+ Hh + Be +2 + DP
17	Pastizal	FEOZEM	Háplico	LITOSOL		Media (2)	Dúrica (Du)	Pastizal+ Hh+ I + 2 + Du
18	Agricultura de riego	FEOZEM	Háplico	VERTISOL	Pélico	Fina (3)	Sin fase (SF)	Agricultura de riego+ Hh + Vp+ 3 + SF
19	Agricultura de temporal	FEOZEM	Háplico	VERTISOL	Pélico	Fina (3)	Sin fase (SF)	Agricultura de temporal+ Hh + Vp+ 3 + SF
20	Urbano	FEOZEM	Háplico	VERTISOL	Pélico	Fina (3)	Sin fase (SF)	Urbano+ Hh + Vp+ 3 + SF
21	Urbano	FEOZEM	Háplico			Media (2)	Dúrica (Du)	Urbano+ Hh+ 2 + Du
22	Agostadero	LITOSOL		FEOZEM	Háplico	Media (2)	Dúrica (Du)	Agostadero+ I + Hh + 2 + Du
23	Reforestación	LITOSOL		FEOZEM	Háplico	Media (2)	Dúrica (Du)	Reforestación+ I + Hh + 2 + Du
24	Agricultura de temporal	CAMBISOL	Húmico			Media (2)	Sin fase (SF)	Agricultura de temporal+ Bh +2 + SF
25	Reforestación	LITOSOL		FEOZEM	Háplico	Media (2)	Sin fase (SF)	Reforestación+ I +Hh + 2 + SF
26	Reforestación	CAMBISOL	Eútrico	LITOSOL		Media (2)	Dúrica (Du)	Reforestación+ Be + I +2 + Du
27	Reforestación	CAMBISOL	Húmico			Media (2)	Sin fase (SF)	Reforestación+ Bh +2 + SF
28	Agostadero	LITOSOL		CAMBISOL	Eútrico	Media (2)	Dúrica (Du)	Agostadero+ I + Be+ 2 + Du
29	Bosque de oyamel	CAMBISOL	Dístrico			Fina (3)	Sin fase (SF)	Bosque de oyamel+ Bd+ 3 + SF
30	Bosque de encino	LITOSOL		FEOZEM	Háplico	Media (2)	Sin fase (SF)	Bosque de encino+ I +Hh + 2 + SF
31	Reforestación	CAMBISOL	Dístrico			Fina (3)	Sin fase (SF)	Reforestación+ Bd+ 3 + SF
32	Bosque de encino	CAMBISOL	Dístrico			Fina (3)	Sin fase (SF)	Bosque de encino+ Bd+ 3 + SF
33	Bosque de encino	CAMBISOL	Húmico			Media (2)	Sin fase (SF)	Bosque de encino+ Bh +2 + SF
34	Bosque de pino - encino	CAMBISOL	Dístrico			Fina (3)	Sin fase (SF)	Bosque de pino - encino+ Bd+ 3 + SF
35	Agricultura de temporal	FEOZEM	Háplico			Media (2)	Dúrica (Du)	Agricultura de temporal+ Hh+ 2 + Du

6.2 Variables ambientales.

6.2.1 Altitud.

En la cuenca del río Chapingo se tienen altitudes desde los 2251.51 m hasta los 3587.18 m. (Figura 13).

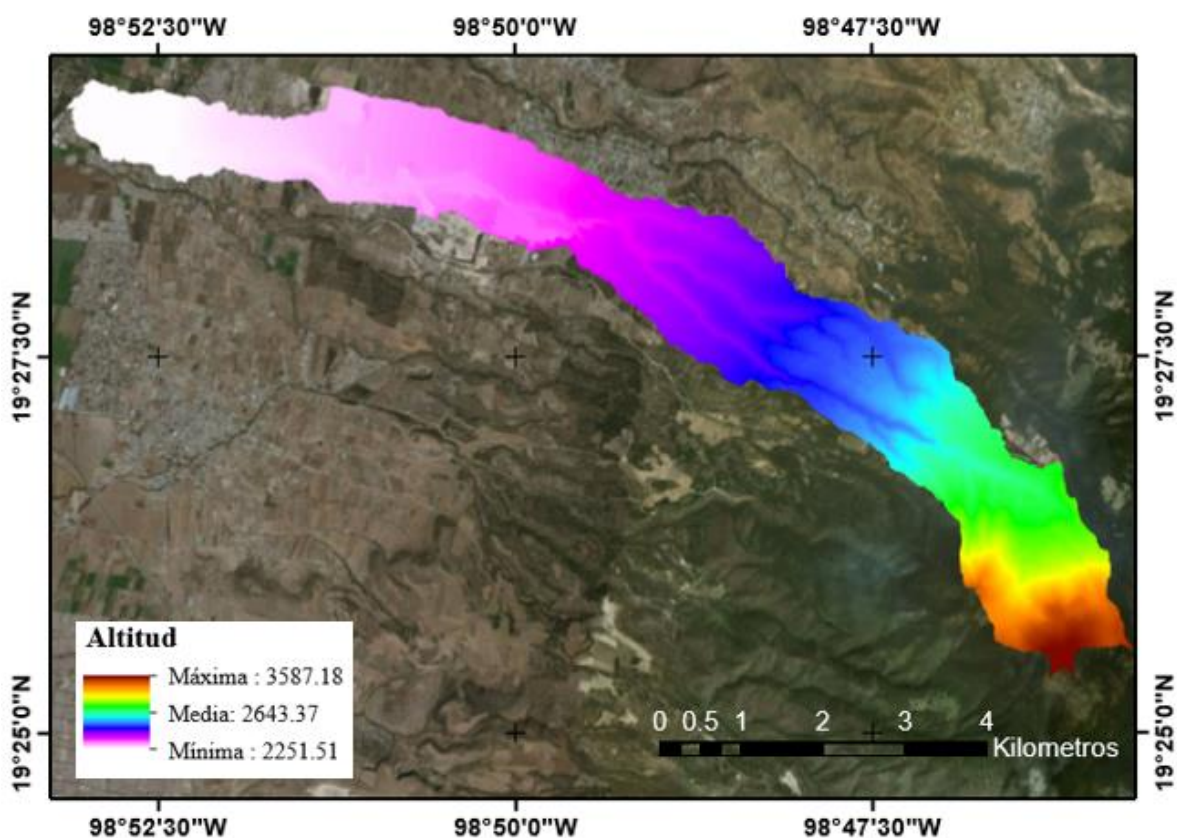


Figura 13. Mapa de altitud de la cuenca del río Chapingo.

6.2.2 Pendiente.

La Figura 14 muestra los rangos de pendiente (%) presentes en la zona de estudio. Las pendientes varían desde 0 a 383 % y fueron clasificadas de acuerdo con FAO (2009), los cuales La parte alta de la cuenca presenta pendientes fuertemente inclinadas a muy escarpadas, mientras que la parte baja-media presenta pendientes planas a inclinadas.

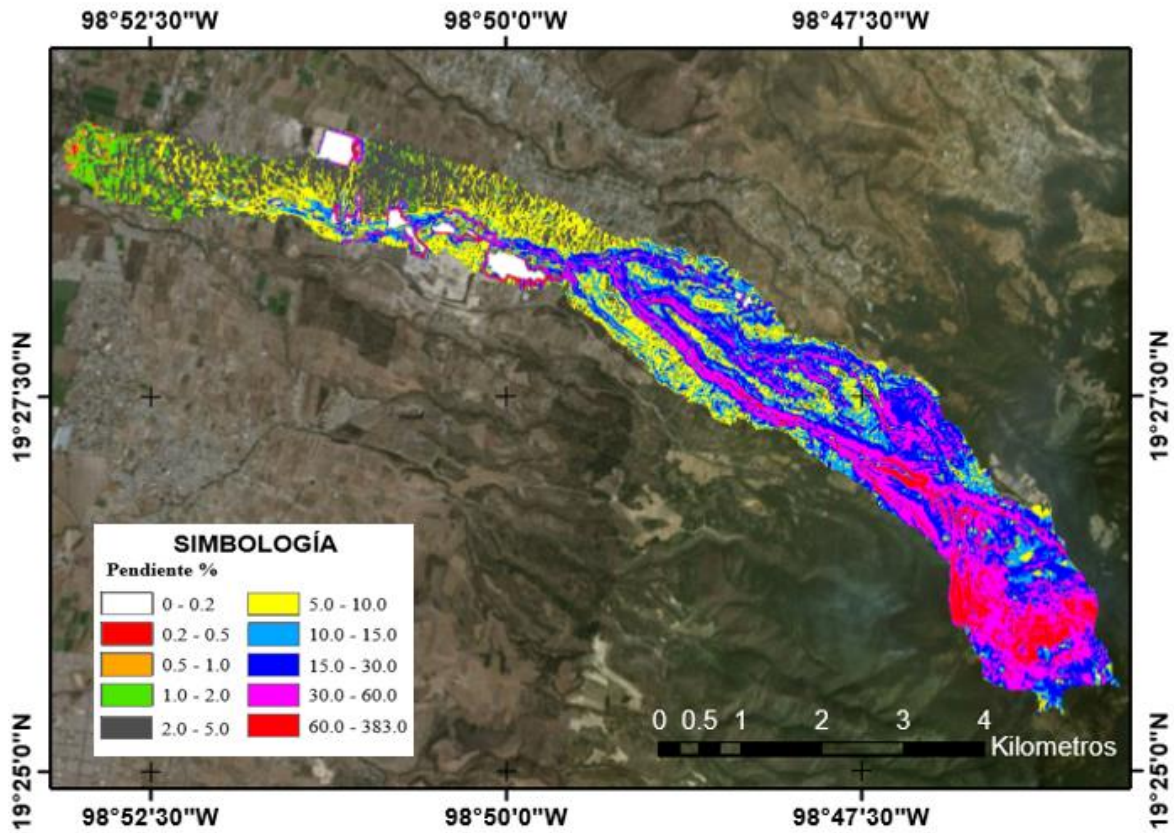


Figura 14. Mapa de pendiente de la cuenca del río Chapingo.

6.2.3 Curvatura.

En la Figura 15 se muestra la curvatura general con valores de -55.13 hasta a 91.80.

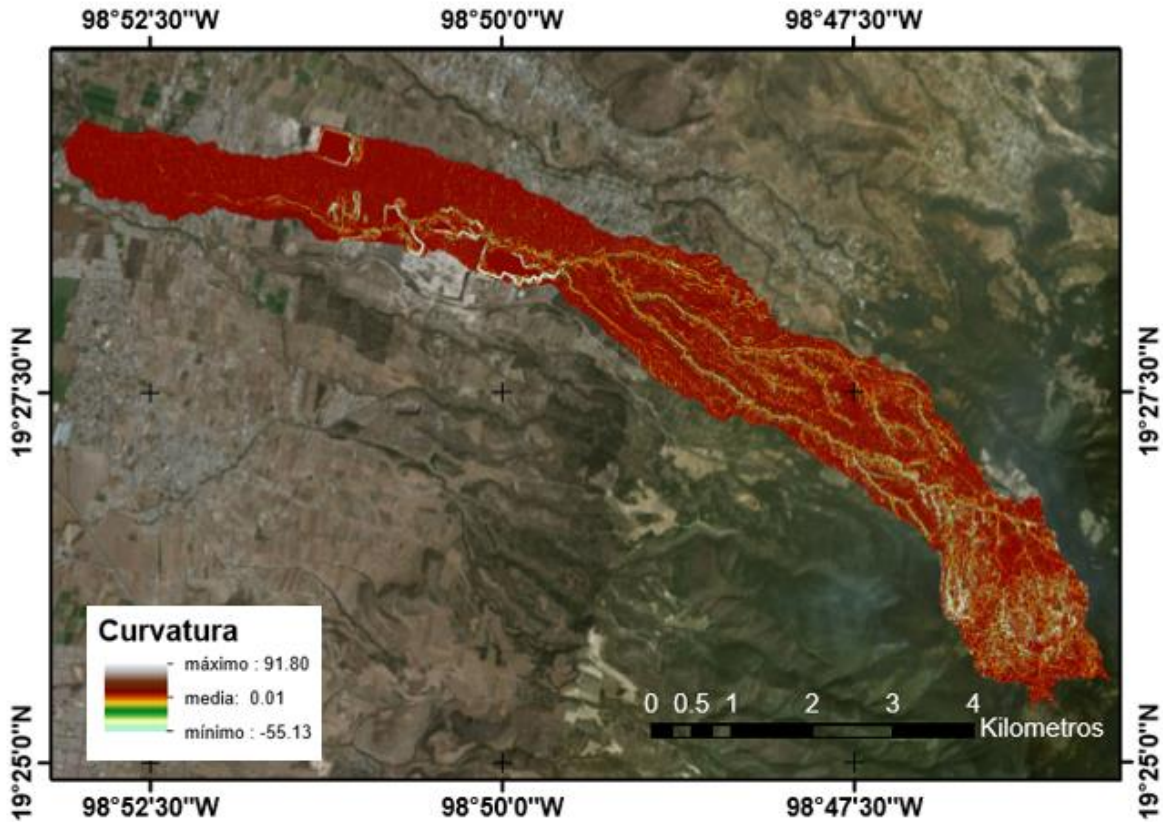


Figura 15. Mapa de curvatura general de la cuenca del río Chapingo.

6.2.4 Curvatura horizontal o plana.

La curvatura horizontal indica la convergencia y divergencia del flujo. Rangos negativos corresponden a flujos convergentes (topografías cercanas a valles), mientras que rangos positivos están asociados a flujos divergentes (Figura 16).

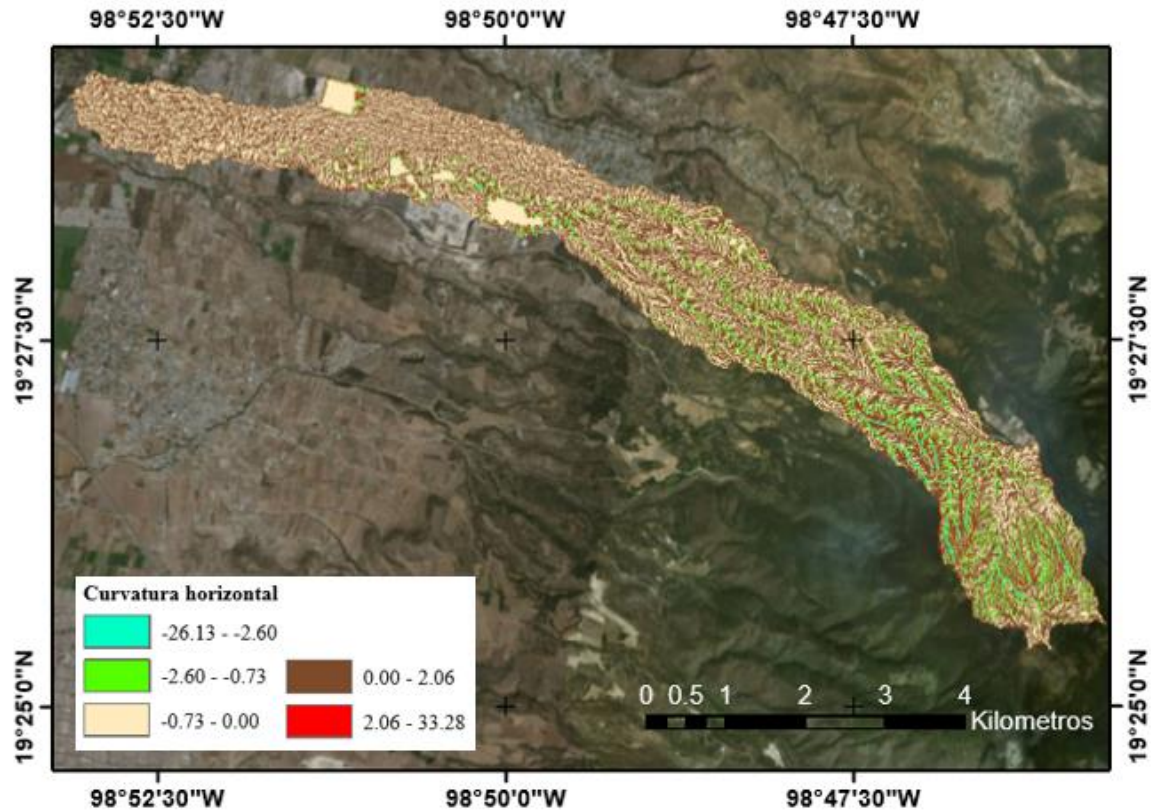


Figura 16. Mapa de curvatura horizontal de la cuenca del río Chapingo.

6.2.5 Curvatura vertical o de perfil.

La curvatura vertical es paralela a la dirección de la máxima pendiente. Valores positivos indican superficies cóncavas y una desaceleración del flujo del agua, mientras que los valores negativos reflejan superficies convexas y consecuentemente una aceleración del flujo del agua conforme desciende. El valor 0 es equivalente a superficies planas.

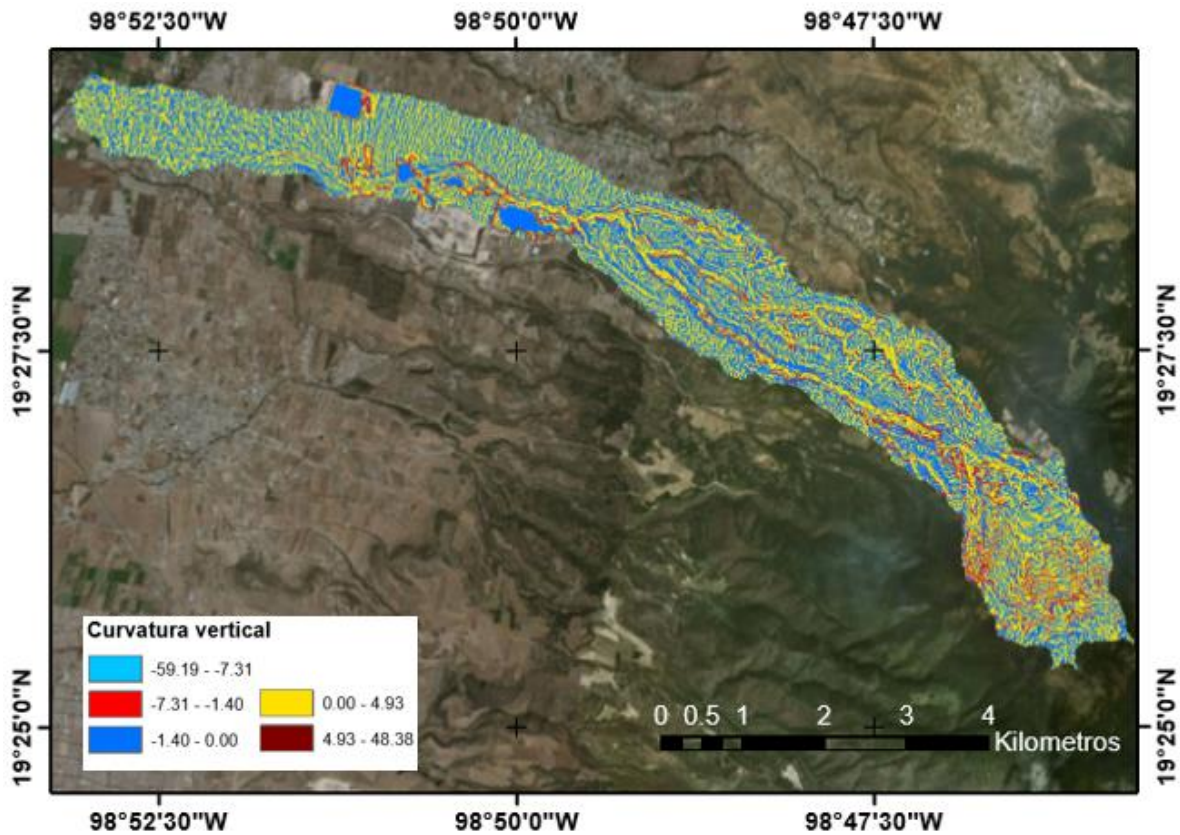


Figura 17. Mapa de curvatura vertical de la cuenca del río Chapingo.

6.2.6 Longitud de pendiente.

En el área de estudio se presentan laderas con longitudes entre 0 y 564.32 m (Figura 18). Entre mayor sea la longitud de pendiente, mayor la acumulación de escurrimiento que ocurre (Wischmeier y Smith, 1978).

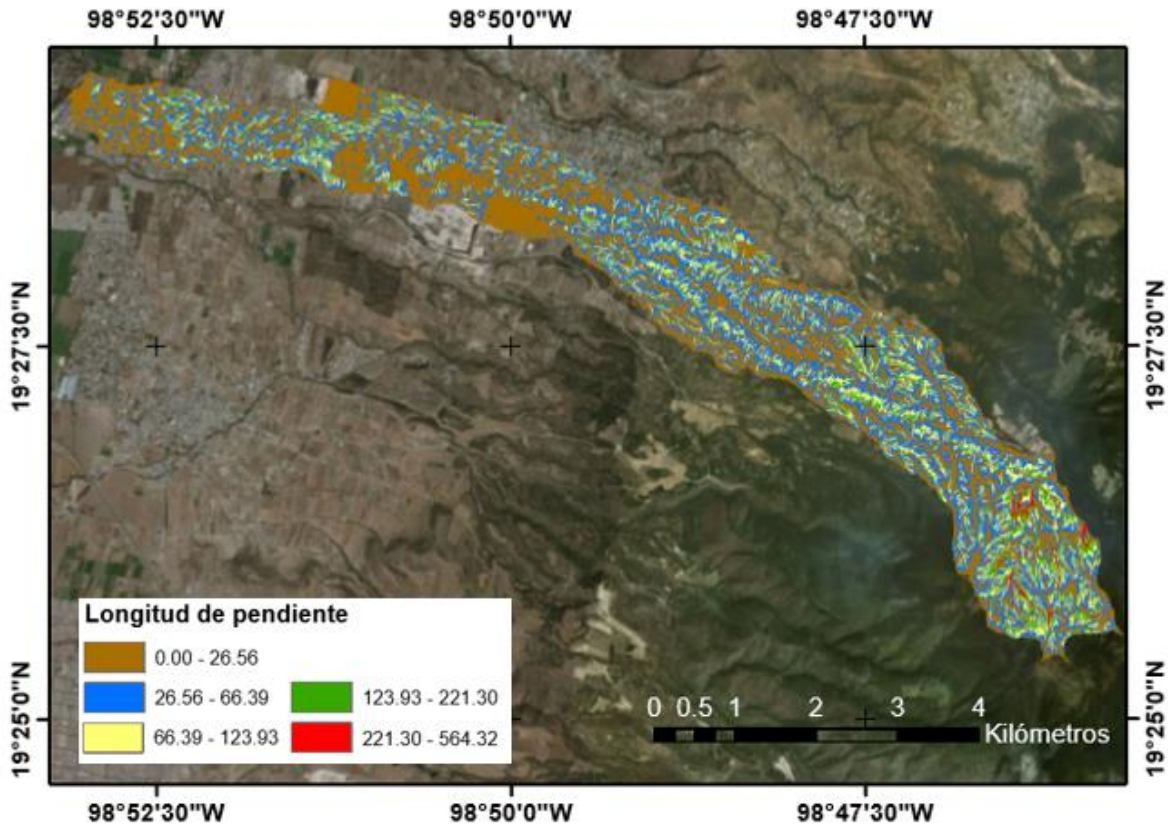


Figura 18. Mapa de longitud de pendiente de la cuenca del río Chapingo.

6.2.7 Densidad de drenaje.

La densidad de drenaje tiene influencia en la respuesta espacial y temporal que tiene la cuenca ante una tormenta. Entre mayor sea la densidad de drenaje, los gastos picos aumentan y los hidrogramas suelen ser cortos (Mccuen, Johnson, y Ragan, 2002).

En la cuenca del río Chapingo, existen densidades de drenaje desde 0 hasta 14.57 m por hectárea (Figura 19).

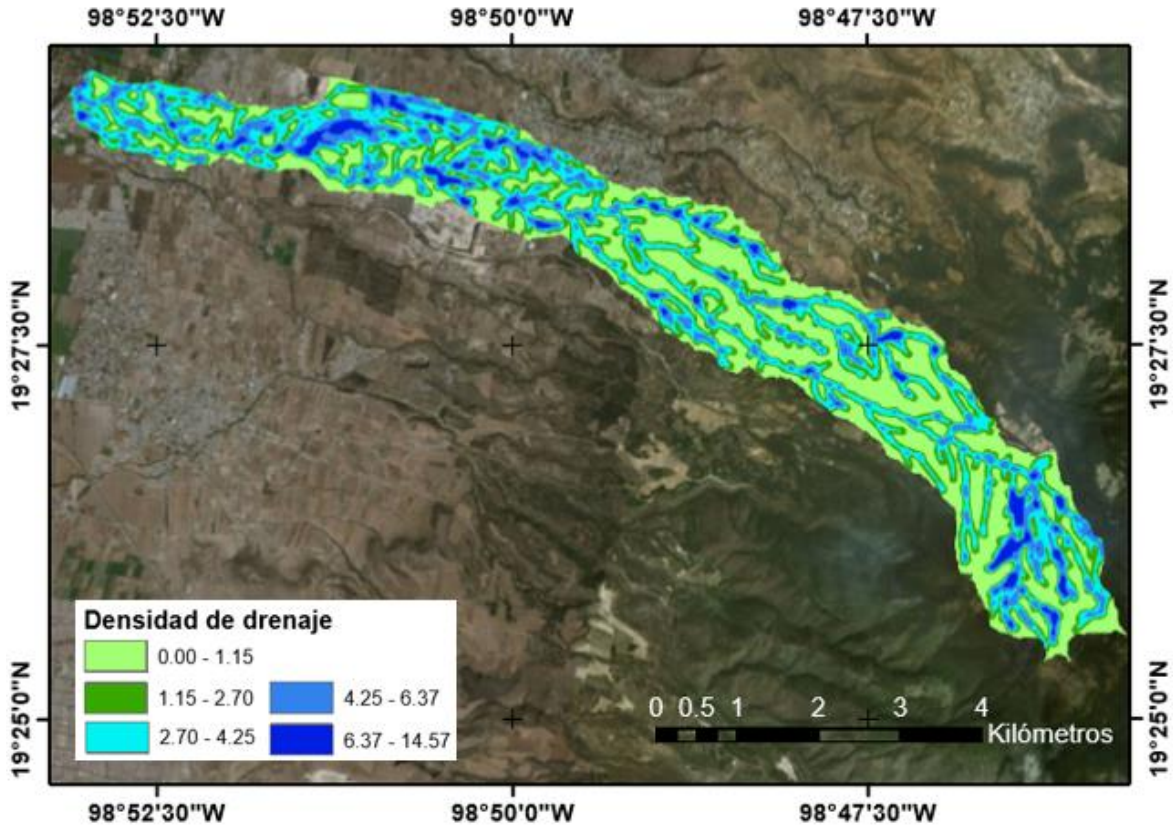


Figura 19. Mapa de densidad de drenaje de la cuenca del río Chapingo.

6.2.8 Número de rugosidad.

En cuanto al número de rugosidad refiere, éste varía de 0 hasta 0.151 (Figura 20).

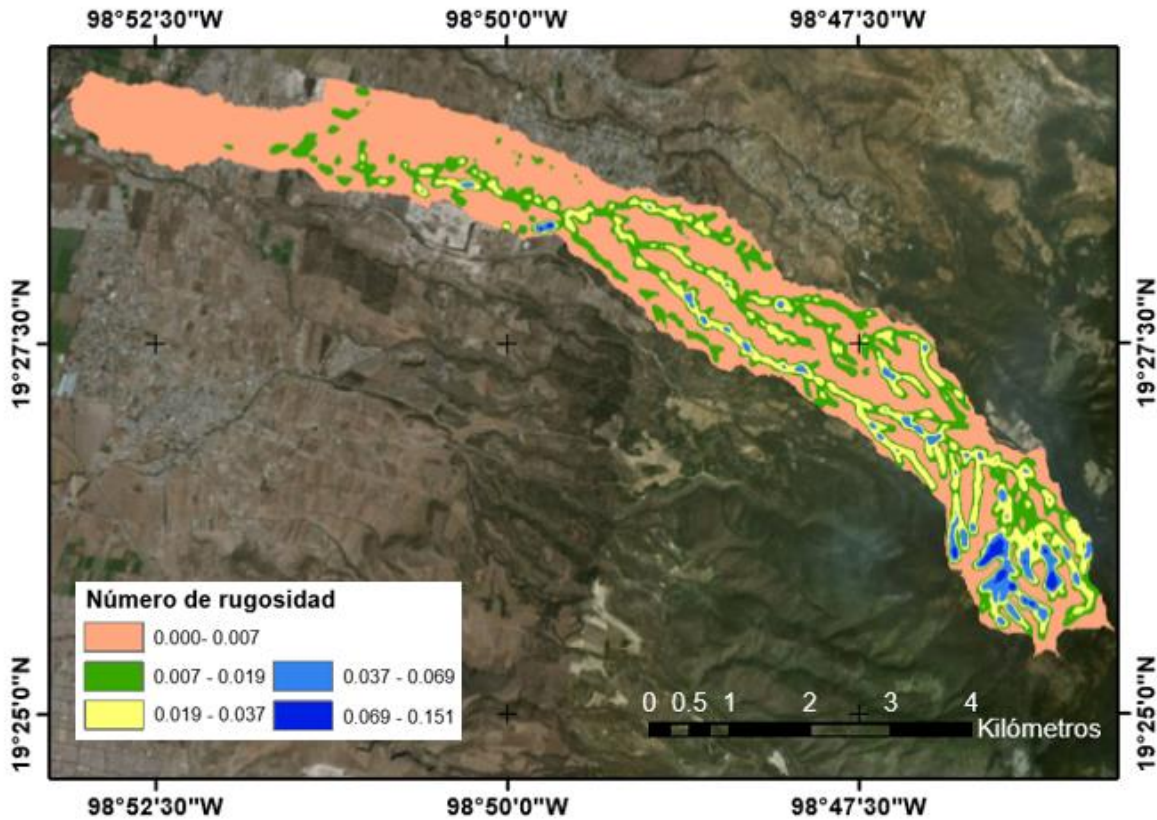


Figura 20. Mapa de número de rugosidad de la cuenca del río Chapingo.

6.2.9 Índice de Potencia de Flujo.

El IPF determina la habilidad de transferir sedimentos y expresa el potencial topográfico para que ocurra la deposición (valores cercanos a cero y/o valores negativos) y erosión por arrastre (valores positivos) (Bannari *et al.*, 2017).

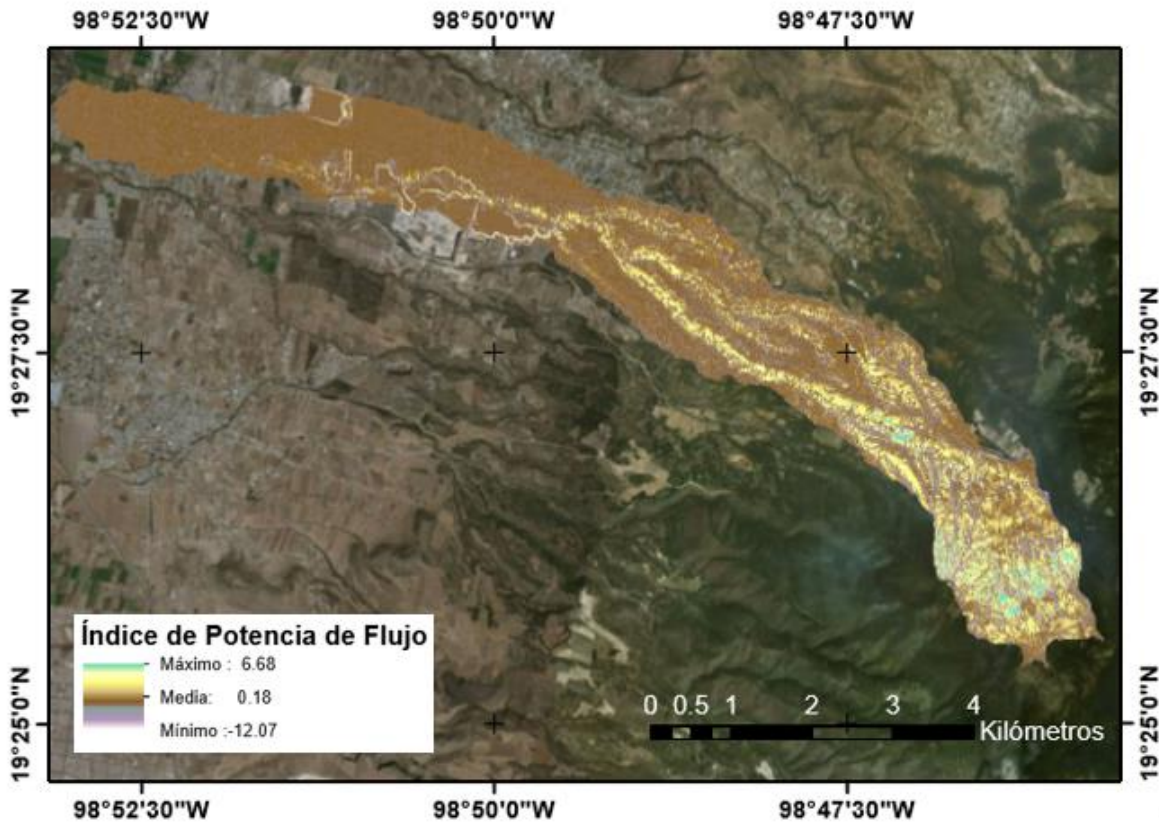


Figura 21. Mapa del Índice de Potencia de Flujo de la cuenca del río Chapingo.

6.2.10 Índice de Transporte de Sedimentos.

El índice de transporte de sedimentos varía desde 0 hasta 60.89. La Figura 22 muestra cómo los valores más altos siguen el patrón de la red de drenaje, la cual transporta los escurrimientos y sedimentos.

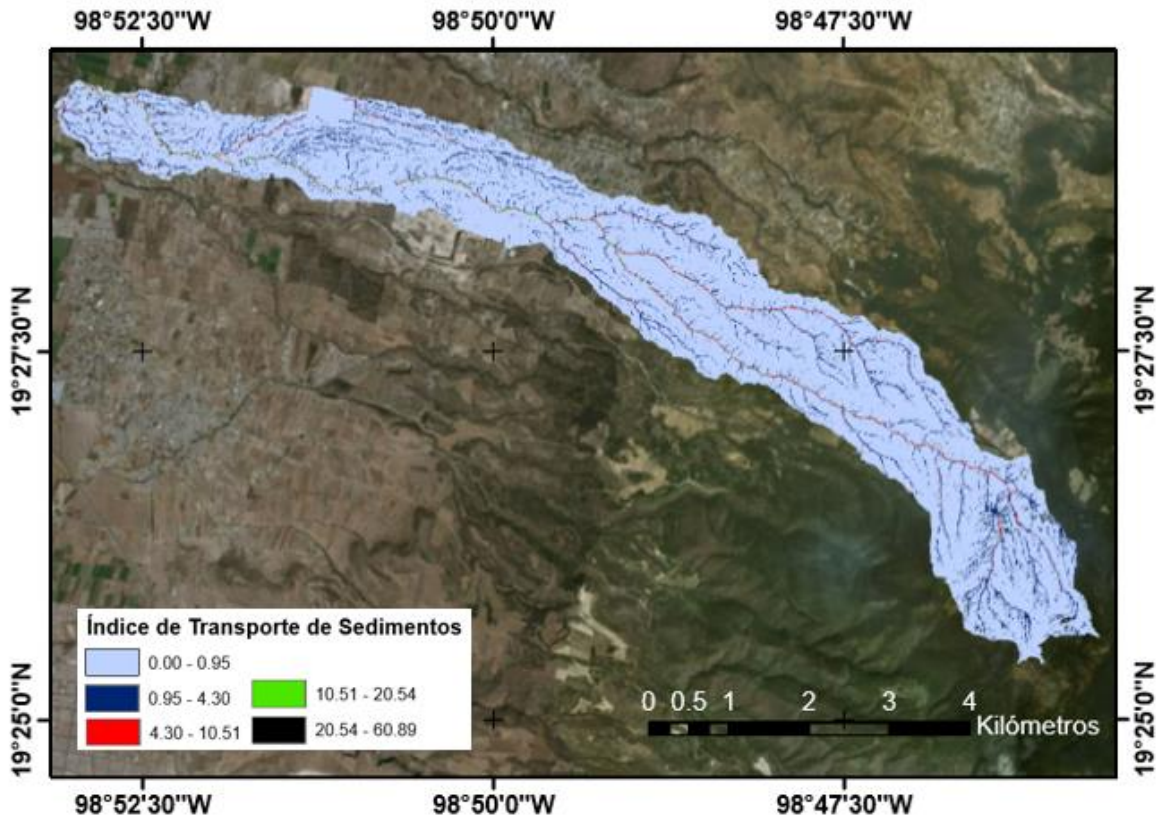


Figura 22. Mapa del índice de Transporte de Sedimentos de la cuenca del río Chapingo.

6.2.11 Índice topográfico de humedad.

Este índice está relacionado con la humedad edáfica y refleja la tendencia del suelo a generar escorrentías debido a que los perfiles con mayor humedad son más proclives a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse más fácilmente en escorrentía. Valores altos de este índice indican mayor humedad de la celda en función de su configuración topográfica (Sorensen *et al.*, 2005) (Figura 23).

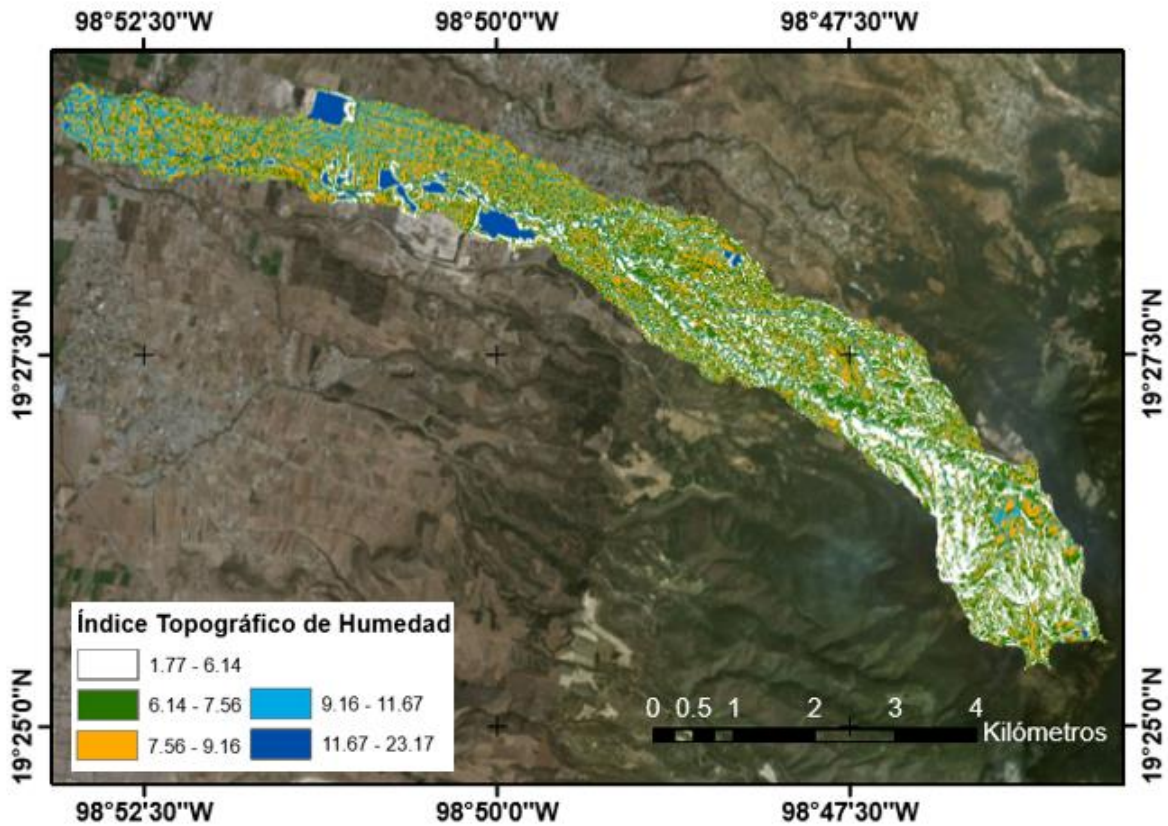


Figura 23. Mapa de Índice Topográfico de humedad en la cuenca del río Chapingo.

6.2.12 Índice de Posición Topográfica.

La Figura 24, muestra las formas de relieve presentes en la cuenca según la clasificación de Weiss (2001).

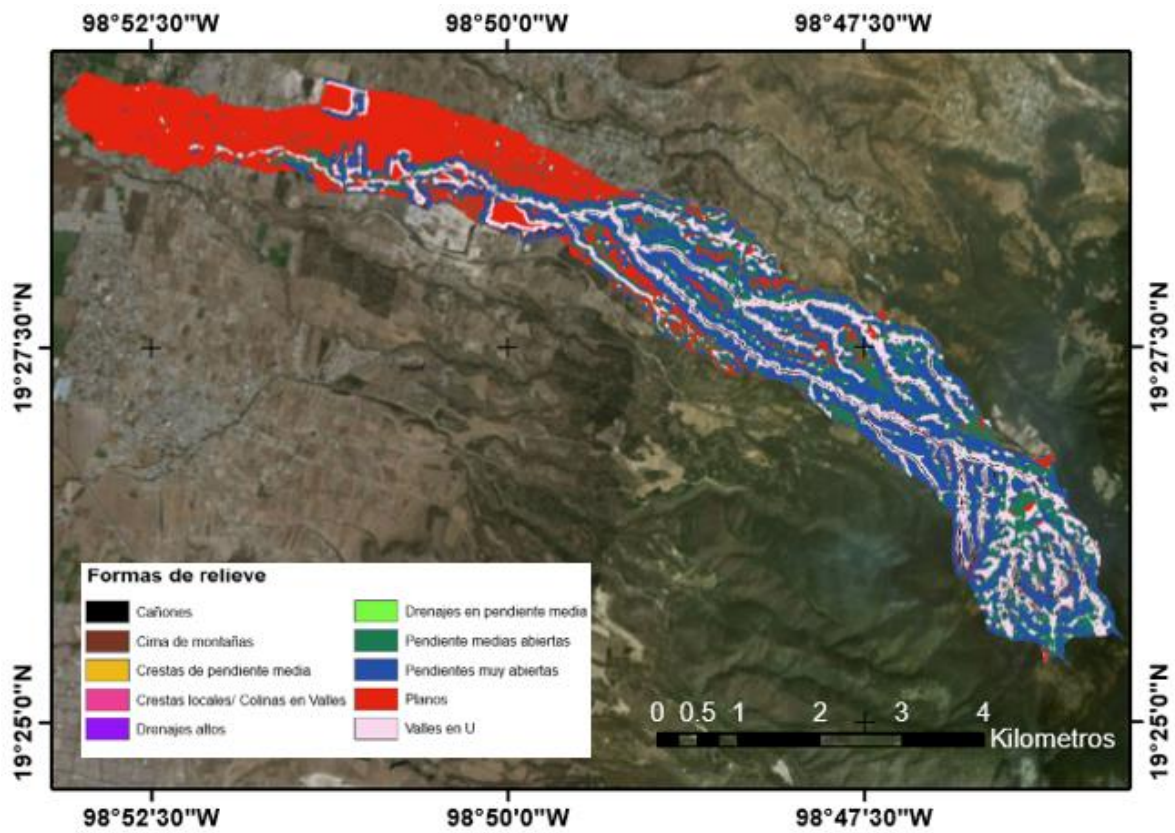


Figura 24. Mapa de clasificación del relieve según el Índice de Posición Topográfica.

6.2.13 Temperatura.

La cuenca del río Chapingo presenta temperaturas superficiales desde 17.69 °C hasta 31.56°C

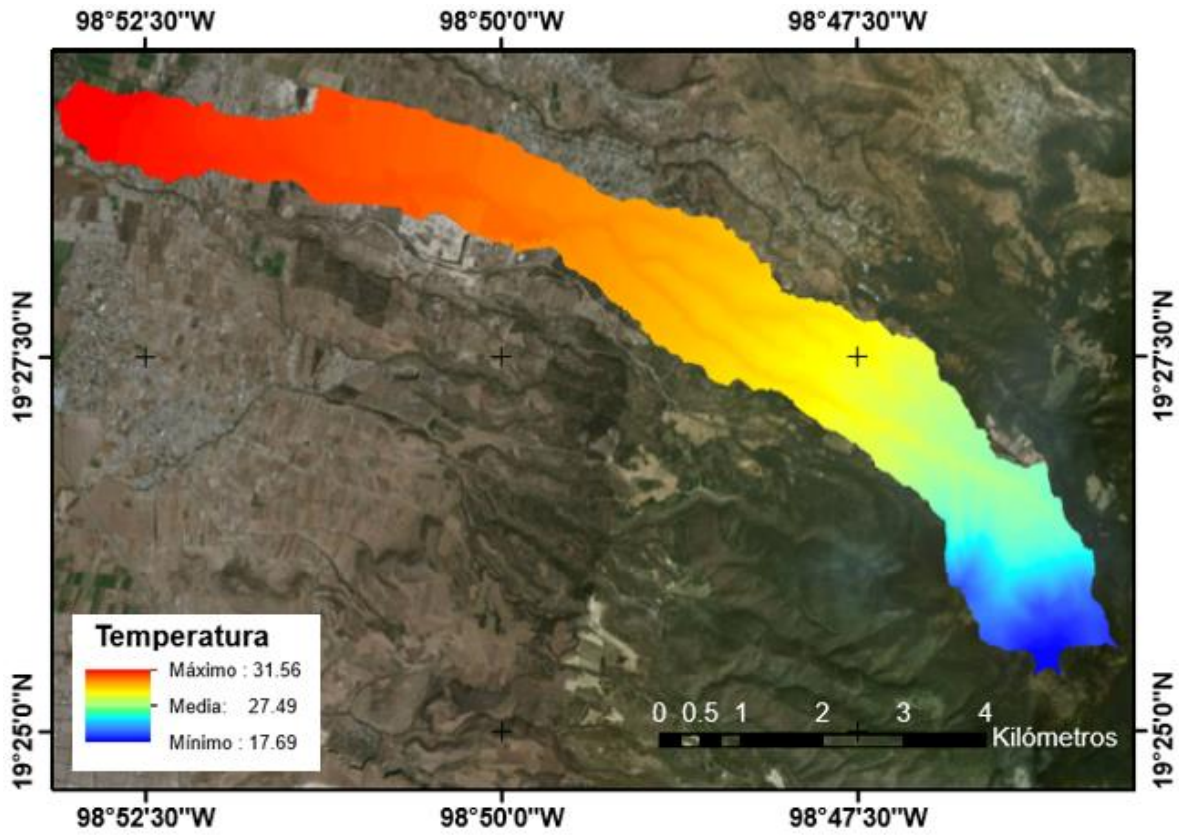


Figura 25. Mapa de temperatura de superficie (°C) de la cuenca del río Chapingo.

6.2.14 Altura de vegetación.

La zona de estudio presenta alturas de vegetación desde 0.53 m hasta 21.97 m, en donde los valores más altos corresponden a la zona de bosques (Figura 26).

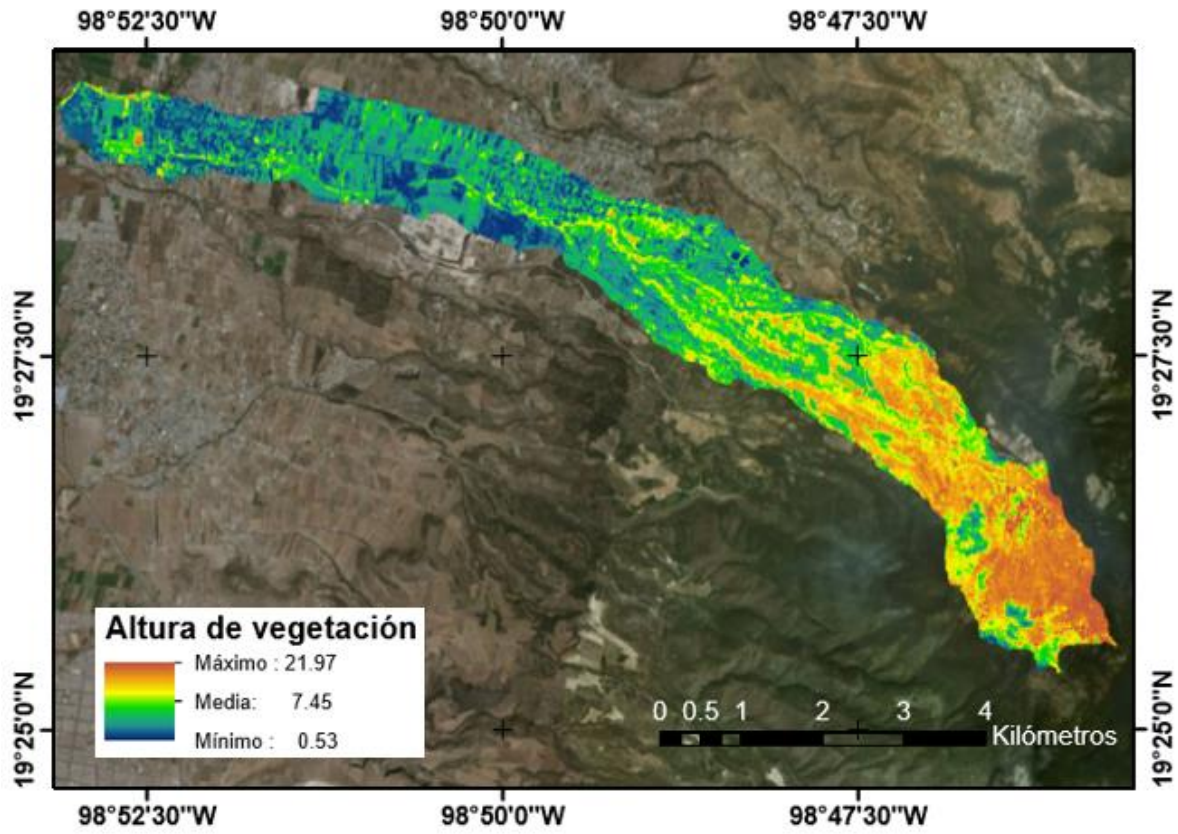


Figura 26. Mapa de altura de vegetación de la cuenca del río Chapingo.

6.2.15 NDVI.

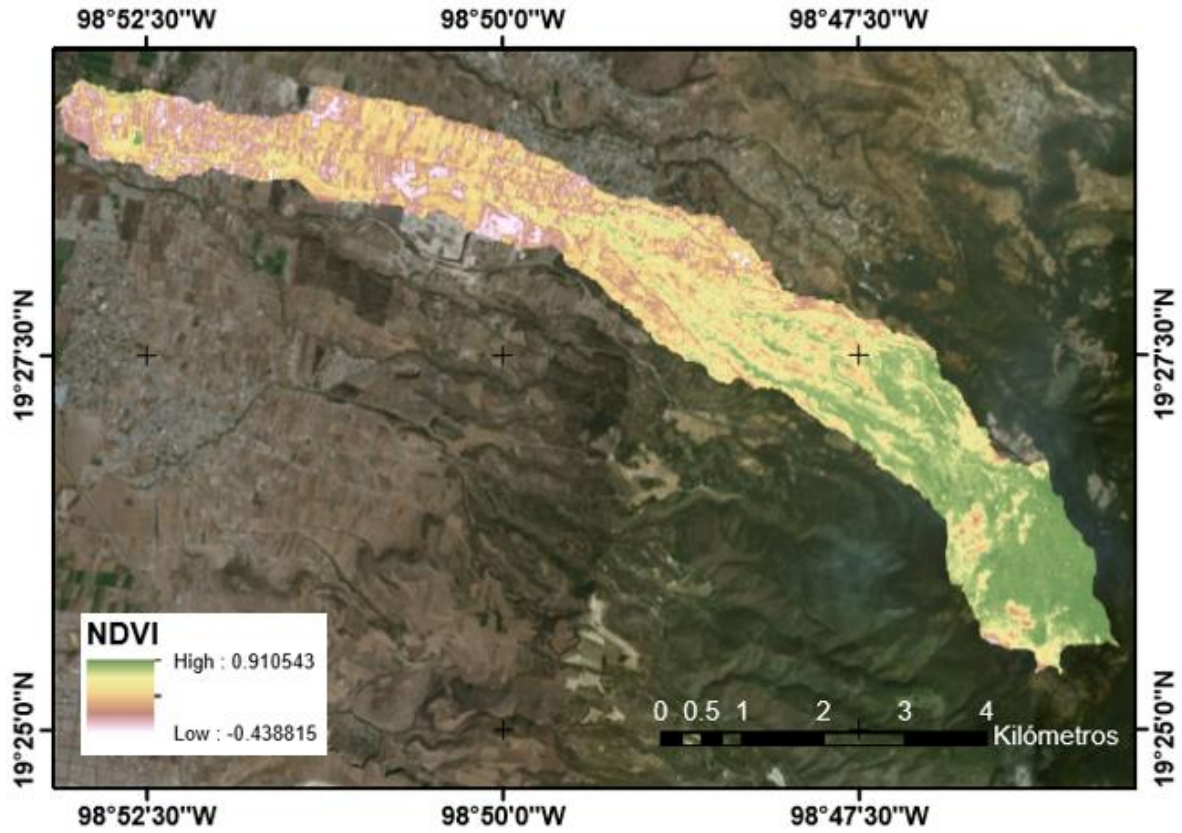


Figura 27. Mapa de NDVI de la cuenca del río Chapingo.

6.2.16 IAF.

La Figura 28 muestra el Índice de Área Foliar de la cuenca del río Chapingo el cual va de 0 (zonas urbanas) a 17.46 (bosques).

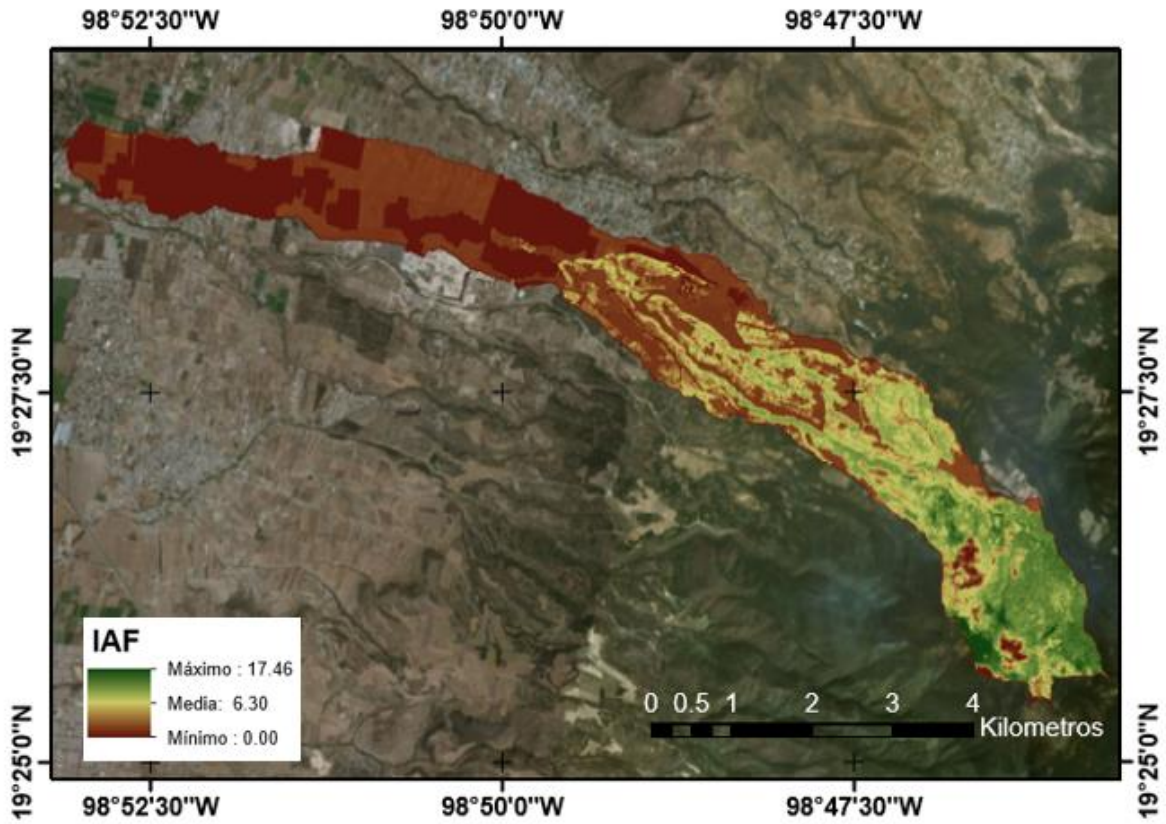


Figura 28. Mapa de Índice de Área Foliar de la cuenca del río Chapingo.

6.2.17 Radiación.

La Figura 29 muestra la radiación en unidades Langley de la cuenca del río Chapingo para el día 13 de octubre de 2019.

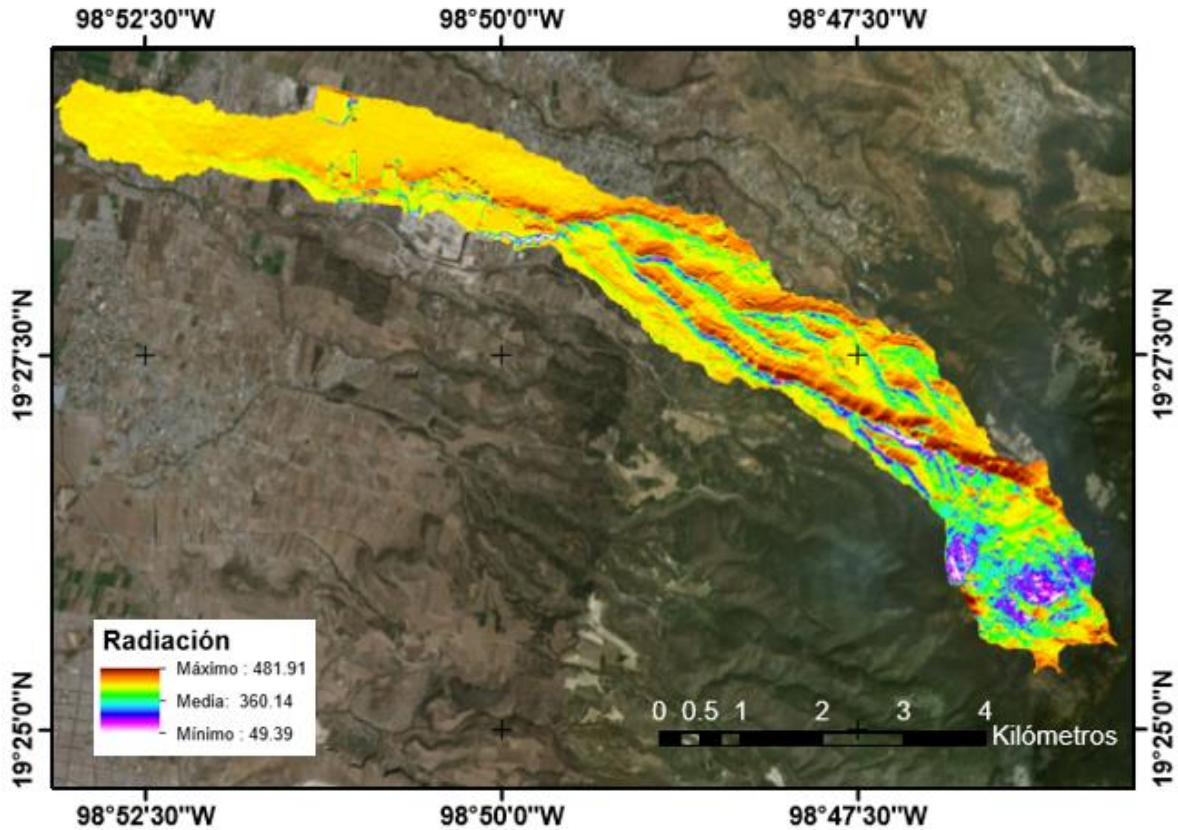


Figura 29. Radiación de la cuenca del río Chapingo.

6.3 Matriz de regresión completa.

En el Cuadro 15 se muestra la matriz completa con los valores de la variable dependiente (CN) y las 18 variables ambientales (variables independientes).

Donde X_1 es la altitud (m), X_2 es la Pendiente %, X_3 : Curvatura, X_4 : Curvatura de perfil X_5 : Curvatura plana , X_6 : Longitud de pendiente (m), X_7 : Densidad de drenaje (m/ha) X_8 : Número de rugosidad, X_9 : Índice de Posición topográfica, X_{10} : Índice de potencia de flujo, X_{11} : Índice de transporte de sedimentos, X_{12} : Índice Topográfico de humedad (m^2/m°), X_{13} : Temperatura ($^\circ C$), X_{14} : Altura de vegetación (m), X_{15} : NDVI, X_{16} : Índice de Área Foliar (m^2/m^2), X_{17} : Radiación (ly) y X_{18} : Conductividad hidráulica saturada (cm/h)

Cuadro 15. Matriz con las 18 variables ambientales consideradas para los 136 puntos de muestreo.

Punto	CN	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
1	68.338	2615.360	10.339	0.564	-0.052	0.513	5.039	0.225	0.000	0.631	-0.261	0.157	5.852	27.785	3.340	0.285	1.526	441.850	8.887
2	75.473	2627.160	7.703	0.146	-0.173	-0.026	17.936	0.017	0.000	1.214	0.079	0.257	6.761	27.663	3.530	0.294	0.329	468.468	0.619
3	67.950	2717.030	18.114	-0.276	0.132	-0.144	27.229	2.832	0.010	-2.369	0.050	0.265	6.035	26.729	12.849	0.782	12.945	421.049	11.256
4	65.069	2934.110	10.142	0.444	-0.048	0.397	10.000	0.243	0.001	1.145	-0.002	0.277	6.201	24.474	8.392	0.651	3.154	465.518	55.004
5	61.000	2987.190	3.957	0.120	0.017	0.137	11.976	2.237	0.002	-0.040	-0.112	0.122	7.960	23.922	11.239	0.751	5.020	478.969	7.639
6	74.244	2950.530	34.288	1.120	-1.133	-0.013	10.539	0.008	0.000	2.037	-0.760	0.104	5.228	24.303	10.360	0.726	9.344	491.236	5.924
7	67.270	2630.880	8.621	-0.115	-0.148	-0.264	127.844	2.756	0.006	1.820	0.181	0.393	8.643	27.624	6.345	0.532	8.349	440.250	28.313
8	69.125	2677.670	6.007	0.320	-0.219	0.101	10.000	1.647	0.002	0.573	0.040	0.155	6.643	27.138	7.838	0.646	3.324	446.059	1.319
9	70.082	2580.550	8.501	-0.524	0.689	0.165	10.730	1.591	0.002	0.334	-0.195	0.169	7.089	28.147	9.292	0.684	11.763	440.110	24.384
10	64.792	2714.110	15.785	-0.102	-0.325	-0.427	207.036	5.132	0.013	-0.437	0.487	1.129	8.417	26.760	9.602	0.722	10.876	427.347	0.608
11	67.241	2847.200	25.043	-0.933	0.767	-0.166	19.372	0.498	0.004	2.236	0.206	0.202	6.185	25.377	6.818	0.569	5.397	405.357	13.962
12	60.230	2914.210	16.853	-1.938	0.378	-1.560	95.694	4.742	0.021	-5.713	0.507	0.587	8.071	24.681	9.460	0.668	13.361	427.778	57.748
13	81.377	2410.250	5.779	0.489	-0.125	0.363	14.468	2.947	0.004	0.341	-0.119	0.189	7.206	29.916	4.715	0.480	0.000	442.206	13.175
14	79.165	2365.270	10.057	1.685	-1.237	0.448	22.420	3.138	0.018	7.882	-0.439	0.323	8.259	30.384	1.816	0.052	0.000	443.047	18.588
15	81.523	2479.670	8.644	0.382	-0.038	0.344	11.381	0.128	0.000	0.384	-0.143	0.107	6.374	29.195	4.519	0.432	1.444	440.970	0.605
16	80.004	2512.450	7.087	0.085	0.030	0.114	35.562	2.485	0.003	0.101	-0.016	0.576	7.532	28.855	3.242	0.273	0.299	438.548	1.400
17	70.292	2532.880	4.741	-0.285	0.235	-0.049	11.341	0.390	0.001	0.846	0.011	0.211	7.195	28.642	5.168	0.453	6.533	455.400	41.908
18	79.928	2581.860	6.908	0.687	-0.350	0.337	2.222	0.029	0.000	0.888	-0.274	0.004	6.022	28.134	4.942	0.429	0.000	449.084	28.250
19	81.426	2261.610	2.253	0.071	-0.049	0.022	16.667	5.403	0.002	-0.014	0.002	0.247	8.195	31.461	7.967	0.622	0.000	441.758	31.441
20	85.000	2266.250	2.968	-0.102	0.090	-0.013	35.000	0.880	0.000	-0.143	0.056	0.376	8.539	31.413	5.504	0.505	2.363	441.976	13.670
21	92.000	2272.710	3.256	-0.244	0.175	-0.069	77.196	6.306	0.004	-0.828	0.050	1.344	10.654	31.345	6.210	0.526	0.000	439.637	17.330
22	85.970	2293.260	7.808	-0.698	0.425	-0.273	32.308	0.080	0.000	0.190	0.101	0.304	7.860	31.132	3.869	0.442	0.000	429.458	37.480
23	79.427	2325.420	5.328	0.049	-0.089	-0.040	17.436	0.000	0.000	1.216	0.003	0.359	8.178	30.798	5.371	0.469	1.799	434.023	4.016
24	76.183	2326.930	5.812	0.035	-0.071	-0.035	22.785	0.022	0.000	0.750	0.092	0.324	7.618	30.782	4.941	0.443	1.667	436.227	13.424
25	77.537	2330.020	7.402	0.080	-0.067	0.013	80.641	1.972	0.005	-0.460	0.242	0.851	9.045	30.750	4.626	0.419	1.384	428.602	15.128
26	78.442	2334.380	8.301	-0.044	0.453	0.409	5.000	2.967	0.004	0.706	-0.135	0.035	5.989	30.705	4.840	0.407	0.490	458.093	27.842
27	86.000	2336.850	4.964	-0.076	-0.069	-0.144	17.397	4.235	0.003	0.092	0.024	0.201	7.611	30.679	3.966	0.399	1.334	447.212	9.903
28	77.079	2317.380	5.441	-0.062	0.027	-0.035	183.958	6.799	0.009	-0.222	0.185	0.754	9.481	30.881	4.326	0.421	1.660	449.391	3.274
29	81.000	2321.580	4.491	-0.453	0.240	-0.213	123.807	4.265	0.003	-0.126	0.145	0.336	9.655	30.838	4.709	0.430	1.666	449.035	0.315
30	80.612	2320.820	2.497	-0.244	0.230	-0.015	37.094	2.181	0.001	0.007	0.055	0.990	9.468	30.846	4.261	0.420	1.610	447.552	9.448
31	85.000	2298.380	3.364	-0.320	0.165	-0.155	41.460	4.345	0.004	-0.214	0.056	1.019	10.871	31.079	3.974	0.420	0.000	447.225	7.203
32	81.000	2298.580	1.620	-0.089	0.075	-0.014	22.857	2.300	0.001	-0.124	-0.011	0.576	9.384	31.077	4.682	0.405	2.003	444.064	4.958
33	65.938	2960.190	6.284	-0.951	0.718	-0.233	18.357	0.000	0.000	2.956	0.074	0.138	7.884	24.203	7.294	0.620	9.243	463.193	14.967
34	59.732	2904.380	17.323	-1.067	0.355	-0.712	157.940	5.547	0.016	-2.281	0.207	0.659	8.549	24.783	11.400	0.777	11.218	426.370	13.920
35	63.762	2896.830	22.572	-2.098	0.602	-1.495	46.292	0.464	0.003	0.696	0.537	0.644	7.133	24.861	12.555	0.821	13.030	431.440	53.900
36	74.307	2876.380	42.583	1.129	-0.683	0.446	31.381	0.350	0.003	1.615	-0.297	0.223	6.423	25.074	11.153	0.756	11.506	360.975	13.314
37	69.386	2818.480	11.667	1.085	-0.154	0.930	6.055	0.148	0.001	4.561	-0.324	0.156	5.703	25.675	8.034	0.565	5.315	447.657	3.916
38	67.131	2790.200	18.783	0.418	-0.092	0.325	62.761	0.001	0.000	2.058	0.456	0.662	7.265	25.969	9.749	0.693	10.447	458.450	10.726
39	61.092	2942.500	25.236	0.693	-0.085	0.608	36.667	3.430	0.016	-4.439	-0.002	0.189	7.035	24.387	12.773	0.810	15.685	444.894	23.031
40	82.760	2258.690	4.858	0.040	-0.130	-0.090	49.014	3.474	0.002	-0.391	0.108	0.491	8.545	31.491	4.306	0.373	0.000	442.627	23.155

Continuación del Cuadro 15.

Punto	CN	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
41	70.591	2869.040	30.691	1.453	-1.260	0.193	7.032	0.065	0.000	4.877	-0.420	0.190	5.593	25.150	8.222	0.627	8.493	472.005	13.610
42	68.029	2801.550	18.541	-0.818	0.726	-0.092	14.523	0.167	0.001	2.775	0.069	0.193	5.989	25.851	7.043	0.631	8.215	471.927	2.700
43	69.741	2775.320	11.882	0.031	0.106	0.137	18.071	0.059	0.000	1.931	0.020	0.094	6.363	26.124	10.389	0.713	5.648	445.241	22.045
44	63.290	2765.540	12.595	0.155	0.002	0.157	66.187	0.002	0.000	0.808	0.266	0.143	7.408	26.225	6.672	0.528	2.393	439.650	7.515
45	63.470	2767.190	10.950	-0.729	0.381	-0.348	46.562	0.000	0.000	0.965	0.148	0.478	7.774	26.208	11.559	0.767	12.328	454.001	4.740
46	67.899	2728.900	9.330	-0.173	0.064	-0.109	125.592	1.425	0.003	0.058	0.300	1.024	8.781	26.606	5.120	0.383	1.978	440.719	126.659
47	63.623	2708.400	20.956	0.115	0.065	0.181	66.904	2.508	0.009	-1.518	0.494	0.522	7.111	26.819	12.355	0.747	13.285	408.427	31.618
48	72.880	2693.320	6.864	-0.315	0.363	0.047	8.468	0.449	0.001	0.630	-0.051	0.080	7.139	26.976	6.056	0.507	1.941	456.909	6.355
49	71.011	2677.820	5.542	0.044	-0.030	0.014	4.905	0.060	0.000	1.631	-0.158	0.213	6.571	27.137	5.142	0.439	1.707	448.500	12.660
50	73.982	2675.550	11.994	-0.582	0.087	-0.495	59.967	3.023	0.009	-1.014	0.351	0.520	8.237	27.160	5.366	0.521	2.155	479.543	22.996
51	69.903	2680.070	6.215	0.467	-0.410	0.057	9.293	0.903	0.004	1.772	-0.131	0.028	6.717	27.113	6.311	0.473	4.277	459.969	13.845
52	75.308	2699.020	12.885	3.831	-2.950	0.880	1.111	4.481	0.018	4.565	-0.691	0.015	5.236	26.916	11.835	0.773	11.707	460.022	28.282
53	71.497	2698.310	9.555	-0.036	0.080	0.044	88.646	2.976	0.007	0.411	0.127	0.556	7.932	26.924	6.489	0.560	2.599	447.641	2.258
54	69.000	2682.640	2.062	-0.186	0.432	0.245	3.238	0.224	0.001	4.614	-0.076	0.277	8.349	27.086	5.316	0.456	0.000	459.988	43.716
55	73.404	2612.520	17.592	0.453	-0.350	0.103	47.331	0.087	0.000	0.292	0.432	0.432	7.413	27.815	7.474	0.598	8.482	480.648	175.738
56	68.664	2966.870	27.209	2.298	-0.993	1.305	2.222	0.193	0.002	11.328	-0.480	0.157	4.701	24.134	9.712	0.717	10.973	402.273	50.389
57	62.868	2839.870	15.629	-0.285	-0.006	-0.290	13.357	0.092	0.001	3.918	0.012	0.148	5.871	25.453	6.935	0.650	8.964	439.571	13.782
58	64.979	2807.070	12.617	0.220	0.199	0.419	1.341	0.007	0.000	0.332	-0.203	0.215	5.743	25.794	9.175	0.704	4.552	439.768	25.101
59	70.011	2742.020	11.277	-0.258	0.194	-0.064	107.686	0.000	0.000	0.495	0.217	0.261	8.753	26.470	6.324	0.533	2.385	445.330	2.700
60	69.165	2686.640	9.017	0.155	-0.030	0.125	7.357	2.985	0.008	-1.987	-0.082	0.125	6.262	27.045	9.515	0.746	11.746	457.111	17.900
61	69.304	2678.640	10.117	0.347	-0.350	-0.003	8.333	2.102	0.006	1.865	0.125	0.293	6.708	27.128	9.033	0.676	12.038	436.167	26.025
62	68.621	2665.460	14.236	0.893	-1.378	-0.484	6.151	3.264	0.009	-1.660	-0.109	0.077	5.584	27.265	6.214	0.488	5.151	425.005	152.704
63	63.000	2627.570	4.297	0.227	-0.199	0.028	17.666	0.076	0.000	1.372	-0.023	0.102	7.269	27.659	5.480	0.472	5.319	454.564	13.289
64	70.900	2654.150	9.340	-1.040	0.590	-0.450	56.016	0.711	0.001	-0.586	0.196	0.203	8.324	27.382	9.985	0.712	3.596	437.872	3.305
65	72.062	2601.740	11.156	-0.342	-0.148	-0.491	52.594	0.530	0.001	0.696	0.183	0.870	7.138	27.927	4.818	0.509	6.080	442.770	35.671
66	70.685	2581.630	12.884	-0.013	-0.372	-0.385	55.681	4.755	0.010	0.003	0.182	0.248	6.727	28.136	6.104	0.517	7.014	436.275	0.175
67	78.000	2488.260	3.785	-0.160	0.131	-0.029	29.507	1.184	0.001	0.605	0.013	0.647	8.620	29.106	4.077	0.359	1.515	443.926	4.983
68	80.728	2538.670	9.084	-0.960	0.377	-0.583	92.315	6.864	0.012	-1.400	0.258	1.786	9.155	28.582	6.062	0.514	0.642	433.605	12.966
69	87.661	2524.640	11.374	-0.756	0.362	-0.394	87.450	5.399	0.009	-1.320	0.334	0.929	8.415	28.728	4.868	0.426	0.517	461.571	12.972
70	80.749	2525.290	9.152	2.205	-1.161	1.044	1.341	4.727	0.008	1.240	-0.432	0.040	5.238	28.721	8.172	0.632	9.484	438.264	8.388
71	81.785	2511.290	13.611	0.471	-0.047	0.424	5.365	2.677	0.006	0.557	-0.278	0.123	5.420	28.867	3.648	0.265	0.288	459.079	0.976
72	69.346	2491.130	13.073	0.289	-0.535	-0.247	31.151	1.720	0.005	1.131	0.036	0.299	7.286	29.076	5.986	0.537	7.464	422.495	19.021
73	71.263	2478.470	8.984	1.205	-0.335	0.869	3.889	0.340	0.000	1.155	-0.225	0.049	5.803	29.208	5.478	0.487	9.677	446.734	39.819
74	74.308	2503.890	5.489	-0.182	0.014	-0.168	177.842	1.529	0.002	-0.765	0.231	1.111	10.357	28.944	4.285	0.407	0.490	445.200	10.383
75	90.000	2456.930	1.683	0.120	-0.047	0.073	19.428	3.307	0.003	-0.227	-0.007	1.071	11.217	29.431	5.614	0.459	0.000	449.850	76.145
76	72.915	2496.890	8.298	-0.476	0.395	-0.081	33.205	0.643	0.001	-0.431	0.079	0.388	7.655	29.016	8.742	0.660	4.123	465.004	13.938
77	86.000	2398.380	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.473	0.000	-0.047	0.003	0.000	13.189	30.040	2.104	0.099	0.000	446.081	19.479
78	90.105	2398.380	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.079	0.000	0.000	0.004	0.000	13.745	30.040	1.905	0.060	0.000	446.203	13.816
79	75.212	2441.830	7.145	0.378	0.029	0.407	3.889	0.007	0.000	2.792	-0.156	0.072	6.099	29.588	4.529	0.401	1.651	451.378	18.148
80	81.261	2398.730	39.600	-13.089	12.470	-0.619	6.016	1.396	0.007	-6.699	0.275	0.214	7.785	30.036	2.110	0.082	0.000	401.154	15.477

Continuación del Cuadro 15.

Punto	CN	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
81	81.171	2399.070	30.451	-6.165	5.803	-0.362	14.563	3.638	0.007	-4.381	0.698	0.219	8.286	30.033	2.652	0.178	0.000	443.578	18.274
82	85.000	2360.510	2.471	0.080	-0.076	0.004	144.241	8.382	0.005	0.083	0.088	16.609	12.918	30.433	6.875	0.534	2.213	444.939	13.487
83	80.000	2391.920	3.835	0.187	-0.023	0.163	23.603	5.442	0.005	0.181	-0.094	0.035	8.390	30.107	5.426	0.432	1.947	448.098	14.550
84	77.183	2376.370	4.495	-0.169	0.090	-0.079	29.484	3.136	0.002	0.016	0.004	0.248	8.217	30.268	3.448	0.294	1.139	448.933	13.106
85	86.000	2429.820	4.181	0.404	-0.173	0.231	4.579	6.490	0.008	-0.204	-0.133	0.034	6.796	29.713	3.523	0.235	0.000	446.666	13.075
86	72.000	2473.850	4.241	-0.009	0.018	0.009	53.150	0.228	0.000	-0.325	-0.017	0.493	9.211	29.256	5.388	0.468	1.887	448.149	11.350
87	74.161	2495.490	9.111	1.191	-1.011	0.181	4.809	1.872	0.007	2.201	-0.081	0.101	5.748	29.031	4.107	0.355	0.000	467.408	11.163
88	76.014	2505.720	7.060	0.080	-0.175	-0.095	48.587	1.028	0.002	0.323	0.122	0.675	8.517	28.925	5.868	0.500	2.013	450.794	32.528
89	70.449	2571.820	7.287	1.169	-0.680	0.489	4.444	1.489	0.006	2.395	-0.196	0.197	6.195	28.238	5.900	0.499	0.621	440.724	44.402
90	80.150	2558.200	5.289	-0.089	-0.063	-0.152	62.594	0.000	0.000	1.052	0.097	0.595	7.999	28.379	6.261	0.492	2.002	448.533	2.538
91	83.000	2573.510	2.637	-0.298	0.338	0.040	6.341	0.000	0.000	1.835	-0.067	0.130	7.795	28.220	4.340	0.423	0.512	458.232	16.713
92	78.217	2569.820	7.403	0.249	-0.197	0.052	9.984	0.021	0.000	1.605	0.064	0.188	6.638	28.259	4.768	0.343	1.402	462.469	3.785
93	78.508	2466.250	3.849	-1.102	1.075	-0.028	5.690	0.358	0.001	0.694	0.046	0.571	9.265	29.335	4.174	0.352	1.184	455.075	6.249
94	79.733	2424.530	16.874	0.667	-0.852	-0.185	28.705	0.667	0.002	1.132	-0.038	0.240	7.426	29.768	5.666	0.446	0.000	474.058	7.577
95	71.066	2913.660	8.832	0.275	-0.050	0.226	149.518	4.340	0.010	0.045	0.192	0.660	9.102	24.686	7.933	0.623	2.884	453.604	20.985
96	70.443	2684.900	21.392	0.435	0.146	0.582	20.023	3.402	0.011	-4.014	-0.327	0.146	6.085	27.063	8.508	0.656	7.898	428.449	55.113
97	78.522	2648.420	27.996	0.049	-0.429	-0.381	58.656	1.541	0.006	0.446	0.627	0.560	6.715	27.442	3.858	0.351	0.409	487.876	33.988
98	70.314	2673.090	23.537	2.538	-1.330	1.208	10.769	0.365	0.002	4.464	-0.287	0.212	5.462	27.186	11.487	0.793	13.326	411.010	44.184
99	65.321	2678.090	10.786	1.515	-1.288	0.228	5.000	1.713	0.005	1.045	-0.040	0.117	5.506	27.134	8.596	0.621	9.996	455.183	9.573
100	78.006	2672.420	18.658	1.280	-0.788	0.492	23.317	0.010	0.000	1.507	-0.018	0.277	6.624	27.193	4.529	0.419	5.761	489.667	13.595
101	68.183	2666.120	13.491	0.582	0.253	0.835	6.151	0.072	0.000	0.898	-0.258	0.115	5.542	27.258	5.307	0.406	5.747	434.127	13.221
102	85.285	2640.530	24.523	2.435	-2.393	0.043	22.166	0.069	0.000	1.764	-0.198	0.346	6.862	27.524	5.735	0.511	0.637	461.708	13.054
103	84.658	2596.420	41.016	2.471	-1.555	0.915	36.381	2.196	0.012	-0.360	-0.339	0.200	5.902	27.982	7.108	0.578	10.926	352.482	4.634
104	76.430	2366.070	10.223	0.902	-0.385	0.517	3.794	2.084	0.009	6.160	-0.278	0.065	5.582	30.375	4.509	0.388	0.000	449.535	18.916
105	75.629	2354.930	8.059	0.311	-0.137	0.174	57.959	0.003	0.000	0.303	0.009	0.048	7.651	30.491	3.271	0.273	0.299	435.464	14.857
106	84.257	2346.000	21.497	-2.080	1.719	-0.361	4.809	3.089	0.003	-0.770	0.091	0.258	9.706	30.584	1.511	0.124	0.000	428.877	14.935
107	77.655	2376.750	6.194	0.276	-0.253	0.022	42.499	3.334	0.005	-0.478	0.118	0.553	7.881	30.265	4.773	0.421	1.651	436.262	2.376
108	81.000	2261.540	2.752	0.515	-0.376	0.139	4.024	2.359	0.001	-0.007	-0.047	0.328	7.175	31.461	7.904	0.601	2.966	442.121	3.318
109	78.000	2258.550	1.972	-0.094	0.039	-0.055	7.222	3.316	0.001	0.343	-0.008	0.244	8.381	31.492	6.244	0.491	2.525	441.743	0.175
110	78.000	2257.720	1.623	0.048	-0.083	-0.035	2.127	2.864	0.001	0.020	-0.092	0.000	8.009	31.501	5.108	0.433	0.000	444.459	14.582
111	94.000	2253.190	0.159	-0.049	0.046	-0.003	0.000	1.306	0.000	-0.369	0.004	0.123	11.749	31.548	8.012	0.637	0.000	442.257	13.234
112	92.000	2256.190	1.933	-0.129	0.111	-0.017	14.389	2.961	0.001	-0.016	0.003	0.684	10.313	31.517	5.010	0.434	1.817	441.307	3.804
113	82.121	2252.250	1.282	0.036	-0.086	-0.051	5.595	7.863	0.002	-0.108	-0.024	0.119	8.113	31.558	3.094	0.252	1.375	440.166	12.951
114	84.006	2252.900	1.402	-0.129	0.012	-0.117	50.355	5.955	0.002	-0.063	0.033	0.880	10.566	31.551	2.593	0.182	0.870	442.029	5.675
115	84.870	2256.270	1.019	0.058	-0.092	-0.034	2.357	1.881	0.000	0.119	-0.035	0.000	9.516	31.516	2.628	0.187	0.955	440.546	0.479
116	63.979	3079.580	26.157	2.929	-1.729	1.200	4.349	3.565	0.023	-0.740	-0.393	0.114	4.807	22.963	13.715	0.848	14.369	409.874	33.551
117	63.939	3498.590	25.355	0.849	-0.810	0.038	31.897	0.106	0.001	3.390	0.269	0.277	6.713	18.609	12.324	0.798	13.322	425.602	35.703
118	64.063	3457.850	59.386	0.231	-0.116	0.115	26.016	0.532	0.005	1.321	0.034	0.243	5.844	19.033	12.743	0.799	14.471	320.102	19.395
119	61.063	3451.790	23.929	0.160	0.232	0.393	86.927	1.581	0.009	-1.633	0.515	0.946	8.215	19.096	10.425	0.716	11.477	423.304	5.613
120	64.315	3323.930	86.830	-0.462	-1.003	-1.465	59.356	8.971	0.138	-7.857	1.172	1.137	7.237	20.424	14.464	0.855	14.492	228.402	10.383

Continuación del cuadro 15.

Punto	CN	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
121	61.485	3323.930	86.830	-0.462	-1.003	-1.465	59.356	8.971	0.138	-7.857	1.172	1.137	7.237	20.424	14.464	0.855	14.492	228.402	220.764
122	61.484	3313.420	67.917	-0.302	-0.072	-0.374	78.489	8.281	0.121	-6.716	1.354	0.751	6.846	20.533	14.716	0.880	15.066	276.699	56.260
123	61.485	3301.280	83.862	0.569	0.776	1.345	10.921	6.399	0.092	-6.573	-0.704	0.280	4.252	20.659	14.665	0.864	14.932	235.958	86.871
124	61.432	3151.740	39.786	0.440	0.159	0.599	22.071	1.616	0.013	2.391	0.474	0.276	5.339	22.213	13.422	0.835	13.780	367.728	35.609
125	61.432	3151.740	39.786	0.440	0.159	0.599	22.071	1.616	0.013	2.391	0.474	0.276	5.339	22.213	13.422	0.835	13.780	367.728	28.375
126	64.123	3155.310	30.210	1.138	-0.233	0.905	85.099	2.480	0.019	2.511	0.457	0.394	7.184	22.176	14.427	0.858	14.817	414.421	79.668
127	64.304	3087.920	50.875	-0.649	-1.506	-2.155	22.341	1.796	0.013	3.531	-0.075	0.748	5.613	22.876	14.056	0.847	14.328	336.886	9.136
128	64.176	2975.080	32.508	-1.382	0.305	-1.077	69.005	3.707	0.020	-4.560	0.751	0.512	6.663	24.048	12.879	0.856	14.731	490.129	32.581
129	62.282	2986.200	30.077	0.675	-0.653	0.023	88.646	0.204	0.002	1.433	0.776	0.486	6.992	23.933	12.321	0.809	13.836	487.758	24.602
130	92.000	2274.130	2.532	0.053	-0.061	-0.007	39.698	4.638	0.003	0.049	0.031	0.403	9.113	31.331	6.553	0.532	0.000	441.015	15.528
131	79.364	2347.730	6.833	-1.044	0.678	-0.367	15.174	0.006	0.000	0.520	0.051	0.425	8.738	30.566	3.543	0.332	0.382	455.555	13.328
132	69.161	2665.560	6.098	0.671	-0.602	0.069	11.111	0.525	0.003	2.070	-0.056	0.190	6.914	27.264	6.147	0.576	9.101	445.443	84.969
133	92.110	2253.380	5.484	0.160	-0.010	0.150	21.055	3.395	0.002	-0.270	-0.033	0.424	7.343	31.546	4.483	0.294	0.000	435.068	9.604
134	81.000	2262.610	1.387	-0.205	0.157	-0.047	10.595	2.795	0.001	-0.258	0.009	0.268	9.362	31.450	4.979	0.423	1.938	441.328	13.159
135	82.545	2256.760	1.403	0.297	-0.219	0.078	1.341	2.909	0.002	0.228	-0.079	0.061	8.064	31.511	6.329	0.499	0.000	442.528	12.958
136	76.809	2543.020	11.532	1.009	-0.613	0.396	9.944	0.000	0.000	3.188	-0.107	0.086	6.648	28.537	8.105	0.628	7.925	457.930	13.065

6.4 Selección de variables ambientales.

De la matriz conformada por las 18 variables ambientales analizadas en los 136 puntos de muestro, el Cuadro 16 muestra el comportamiento de diferentes estadísticos, para una significancia del 5%, conforme Stepwise va agregando variables independientes.

Santhi *et al.* (2001) describen que dicho coeficiente varía de 0 a 1, en donde los valores cercanos a 1 explican el menor error posible, usualmente valores mayores a 0.5 son considerados como aceptables. Para los diferentes modelos de regresión lineal múltiple analizados, en el Cuadro 16 se observa el comportamiento de R^2 para las variables consideradas en cada modelo. Estos coeficientes de determinación, de ajuste entre variables ambientales analizadas y los valores de CN observados en campo, presentan valores entre de 0.642 y 0.839 y alcanzan su máxima estabilización para los modelos de regresión 11 (con nueve variables) y 12 (con 17 variables ambientales). Por otra parte, al comparar los valores de CN observados con los simulados por cada modelo de regresión se observa que el coeficiente de determinación varía ente 0.450 y 0.822; siendo máxima para los modelos 11 y 12.

Cuadro 16. Resumen de estadísticos ($p \leq 5\%$) entre valores observados y simulados por diferentes modelos de regresión lineal múltiple (RLM).

Modelo	Variables consideradas	R^2 ajustado LMR	Pendiente	R^2	NSE		PBIAS%		RSR	
					Valor	Rendimiento	Valor	Rendimiento	Valor	Rendimiento
1	x_1	0.642	0.996	0.450	0.448	Insatisfactorio	-3.7E-14	Muy bueno	0.596	Bueno/Satisfactorio
2	x_1, x_{16}	0.673	0.996	0.526	0.524	Satisfactorio	-2.72E-14	Muy bueno	0.568	Bueno
3	x_1, x_2, x_{16}	0.709	0.996	0.604	0.602	Satisfactorio	-4.45E-14	Muy bueno	0.534	Bueno
4	x_1, x_2, x_{13}, x_{16}	0.729	0.997	0.645	0.644	Satisfactorio	-2.57E-14	Muy bueno	0.513	Bueno
5	$x_1, x_2, x_{12}, x_{13}, x_{16}$	0.750	0.997	0.684	0.683	Bueno	1.98E-10	Muy bueno	0.491	Muy bueno
6	$x_1, x_2, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{16}$	0.785	0.997	0.742	0.741	Bueno	3.478E-10	Muy bueno	0.454	Muy bueno
7	$x_1, x_2, x_3, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{16}$	0.794	0.998	0.757	0.757	Muy bueno	4.815E-10	Muy bueno	0.442	Muy bueno
8	$x_1, x_2, x_3, x_6, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{16}$	0.803	0.998	0.773	0.773	Muy bueno	7.72E-10	Muy bueno	0.430	Muy bueno
9	$x_1, x_2, x_3, x_6, x_8, x_{10}, x_{12}, x_{13}, x_{16}$	0.813	0.998	0.790	0.790	Muy bueno	3.893E-10	Muy bueno	0.417	Muy bueno
10	$x_1, x_2, x_3, x_6, x_8, x_{12}, x_{13}, x_{16}$	0.815	0.998	0.787	0.786	Muy bueno	1.703E-09	Muy bueno	0.420	Muy bueno
11	$x_1, x_2, x_3, x_6, x_7, x_8, x_{12}, x_{13}, x_{16}$	0.838	0.998	0.822	0.822	Muy bueno	-4.47E-10	Muy bueno	0.389	Muy bueno
12	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}$	0.839	0.998	0.822	0.822	Muy bueno	-4.47E-10	Muy bueno	0.389	Muy bueno

Willmott (1981) menciona que una pendiente de 1 y una intercepción de 0, indica que el modelo reproduce perfectamente las magnitudes de los datos observados. En este caso los valores de la pendiente para cada modelo resultaron mayores de 0.99 (Cuadro 16) lo cual implica que los modelos de regresión no están sobre o sub-prediciendo.

Nash y Sutcliffe (1970) comentan que el NSE varía de $-\infty$ a 1 en donde 1 es el valor óptimo. En la presente investigación se tienen valores que varían de 0.448 a 0.822 alcanzando el mejor valor con el modelo 11 (Cuadro 16).

En cuanto al PBIAS refiere, Gupta *et al.* (1999) dice que éste estadístico mide en porcentaje, la tendencia de los datos simulados, para observar si son mayores o menores que los observados. El valor óptimo PBIAS es 0, en donde valores cercanos a este umbral indican una mayor precisión del modelo y los valores positivos muestran subestimación y los valores negativos sobreestimación. En este caso, los modelos 1, 2, 3, 4 y 11 sobreestiman la tendencia de los valores observados, mientras que los restantes modelos de regresión lo subestiman. A pesar de ello, todos los modelos se encuentran clasificados como muy buenos (Cuadro 16).

Finalmente, Singh *et al.* (2005) indican que el valor óptimo de RSR ocurre cuando éste es 0, por tanto, los valores más cercanos a este límite, indican un mejor rendimiento del modelo. En el Cuadro 16 se observa un RSR máximo de 0.596 y un mínimo de 0.389, clasificados como satisfactorio y muy bueno, respectivamente.

6.5 Modelo de regresión lineal múltiple.

Aunque los modelos 7, 8, 9, 10 y 11 están clasificados como muy buenos de acuerdo con su NSE, PBIAS y RSR (Cuadro 16), se eligió al modelo 11 para elaborar el mapa de CN por tener el R^2 ajustado más alto (0.838) y utilizar solo 9 variables ambientales en su determinación. De este modo, resultó que las variables ambientales que explican los valores de CN para la cuenca del río Chapingo son: altitud, pendiente, curvatura general, longitud de pendiente, densidad de drenaje, número de rugosidad, índice topográfico de humedad, temperatura e índice de área foliar.

En el Cuadro 17, se muestran los coeficientes de regresión y el factor de variación de la varianza (VIF), para cada una de las variables regresoras.

Cuadro 17. Coeficientes de regresión y VIF de las 9 variables ambientales elegidas.

	Coefficientes de regresión		VIF
Intercepción	-1871636.890		
Altitud	353.823	5350459685	
Pendiente	0.326	5.427	
Curvatura	1.128	1.275	
Longitud de pendiente	-0.045	1.498	
Densidad de drenaje	0.920	2.334	
Número de rugosidad	-169.708	4.438	
índice Topográfico de humedad	1.666	2.094	
Temperatura	34058.290	5350424725	
Índice de área foliar	-0.642	2.978	

Salmerón *et al.* (2018) mencionan que cuando se tienen valores de VIF mayores a 10, existe un problema de multicolinealidad, sin embargo, el VIF no hace referencia a las variables que presentan dicho problema. Para el caso de estudio, la temperatura y la altitud presentan este problema, en consecuencia, se confirma que las dos están relacionadas y, por lo tanto, una de las dos variables puede ser excluida del modelo. Cuando se excluyó alguna de las dos variables el R^2 ajustado del modelo de regresión para los 136 puntos de muestreo, disminuyó a 0.809.

En el Cuadro 18 se muestran los diferentes estadísticos para evaluar el rendimiento del modelo entre los valores de CN observados y estimados. El modelo 11, se refiere al modelo con las 9 variables seleccionadas; el modelo 13, excluye de las nueve variables a la temperatura (X_{13}) y el 14 no considera la altitud (X_1). Para los tres modelos (11, 13 y 14) se observa que el NSE, el PBIAS y el RSR clasifica al modelo como muy bueno (Moriassi *et al.*, 2007), presentan pendientes cercanas a 1 y el coeficiente de determinación (R^2) al eliminar una variable disminuye de 0.822 (modelo 11) a 0.782 (modelos 13 y 14).

Cuadro 18. Comparación de los estadísticos de error entre los datos observados y los ajustados.

Modelo	Variables consideradas	Pendiente	R ²	NSE		PBIAS%		RSR	
				Valor	Rendimiento	Valor	Rendimiento	Valor	Rendimiento
11	X ₁ ,X ₂ ,X ₃ ,X ₆ ,X ₇ ,X ₈ ,X ₁₂ ,X ₁₃ ,X ₁₆	0.998	0.822	0.822	muy bueno	-4E-10	muy bueno	0.389	muy bueno
13	X ₁ ,X ₂ ,X ₃ ,X ₆ ,X ₇ ,X ₈ ,X ₁₂ ,X ₁₆	0.998	0.782	0.782	muy bueno	-3E-14	muy bueno	0.423	muy bueno
14	X ₂ ,X ₃ ,X ₆ ,X ₇ ,X ₈ ,X ₁₂ ,X ₁₃ ,X ₁₆	0.998	0.782	0.782	muy bueno	-2E-14	muy bueno	0.423	muy bueno

La Figura 30 muestra la representación gráfica del CN estimado contra los CN observados. Cada punto de muestreo presenta un CN observado y aplicando la ecuación de regresión (ecuación 39) a cada uno de estos puntos se obtienen los valores de CN estimados.

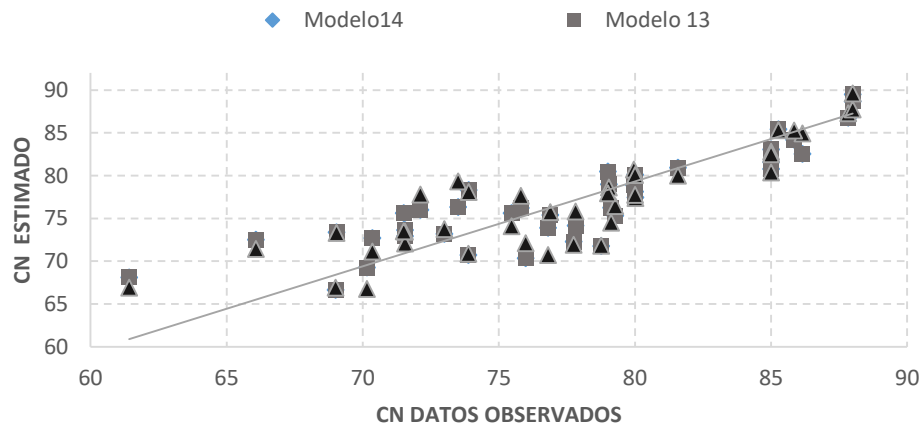


Figura 30. Representación gráfica de valores de CN estimado contra los CN observados.

A pesar de que existe multicolinealidad en el primer modelo entre las variables independientes (altitud y temperatura), se concluye que este modelo explica de mejor manera la variable dependiente (CN); dando como resultado la ecuación (39).

$$\begin{aligned}
 CN = & -1871636.89 + 353.82 X_1 + 0.33 X_2 + 1.13 X_3 + -0.04 X_6 + 0.92 X_7 \\
 & - 169.71 X_8 + 1.67 X_{12} + 34058.29 X_{13} - 0.64 X_{16}
 \end{aligned}
 \tag{39}$$

6.6 Mapa de CN.

En la Figura 31 se muestra el histograma de frecuencias con una distribución normal de los datos bimodal, con un quiebre en aproximadamente el promedio de CN (71.43).

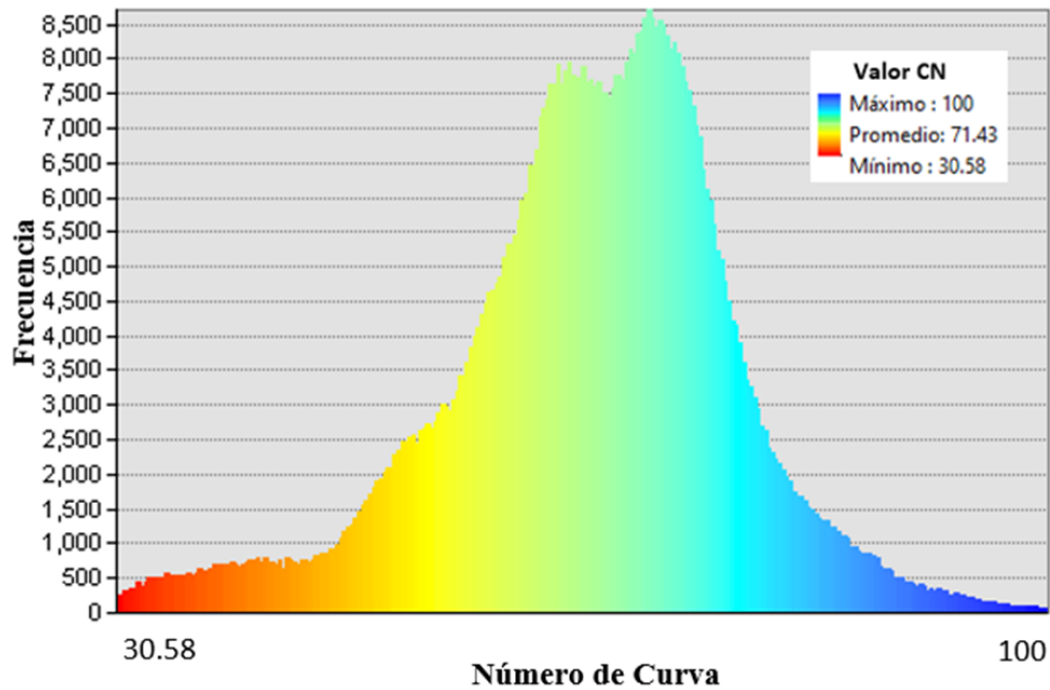


Figura 31. Histograma de frecuencias del CN en la cuenca del río Chapingo.

De acuerdo con la Figura 31, se observa que el CN ajustado para la cuenca del río Chapingo, varía de 30.58 a 100 con un promedio de 71.43. Los valores mínimos corresponden principalmente a la parte alta de la cuenca. Esto concuerda ya que en la parte alta predominan bosques; mientras que parte media-baja se encuentran los valores más altos de CN, debido a las áreas urbanas y suelos desprovistos de vegetación (Figura 32y Figura 33).

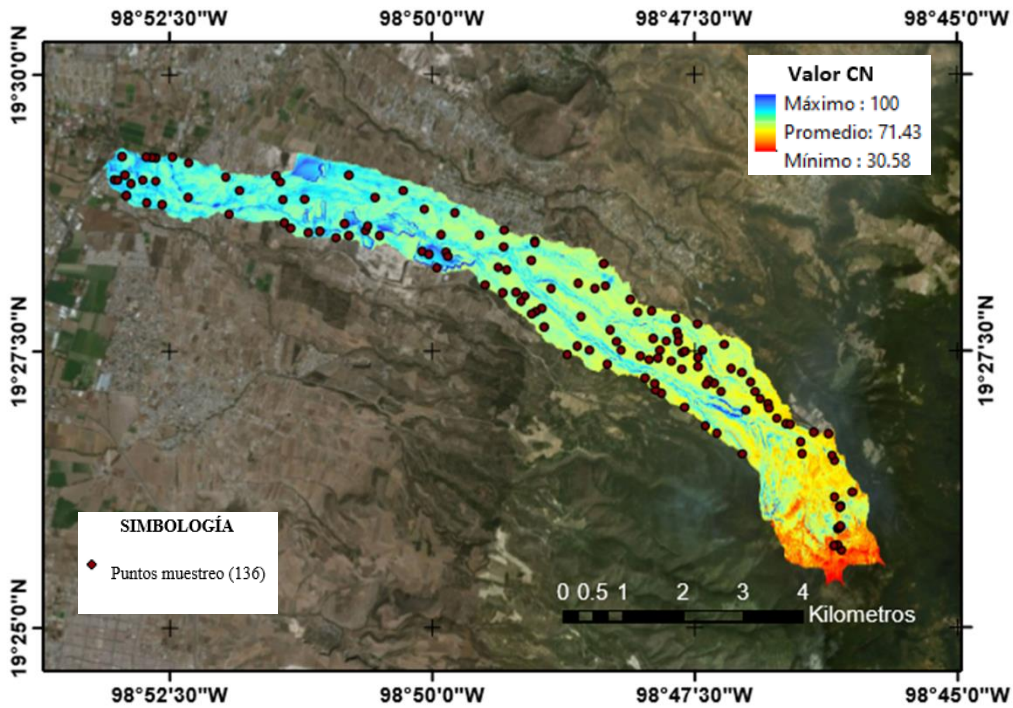


Figura 32. CN ajustado en la cuenca del río Chapingo y 136 puntos de muestreo.

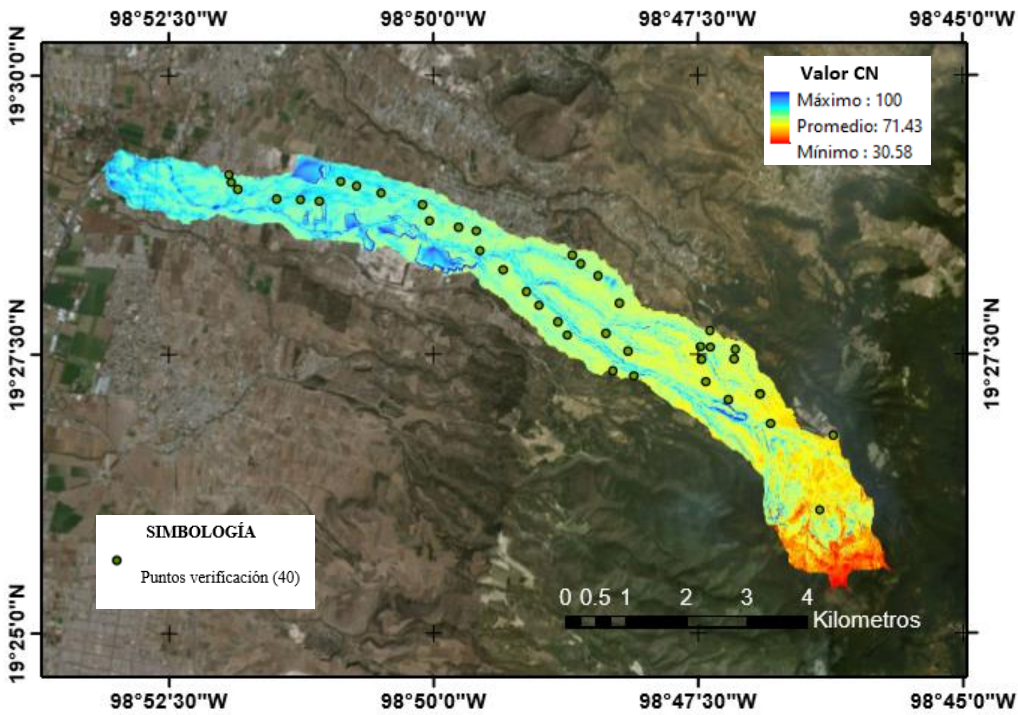


Figura 33. CN ajustado en la cuenca del río Chapingo y 40 puntos de muestreo.

6.7 Verificación del modelo.

El Cuadro 19, muestra los estadísticos de error, para los 40 puntos considerados.

Cuadro 19. Estadísticos de error, considerando 40 puntos para verificación.

Modelo	Variables consideradas	Pendiente	R ²	NSE		PBIAS%		RSR	
				Valor	Rendimiento	Valor	Rendimiento	Valor	Rendimiento
11	x ₁ ,x ₂ ,x ₃ ,x ₆ ,x ₇ ,x ₈ ,x ₁₂ ,x ₁₃ ,x ₁₆	0.975	0.679	0.607	Satisfactorio	2.372	muy bueno	0.606	Satisfactorio/Bueno

Respecto a los 136 puntos, se observa que el coeficiente de determinación disminuyó 17.455%, el NSE, disminuyó un 26.167% (Figura 35) (pasando de una clasificación buena a satisfactoria). El PBIAS aumentó en más del 100% (Figura 36) y el RSR, aumentó 55.857 % (pasando de satisfactorio a bueno) (Figura 37).

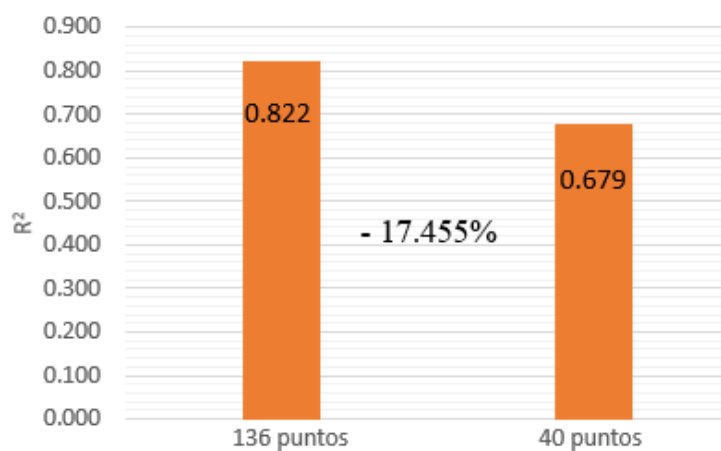


Figura 34. Comparación del estadístico R² considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.

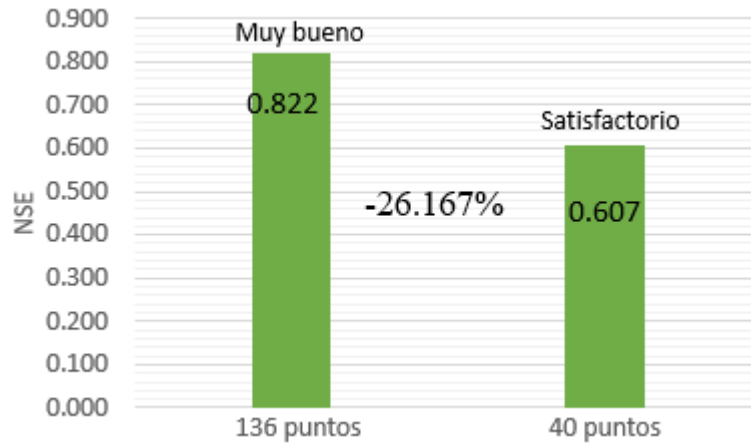


Figura 35. Comparación del estadístico NSE considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.

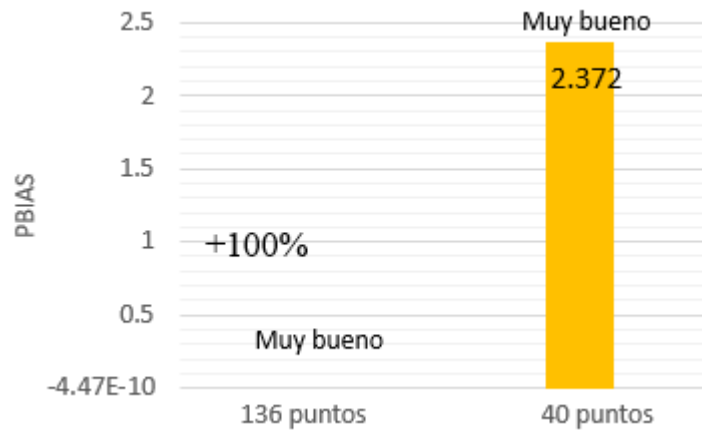


Figura 36. Comparación del estadístico PBIAS considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.

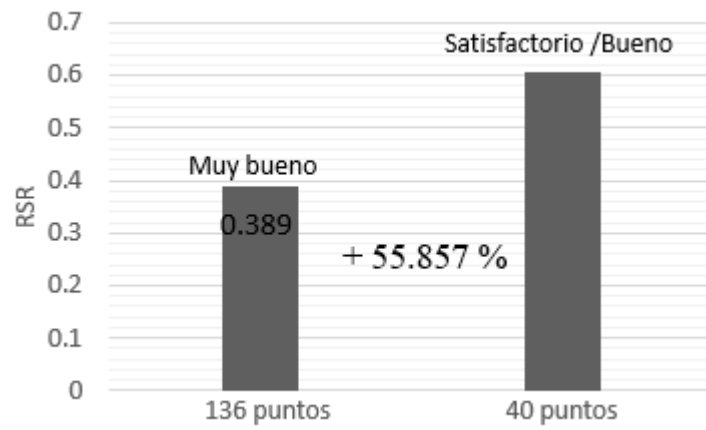


Figura 37. Comparación del estadístico RSR considerando 136 y 40 puntos, respectivamente.

7 CONCLUSIONES

Las variables ambientales que influyen en el Número de Curva de la cuenca del río Chapingo son: altitud, pendiente, curvatura general, longitud de pendiente, densidad de drenaje, número de rugosidad, índice topográfico de humedad, temperatura e índice de área foliar. Se observa que los factores que más influyen en la magnitud de CN son temperatura, altitud y número de rugosidad con coeficientes de regresión de 34 058.29, 353.82 y 169.71, respectivamente. El CN de tablas al estar relacionado con la vegetación, se comprende que esté relacionado con la temperatura, ya que ésta regula el crecimiento de las plantas. Además, aunque la temperatura tiene una relación inversamente proporcional con la altitud, la presencia de microclimas debido a los diferentes usos de suelo y vegetación en la zona de estudio, provocaron que no se pudiera excluir cualquiera de las dos. Con respecto al número de rugosidad, éste depende el relieve relativo y la densidad de drenaje, mismos que llevan explícitos los suelos y la topografía del terreno, los cuales influyen en el escurrimiento.

El uso de tecnologías SIG y el método de regresión *Stepwise* (para la selección de variables independientes), es útil en la determinación de los factores ambientales mayormente relacionadas con CN. Además, los nueve factores son fácil de obtener sin generar costos por salidas a campo, compra de materiales, etc.; lo cual también eficientiza el tiempo en la obtención de los resultados.

8 RECOMENDACIONES

Del programa Eric 3, se obtuvo la precipitación máxima diaria correspondiente al periodo de 1954 a 2014 y con ayuda del Banco Nacional de datos de Aguas superficiales, se descargaron los gastos medios diarios. Los datos de precipitación fueron empatados con los datos de escurrimiento medio diario. Para cada dato de precipitación, se obtuvo la humedad antecedente (5 días antes de la fecha en cuestión) y solamente se eligieron aquellos que cumplieron una condición de humedad antecedente tipo II, basados en el criterio de Aparicio (2010). A cada par de P-Q se le calculó la retención potencial máxima, la relación P/S y el número de curva, de acuerdo con las ecuaciones (11) y (12). Además Hawkins *et al.* (2010), recomienda una relación $P/S > 0.49$, para depurar datos, solo se consideraron aquéllos que cumplieran dicho umbral. Una vez depurados, se ordenaron en forma descendente para la obtención del número de curva asintótico.

La Figura 38, Figura 39 y Figura 40 muestran el coeficiente de determinación ajuste para la obtención del CN representativo de la cuenca del río Chapingo mediante el método asintótico. La Figura 40 y Cuadro 20 muestra que la función con mejor ajuste corresponde cuando se tiene un valor de k igual a 0.37 y un CN representativo de la cuenca de 50.15.

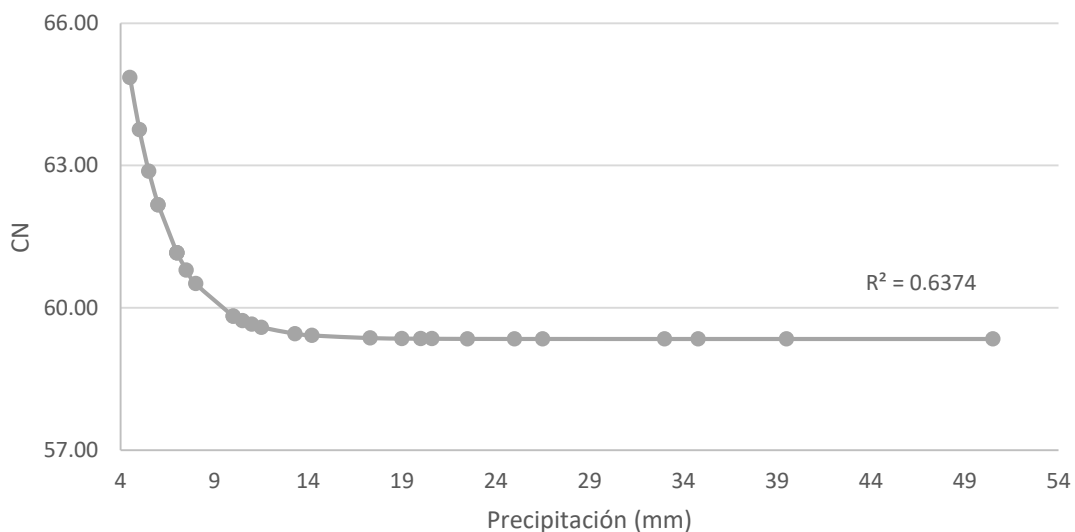


Figura 38. CN asintótico para una $k = 0.44$.

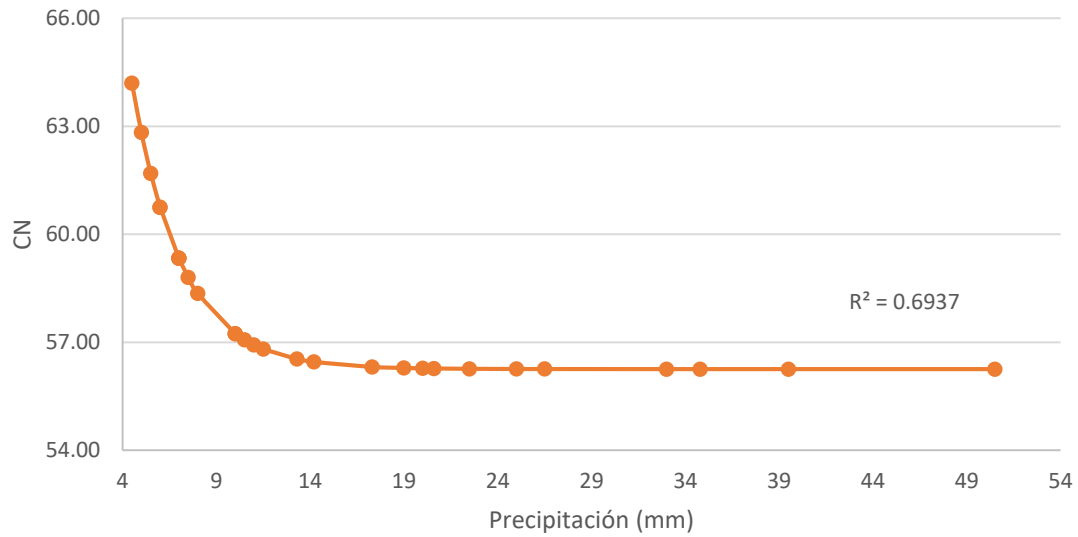


Figura 39. CN asintótico para una $k=0.38$.

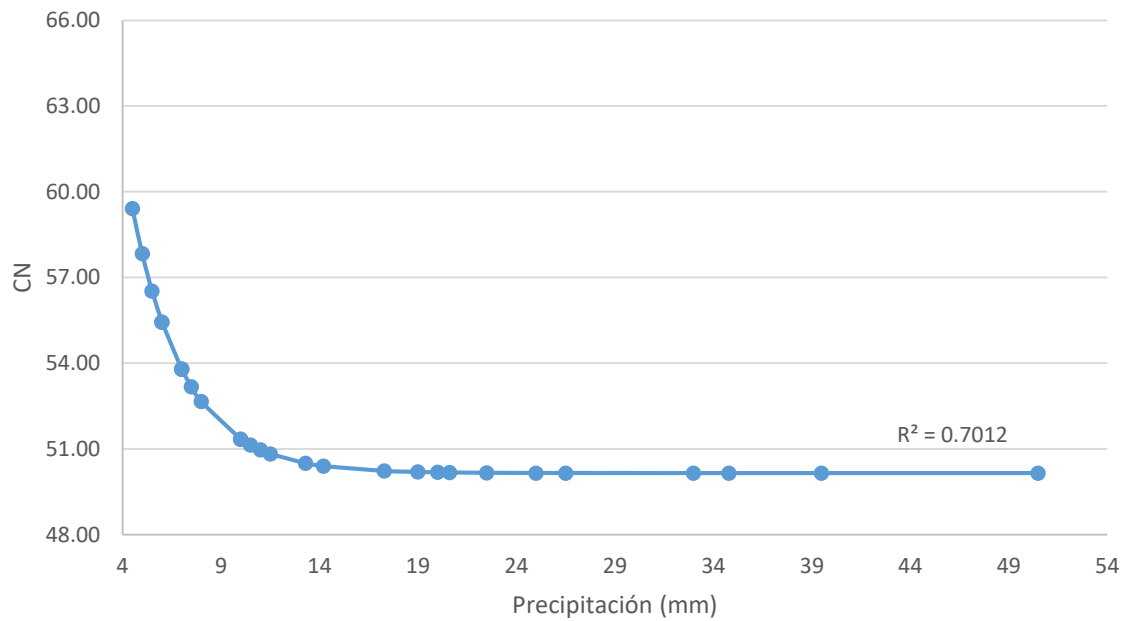


Figura 40. CN asintótico para una $k=0.37$.

Cuadro 20. CN representativo de la cuenca del río Chapingo para diferentes k .

k	CN	R^2
0.37	50.15	0.7012
0.38	56.26	0.6937
0.44	59.35	0.6374

El CN obtenido mediante el método asintótico (50.15), presenta una diferencia porcentual de 43.03% con respecto al valor promedio obtenido mediante regresión lineal múltiple (71.43).

Con lo anteriormente mencionado, se recomienda realizar una modelación hidrológica utilizando el mapa de CN obtenido, como complemento a dicha investigación y así observar el comportamiento de los escurrimientos después del tránsito de avenidas.

Con la metodología propuesta, se pudieran adecuar los CN para las condiciones que hay en México, ya que los factores involucrados se obtienen fácilmente a través de tecnología SIG y Teledetección.

El análisis multivariado en la relación de los factores que influyen en el CN resulta ser de gran ayuda. Sin embargo, sería conveniente involucrar otros factores que afectan el escurrimiento, o bien, las firmas de escurrimiento las cuales son campo de estudio en otros países.

A pesar de contar con un mapa de vegetación del año 2013 y obtenido a través de una clasificación supervisada de la zona realizada por Márquez (2013), se recomienda actualizarlo ya que se observó que algunas partes agrícolas han quedado abandonadas y ahora son pastizales.

Además, la mala calidad de la información existente en las estaciones meteorológicas y de aforo, son un factor influyente en el análisis de la información para futuras propuestas. Este problema viene arrastrándose desde la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos, por lo que sería de gran utilidad ordenar las bases de datos, rellenar datos faltantes y utilizar las nuevas tecnologías de imágenes satelitales Goes, para la realización de una base de datos más completa de la precipitación.

El CN como factor influyente en los escurrimientos se basa en las condiciones que existen en USA, este método sería una propuesta para adecuar los CN a las condiciones que hay en México. Además, factores que influyen en el CN para la zona de estudio son fáciles de obtener a partir de teledetección y SIG por lo que minimiza costos y tiempo en futuros proyectos.

9 LITERATURA CITADA

- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M. de los, & Aguirre-Salado, A. I. (2011). Mapeo del índice de área Foliar y cobertura Arbórea mediante fotografía Hemisférica y datos SPOT 5 HRG: Regresión y K-NN. *Agrociencia*, 45(1), 105–119.
- Ahmad, I. (2018). Digital elevation model (DEM) coupled with geographic information system (GIS): an approach towards erosion modeling of Gumara watershed, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 568. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6888-8>
- Ahmad, I., Dar, M. A., Teka, A. H., Gebre, T., Gadissa, E., & Tolosa, A. T. (2019). Application of hydrological indices for erosion hazard mapping using Spatial Analyst tool. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(8), 482. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7614-x>
- Aparicio Mijares, F. J. (2010). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Francisco Javier Aparicio Mijares. (G. N. Editores, Ed.). México: Limusa.
- Banasik, K., & Woodward, D. (2010). Empirical determination of Runoff Curve Number for a Small Agricultural Watershed in Poland. En *2nd Joint Federal Interagency Conference* (pp. 75–86). Las Vegas Nevada, United States Of America.
- Bannari, A., Ghadeer, A., El-Battay, A., Hameed, N. A., & Rouai, M. (2017). *Global Changes and Natural Disaster Management: Geo-inf*Bannari, A., Ghadeer, A., El-Battay, A., Hameed, N. A. y Rouai, M. (2017) *Global Changes and Natural Disaster Management: Geo-information Technologies, Global Changes and Natural Disaster Management: .* (S. Pirasteh & J. Li, Eds.), *Global Changes and Natural Disaster Management: Geo-information Technologies*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51844-2>
- Beck, H. E., de Jeu, R. A. M., Bruijnzeel, L. A., Schellekens, J., & van Dijk, A. I. J. M. (2009). Improving Curve Number Based Storm Runoff Estimates Using Soil Moisture Proxies. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2(4), 250–259. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2009.2031227>

- Beven, K. J., & Kirby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bishop, M. P., James, L. A., Shroder, J. F., & Walsh, S. J. (2012). Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. *Geomorphology*, 137(1), 5–26. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.027>
- Braux, H. J. (1967). *On stepwise multiple linear regression*.
- Chen, J. M. (2018). *Remote Sensing of Leaf Area Index and Clumping Index*. *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10540-8>
- Chin, D. A. (2017). Estimating the Parameters of the Curve Number Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(6), 06017001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001495](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001495)
- Chong, S.-K., & Teng, T.-M. (1986a). *RELATIONSHIP BETWEEN THE RUNOFF CURVE NUMBER AND HYDROLOGIC SOIL PROPERTIES**. *Journal of Hydrology* (Vol. 84).
- Chong, S.-K., & Teng, T.-M. (1986b). Relationship between the runoff curve number and hydrologic soil properties. *Journal of Hydrology*, 84(1–2), 1–7. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90041-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90041-7)
- Christianson, R. D., Hutchinson, S. L., & Brown, G. O. (2016). Curve Number Estimation Accuracy on Disturbed and Undisturbed Soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(2), 04015059. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001274)
- Das, P. (2016). Morphometric Diversity on Kuya River Basin. *International Research Journal of Earth Sciences*, 4(4), 17–28.
- Day, P. R. (1965). Particle Fractionation and Particle-Size Analysis (pp. 545–567). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c43>
- Desboulets, L. D. (2018). A Review on Variable Selection in Regression Analysis. *Econometrics*, (2015), 1–27. <https://doi.org/10.3390/econometrics6040045>

- Fan, F., Deng, Y., Hu, X., & Weng, Q. (2013). Estimating Composite Curve Number Using an Improved SCS-CN Method with Remotely Sensed Variables in, (1), 1425–1438. <https://doi.org/10.3390/rs5031425>
- Fan, L., Gao, Y., Brück, H., & Bernhofer, C. (2009). Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1–2), 151–156. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0369-2>
- Florinsky, I. V. (2017). An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 20(10), 1–30. <https://doi.org/10.1177/0309133317733667>
- Fu, P., & Rich, P. M. (2002). A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37(1–3), 25–35. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00115-1](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00115-1)
- Gandini, M. (2004). SCS CURVE NUMBER ESTIMATION USING REMOTE SENSING NDVI IN A GIS. *Journal of Environmental Hydrology*, 2(September).
- Garcia, G. P. B., & Grohmann, C. H. (2019). DEM-based geomorphological mapping and landforms characterization of a tropical karst environment in southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 93(March), 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.04.013>
- Gitelson, A. A., Viña, A., Arkebauer, T. J., Rundquist, D. C., Keydan, G., & Leavitt, B. (2003). Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophysical Research Letters*, 30(5), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2002GL016450>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Hawkins, R. H. (1993). Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(2), 334–345. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:2\(334\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:2(334))

- Hawkins, R. H., Ward, T. J., Woodward, E., & Van Mullem, J. a. (2010). Continuing evolution of rainfall-runoff and the curve number precedent. *2nd Joint Federal Interagency Conference*, 2–12.
- Klute, A., Klute, A., & Dirksen, C. (1986). Hydraulic Conductivity and Diffusivity: Laboratory Methods. En Madison (Ed.), *Methodsof soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods*. WI,USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
- Kuchment, L. S. (2004). The Hydrological Cycle and Human Impact on it. En *Water Resources Management, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Recuperado de <http://www.eolss.net/ebooks/Sample Chapters/C07/E2-16-10-01.pdf>
- Kumar, L., Skidmore, A. K., & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), 475–497. <https://doi.org/10.1080/136588197242266>
- Maity, R. (2018). *Statistical Methods in Hydrology and Hydroclimatology. Statistical methods in hydrology*. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8779-0>
- Mc Cuen, R. H. (2004). *Hydrologic Analysis and Design. Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers* (Second). New Jersey, United States: Pearson Education Prentice-Hall.
- Mccuen, R. H., Johnson, P. A., & Ragan, R. M. (2002). *HDS-2 - Highway Hydrology - second edition*.
- Moore, I. D., & Burch, G. J. (1986). Modelling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 29(6), 1624–1630. <https://doi.org/10.13031/2013.30363>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

- Muche, M. E., Hutchinson, S. L., Hutchinson, J. M. S., & Johnston, J. M. (2019). Phenology-adjusted dynamic curve number for improved hydrologic modeling. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.115>
- Murtaugh, P. A. (1998). Methods of variable selection in regression modeling. *Communications in Statistics Part B: Simulation and Computation*, 27(3), 711–734. <https://doi.org/10.1080/03610919808813505>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., & Williams, J. R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual. TWRI Report TR-192*. Texas. Recuperado de <http://swat.tamu.edu/media/1294/swatuserman.pdf>
- NRCS. (1972). *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook: Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. National Engineering Handbook*.
- NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Recuperado de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Urban+Hydrology+for+Small+watersheds#1>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO). (2009). *Guía para la descripción de suelos. Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación* (Vol. 3). Recuperado de [file:///C:/Users/Alina Belen Ortiz/Downloads/a0541s00 \(1\).pdf](file:///C:/Users/Alina%20Belen%20Ortiz/Downloads/a0541s00%20(1).pdf)
- Ortiz Villanueva, B., & Ortíz Solorio, C. (1980). *Edafología*. Chapingo, México: Universidad autónoma Chapingo.
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: A brief guide. En *Developments in Soil Science* (Vol. 33, pp. 3–30). [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9)
- Rich, P. M., Dubayah, R., Hetrick, W. A., & Saving, S. C. (1994). Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. *American Society for*

Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, 524–529.

- Roa Lobo, J., & Kamp, U. (2012). Use of the topographic wetness index (TWI) for the diagnosis of the river overflow threat, Trujillo State-Venezuela. *Revista Geografica Venezolana*, 53(1), 109–126.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium* (Vol. 1). Recuperado de <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19740022614.pdf>
- Saha, S., Paul, G. C., & Hembram, T. K. (2019). Classification of terrain based on geo-environmental parameters and their relationship with land use/land cover in Bansloi River basin, Eastern India: RS-GIS approach. *Applied Geomatics*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12518-019-00277-4>
- Salmerón, R., García, C. B., & García, J. (2018). Variance Inflation Factor and Condition Number in multiple linear regression. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 88(12), 2365–2384. <https://doi.org/10.1080/00949655.2018.1463376>
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., & Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1169–1188. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x>
- Sefton, C. E. ., & Howarth, S. . (1998). Relationships between dynamic response characteristics and physical descriptors of catchments in England and Wales. *Journal of Hydrology*, 211(1–4), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00163-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00163-2)
- Şen, Z. (2015). Basic Porous Medium Concepts. En *Practical and Applied Hydrogeology* (pp. 43–97). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800075-5.00002-9>
- Shi, Z. H., Chen, L. D., Fang, N. F., Qin, D. F., & Cai, C. F. (2009). Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *Catena*, 77(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.11.006>
- Singh, J., Knapp, H., & Demissie, M. (2005). Hydrologic modeling of the Iroquois River

- watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. *Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey*, 61820, 343–360. Recuperado de <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Hydrologic+Modeling+of+the+Iroquois+River+Watershed+Using+HSPF+and+SWAT#3>
- Sorensen, R., Zinko, U., & Seibert, J. (2005). On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2(4), 1807–1834. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Thompson, D. B., Harle, H. K., & Keister, H. (2003). *Climatic Adjustments of Natural Resource Conservation Service (NRCS) Runoff Curve Numbers*.
- Tucker, C. J., & Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395–1416. <https://doi.org/10.1080/01431168608948944>
- Visessri, S., & McIntyre, N. (2016). Regionalisation of hydrological responses under land-use change and variable data quality. *Hydrological Sciences Journal*, 61(2), 302–320. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1006226>
- Weiss, A. D. (2001). Topographic Positions and Landforms Analysis. En *ESRI International User Conference*. (p. 2). Recuperado de http://www.jennessent.com/downloads/TPI-poster-TNC_18x22.pdf
- Willmott, C. J. (1981). ON THE VALIDATION OF MODELS. *Physical Geography*, 2(2), 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Wilson, P. J., & Gallant, J. C. (2000). Digital Terrain Analysis. En *Terrain Analysis: Principles and Applications* (pp. 1–28). John Wiley & Sons, Inc. [https://doi.org/10.1016/s0925-8574\(00\)00178-6](https://doi.org/10.1016/s0925-8574(00)00178-6)
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. . (1978). *Predicting rainfall erosion Losses: A guide to conservation Planning*. *Agriculture Handbook*.

- Wu, X.-J., & Dong, Y. (2017). Identify of Runoff Influence Factors in Coal Mining Area Based on Stepwise Regression Analysis. En *Proceedings of the 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017)* (Vol. 120, pp. 1502–1505). Paris, France: Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/ifeesm-17.2018.273>
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(1), 47–56. <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>
- Zhang, Y., Chiew, F. H. S., Li, M., & Post, D. (2018). Predicting Runoff Signatures Using Regression and Hydrological Modeling Approaches. *Water Resources Research*, 54(10), 7859–7878. <https://doi.org/10.1029/2018WR023325>