

Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación

• Adolfo López-Pérez • Mario R. Martínez-Menes* •
• Demetrio S. Fernández-Reynoso •
Colegio de Postgraduados, México

*Autor de correspondencia

Resumen

López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández Reynoso, D. S. (enero-febrero, 2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 121-137.

La caracterización morfométrica y el análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) puede ser una estrategia en los programas de restauración hidrológica ambiental de cuencas, ya que la interrelación entre el área, forma, relieve, sistema de drenaje y los cambios de la cobertura vegetal causada por la alteración antropogénica permite hacer una priorización de subcuencas para su intervención con prácticas productivo-conservacionistas, a fin de reducir el crecimiento de los sistemas de drenaje en zonas con presencia de eventos meteorológicos extremos que causan deslaves y provocan inundaciones en las partes bajas de las cuencas. El estudio se realizó en la cuenca del río Huehuetán, ubicada en la región del Soconusco del estado de Chiapas, México, con el objetivo de estimar los parámetros morfométricos (lineales y de forma) de 16 subcuencas, así como el NDVI para los años 1993 y 2013, para priorizar los cambios en la cobertura vegetal que afectan la degradación del suelo de las subcuencas para la restauración hidrológica. La metodología permitió definir el orden de intervención de las subcuencas con prácticas de conservación del suelo, agua y obras de control de azolves, para reducir los procesos de erosión hídrica, el crecimiento del sistema de drenaje y la capacidad de transporte del flujo superficial en laderas y cauces.

Palabras clave: NDVI, cuenca, conservación, LandSat, sensores remotos.

Introducción

El análisis de los procesos hidrológicos asociados con las características morfométricas de las cuencas hidrográficas, en especial cuando se presentan eventos meteorológicos extremos provocados por las tormentas tropicales y cambios de uso del suelo, han sido estudiados por diferentes autores (Delgado & Gaspari,

Abstract

López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández Reynoso, D. S. (January-February, 2015). Prioritization of Intervention Areas using a Morphometric Analysis and Vegetation Index. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(1), 121-137.

Morphometric characterizations and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) can be used as a strategy for the environmental hydrological restoration of basins, since identifying the interrelation among the area, shape, topography, drainage system and changes in vegetation due to anthropogenic factors enables prioritizing the application of productive-conservation interventions in sub-basins. The purpose of this is to reduce the growth of drainage systems in regions with extreme meteorological events that cause landslides and flooding in lower portions of basins. The study was performed in the Huehuetan River Basin located in the Soconusco region of the state of Chiapas, Mexico. Its objective was to estimate the morphometric parameters (linear and shape) of 16 sub-basins, as well as the NDVI for the years 1993 and 2013, in order to prioritize changes in vegetation cover that affect the degradation of the soil in the sub-basin, for the purpose of hydrological restoration. The methodology enabled defining the order of intervention (water and soil conservation practices and sediment control works) in the sub-basins so as to reduce hydric erosion, the growth of the drainage system and the transport capacity of surface flow through hillsides and rivers.

Keywords: NDVI, watershed, conservation, LandSat, remote sensing.

Recibido: 20/01/14
Aceptado: 25/07/14

2010). El comportamiento hidrológico de las cuencas, asociado con el análisis morfométrico ha recibido una amplia atención y aceptación por los hidrólogos y geomorfólogos debido a la facilidad para analizar los procesos físicos complejos y su relación precipitación-escurrimiento (Javed, Khanday, & Rais, 2011; Mahadevaswamy *et al.*, 2011; Srinivasa-Raju & Nagesh-Kumar, 2011; Sarma & Saikia, 2012). La

integración de los parámetros morfométricos con las características hidrológicas de las áreas de drenaje es esencial, ya que permite una mejor planificación y formulación de estrategias para la adecuada conservación de los recursos naturales y el establecimiento de prácticas de manejo para la restauración hidrológica (Srinivasa-Raju & Nagesh-Kumar, 2011).

El análisis cuantitativo de los parámetros morfométricos ayuda en la elaboración de diagnósticos hidrológicos preliminares para predecir de forma aproximada si el comportamiento de la cuenca está relacionado con la geología y geomorfología, en especial para la ubicación de movimientos en masa de los suelos y el crecimiento del sistema de drenaje (Esper-Angillieri, 2008). La respuesta hidrológica de una cuenca está relacionada con las características morfométricas de la misma, tales como el tamaño, forma, pendiente, densidad, número de corrientes, longitud de los cauces, etc.; por lo tanto, el análisis morfométrico del área de drenaje debe ser el primer paso para comprender la dinámica de los procesos hidrológicos en las cuencas (Kanth & Hassan, 2012).

Los parámetros morfométricos han sido reportados como una distribución espacial que permite realizar comparaciones entre las unidades de drenaje a distintos niveles de intervención (cuenca, subcuenca, microcuenca o unidad de escurrimiento) y obtener resultados preliminares sobre las características del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales (Gaspari *et al.*, 2012); estos parámetros son índices cuantitativos que apoyan a los estudios hidrológicos de las cuencas para conocer el tránsito y los tiempos de concentración de los escurrimientos superficiales de las avenidas máximas extraordinarias provocadas por eventos meteorológicos extremos que originan inundaciones, y limitan las actividades productivas y recreativas del hombre (Zucarelli, 2013). Además, están asociados con el grado de saturación de los suelos que generan deslizamientos en masa, incrementando el sistema de drenaje (D'Odorico, Fagherazzi, & Rigon, 2005).

Horton (1945) señaló que las redes de drenaje podían ser estudiadas de modo cuantitativo con base en un modelo de órdenes de corrientes, que posteriormente fue modificado por Strahler (1964). Los parámetros morfométricos permiten caracterizar las unidades de intervención y correlacionarlos con otros atributos de las cuencas para conocer y evaluar los procesos hidrológicos, erosivos y de producción de sedimentos (Racca, 2010).

Por otro lado, la variación espacial y temporal de la cobertura vegetal en las áreas de drenaje influye en la respuesta de los suelos a eventos de lluvia de diferentes magnitudes e intensidades que generan cambios en el sistema de drenaje de las áreas de escurrimiento; por lo tanto, los índices de vegetación obtenidos a partir de sensores remotos, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), permiten conocer las condiciones de la cobertura vegetal y evaluar el porcentaje de cambio en el tiempo, ya que esto está asociado con los procesos de erosión y transporte de sedimentos (Alatorre, Beguería, & Vicente-Serrano, 2010).

El NDVI facilita la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación, y permite identificar la presencia de vegetación en la superficie y caracterizar su distribución espacial y temporal (Di *et al.*, 1994); Merg *et al.*, 2011); asimismo, explica la variación de la cobertura vegetal (reforestación y deforestación) y su efecto en el escurrimiento superficial (Hibbert, 1971; Johnson, 1998; Andréassian, 2004).

La presente investigación tiene como objetivo analizar la interacción de los parámetros morfométricos y NDVI de las subcuencas de la cuenca del río Huehuetán, en el estado de Chiapas, México, para priorizarlas de acuerdo con la variabilidad de los sistemas de drenaje y los riesgos de degradación originados por los procesos hidrológicos, con la finalidad de proponer la restauración hidrológica ambiental de la cuenca para minimizar los riesgos de inundaciones y el crecimiento del sistema de drenaje.

Metodología

Ubicación del área de estudio

La cuenca del río Huehuetán se localiza en el sureste del estado de Chiapas. Tiene una superficie de 317.51 km² desde la parte alta hacia la estación hidrométrica Huehuetán, ubicada en la carretera Arriaga-Tapachula, con las coordenadas geográficas 15° 05' 56" de latitud norte y 92° 24' 02" de longitud oeste, con una altitud de 30 m (figura 1). La delimitación de la cuenca y subcuencas se realizó en forma automatizada usando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en colaboración con la Universidad de Texas (Arnold, Williams, Nicks, & Sammons, 1990), con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) escala 1:20 000, con curvas a nivel cada 10 m, lo que permitió obtener con mayor precisión la red de drenaje de las 16 subcuencas

identificadas debido a la escala del MDE utilizado.

Obtención de la información morfométrica

Las características de área, perímetro, longitud del cauce principal, longitud total de cauces, pendiente del cauce principal, pendiente media de la subcuenca, elevación mínima, media y máxima, desnivel, número total de cauces y tiempo de concentración, se obtuvieron con el modelo SWAT; estos valores se usaron para estimar los parámetros morfométricos lineales (de relieve y de la red de drenaje) y de forma de las 16 subcuencas bajo estudio, con las ecuaciones propuestas en diferentes investigaciones o estudios (cuadro 1).

Los parámetros lineales y de forma, también conocidos como de evaluación del grado de degradación de los suelos por los sistemas de drenaje, se analizaron utilizando sus estadísticas descriptivas (mínimo, máximo, media,

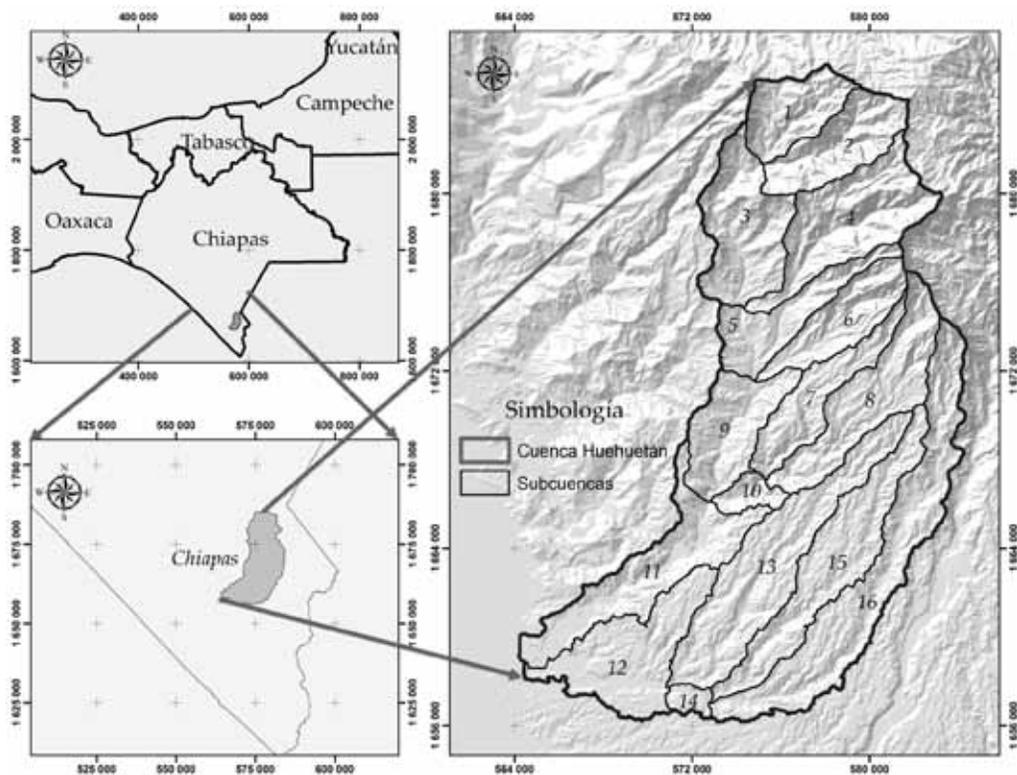


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Huehuetán y subcuencas delimitadas.

Cuadro 1. Fórmulas utilizadas para obtener los parámetros morfométricos de las subcuencas.

Parámetro	Ecuación	Autor	Año
Lineales			
Densidad de drenaje (km/km ²)	$D_d = \frac{L_{tc}}{A}$	Horton	1945
Densidad hidrográfica (cauces/km ²)	$D_h = \frac{L_u}{A}$	Horton	1945
Relación de bifurcación media	R_{bm} = promedio de la relación de bifurcación de cada uno de los órdenes	Strahler	1957
Textura del drenaje (cauces/km ¹)	$R_t = \frac{L_u}{P}$	Horton	1945
Longitud del flujo superficial (km)	$L_g = \frac{1}{2D_d}$	Horton	1945
De forma			
Relación de elongación	$R_e = \frac{2}{L_c} \times \left(\frac{A}{\pi}\right)^{0.5}$	Schumn	1956
Relación de circularidad	$R_c = \frac{4\pi A}{P^2}$	Miller	1953
Coefficiente de compacidad	$C_c = 0.2821 \frac{P}{A^{0.5}}$	Gravelius	1914
Factor de forma	$R_f = \frac{A}{L_c^2}$	Horton	1932
Forma de la cuenca	$B_s = \frac{L_c^2}{A}$	Horton	1932

Donde A es el área (km²); P , el perímetro (km); L_c , la longitud del cauce principal (km); L_u , el número total de cauces (adim.), y N_u es el número de orden.

desviación estándar y coeficiente de variación) para conocer su variabilidad en cada una de las áreas de drenaje para la priorización de subcuencas (Biswas, Sudhakar, & Desai, 1999).

La priorización de subcuencas mediante el análisis morfométrico se basa en la asignación de valores enteros ascendentes a cada parámetro morfométrico calculado, en función del grado de afectación que tienen sobre el crecimiento longitudinal y transversal del sistema de drenaje; los parámetros lineales, como relación de bifurcación media (R_{bm}), densidad de drenaje (D_d), densidad hidrográfica (D_h), textura del drenaje (R_t) y longitud del flujo superficial (L_g), tienen una relación directa con la degradación específica de las áreas de intervención, es decir, a mayores valores de estos parámetros, mayor es la degradación. Por lo tanto, al valor más alto de cada parámetro lineal se le asignó el valor de 1; al siguiente valor en orden descendente

se le asignó el valor 2 y así sucesivamente. En contraste, los parámetros de forma, como la relación de elongación (R_e), relación de circularidad (R_c), coeficiente de compacidad (C_c), factor de forma (R_f) y forma de la cuenca (B_s), tienen una relación inversa con la degradación específica de las áreas de intervención; es decir, a valores más bajos, mayor es la degradación; por lo tanto, al valor más bajo de estos parámetros se le asignó el valor de 1 y así de forma consecutiva (Biswas et al., 1999; Nooka-Ratnam et al., 2005; Javed, Khanday, & Ahmed, 2009; Kanth & Hassan, 2012; Kiran & Srivastasa, 2012; Tamang, Dhakal, Shresta, & Sharma, 2012; Tolessa & Rao, 2013).

Obtención del NDVI

El NDVI se obtuvo mediante el uso de imágenes de los satélites LandSat 5 TM para 1993 y

LandSat 8 OLI para 2013, de fechas 13/07/1993 y 20/07/2013, respectivamente. En ambas imágenes se aplicó la corrección atmosférica para eliminar las interferencias debido a las condiciones atmosféricas y nubosidad. Los valores de *NDVI* se obtuvieron utilizando la ecuación (1) para ambas imágenes (Hayes, 1985):

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (1)$$

Donde *NDVI* es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada; *IRC* y *R* corresponden a las bandas usadas para el cálculo, siendo las bandas 4 y 3 para el sensor TM y las bandas 5 y 4 para el sensor OLI, respectivamente.

Los valores de *NDVI* para cada subcuenca se agruparon utilizando como valores de referencia los propuestos por Merg *et al.* (2011) (cuadro 2).

La variación del *NDVI* para las diferentes fechas asociadas con la clasificación señalada se obtuvo mediante la aplicación de álgebra de mapas; a partir del análisis de píxeles se determinó la superficie para cada tipo de vegetación (*NA*, *SV*, *VL*, *VM* y *VA*) y para cada subcuenca; el porcentaje de cambio de superficie se estimó con la ecuación (2):

$$PCS_n = \frac{((SNDVI_{2013}) - (SNDVI_{1993}))_n}{St_n} \times 100 \quad (2)$$

Donde PCS_n es el porcentaje de cambio de superficie por cada tipo de vegetación (%); $SNDVI_{(2013, 1993)}$ corresponde a la superficie presente en el año evaluado (*ha*); St_n , la superficie de la subcuenca (*ha*), y *n* es el número de subcuenca.

Cuadro 2. Clasificación de los valores de *NDVI*.

Clasificación	Valor
Nubes y agua (NA)	< 0.01
Suelo sin vegetación (SV)	0.01 - 0.1
Vegetación ligera (VL)	0.1 - 0.2
Vegetación mediana (VM)	0.2 - 0.4
Vegetación alta (VA)	> 0.4

La priorización de las subcuencas por *NDVI* se realizó de acuerdo con los siguientes criterios:

1. Se eliminaron los valores de superficie para la clasificación de nubes y agua (*NA*).
2. Los *NDVI* de *SV* y *VL* tienen un impacto directo sobre la degradación específica; por lo tanto, valores mayores de esta variable tienen más prioridad.
3. Los *NDVI* de *VM* y *VA* tienen una relación inversa en el proceso de degradación, así que los valores menores tienen mayor impacto sobre la degradación específica y así tienen mayor prioridad.

Priorización de las áreas de intervención

Los parámetros morfométricos y el *NDVI* se clasificaron en función del grado de afectación que tienen sobre la degradación específica de los suelos; estos valores se promediaron para obtener un parámetro compuesto para morfometría (PC_m) y para *NDVI* (PC_{NDVI}); posteriormente se clasificaron de menor a mayor valor, considerando intervalos de clase para la priorización alta, media y baja, respectivamente (Biswas *et al.*, 1999; Nooka-Ratnam *et al.*, 2005; Javed *et al.*, 2009; Kanth & Hassan, 2012; Kiran & Srivastasa, 2012; Tamang *et al.*, 2012; Tolessa & Rao, 2013). El intervalo de clase se obtuvo utilizando los $PC_{m,NDVI}$ mediante las ecuaciones (3), (4) y (5):

$$\text{Int. clase (alto)} = \left[PC_{\min}, PC_{\min} + \left(\frac{PC_{\max} - PC_{\min}}{3} \right) \right] \quad (3)$$

$$\text{Int. clase (medio)} = \left[PC_{\min} + \left(\frac{PC_{\max} - PC_{\min}}{3} \right), PC_{\min} + 2 \times \left(\frac{PC_{\max} - PC_{\min}}{3} \right) \right] \quad (4)$$

$$\text{Int. clase (bajo)} = \left[PC_{\min} + 2 \times \left(\frac{PC_{\max} - PC_{\min}}{3} \right), PC_{\max} \right] \quad (5)$$

Donde $PC_{\text{mín,máx}}$ corresponden a los valores límite (inferior y superior) del parámetro compuesto; int. clase (alto, medio, bajo) son los tres intervalos de clase definidos a partir de la metodología.

La priorización de áreas de drenaje a distintos niveles de intervención (cuenca, subcuenca, microcuenca, unidad de escurrimiento) se basa en un esquema de optimización para la toma de decisiones multicriterio, a partir de parámetros compuestos y su interrelación entre cada uno de ellos (figura 2).

Resultados y discusión

Análisis morfométrico

La determinación del número de orden de las corrientes de una subcuenca es uno de los primeros pasos en el análisis morfométrico basado en la jerarquía propuesta por Strahler (1964); después las características de las subcuencas permitirán estimar los parámetros dimensionales y los valores esperados de tiempo de concentración de los escurrimientos (cuadro 3).

Donde P_{lc} es la pendiente del cauce principal (%); P_{mc} la pendiente media de la subcuenca; $Alt_{\text{mín, máx, med}}$ es la altitud mínima, máxima y media (m), respectivamente; H , el desnivel (m); T_c , el tiempo de concentración (h), y N_u es el número de orden de la subcuenca.

Las subcuencas se caracterizan por tener órdenes de corrientes entre III y V, dominando este último; las áreas de drenaje varían de 2.4 a 39.9 km², con un coeficiente de variación de más de 50%, con perímetros de más de 10 km, longitudes de las corrientes principales que varían de 2 a 28 km, longitudes totales de cauces de 10 a 205 km, pendientes medias de los cauces que fluctúan cerca de 3 a más de 21% y con pendientes medias de las subcuencas que varían de 16 a 68%, lo cual indica que se trata de subcuencas de características altamente contrastantes, asociadas con la degradación de los suelos y al aporte de escurrimientos superficiales a la corriente principal, que se magnifica con la presencia de tormentas tropicales, provocando avenidas torrenciales que ponen en riesgo de inundación las partes bajas de las cuencas, lo cual coincide con lo reportado por Villegas-Romero, Oropeza-

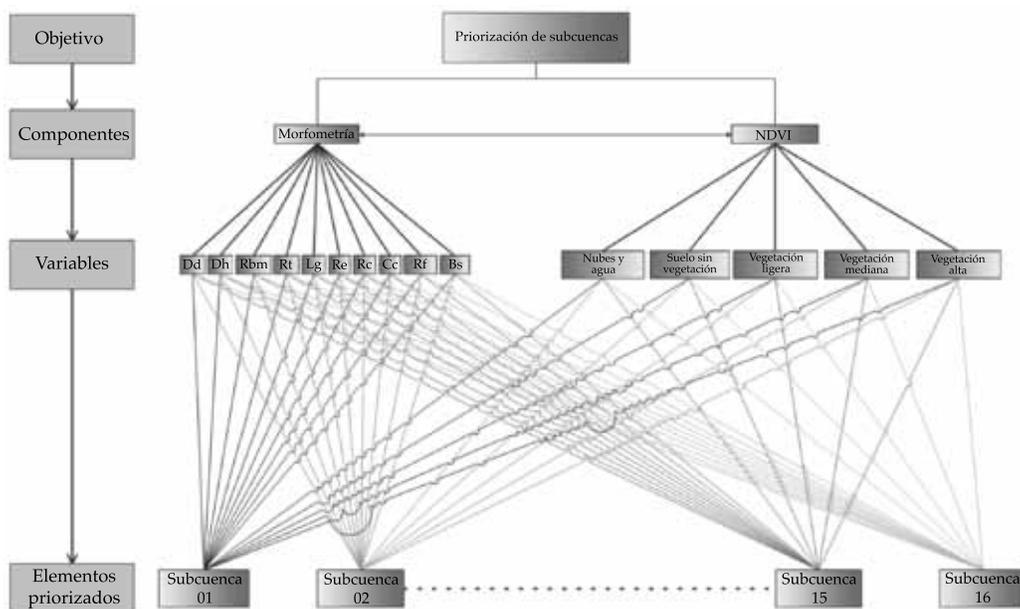


Figura 2. Metodología para la priorización de áreas de drenaje con base en el análisis morfométrico y NDVI.

Cuadro 3. Parámetros dimensionales de las subcuencas de estudio.

Subcuenca	A (km ²)	P (km)	L _c (km)	L _{tc} (km)	P _{lc} (%)	P _{mc} (%)	Alt _{min} (m)	Alt _{máx} (m)	Alt _{med} (m)	H (m)	L _n	T _c (h)	N _n
1	12.99	20.70	6.45	70.61	18.57	57.60	1 322	2 520	2 019	1 198	293	0.53	V
2	16.22	24.76	7.98	75.57	17.16	68.28	1 321	2 690	1 980	1 369	292	0.65	V
3	22.47	30.58	8.96	133.56	18.74	51.12	660	2 339	1 200	1 679	558	0.68	V
4	25.92	37.40	12.66	145.28	15.80	66.95	660	2 660	1 745	2 000	634	0.95	V
5	13.99	32.00	10.35	83.28	20.48	43.87	510	2 630	960	2 120	325	0.74	V
6	14.24	26.40	9.53	76.02	21.09	57.64	510	2 520	1 205	2 010	291	0.68	IV
7	14.33	33.94	14.11	75.20	12.66	39.37	350	2 136	852	1 786	285	1.13	IV
8	23.36	39.62	15.56	125.53	13.36	43.14	350	2 430	1 014	2 080	470	1.19	V
9	16.84	26.34	8.99	83.94	7.12	32.34	210	850	529	640	308	0.99	IV
10	3.85	12.76	3.93	14.42	10.79	39.16	213	637	414	424	56	0.45	III
11	25.71	53.82	16.41	99.92	3.84	23.16	30	660	246	630	314	2.00	IV
12	24.41	42.00	14.97	106.70	2.81	16.17	30	450	174	420	391	2.11	V
13	33.90	52.80	22.19	154.58	4.28	25.90	100	1 050	469	950	568	2.42	V
14	2.40	9.22	2.06	10.80	5.92	17.18	100	222	155	122	45	0.34	III
15	26.98	53.44	21.50	140.67	4.83	26.41	131	1 170	549	1 039	590	2.26	IV
16	39.90	72.64	28.60	205.92	6.39	32.80	133	1 960	613	1 827	817	2.53	IV
Mín.	2.40	9.22	2.06	10.80	2.81	16.17	30.00	222.00	155	122	45.00	0.34	
Máx.	39.90	72.64	28.60	205.92	21.09	68.28	1 322	2 690	2 019	2 120	817.00	2.53	
\bar{x}	19.84	35.53	12.77	100.13	11.49	40.07	414.38	1 683	883	1 268	389.81	1.23	
σ	9.96	16.63	7.04	50.46	6.52	16.66	410.52	919.78	611	680	205.80	0.76	
CV	50.18	46.80	55.17	50.40	56.76	41.58	99.07	54.66	69.25	53.61	52.80	62.20	

Mota, Martínez-Ménes, & Mejía-Sáenz (2009), quienes señalan que los gastos aumentan a medida que se incrementa el área de drenaje y están en función de la variación espacial de las precipitaciones y de las condiciones fisiográficas.

El coeficiente de variación de los parámetros dimensionales es mayor de 40; las pendientes de los cauces son menores que las pendientes medias; las altitudes de la cuenca varían de 30 a más de 2000 m, situación fisiográfica que ante lluvias torrenciales propicia zonas con mayores descargas de escurrimientos y sedimentos a altas velocidades hacia las partes bajas, generando problemas de inundaciones.

Los parámetros morfométricos se agruparon en lineales, esto es, aquellos que para su estimación requieren de la información de las corrientes; y los de forma, que toman en cuenta el área y perímetro de las subcuencas. Los parámetros lineales tienen menores coeficientes de variación que los de forma (cuadro 4) y

ambos influyen de diferente manera en el grado de degradación de los suelos y del tránsito del flujo superficial en laderas y cuencas.

Densidad de drenaje (D_d)

Este parámetro se asocia con la resistencia al intemperismo, permeabilidad de las rocas en formación, clima y vegetación; las subcuencas reportan valores de 3.75 a 5.95 km km⁻², con un coeficiente de variación de 13%, lo cual indica que están bien drenadas e influyen en la capacidad para producir un caudal superficial importante, lo cual concuerda con lo reportado por Nauyital (1994).

Densidad hidrográfica (D_h)

Indica qué valores altos están asociados con materiales impermeables de baja capacidad de infiltración, vegetación escasa y condiciones de

Cuadro 4. Parámetros morfométricos de las subcuencas analizadas.

Subcuenca	Parámetros lineales					Parámetros de forma				
	D_d	D_h	R_{bm}	R_t	L_g	R_e	R_c	C_c	R_f	B_s
1	5.436	22.556	2.415	14.155	0.092	0.631	0.381	1.620	0.312	3.203
2	4.659	18.002	2.156	11.793	0.107	0.569	0.332	1.734	0.255	3.926
3	5.944	24.833	2.189	18.247	0.084	0.597	0.302	1.820	0.280	3.573
4	5.605	24.460	1.899	16.952	0.089	0.454	0.233	2.072	0.162	6.183
5	5.953	23.231	3.217	10.156	0.084	0.408	0.172	2.413	0.131	7.657
6	5.340	20.439	2.294	11.023	0.094	0.447	0.257	1.974	0.157	6.380
7	5.246	19.882	1.834	8.397	0.095	0.303	0.156	2.529	0.072	13.884
8	5.374	20.120	1.741	11.863	0.093	0.350	0.187	2.312	0.096	10.370
9	4.985	18.290	1.668	11.693	0.100	0.515	0.305	1.811	0.208	4.799
10	3.749	14.559	1.678	4.389	0.133	0.563	0.297	1.835	0.249	4.016
11	3.886	12.213	1.697	5.834	0.129	0.349	0.112	2.994	0.095	10.474
12	4.371	16.018	2.132	9.310	0.114	0.372	0.174	2.398	0.109	9.181
13	4.560	16.756	1.647	10.758	0.110	0.296	0.153	2.558	0.069	14.525
14	4.500	18.750	1.696	4.881	0.111	0.849	0.355	1.679	0.566	1.768
15	5.213	21.866	1.625	11.040	0.096	0.273	0.119	2.902	0.058	17.127
16	5.162	20.478	1.658	11.247	0.097	0.249	0.095	3.244	0.049	20.506
Mín.	3.749	12.213	1.625	4.389	0.084	0.249	0.095	1.620	0.049	1.768
Máx.	5.953	24.833	3.217	18.247	0.133	0.849	0.381	3.244	0.566	20.506
\bar{x}	4.999	19.528	1.972	10.734	0.102	0.452	0.227	2.244	0.179	8.598
σ	0.658	3.518	0.423	3.803	0.015	0.161	0.093	0.506	0.133	5.505
CV	13.17	18.02	21.48	35.43	14.31	35.69	40.91	22.55	74.27	64.02

relieve pronunciadas (Kanth & Hassan, 2012; Kumar-Tamang, Dhakal, Shrestha, & Sharma, 2012). Para las subcuencas de la cuenca del río Huehuetán, se encontró una variación hasta de 12 cauces km², lo cual se explica con el coeficiente de variación estimado.

Relación de bifurcación media (R_{bm})

Es la relación promedio entre el número de cauces de un orden dado con el número de cauces del orden inmediato superior (Horton, 1932). Strahler (1957) demostró que la relación de bifurcación media (R_{bm}) presenta pequeños rangos de variación para diferentes regiones o ambientes, exceptuando aquellos que son fuertemente influenciados por la geología. Entre más altos sean los valores de la R_{bm} , mayor es el grado de torrencialidad del área de drenaje y está asociado con diferente respuesta de las crecidas, más si se combina

con otras características morfométricas, como el coeficiente de compacidad (Strahler, 1964). La R_{bm} está asociada con la forma, ya que cuanto más redondeada es el área de aporte, menor será la relación de bifurcación y mayor el riesgo de crecidas a la salida (Gregory & Walling, 1973; Patton, 1988; Sala & Gay, 1981). Los valores de la R_{bm} variaron entre 1.63 a 3.22, teniendo 10 subcuencas con valores menores a 2, seis con valores de 2 a 2.5 y sólo una fue mayor que 3.

Textura del drenaje (R_t)

Este parámetro es uno de los más importantes en el concepto de la geomorfología e indica la separación entre los cauces o tributarios (Londhe, Nathawat, & Subudhi, 2010; Pareta & Pareta, 2011); está influenciado por la litología, capacidad de infiltración y condiciones topográficas (Pareta & Pareta, 2011). Smith (1950) estableció una clasificación de la textura del

drenaje con base en los siguientes rangos: muy gruesa (< 2), gruesa (2 a 4), media (4 a 6), fina (6 a 8) y muy fina (> 8). Se encontró que las subcuencas 10, 11 y 15 pertenecen a la clase media, mientras que las restantes tienen una textura muy fina. La R_t varió de 4.39 a 18.25 cauces km^{-1} , con un coeficiente de variación de 35.4%.

Longitud del flujo superficial (L_g)

Horton (1945) define este parámetro como la longitud de recorrido del agua sobre la superficie del suelo antes de que se concentre en los canales tributarios; este valor es aproximadamente igual a la mitad del recíproco de la densidad de drenaje y se relaciona de forma inversa con la pendiente promedio del cauce, y es sinónimo de la longitud del flujo laminar en laderas (Javed *et al.*, 2009; Ramaiah, Gopalakrishna, Srinivasa-Vittala, & Najeeb, 2012). Los valores de L_g para las subcuencas analizadas variaron entre 0.084 y 0.133, indicando que el recorrido del escurrimiento superficial es mínimo antes de integrarse a los cauces de primer orden; este valor influye en el aporte de los volúmenes de agua al cauce principal y en la velocidad de concentración del flujo.

Relación de elongación (R_e)

Es la relación entre el diámetro de un círculo que tiene la misma área que la subcuenca y la longitud del cauce principal. Este parámetro es muy importante en el análisis de la forma de la cuenca, principalmente cuando se trata de conocer el comportamiento hidrológico de la misma (Schumm, 1956; Tolessa & Rao, 2013); los valores de la relación de elongación varían de 0.6 a 1.0 para una amplia variedad de geología y climas (Magesh, Jitheshlal, Chandrasekar, & Jini, 2013); valores entre 0.6 y 0.8 se asocian con relieves montañosos y pendientes pronunciadas (Strahler, 1964). Estos valores pueden ser agrupados en cinco categorías: circular (> 0.9), ovalada (de 0.8 a

0.9), menos alargada (de 0.7 a 0.8), alargada (0.5 a 0.7) y muy alargada (< 0.5) (Pareta & Pareta, 2011). Se encontró que 10 subcuencas son muy alargadas, mientras que cinco subcuencas son alargadas y la número 15 es de forma ovalada; tales valores están influenciados por las condiciones geológicas y climáticas de la región.

Relación de circularidad (R_c)

Miller (1953) definió este parámetro como la relación del área de la subcuenca y el área de un círculo con una circunferencia igual al perímetro de la subcuenca (Magesh *et al.*, 2013); toma valores de 1 para un círculo y 0.785 para un cuadrado. Este parámetro está influenciado principalmente por las características litológicas de la subcuenca (Sangita & Nagarajan, 2010; Magesh *et al.*, 2013), además de la longitud y densidad hidrográfica, estructuras geológicas, uso del suelo, clima, relieve y pendiente del área de drenaje (Ramaniah *et al.*, 2012); los valores bajos, medios y altos de la relación de circularidad son indicadores del estado joven, maduro y senil, respectivamente, del ciclo de vida de las áreas tributarias. Los valores extremos para las subcuencas analizadas estuvieron entre 0.095 y 0.381 para las subcuencas 11 y 1, respectivamente.

Coefficiente de compacidad (C_c)

Relaciona el perímetro de la cuenca y el de una circunferencia de área igual a la de la cuenca (Suresh, Sudhakar, Tiwari, & Chowdary, 2004; Javed *et al.*, 2011; Uniyal & Gupta, 2013). Este parámetro es independiente del tamaño de la cuenca y depende sólo de la pendiente (Pareta & Pareta, 2011). Una cuenca de forma circular es más susceptible a la degradación desde el punto de vista de drenaje, ya que el tiempo de concentración es menor y el gasto pico se presenta en corto tiempo (Nooka-Ratnam *et al.*, 2005). Campos-Aranda (1998) clasifica el C_c en tres clases: clase I (1.0-1.25, casi redonda a oval-oblonga); clase II (1.26-1.50, oval-redonda

a oval-oblonga), y clase III (de 1.51 a > 2 , de oval-oblonga a rectangular-oblonga). Los valores de C_c variaron entre 1.620 y 3.244; por lo tanto, todas las subcuencas se encuentran en la clase III, indicando que puede existir un incremento en la magnitud de las avenidas al menos en las salidas y el escurrimiento pico de la crecida puede manifestarse de forma muy fuerte en el cauce principal. Este parámetro es un indicador de la presencia de inundaciones en los poblados cercanos a cauces o arroyos, porque los escurrimientos superficiales llegan con rapidez al cauce principal (Maldonado de León, Palacios, Oropeza, Springall, & Fernández, 2001).

Factor de forma (R_f)

Implica la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud máxima o axial de la misma (Horton, 1945; Pareta & Pareta, 2011; Chirala, Nooka-Ratnam, & Murali-Krishna, 2012; Jasrotia, Kumar, & Aasim, 2012; Kanth & Hassan, 2012; Tamang *et al.*, 2012; Tolessa & Rao, 2013); esta última se obtiene midiendo la longitud del cauce principal hasta llegar al parteaguas del área de drenaje en el punto más alejado; en otras palabras, la longitud de la ruta más larga de una gota de agua. Las áreas de drenaje con valores cercanos a 0.7854 son circulares y presentan avenidas pico de corta duración, mientras que valores bajos indican cuencas alargadas con avenidas con picos atenuados y de duración más larga (Javed *et al.*, 2011; Londhe *et al.*, 2010; Tamang *et al.*, 2012). Para las subcuencas del río Huehuetán, se encontró que la mayoría tiende a ser de forma alargada, ya que son menores a 0.312, y sólo la subcuenca 14 reportó un valor de 0.566.

Forma de la cuenca (B_s)

Es la relación que existe entre la longitud del cauce principal al cuadrado y el área de la cuenca (Horton, 1945). Este parámetro indica el resultado directo de la evolución del sistema de drenaje en una cuenca en particular y debe

ser analizado tomando en consideración los valores de los parámetros como factor de forma, relación de circularidad y relación de elongación (Jawaharaj & Sakthivel, 2012). Este parámetro varió entre 1.768 y 20.506, para la subcuenca 14 y 16, respectivamente, teniendo un coeficiente de variación de 64%, sólo siendo superado por el CV del parámetro factor de forma (74.27%).

Priorización de las áreas de intervención (subcuencas) basada en el análisis morfométrico

Con base en los valores de los parámetros morfométricos, se obtuvo un valor promedio denominado parámetro compuesto (PC_m), que permitió ordenar las subcuencas, de tal manera que al valor menor de PC_m se le asignó el nivel de priorización (NP_m) de 1, incrementándose conforme el valor de PC_m de las subcuencas aumentó. De acuerdo con el rango de valores de PC_m se definieron los grados de priorización (GP_m), alto, medio y bajo (cuadro 5).

Los grados de prioridad (GP_m) están asociados con el orden de intervención de las subcuencas, de tal forma que ocho subcuencas tuvieron una alta prioridad, cubriendo 56.64% de la superficie total de la cuenca; cinco resultaron con una prioridad media, con 33.29%, y el resto de las subcuencas con una prioridad baja, cubriendo sólo 10.07% de área total. Resalta que los parámetros morfométricos de la parte alta son indicadores de las condiciones de relieve y de forma, que influyen en el grado de degradación de las áreas de drenaje.

Priorización de las subcuencas basada en el cambio de superficie ocupada por valores de NDVI

Los valores de NDVI para cada uno de los píxeles permitieron agrupar zonas con diferentes valores de NDVI y de acuerdo con los rangos de valores establecidos en el cuadro 2, se definieron las superficies con los diferentes

Cuadro 5. Priorización de subcuencas basada en el análisis morfométrico.

Subc.	Parámetros lineales					Parámetros de forma					PC_m	NP_m	GP_m
	D_d	D_h	R_{bm}	R_t	L_g	R_e	R_c	C_c	R_f	B_s			
1	4	4	2	3	13	15	16	1	15	2	7.50	4	Alto
2	11	12	5	5	6	13	14	3	13	4	8.60	9	Medio
3	2	1	4	1	15	14	12	5	14	3	7.10	1	Alto
4	3	2	7	2	14	10	9	8	10	7	7.20	2	Alto
5	1	3	1	11	16	8	6	11	8	9	7.40	3	Alto
6	6	7	3	9	11	9	10	7	9	8	7.90	6	Alto
7	7	9	8	13	10	4	5	12	4	13	8.50	8	Medio
8	5	8	9	4	12	6	8	9	6	11	7.80	5	Alto
9	10	11	13	6	7	11	13	4	11	6	9.20	11	Medio
10	16	15	12	16	1	12	11	6	12	5	10.60	14	Bajo
11	15	16	10	14	2	5	2	15	5	12	9.60	12	Bajo
12	14	14	6	12	3	7	7	10	7	10	9.0	10	Medio
13	12	13	15	10	5	3	4	13	3	14	9.20	11	Medio
14	13	10	11	15	4	16	15	2	16	1	10.30	13	Bajo
15	8	5	16	8	9	2	3	14	2	15	8.20	7	Alto
16	9	6	14	7	8	1	1	16	1	15	7.80	5	Alto

tipos de vegetación y su porcentaje (%), en relación con la superficie de cada subcuenca para los años 1993 y 2013 (cuadros 6 y 7).

Los cambios en las condiciones de la vegetación en los años de referencia indican el grado de alteración de la cobertura vegetal; los aumentos o reducciones de las superficies de cada tipo de vegetación permitió conocer la diferencia porcentual de cambio (cuadro 8). La máxima variación de la cobertura vegetal con base en el análisis del cambio de superficie de $NDVI$ se encontró en la clase de vegetación alta, ya que todos los porcentajes de cambio fueron negativos, principalmente en las subcuencas de la parte alta, lo cual está asociado con un deterioro considerable de la vegetación y con un incremento de los procesos de degradación del suelo.

Para la priorización del componente de cambio de cobertura vegetal en función del $NDVI$, se clasificaron considerando los criterios descritos antes; a los valores con mayor porcentaje de cambio de cobertura en las subcuencas

se les asignó la prioridad de 1 y así sucesivamente para cada clase; después se obtuvo el parámetro compuesto (PC_{NDVI}) para cada subcuenca; de tal forma que al valor menor de PC_{NDVI} se le asignó el NP_{NDVI} de 1, incrementándose conforme el valor de PC_{NDVI} aumentó. De acuerdo con el rango de valores de PC_{NDVI} se definieron los grados de priorización (GP_{NDVI}), alto, medio y bajo (cuadro 8). Cinco subcuencas que cubren 29.69% de la cuenca presentaron un grado de prioridad alto; otras cinco subcuencas reportaron una prioridad media, cubriendo 25.27% de la cuenca; las seis subcuencas restantes tuvieron un grado de prioridad baja, representando 45.04%.

Priorización de las áreas de intervención (subcuencas), considerando ambos componentes

Los parámetros compuestos de cada uno de los componentes (PC_m y PC_{NDVI}) permitió obtener un parámetro compuesto global (PC_g)

Cuadro 6. Superficie de las subcuencas, en función de la clasificación de NDVI para el año 2013.

Subcuenca	Superficie con NDVI										Superficie total ha
	NA		SV		VL		VM		VA		
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
1	0.00	0.00	8.46	0.65	86.40	6.66	316.62	24.42	885.33	68.27	1 296.81
2	0.00	0.00	5.04	0.31	87.21	5.38	526.50	32.47	1 002.87	61.84	1 621.62
3	0.00	0.00	0.36	0.02	16.74	0.74	172.80	7.68	2 061.54	91.57	2 251.44
4	0.00	0.00	20.25	0.78	148.14	5.72	620.19	23.93	1 802.61	69.57	2 591.19
5	0.00	0.00	0.45	0.03	29.61	2.08	92.43	6.49	1 301.31	91.40	1 423.80
6	0.00	0.00	0.00	0.00	32.76	2.30	145.80	10.24	1 244.88	87.46	1 423.44
7	0.00	0.00	0.36	0.03	2.52	0.18	117.63	8.21	1 312.83	91.59	1 433.34
8	0.00	0.00	0.09	0.00	21.06	0.90	133.02	5.70	2 180.70	93.40	2 334.87
9	0.09	0.01	1.26	0.08	5.94	0.36	47.25	2.85	1 602.36	96.71	1 656.90
10	0.00	0.00	0.09	0.02	0.18	0.05	9.27	2.38	379.62	97.55	389.16
11	2.43	0.10	18.54	0.73	60.66	2.38	250.65	9.83	2 217.33	86.97	2 549.61
12	0.27	0.01	3.69	0.16	6.57	0.28	176.22	7.50	2 163.78	92.05	2 350.53
13	0.00	0.00	0.18	0.01	18.81	0.53	143.37	4.06	3 368.43	95.40	3 530.79
14	0.00	0.00	0.18	0.06	2.88	0.89	43.83	13.52	277.38	85.54	324.27
15	0.00	0.00	0.00	0.00	3.69	0.14	117.09	4.32	2 591.91	95.55	2 712.69
16	0.00	0.00	0.00	0.00	1.71	0.04	144.72	3.57	3 904.20	96.39	4 050.63

Cuadro 7. Superficie de las subcuencas en función de la clasificación de NDVI para el año 1993.

Subcuenca	Superficie con NDVI										Superficie total ha
	NA		SV		VL		VM		VA		
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.77	0.37	1 292.04	99.63	1 296.81
2	0.00	0.00	0.09	0.01	0.72	0.04	18.54	1.14	1 602.27	98.81	1 621.62
3	0.09	0.00	0.09	0.00	0.27	0.01	19.71	0.88	2 231.28	99.10	2 251.44
4	0.00	0.00	0.09	0.00	0.63	0.02	16.83	0.65	2 573.64	99.32	2 591.19
5	0.00	0.00	0.36	0.03	0.90	0.06	10.08	0.71	1 412.46	99.20	1 423.80
6	0.00	0.00	0.27	0.02	3.33	0.23	39.87	2.80	1 379.97	96.95	1 423.44
7	0.00	0.00	0.63	0.04	3.24	0.23	11.25	0.78	1 418.22	98.95	1 433.34
8	6.21	0.27	14.94	0.64	18.54	0.79	50.13	2.15	2 245.05	96.15	2 334.87
9	0.00	0.00	0.09	0.01	0.36	0.02	5.94	0.36	1 650.51	99.61	1 656.90
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.07	388.89	99.93	389.16
11	0.00	0.00	2.07	0.08	14.94	0.59	135.63	5.32	2 396.97	94.01	2 549.61
12	0.00	0.00	0.00	0.00	4.32	0.18	93.69	3.99	2 252.52	95.83	2 350.53
13	0.00	0.00	0.27	0.01	0.99	0.03	25.83	0.73	3 503.70	99.23	3 530.79
14	0.00	0.00	0.45	0.14	3.60	1.11	48.69	15.02	271.53	83.74	324.27
15	0.00	0.00	0.72	0.03	1.98	0.07	13.59	0.50	2 696.40	99.40	2 712.69
16	10.44	0.26	33.21	0.82	27.09	0.67	61.11	1.51	3 918.78	96.74	4 050.63

Cuadro 8. Diferencia porcentual de las superficies de las subcuencas con base en el cambio de NDVI.

Subcuenca	Diferencia del cambio de superficie					Priorización					PC_{NDVI}	NP_{NDVI}	GP_{NDVI}
	NA* (%)	SV (%)	VL (%)	VM (%)	VA (%)	NA*	SV	VL	VM	VA			
1	--	0.65	6.66	24.05	-31.36	--	2	1	15	2	5.00	1	Alto
2	--	0.31	5.33	31.32	-36.96	--	4	3	16	1	6.00	2	Alto
3	--	0.01	0.73	6.80	-7.54	--	8	7	11	6	8.00	6	Medio
4	--	0.78	5.69	23.29	-29.76	--	1	2	14	3	5.00	1	Alto
5	--	0.01	2.02	5.78	-7.81	--	9	5	10	5	7.25	4	Alto
6	--	-0.02	2.07	7.44	-9.49	--	11	4	13	4	8.00	6	Medio
7	--	-0.02	-0.05	7.42	-7.35	--	10	14	12	7	10.75	11	Bajo
8	--	-0.64	0.11	3.55	-2.76	--	14	10	7	13	11.00	12	Bajo
9	--	0.07	0.34	2.49	-2.91	--	6	9	4	12	7.75	5	Medio
10	--	0.02	0.05	2.31	-2.38	--	7	13	3	14	9.25	8	Medio
11	--	0.65	1.79	4.51	-7.05	--	3	6	9	8	6.50	3	Alto
12	--	0.16	0.10	3.51	-3.78	--	5	11	6	11	8.25	7	Medio
13	--	--	0.50	3.33	-3.83	--	16	8	5	10	9.75	9	Bajo
14	--	-0.08	-0.22	-1.50	1.80	--	13	15	1	16	11.25	13	Bajo
15	--	-0.03	0.06	3.82	-3.85	--	12	12	8	9	10.25	10	Bajo
16	--	-0.82	-0.63	2.06	-0.36	--	15	16	2	15	12.00	14	Bajo

*Superficie eliminada al no ser significativa (ver cuadros 6 y 7).

a partir de la priorización de éstos mediante la asignación de valores ascendentes en función del PC_m y PC_{NDVI} obtenido para cada una de las subcuencas. Al valor menor de PC_s se le asignó el nivel de prioridad global (NP_g) de 1 y así de forma sucesiva; además, considerando los intervalos de clase entre los valores de NP_g , se definieron los grados de prioridad global (GP_g) de alto, medio y bajo de las subcuencas; es decir, los niveles de intervención globales, considerando los parámetros compuestos de las subcuencas (cuadro 9).

Con base en este análisis, se determinó que las subcuencas uno a cinco son de alta prioridad y representan 29.20% de la cuenca, siendo la subcuenca cuatro la de prioridad mas alta; seguida por cuatro subcuencas de prioridad media, que representan 25.89%, y

las restantes 44.91% corresponden a las de baja prioridad (figura 3).

Resalta la importancia de la metodología para la priorización de áreas de intervención, considerando la toma de decisiones multicriterio, ya que las principales áreas (subcuencas) a intervenir se encuentran en la parte alta de la cuenca y las de menor intervención en la parte baja (figura 3), lo cual refleja las condiciones que prevalecen en cada una de las subcuencas, mediante la combinación del análisis espacial de datos, el comportamiento hidrológico de éstas y el efecto que tiene la variación temporal de cobertura vegetal sobre los procesos de degradación del suelo y el transporte de sedimentos.

En la parte alta y media de la cuenca, los parámetros morfométricos y la variación temporal del NDVI tienen la misma influencia

Cuadro 9. Priorización final de los componentes analizados (morfometría y NDVI).

Subcuenca	PC_m (morfometría)	PC_{NDVI} (% de cambio de NDVI)	PC_g (componentes)	NP_g	GP_g
1	7.50	5.00	6.25	2	Alto
2	8.60	6.00	7.30	3	Alto
3	7.10	8.00	7.55	5	Alto
4	7.20	5.00	6.10	1	Alto
5	7.40	7.25	7.33	4	Alto
6	7.90	8.00	7.95	6	Medio
7	8.50	10.75	9.63	13	Bajo
8	7.80	11.00	9.40	11	Bajo
9	9.20	7.75	8.48	8	Medio
10	10.60	9.25	9.93	15	Bajo
11	9.60	6.50	8.05	7	Medio
12	9.00	8.25	8.63	9	Medio
13	9.20	9.75	9.48	12	Bajo
14	10.30	11.25	10.78	16	Bajo
15	8.20	10.25	9.23	10	Bajo
16	7.80	12.00	9.90	14	Bajo

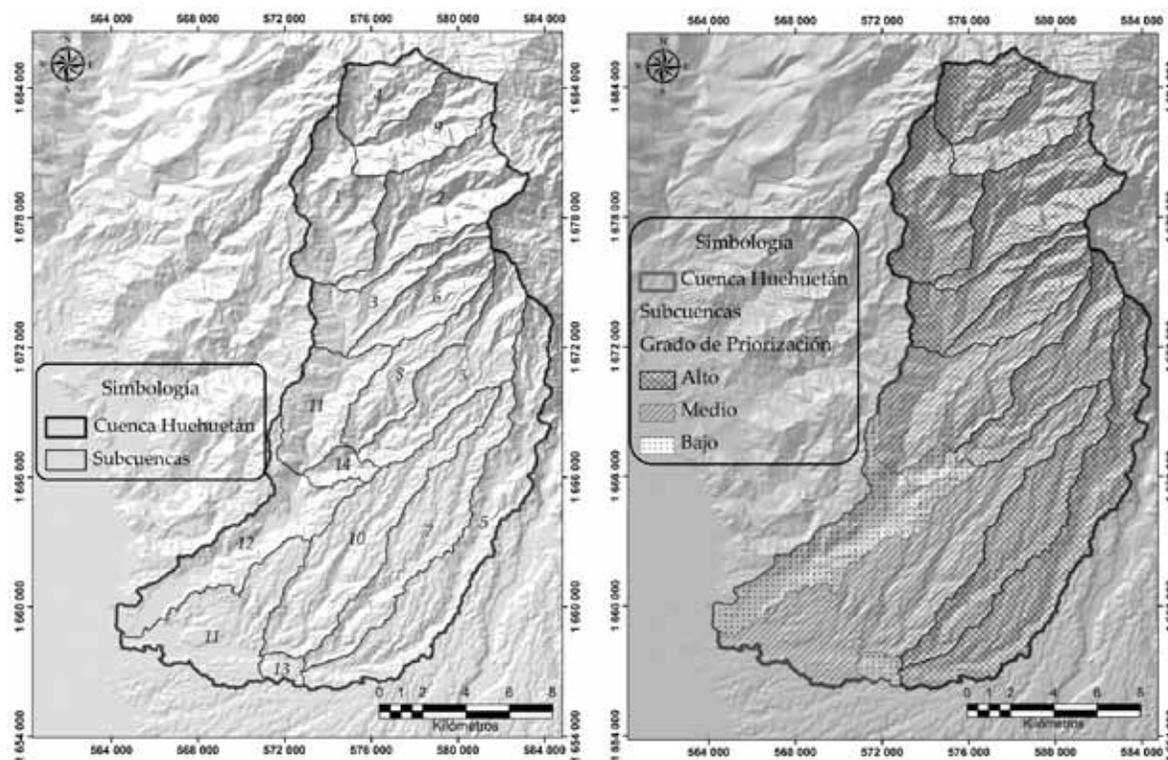


Figura 3. Nivel de priorización global (izquierda) y grado de priorización global (derecha) de las subcuencas de la cuenca del río Huehuetán.

en el grado de priorización por degradación; en contraste, en la parte baja de la cuenca, los parámetros morfométricos definen subcuencas con prioridad alta y media, y la variación de temporal del NDVI define subcuencas con prioridad baja, por lo que en el grado de priorización global, el NDVI tiene mayor impacto agrupando a las subcuencas en una prioridad baja.

El análisis morfométrico, combinado con los cambios del índice de vegetación multitemporal, permite asociar parámetros lineales y de forma, que están relacionados con las variables hidrológicas responsables del crecimiento de los sistemas de drenaje de las subcuencas y los cambios de la cobertura vegetal con el riesgo de degradación, que en conjunto permiten definir las áreas de intervención para la restauración hidrológica.

Conclusiones

La priorización de áreas de intervención basada en parámetros morfométricos y cambios de cobertura vegetal permitió identificar que cinco subcuencas de la parte alta de la cuenca, por sus parámetros lineales y de forma, asociados con las variables hidrológicas, son las que tienen mayor prioridad para la restauración hidrológica, a fin de reducir los impactos de las avenidas extraordinarias en las partes bajas de la cuenca.

La metodología puede utilizarse para la priorización de áreas de intervención tanto en el nivel cuenca como subcuenca, microcuenca y unidades de escurrimiento, dependiendo del tamaño del proyecto y la finalidad que éste tenga; sin embargo, es importante contar principalmente con un modelo de elevación digital a una escala que permita obtener con mayor precisión los parámetros morfométricos tanto lineales como de forma.

Referencias

Alatorre, L. C., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del

- NDVI sobre las áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central. *Pirineos. Revista de Ecología de Montaña*, 165, 7-27.
- Andréassian, V. (2004). Waters and Forests: From Historical Controversy to Scientific Debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1-27.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Nicks, A. D., & Sammons, N. B. (1990). *SWRRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management* (142 pp.). College Station, USA: Texas A & M University Press.
- Biswas, S., Sudhakar, S. And Desai, V. R. (1999). Prioritisation of Subwatersheds based on Morphometric Analysis of Drainage Basin: A Remote Sensing and GIS Approach. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 27(3), 155-166.
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico* (pp. 22-23). Tercera reimpresión. San Luis Potosí, México: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Luis Potosí, México.
- Chirala, U., Nooka-Ratnam, K., & Murali-Krishna, G. (2012). Correlation of Geomorphometric Parameters for the Hydrological Characterization of Meghadrigedda Watershed, Visakhapatnam, India – A GIS approach. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5(7), 3169-3183.
- D'odorico, P., Fagherazzi, S., & Rigon, R. (2005). Potential for Landsliding: Dependence on Hyetograph Characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1-10.
- Di, L., Rundquist, D. C., & Han, L. (1994). Modeling Relationships between NDVI and Precipitation during Vegetative Growth Cycles. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2121-2136.
- Delgado, M. I., & Gaspari, F. J. (septiembre-diciembre 2010). Caracterización morfométrica geoespacial. Estudio de caso: arroyo Belisario, Argentina. *Tecnociencia Chihuahua*, 4(3), 154-163.
- Esper-Angillieri, Y. (2008). Morphometric Analysis of Colangüil River Basin and Flash Flood Hazard, San Juan, Argentina. *Environmental Geology*, 55, 107-111.
- Gaspari, F. J., Rodríguez-Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Denegri, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina (pp. 1-25). *Actas 7mo. Congreso de Medio Ambiente AUGM*, UNLP, Argentina.
- Gregory, K. J., & Walling, D. E. (1973). *Drainage Basin Form and Process: A Geomorphological Approach* (456 pp.). London: Edward Arnold.
- Hayes, L. (1985) The Current Use of TIROS-N Series for Meteorological Satellites for Land-Cover Studies. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1), 35-45.
- Hibbert, A. R. (1971). Increases in Streamflow after Converting Chaparral to Grass. *Water Resources Research*, 7(1), 71-80.

- Horton, R. E. (1932). Drainage Basin Characteristics. *Trans. Am. Geophys. Unions*, 13, 350-361.
- Horton, R. E. (1945). Erosional Development of Streams and their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- Jasrotia, A. S., Kumar, A., & Aasim, M. (2012). Morphometric Analysis and Hydrogeomorphology for Delineating Groundwater Potential Zones of Western Doon Valley, Uttarakhand, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(4), 1078-1096.
- Javed, A., Khanday, M. Y., & Ahmed, R. (June, 2009). Prioritization of Sub-watersheds based on Morphometric and Land Use Analysis using Remote Sensing and GIS Techniques. *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 37(2), 261-274.
- Javed, A., Khanday, M. Y., & Rais, S. (2011). Watershed Prioritization Using Morphometric and Land Use/Land Cover Parameters: A Remote Sensing and GIS Based Approach. *Journal Geological Society of India*, 78, 63-75.
- Jawaharaj, N., & R. Sakthivel (2012). Quantitative Morphometric Analysis and its Consequences: A case Study from Gomukhiriver Basin, Tamil Nadu. *Int. Journal of Advances in Remote Sensing and GIS*, 1(2), 154-159.
- Johnson, R. (1998). The Forest Cycle and Low River Flows: A Review of UK and International Studies. *Forest Ecology and Management*, 109, 1-7.
- Kanth, T. A., & Hassan, Z. U. (enero-abril, 2012). Morphometric Analysis and Prioritization of Watersheds for Soil and Water Resource Management in Wular Catchment Using Geo-Spatial Tools. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences*, 2(1), 30-41.
- Kiran, V. S. S., & Srivastava Y. K. (July, 2012). Check Dam Construction by Prioritization of Micro Watershed, using Morphometric Analysis as a Perspective of Remote Sensing and GIS for Simlupal Block, Bankura, W. B. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, 2(Special Issue 1), 20-31.
- Kumar-Tamang, D., Dhakal, D., Shrestha, D. G. And Sharma, N. P. (2012). Morphometric Analysis and Prioritization of Miniwatersheds in Rongli Watershed, Sikkim (India) Using Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Fundamental & Applied Sciences*, 1(2), 61-66.
- Londhe, S., Nathawat, M. S., & A. P. Subudhi (2010). Erosion Susceptibility Zoning and Prioritization of Mini-Watersheds Using Geomatics Approach. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(3), 511-528.
- Magesh, N. S., Jitheshlal, K. V., Chandrasekar, N., & Jini, K. V. (2013). Geographical Information System-Based Morphometric Analysis of Bharathapuzha River Basin, Kerala, India. *Appl. Water Sci.*, 3(2), 467-477.
- Mahadevaswamy, G., Nagaraju, D., Siddalingamurthy, S., Lakshamma, M., Subhan, L., Nagesh, P. C., & Rao, K. (2011). Morphometric Analysis of Nanjangud Taluk, Mysore District, Karnataka, India, using GIS Techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(4), 721-734.
- Maldonado-De León, O. A., Palacios, O. L., Oropeza, J. L., Springall, R. G., & Fernández, D. S. (2001). Empleo del modelo SWRRB para generar alternativas de manejo en la cuenca de Iztapa, Guatemala. *Agrociencia* 35(2), 335-345.
- Merg, C., Petri, D., Bodoira, F., Nini, M., Fernández, M., Schmidt, F., Montalva, R., Guzmán, L., Rodríguez, K., Blanco, F., & Selzer, F. (2011). Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde. *Revista Pilquen, Sección Agronomía*, 13(11), 1-11.
- Miller, V. C. (1953). A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area (51 pp.). Technical report-3. New York: Department of Geology, Columbia University.
- Nauyital, M. D. (1994). Morphometric Analysis of a Drainage Basin using Aerial Photographs: A Case Study of Khairkuli Basin, District Dehradun, U. P. *J. Indian Soc. Remote Sensing*, 22(4), 251-261.
- Nooka-Ratnam, K., Srivastava, Y. K., Venkateshwara-Rao, V., Amminedu, E., & Murthy, K. S. R. (marzo, 2005). Check Dam Positioning by Prioritization of Micro-Watersheds using SYI Model and Morphometric Analysis – Remote Sensing and GIS Perspective. *J. Indian Soc. Remote Sensing*, 33(1), 25-38.
- Pareta, K., & Pareta, U. (2011). Quantitative Morphometric Analysis of a Watershed of Yamuna Basin, India using ASTER (DEM) Data and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2(1), 248-269.
- Patton, T. L. (1988). *Drainage Basin Morphometry and Floods* (pp. 51-65). In: V. R. Baker, R. C. Kochel, & P. C. Patton (Eds.). Wiley, USA: Flood Geomorphology.
- Racca, J. M. G. (2010). Geomorfología de la cuenca del Arroyo del Medio. *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 72-75, 13-42.
- Ramaiah, S. N., Gopalakrishna, G. S., Srinivasa-Vittala, S., & Najeeb, K. Md. (2012). Morphometric Analysis of Sub-Basins in and around Malur Taluk, Kolar District, Karnataka Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Nature Environment and Pollution Technology*, 11(1), 89-94.
- Sala, M., & Gay, R. (1981). Algunos datos morfométricos de la cuenca del Isábena. *Notas de Geografía Física*, 4, 41-65.
- Sangita, M. S., & Nagarajan, R. (2010). Morphometric Analysis and Prioritization of Sub-Watersheds Using GIS and Remote Sensing Techniques: A Case Study of Odisha, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 1(3), 501-510.
- Sarma, S., & Saikia, T. (2012). Prioritization of Sub-Watersheds in Khanapara-Bornihat Area of Assam-Meghalaya (India) Based on Land Use and Slope Analysis Using Remote Sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 40(3), 435-446.

- Schumm, S. A. (1956). Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Anboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67, 597-646.
- Smith, K. G. (1950). Standards for Grading Texture of Erosional Topography. *American Journal Science*, 248, 655-668.
- Srinivasa-Raju, K., & Nagesh-Kumar, D. (2011). Classification of Microwatersheds Based on Morphological Characteristics. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5, 101-109.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *American Geophysical Union Transactions*, 38, 913-920.
- Strahler, A. N. (1964). Quantitative Geomorphology of Drainage Basin and Channel Networks (pp. 4-39/4-76). In V. T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw Hill.
- Suresh, M., Sudhakar, S., Tiwari, K. N., & Chowdary, V. M. (2004). Prioritization of Watersheds Using Morphometric Parameters and Assessment of Surface Water Potential Using Remote Sensing. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 32(3), 249-259.
- Tamang, D. K., Dhakal, D., Shresta, D. G., & Sharma, N. P. (2012). Morphometric Analysis and Prioritization of Miniwatersheds in Rongli Watershed, Sikkim (India) Using Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 1(3), 61-66.
- Tolessa, G. A., & Rao, P. J. (February, 2013). Watershed Development Prioritization of Tandava River Basin, Andhra Pradesh, India – GIS Approach. *International Journal of Engineering Science Invention*, 2(2), 12-20.
- Uniyal, S., & Gupta, P. (2013). Prioritization Based on Morphometric Analysis of Bhilangana Watershed Using Spatial Technology. *International Journal of Remote Sensing and Geoscience*, 1(1), 49-52.
- Villegas-Romero, I., Oropeza-Mota, J. L., Martínez-Ménes, M., & Mejía-Sáenz, E. (2009). Trayectoria y relación lluvia-escorrentamiento causados por el huracán *Paulina* en la cuenca del río La Sabana, Guerrero México. *Agrociencia*, 43(4), 345-356.
- Zucarelli, G. V. (November-December, 2013). Identificación de eventos hídricos extremos en la cuenca del río Paraná. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4(5), 181-187.

Dirección institucional de los autores

M.C. Adolfo López-Pérez
 Dr. Mario R. Martínez-Menes
 Dr. Demetrio S. Fernández-Reynoso

Colegio de Postgraduados
 Postgrado de Hidrociencias
 km 36.5 carretera México-Texcoco
 56230 Texcoco, Estado de México, MÉXICO
 Teléfono: +52 (59) 5952 0200, extensiones 1213 y 1163
 adolfholp@colpos.mx
 mmario@colpos.mx
 demetrio@colpos.mx