

Áreas de conservación en subcuencas aportadoras del sistema hidroeléctrico Grijalva, México

Itzel Castro Mendoza

e-mail: castro.itzel@inifap.gob.mx

Walter López Báez

e-mail: lopez.walter@inifap.gob.mx

Campo Experimental Centro de Chiapas del INIFAP,
Programa Manejo Integral de Cuencas, México.

Marcos Antonio López Hernández

e-mail: marccruz_5@hotmail.com

Luis Fernando Guillén Villar

e-mail: fgv.luis30@gmail.com

Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Ciencias de la Tierra, México.

RESUMEN

El Fondo Semilla de Agua busca aumentar la efectividad de la inversión en la conservación de seis subcuencas para disminuir el azolvamiento de las presa Chicoasén y La Angostura en Chiapas, México. Para ello se calcula la aportación de sedimentos y erosión de cada subcuenca a las presas a través de la plataforma Soil and Water Assessment Tool, (SWAT) y de álgebra de mapas para la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS), respectivamente, lo anterior como insumo del taller de generación de criterios para seleccionar los sitios más adecuados a conservar. La superficie total del área de estudio es de 850770 ha de las cuales solo es sujeta a conservación 120 759,18 ha, es decir el 14%.

Palabras claves: conservación, erosión, presas, sedimentos, subcuencas.

Conservation areas of subbasins which tribute to Grijalva hydroelectric system, México

SUMMARY

The Water Seed Foundation looks for the effective investment of conservation areas in six tributary subbasins in order to reduce the reservoir bottom profile (sediment deposition) of Chicoasén and La Angostura dams at Chiapas, México. As inputs to the conservation criteria workshop it was calculated the sediment and erosion contribution of each subbasin by map algebra for the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Soil and Water Assessment Tool (SWAT). As a result only 14% (120 759,18 ha) of the total area of subbasins (850 770 ha) are prospected for conservation.

Keywords: conservation, erosion, dams, sediments, subbasins.

INTRODUCCIÓN

El Fondo de Semilla de Agua vincula los sectores privado, público y organizaciones de la sociedad civil y académica, con el fin de conservar y restaurar las cuencas del Alto Grijalva, Sierra Madre y Costa de Chiapas para proteger las fuentes de agua dulce y apoyar el crecimiento sostenible. Estas cuencas son fundamentales para la captación de agua, biodiversidad, actividades industriales y servicios ya que abastecen al complejo hidroeléctrico más grande del país. El presente trabajo se ubica en la segunda etapa de consolidación del Fondo Semilla de Agua, y su foco de interés es el sistema hidroeléctrico ubicado en la cuenca del Alto Grijalva integrado por las centrales hidroeléctricas La Angostura y Chicoasén ya que éstas producen el 40% de la energía de todo México, sin embargo la gran cantidad de azolves producto de la erosión y desechos sólidos, como plásticos, disminuyen su capacidad de producción como generadores de electricidad y reguladores de caudales extremos.

Durante la primera etapa se determinaron aquellas subcuencas con mayor aportación a las presas. Al conservar estas subcuencas se obtiene un mayor impacto en la disminución de azolves por lo tanto la erosión y producción de sedimentos se consideran las principales variables a ser mitigadas a través de la delimitación de sitios de conservación. Para el caso de la erosión se aplica la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) mientras que para determinar los principales los sitios de sedimentación la plataforma Soil and Water Assessment Tool, conocida como SWAT. Una vez calculadas dichas variables, a través de un taller de generación de criterios, en el cual se consultaron a distintos expertos en las subcuencas de interés, se establecieron las reglas de decisión para determinar los sitios de conservación.

UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Se determinan tres subcuencas de la cuenca R. Grijalva-Tuxtla Gutiérrez: R. Hondo, R. Santo Domingo y Tuxtla Gutiérrez con un total de 3 192 km², y para la cuenca del R. Grijalva-La Concordia tres subcuencas: R. La Concordia, R. Grande o Salinas y R. Yahuyaita con un total de 2 663,76 km². En total el área de estudio para esta segunda etapa cubre una superficie de 5 855,76 km² (figura 1).

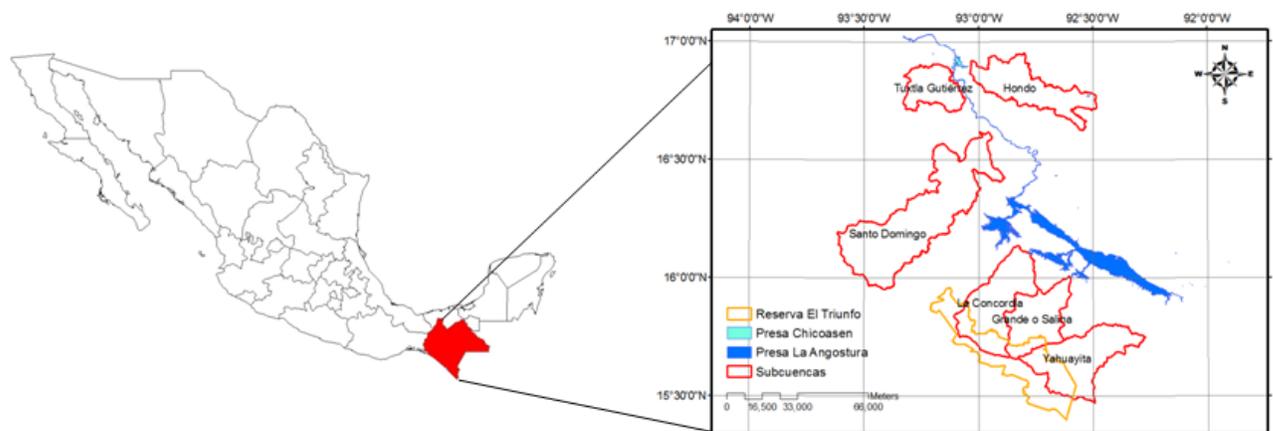


Figura 1. Subcuencas de interés

DESARROLLO

Para cada una de las seis subcuencas se determinará la erosión hídrica actual con base en la EUPS (figura 2), desarrollada por Wischmeier & Smith en 1965 (Figuroa et al. 1991) a través de álgebra de mapas en ArcMap 10.1 y definida por la ecuación (1):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

donde:

- A = Promedio anual de pérdida de suelo por hectárea, y expresado en ton/ha/año
- R = Factor de erosividad de la lluvia en MJ.mm/ (ha.hr)
- K = Factor de erosionabilidad del suelo en ton.ha.hr/ (MJ.mm.ha)
- L = Factor del grado de longitud; adimensional
- S = Factor del grado de pendiente; adimensional
- C = Factor del manejo de vegetación; adimensional
- P = Factor de prácticas mecánicas en el manejo de la vegetación agrícola; adimensional

Para determinar la tasa de entrega de sedimentos se emplea la plataforma ArcSWAT 2012.10, compatible con ArcMap 10.1. La producción de sedimentos calculada por ArcSWAT (figura 3) se basa en la capacidad de carga y se define por la ecuación (2).

$$Con_{sed} = C_{sp} * V_{pk}^{sexp} \quad (2)$$

donde:

- Con_{sed} = Transporte máximo de sedimentos ton/año
- C_{sp} = Coeficiente de manning
- V_{pk} = Velocidad máxima en el canal (m/s)
- $sexp$ = Exponente de calibración

CÁLCULO DE VARIABLES

Clima

Se seleccionaron 22 estaciones climatológicas con influencia en el área de estudio con datos diarios. Para determinar los valores del factor R de la EUPS conforme a la ecuación (3) se calcularon los valores de precipitación media mensual de cada estación y se construyó un ráster con resolución 10 x 10 pixel.

$$R = 2,4619 P + 0,006067 P (2,055 - 0,00061 P) \quad (3)$$

donde:

- R = Erosividad de la lluvia (MJ.mm) / (ha.hr)
- P = Precipitación media anual (mm)

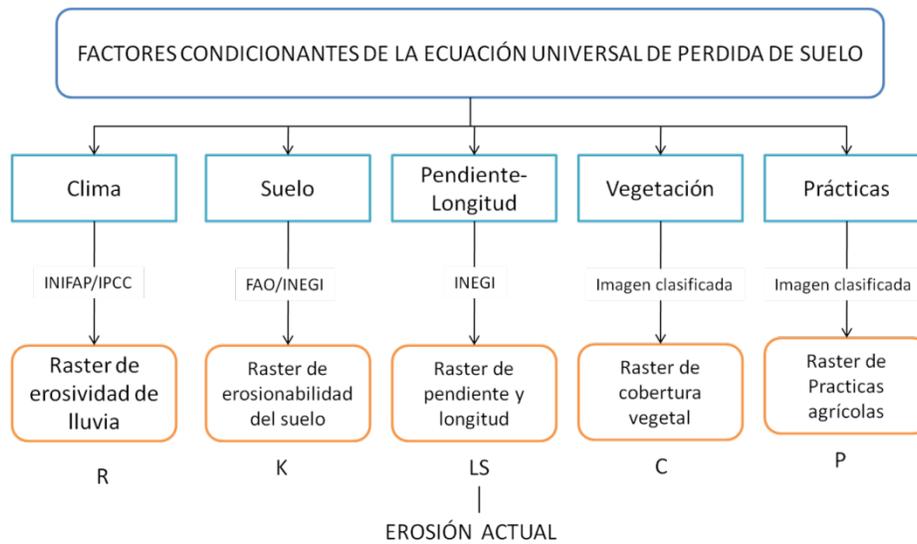


Figura 2. Método de cálculo de la erosión conforme a la EUPS

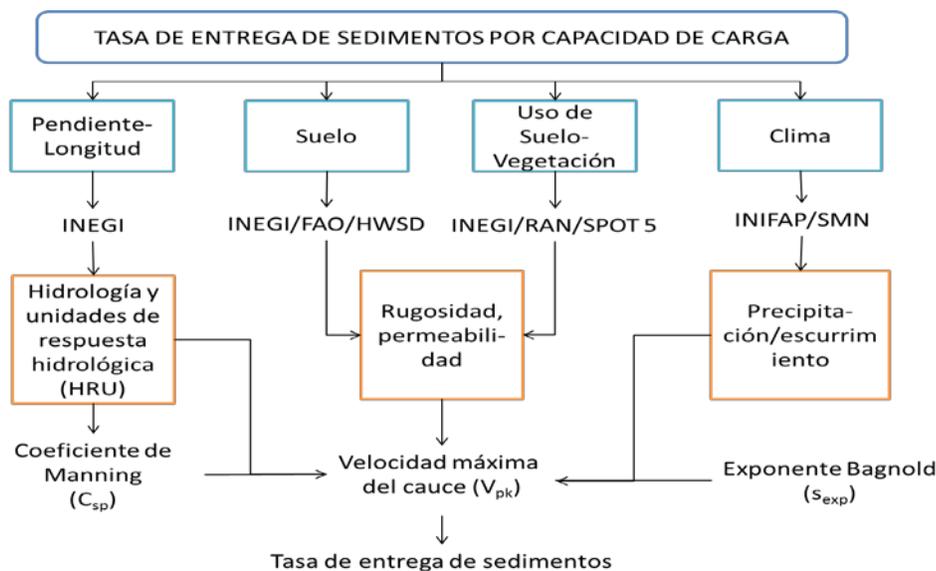


Figura 3. Método de cálculo de entrega de sedimentos conforme a ArcSWAT

Para alimentar el módulo climático de ArcSWAT se emplea la macro WGN_maker4.xlsm, con la cual se realiza la estadística climatológica mensual a base de los datos diarios de las siguientes variables:

- Número de años usados para calcular precipitación máxima en 30 minutos.
- Promedios mensuales de temperatura máxima, mínima, radiación solar, punto de rocío, velocidad del viento, precipitación y días de lluvia en el mes.
- Desviación estándar mensual de temperatura máxima, mínima y precipitación.
- Coefficiente skew para precipitación diaria en un mes.
- Probabilidad de día húmedo posterior a día seco.
- Probabilidad de día húmedo posterior a día húmedo.

Topografía

A partir del modelo de elevación digital, MDE, con resolución espacial de 10 m, se calcula el factor LS conforme a la ecuación (4) y se construye un ráster con la misma resolución (Pérez-Nieto et al. 2012).

$$LS = (\lambda / 22,13)^m (65,41 * \sin^2 \theta + 4,56 * \sin \theta + 0,065) \quad (4)$$

donde:

λ = Longitud del tramo de pendiente en metros, en éste caso de 10 m, por ser la unidad de análisis del pixel

θ = Pendiente en radianes

m = Exponente que depende del grado de pendiente y se define en la ecuación (5).

$$m = \beta / (1 + \beta) \quad (5)$$

En donde β se define por la ecuación (6).

$$\beta = (\sin \theta / 0,0896) / (3 * (\sin \theta)^{0,8} + 0,56) \quad (6)$$

Para que el modelo SWAT determine pendiente y las unidades de respuesta hidrológica o HRU, según sus siglas en inglés, se usa el modelo digital de elevación georreferenciado, el cual con el módulo topográfico del modelo, se divide en los rangos de pendientes mostrados en la tabla 1.

Tabla 1. Rangos de pendientes

Rango de pendiente	Piso	Techo
1	0	5
2	5	10
3	10	20
4	10	35
5	35	99999999

Suelo

Conforme a INEGI y FAO (2007) se determina el factor K. En la tabla 2 se muestran los valores asignados para el factor.

Para alimentar el módulo de suelo en ArcSWAT es necesario determinar parámetros físicos como la pedregosidad, densidad, contenido de materia orgánica, conductividad hidráulica, y capacidad de campo. Para ello se utiliza la base HWSD (Harmonized World Soil Database) la cual contiene características físicas de un gran número de suelos (Palazón y Navas 2012). En la tabla 3 se observan los parámetros calculados que se ingresaron al módulo de suelo. Para el caso de zonas urbanas el valor asignado para el factor K es cero.

Tabla 2. Factor K en las subcuencas de interés

Formaciones Edafológicas	Factor K
Acrisol	0,007 a 0,040
Cambisol	0,02 a 0,04
Feozem	0,007 a 0,020
Fluvisol	0,026 a 0,04
Gleysol	0,04
Litosol	0,007 a 0,02
Luvisol	0,013 a 0,04
N/A	0,00
Regosol	0,007 a 0,040
Rendzina	0,007 a 0,02
Vertisol	0,026

Tabla 3. Parámetros físicos del suelo calculados para cada subcuenca de interés

SNAM	Nombre (clave FAO)
NLAYERS	número de capas del perfil
HYDRGRP	grupo hidrológico
SOL_Z	profundidad (mm)
SOLD_BD	densidad aparente (g/cm ³)
SOL_AWG	disponibilidad de agua (mm/mm)
SOL_CBN	carbono (%)
SOL_K	conductividad hidráulica (mm/h)
CLAY	arcilla (%)
SILT	limo (%)
SAND	arena (%)
ROCK	roca (%)
USLE_K	valor K según FAO

Cobertura vegetal y uso de suelo

Para determinar la cobertura vegetal y el uso de suelo se emplearon 10 imágenes satelitales SPOT 5 2A, las cuales fueron calibradas radiométricamente con las ecuaciones (7) y (8).

$$L_{\lambda} = (DN / A) + B \quad (7)$$

donde:

- L_{λ} = Radiancia espectral
- DN = Número digital
- A = Ganancia de calibración de la banda absoluta
- B = Sesgo de calibración absoluta de la banda

$$\rho = (\pi * L_{\lambda} * d^2) / (ESUN_{\lambda} * \cos(S_z)) \quad (8)$$

donde:

- ρ = Reflectancia
- π = Constante matemática $\sim 3,14159$
- L_λ = Radiancia Espectral
- d = Distancia entre el Sol y la Tierra
- $ESUN_\lambda$ = Valor medio de la irradiancia solar exoatmosférica
- S_z = Ángulo cenital [grados]

El cuadrado de la distancia media del sol a la tierra se calcula con la ecuación (9).

$$d^2 = (1 - 0,01674 \cos(0,9856 (JD-4)))^2 \quad (9)$$

donde:

- d^2 = Cuadrado de la distancia media del sol a la tierra en unidades astronómicas
- JD = Número del día del año

Los valores de ESUN o irradiancia solar media fuera de la atmósfera para cada banda se muestran en la tabla 4 para el sensor HRS2.

Tabla 4. Parámetros de calibración radiométrica ESUN de imágenes SPOT 5

Bandas	ESUN
B1	1858
B2	1575
B3	1047

Posterior a la calibración radiométrica se calibró topográficamente. Debido a que el estado de Chiapas es una zona accidentada, el efecto de sombra orográfica disminuye la certidumbre de las imágenes clasificadas, por lo que se realizó la corrección topográfica basada en un modelo de superficies no lambertianas llamado Corrección C (Teillet et al. 1982). Para ello se generó un modelo de iluminación del día de la toma de la imagen con la ecuación (10).

$$IL = \cos\gamma_i = \cos\theta_p * \cos\theta_i + \text{sen}\theta_p * \text{sen}\theta_i * \cos(\phi_a - \phi_o) \quad (10)$$

donde:

- θ_p = pendiente del terreno: La inclinación del terreno con respecto a la horizontal.
- θ_i = ángulo cenital solar: El ángulo complementario de la elevación solar.
- ϕ_a = ángulo azimutal solar: La dirección del sol con respecto al norte.
- ϕ_o = ángulo de orientación: El ángulo existente entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto.

Una vez que se obtiene el modelo de iluminación se aplica la Corrección C a cada imagen conforme con la ecuación (11).

$$\rho_h = \rho_t ((\cos\theta_i + c_k) / (IL + c_k)) \quad (11)$$

donde:

ρ_h = Valor del pixel calibrado topográficamente

ρ_t = Valor del pixel sin calibración topográfica

IL = Modelo de iluminación

c_k = Coeficiente de calibración C

El coeficiente c_k se define por las ecuaciones (12) y (13).

$$c_k = b_k / m_k \quad (12)$$

$$\rho_t = b_k + m_k * IL \quad (13)$$

Siendo b_k la pendiente y m_k el término independiente de la ecuación de regresión lineal entre ρ_t (valor del pixel sin calibración topográfica) y IL (modelo de iluminación).

Una vez corregidas las imágenes fueron clasificadas y se realizaron recorridos en campo para verificar coberturas y usos de suelo.

En la tabla 5 se observan los valores de Factor C (Lianes et al. 2009) considerados para cada tipo de vegetación y uso de suelo encontrado en las subcuencas de interés; con estos valores se construye un ráster de 10 x 10 de pixel.

Tabla 5. Factor C utilizado por tipo de vegetación

Tipo de cobertura	Factor C
Agricultura	0,70
Agricultura densa	0,01
Agua	0,00
Asentamiento	0,00
Asentamiento urbano	0,00
Bosque de encino	0,001
Bosque mesófilo de montaña	0,002
Bosque de pino	0,007
Bosque pino-encino	0,001
Café	0,09
Canal	1,00
Pastizal inducido	0,10
Pastizal cultivado	0,04
Vegetación riparia	0,01
Sabana	0,01
Selva caducifolia	0,01
Selva perennifolia	0,001

Para alimentar el módulo de uso de suelo del modelo se construye un ráster de 10 x 10 de pixel considerando las equivalencias para ArcSWAT (tabla 6).

Tabla 6. Equivalencias de la cobertura vegetal conforme a ArcSwat 2012.10

Tipo de cobertura	SWAT	Nombre común
Agricultura	AGRL	Agricultura
Agricultura densa	AGRL	Agricultura
Agua	WATR	Agua
Asentamiento	URBN	Zona urbana
Asentamiento urbano	URHD	Zona urbana de alta densidad
Bosque de encino	OAK	Encino
Bosque mesófilo de montaña	FRST	Bosque mixto
Bosque de pino	PINE	Pino
Bosque pino-encino	PINE	Pino
Café	COFF	Café
Canal	UTRN	Unidades pavimentadas
Pastizal inducido	PST	Pastizal
Pastizal cultivado	PAST	Pastizal
Vegetación riparia	WETL	Humedal
Sabana	RNGE	Pasto
Suelo desnudo	BARR	Suelo desnudo
Selva caducifolia	FRSD	Bosque deciduo
Selva perennifolia	FRSE	Bosque siempre verde

EROSIÓN Y PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

Una vez calculados los factores de la EUPS, a través de álgebra de mapas se calcula la erosión actual de todas las subcuencas de interés, así mismo alimentados todos los módulos del modelo SWAT se calcula la tasa de entrega de sedimentos (tabla 7). La erosión media anual se determina multiplicando la erosión media actual y las hectáreas de la subcuenca.

Tabla 7. Erosión media actual(ton/ha/año), media anual (ton/año) y producción promedio anual de sedimentos(ton/año) por Subcuenca

Subcuenca	Erosión Media Actual (ton/ha/año)	Erosión Media Anual (ton/año)	Producción Anual de Sedimentos (ton/año)
Santo Domingo	167,6	32 676 134,00	36 347,15
Yahuayita	203,6	20 139 501,20	37 236,53
Concordia	184,3	17 869 359,40	16 356,14
Grande	284,6	20 064 584,60	22 400,01
Hondo	281,9	22 706 763,10	142 412,00
Tuxtla Gutiérrez	10,7	467 707,70	5 801,01

Las tres subcuencas con mayor erosión media anual son Santo Domingo, Hondo y Yahuyaita, sin embargo solo se sedimenta el 0,11 %, 0,63 % y 0,18 % respectivamente. En contraste, la subcuenca Tuxtla Gutiérrez reporta el valor más bajo de erosión media anual pero su porcentaje de sedimentación es el más alto (1,24 %).

DETERMINACIÓN DE LOS SITIOS DE CONSERVACIÓN

Los sitios de conservación se delimitaron con criterios generados durante un taller donde participaron expertos con conocimiento de campo en cada subcuenca.

Se consideró de importancia la generación de dichos criterios para la delimitación de los sitios de conservación ya que cada subcuenca presenta diferentes panoramas. Por ejemplo, las subcuencas Hondo y Tuxtla son urbanas, por lo tanto las medidas de conservación deben adecuarse a una mancha urbana en constante crecimiento, en cambio la subcuenca Concordia es rural-forestal y su principal amenaza no es la urbanización sino los incendios anuales.

Se considera el principal criterio la intervención de áreas con mayor índice de erosión, los demás se observan en la tabla 8 para cada subcuenca. Se numeran del 1 al 5 por orden de importancia, el primer criterio tendrá un valor de ponderación mayor que el quinto de tal forma que al realizar el álgebra de mapas los sitios de conservación sean un reflejo de estos.

Tabla 8. Criterios para determinar los sitios de conservación de cada subcuenca

Variable	Hondo	Tuxtla	Santo Domingo	Concordia	Grande	Yahuayita
Tenencia de la tierra y uso de suelo	1°					
Cobertura Vegetal-pendiente	2°	1°	3°	3°	3°	
Vulnerabilidad a deslizamientos						1°
Cercanía a caminos	3°					
Partes alta/cuenca alta	4°					
Actores de la población organizada	5°					
Actores organizados o no organizados con actividades de conservación o dentro de servidumbre ecológica u otro esquema de conservación (UMA's, PCA)				1°	1°	2°
Recurrencia de incendios forestales		2°				
ANP (-PNCS)		3°				
Parche natural con manejo dentro de un ANP			5°			
Corredores		5°				
Lotificación		4°				
Tipo de vegetación natural en donde se haga manejo sustentable mayor a 200 ha. o inmediato anterior.			1°			
Vegetación de galería en cauces de 1 y 2 orden			2°	5°		
Vegetación de galería en cauces de la cuenca media					4°	
Presencia de manantiales y cauces perenes en uso			4°			4°
Incendios				2°		
Taza de crecimiento de pastizales en áreas forestales				4°		
Taza de cambio de uso de suelo en áreas forestales					2°	3°
Concesiones forestales o permisos de manejo forestal maderable.					5°	
Aptitud del suelo						5°

Para cada subcuenca se determinó la superficie sujeta a conservación la cual se observa en la tabla 9 y en las figuras 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Tabla 9. Superficie total de los sitios de conservación por subcuenca

Subcuenca	Superficie (ha)		%
	Total	Con conservación	
Santo Domingo	239 111,11	40 672,80	17,01
Yahuayita	61 497,17	16 284,45	26,48
Concordia	57 378,50	16 496,32	28,75
Grande	89 508,68	18 671,51	20,86
Hondo	184 818,75	23 157,79	12,53
Tuxtla Gutiérrez	33 270,41	5 476,31	16,46
Total	665 584,63	120 759,18	18,14

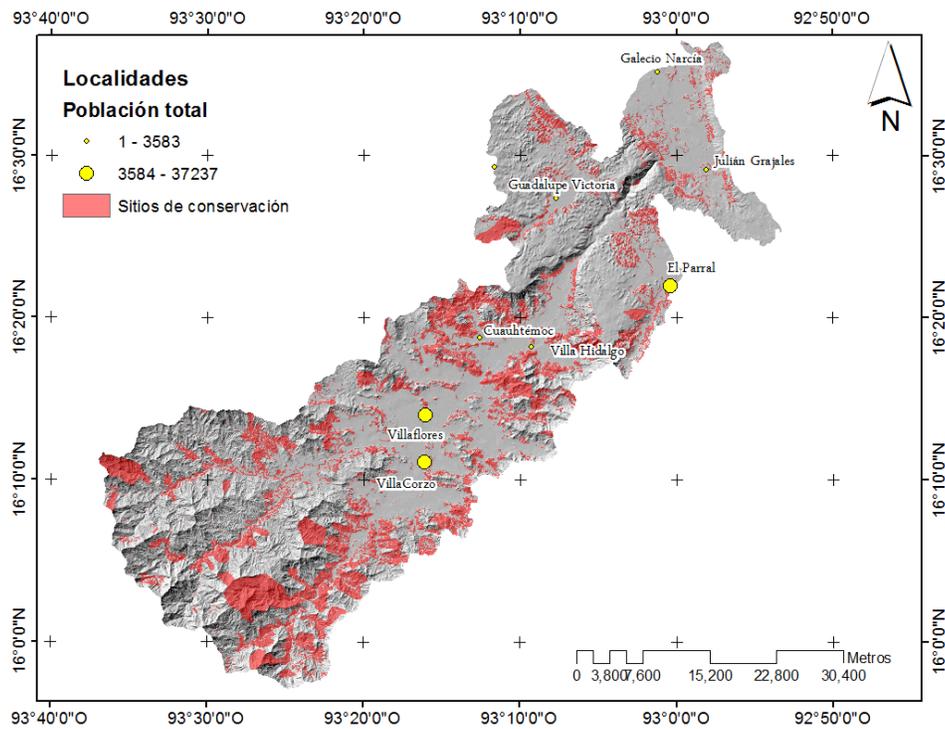


Figura 4. Sitios de conservación para la subcuenca Santo Domingo

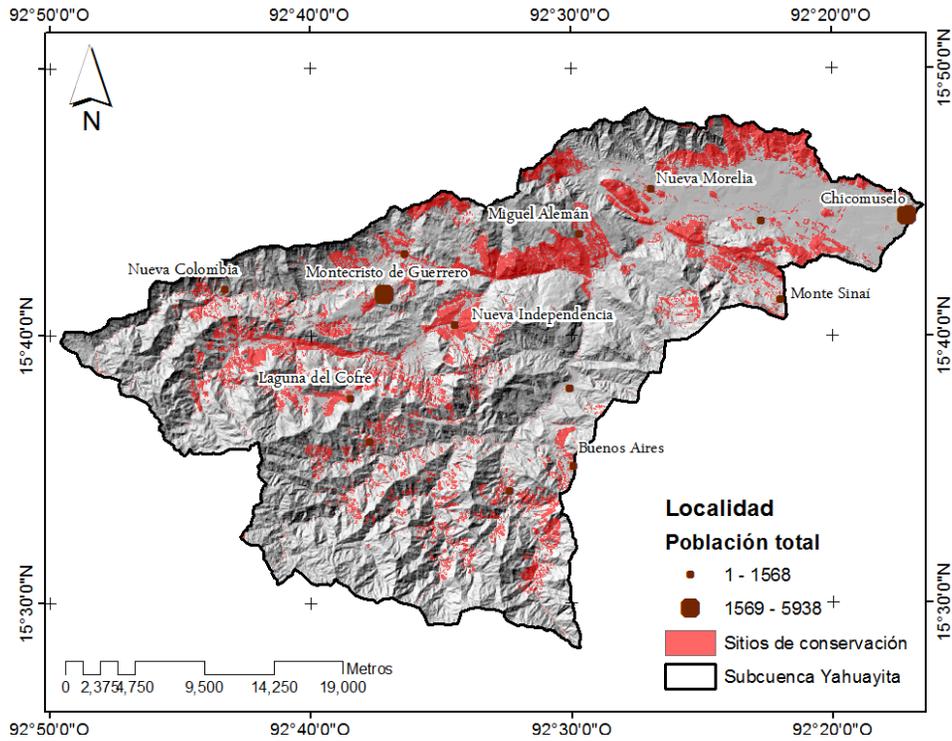


Figura 5. Sitios de conservación para la subcuenca Yahuayita

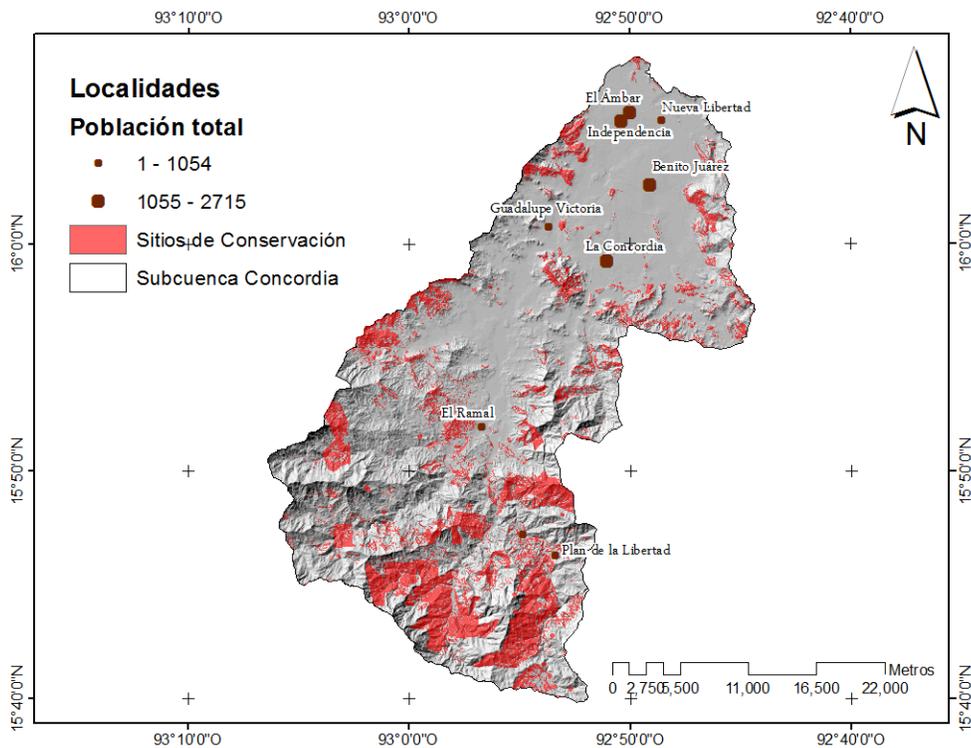


Figura 6. Sitios de conservación para la subcuenca Concordia

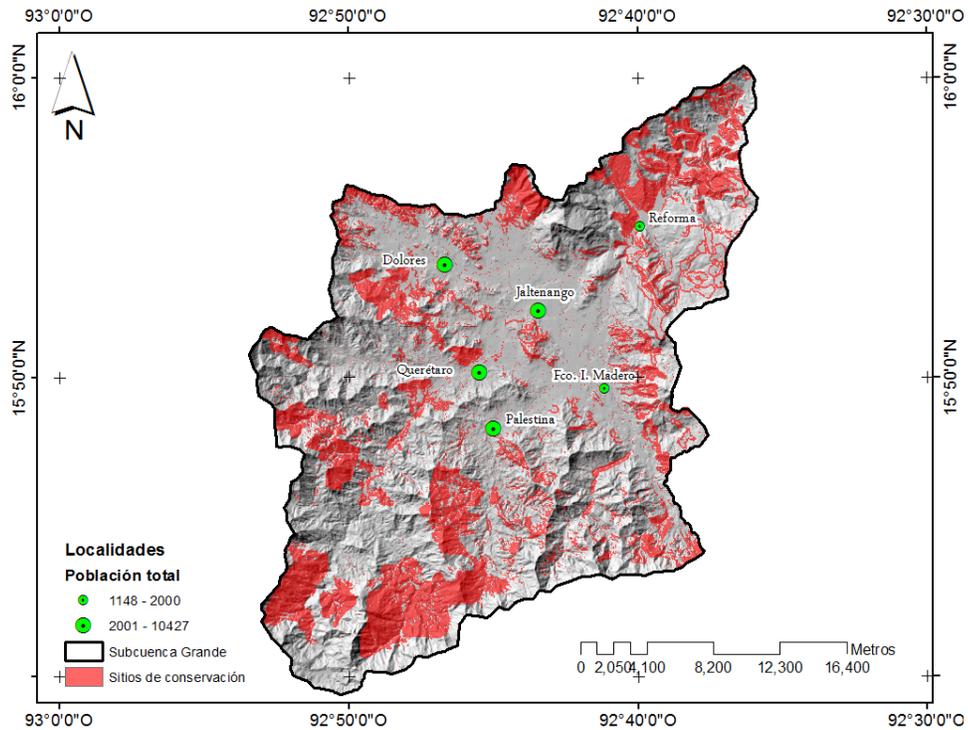


Figura 7. Sitios de conservación para la subcuenca Grande

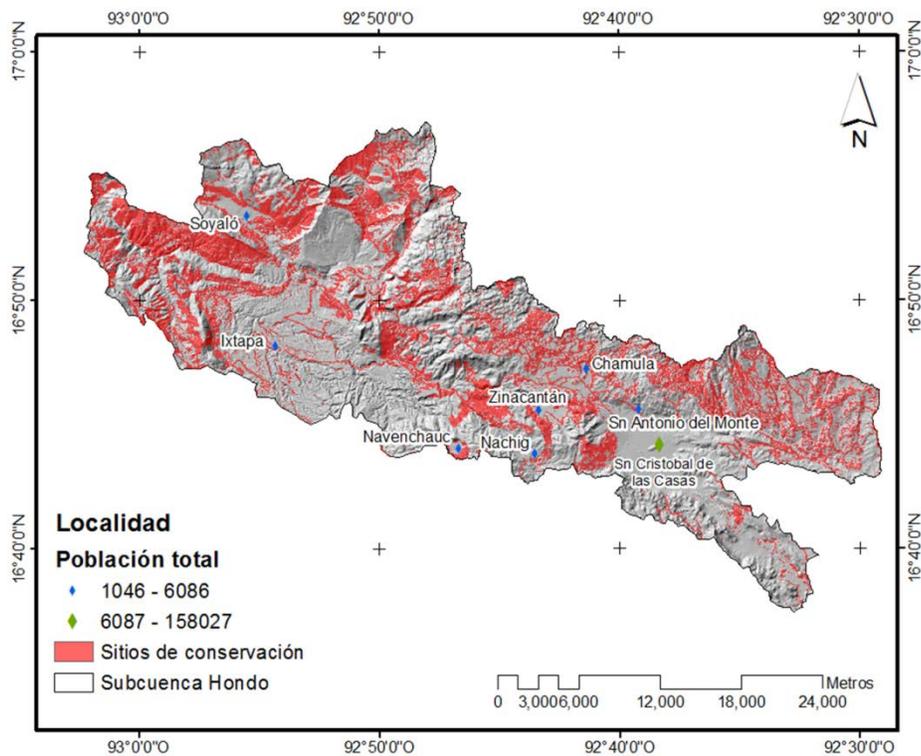


Figura 8. Sitios de conservación para la subcuenca Hondo

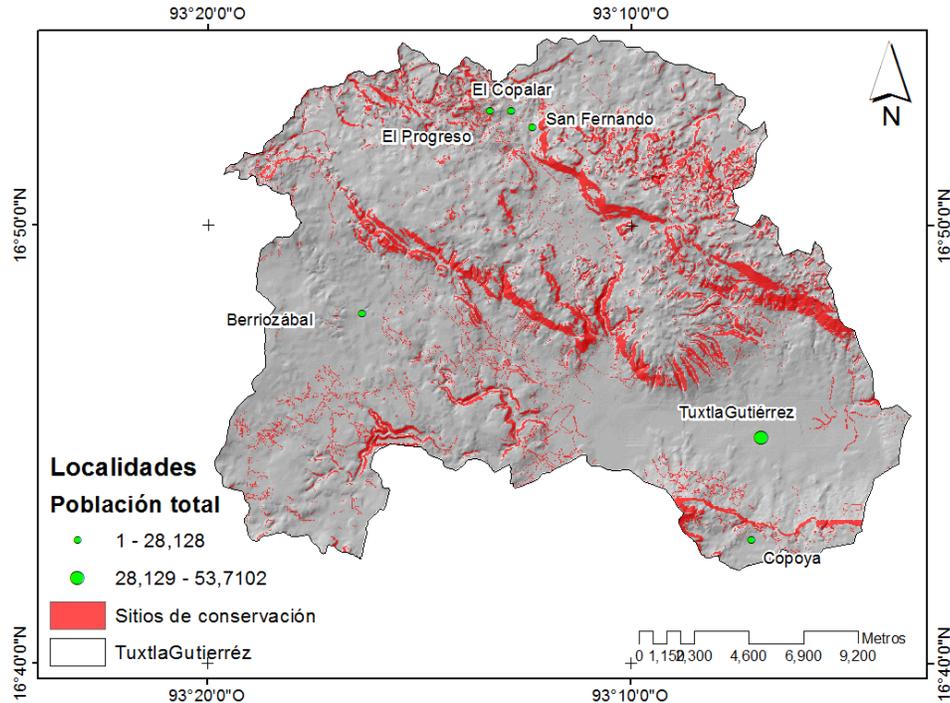


Figura 9. Sitios de conservación para la subcuenca Tuxtla

CONCLUSIONES

- Realizar la ponderación de los criterios de conservación garantizó no solo atender zonas de mayor producción de sedimentos, sino aquellas con un potencial alto en su degradación, realizando actividades preventivas, las cuales son menos costosas que las de restauración.
- Sin embargo, a pesar de que el área de intervención a los sitios de conservación solamente abarca el 18,14 % de la superficie total aún se considera un área extensa, por lo que es necesario estrechar lazos con otras instituciones gubernamentales, ONG's, y grupos civiles organizados a fin de mapear las áreas de intervención de cada uno y así evitar duplicar esfuerzos para lograr una mejor coordinación en la ejecución de actividades de conservación.

REFERENCIAS

FAO (2007). "Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Segunda edición 2006. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 103". Primera Actualización 2007. Extraído de: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a0510s/a0510s00.pdf> en septiembre 2013.

Figueroa S. B., Amante A., Cortés H. G., Pimentel J., Osuna E. S., Rodríguez J. M. y Morales J. (1991). "Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión". Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

- Lianes E., Marchamalo M. y Roldán M.** (2009). “Evaluación del factor C de la Rusle para el manejo de coberturas vegetales en el control de la erosión en la cuenca del Río Birrís”. *Agronomía Costarricense*, vol. 33, no. 2, pp. 217-235, Costa Rica.
- Palazón L. y Navas A.** (2012). “Bases de datos de los suelos para la modelización de la erosión con el modelo SWAT a partir de diferentes fuentes de información”. En: *O solo suporte da producao alimentar, do meio ambiente e da paisagem / Jorge Pinheiro, Joao Madruga, Gilberto Fernandes*, eds. Universida de dos Asores, Anzores, Portugal. pp: 133-136.
- Pérez-Nieto S., Arellano-Monterrosas J. L., Ibáñez-Castillo L. A. y Hernández-Saucedo F. R.** (2012). “Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán STAN en las cuencas costeras de Chiapas, México”. *Terra Latinoamericana*, vol. 30, no. 2, abril-junio, pp. 103-110, Chapingo, México.
- Teillet P.M., Guindon B. y Goodeonugh D.G.** (1982). “On the slope-aspect correction of multispectral scanner data”. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 8, no. 2, pp. 84-106. Canada.