

1er Foro sobre “Inestabilidad de laderas en el Estado de Veracruz”
Instituto de Ecología, A.C., 6-7 noviembre 2014.

ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS, EDÁFICOS E HIDROLÓGICOS LOCALES RELACIONADOS CON LA INESTABILIDAD DE LADERAS

Daniel Geissert Kientz (INECOL)

Estela G. Enríquez Fernández (UV)





¿Qué tienen en común? Agua y gravedad.



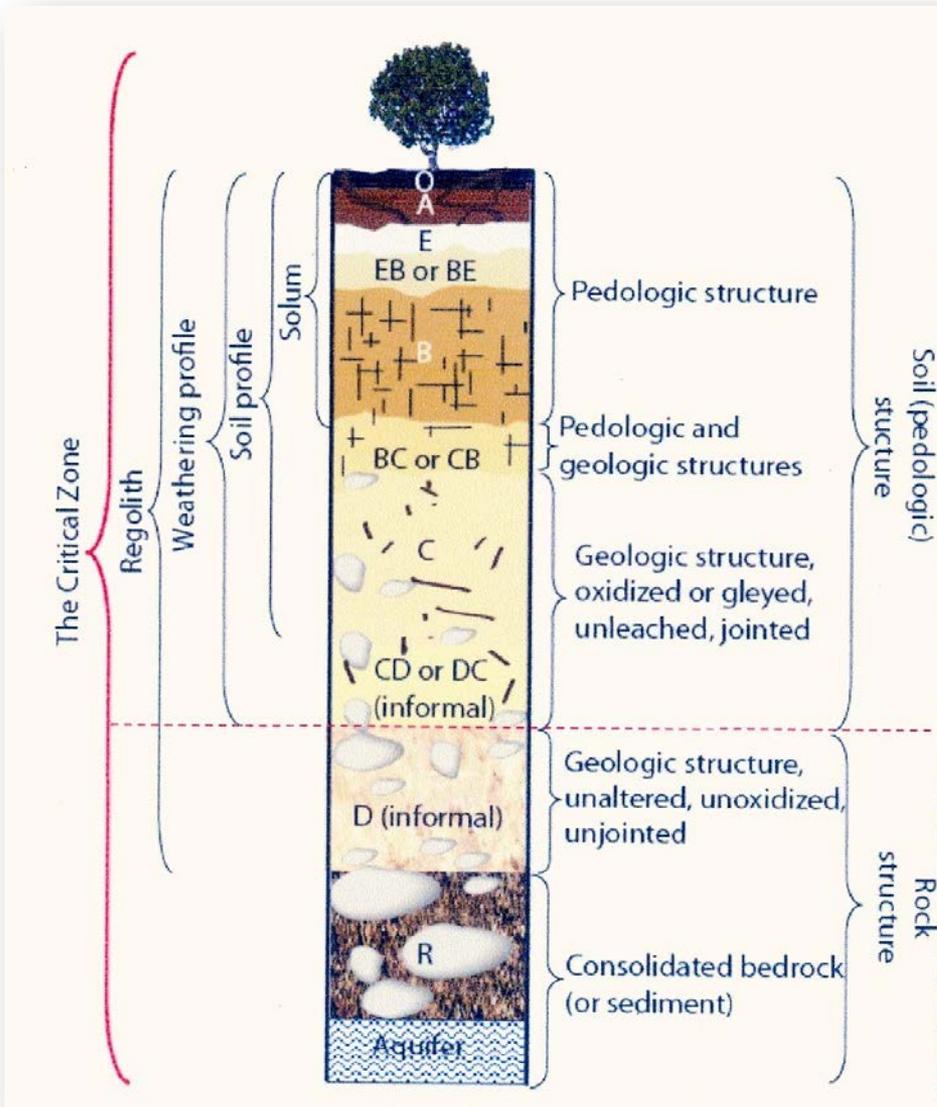
Los mismos factores que causan la estabilidad de laderas, causan también su inestabilidad: clima, topografía, material, vegetación/uso del suelo, hombre/infraestructura.

La diferencia está en la magnitud, frecuencia y lugar de ocurrencia de los procesos .

Interacción geomorfología, suelo y agua en laderas

- **El agua promueve la inestabilidad de laderas:** precipitación y gravedad son los principales detonadores de los cambios geomorfológicos (intemperismo, escorrentía, procesos remoción en masa).
- **El agua promueve la estabilidad de laderas:** estudios sobre denudación resaltaron el papel clave de la vegetación en la protección del suelo contra la erosión en regiones húmedas (*Langbein y Schumm, 1958; Douglas, 1967*), y el papel clave del suelo como amortiguador de la escorrentía, en zonas semi-áridas y áridas (*Yair y Anzel, 1987*).
- Bajo las mismas condiciones meteorológicas, las **características y mecanismos hidrológicos** dentro y fuera de las áreas potencialmente inestables, determinan la **frecuencia** de deslizamientos y juega un papel fundamental en el desarrollo de deslizamientos de diferentes **tipos y tamaños** (*Van Asch et al. 1999*).

Importancia de conocer la Zona Crítica



Zona Crítica de la Tierra (*Earth's Critical Zone*)

“a heterogeneous, near surface environment in which complex interactions involving rock, soil, water, air and living organisms regulate the natural habitat and determine availability of life sustaining resources.” (NRC, 2001).

- copa árbol hasta acuífero
- regolita, capa de intemperismo, perfil, solum
- D = parte no modificada/no intemperizada del horizonte C
- regolita = materiales encima de roca fresca no intemperizada (horizonte R)

Inestabilidad de laderas en el centro del estado de Veracruz

Procesos de remoción en masa

Antecedentes sobre estudios de inestabilidad de laderas en Veracruz

- Laderas potencialmente inestables en Veracruz: $\approx 25\%$ de la superficie del estado ($17,570 \text{ km}^2$) (*Geissert, 1999; Geissert y Enríquez, 2011*).
- Existen bastantes observaciones (SPC, Instituto de Geología UNAM, Centro de Ciencias de la Tierra UV), pero muy pocos estudios locales sobre la inestabilidad de laderas.
- Pocos trabajos publicados en revistas y libros científicos. Varios enfocados hacia procesos catastróficos prehistóricos relacionados con la actividad volcánica.

Antecedentes sobre estudios de inestabilidad de laderas en Veracruz

Artículos (12)

- Publicados entre 1993 y 2014.
- Artículos relacionados con inestabilidad de ladera no derivada de la actividad volcánica.
- Mayoría relacionada con colapsos catastróficos de edificios volcánicos.

Libros y capítulos (5)

- Rodríguez S. et al. 2011. Peligros geológicos más frecuentes en el estado de Veracruz.
- Enríquez E. y Geissert D.. 2012. Riesgos naturales en una zona rural de la cuenca alta del río La Antigua.
- Geissert D. 2004. La Geomorfología. In: Guevara et al. (eds.). Los Tuxtlas. El paisaje de la sierra.
- Secretaría de Protección Civil de Veracruz. 2000. Atlas estatal de riesgo Veracruz.
- Secretaría de Protección Civil de Veracruz. 2010. Atlas de peligros geológicos e hidrometeorológicos del estado de Veracruz.

Tesis (3)

Informe técnicos inéditos (probablemente muchos)

SUBCUENCA DEL RÍO LOS GAVILANES



Cuenca alta río La Antigua; Ladera barlovento del estratovolcán Cofre de Perote, municipios de Coatepec y Xico, del estado de Veracruz.



Clima es semicálido y húmedo en la porción baja (1090-1800 msnm), templado húmedo en la intermedia (1800-2400 msnm) y semifrío húmedo en la alta (2400-2960 msnm).

Suelos de tipo Andosol en la parte media y alta; Acrisol en la parte baja. (Rossignol *et al.*, 1987; Meza y Geissert, 2007).



Parte alta: relieve suave de colinas con cauces de poca incisión.

Andosol

Acrisol



Parte media: laderas de pendiente fuerte y barrancas profundas en forma de "V". Parte baja: cerros bajos y lomeríos, separados por fondos de valle aluviales.



Mosaico discontinuo de bosque mesófilo maduro, acahuales, bosque de pino y pino-oyamel, pastizales inducidos, matorral secundario, y cafetales; asentamientos humanos, áreas agrícolas y huertas.

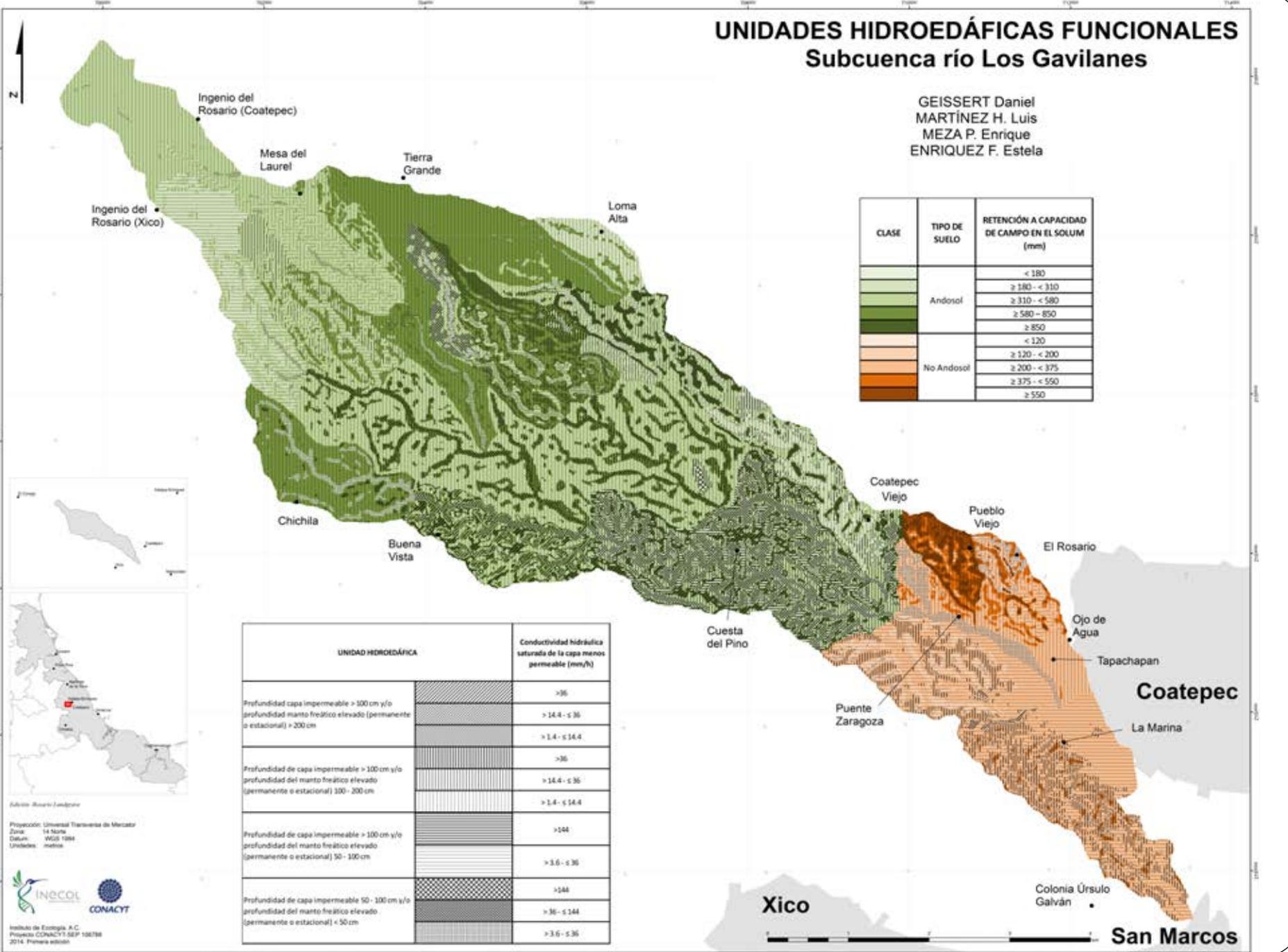
UNIDADES HIDROEDÁFICAS FUNCIONALES

Subcuenca río Los Gavilanes

GEISSERT Daniel
MARTÍNEZ H. Luis
MEZA P. Enrique
ENRIQUEZ F. Estela

CLASE	TIPO DE SUELO	RETENCIÓN A CAPACIDAD DE CAMPO EN EL SOLO (mm)
Andosol		< 180
		≥ 180 - < 310
		≥ 310 - < 580
		≥ 580 - 850
		≥ 850
No Andosol		< 120
		≥ 120 - < 200
		≥ 200 - < 375
		≥ 375 - < 550
		≥ 550

UNIDAD HIDROEDÁFICA	Conductividad hidráulica saturada de la capa menos permeable (mm/h)
Profundidad capa impermeable > 100 cm y/o profundidad manto freático elevado (permanente o estacional) > 200 cm	> 36
	> 14.4 - ≤ 36
	> 1.4 - ≤ 14.4
Profundidad de capa impermeable > 100 cm y/o profundidad del manto freático elevado (permanente o estacional) 100 - 200 cm	> 36
	> 14.4 - ≤ 36
	> 1.4 - ≤ 14.4
Profundidad de capa impermeable > 100 cm y/o profundidad del manto freático elevado (permanente o estacional) 50 - 100 cm	> 144
	> 3.6 - ≤ 36
Profundidad de capa impermeable 50 - 100 cm y/o profundidad del manto freático elevado (permanente o estacional) < 50 cm	> 144
	> 36 - ≤ 144
	> 3.6 - ≤ 36



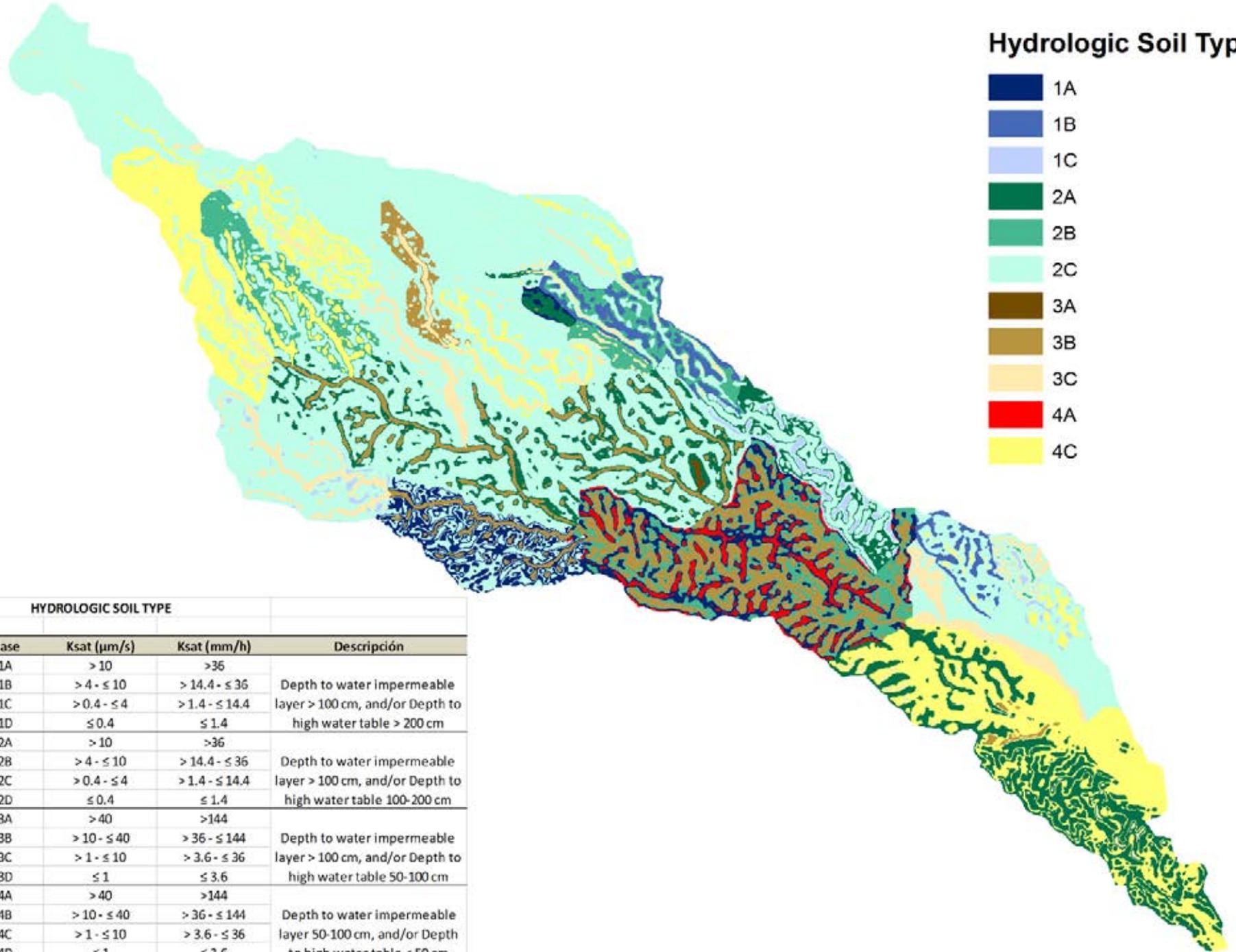
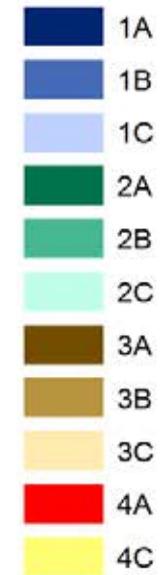
Autores: Ricardo Landgrave
Proyección: Universal Transversa de Mercator
Zona: 14 Norte
Datum: WGS 1984
Unidades: metros

INECOL
CONACYT

Instituto de Ecología, A.C.
Proyecto CONACYT-SEP 180788
2014. Primera edición

Xico
Colonia Úrsulo Galván
San Marcos

Hydrologic Soil Type



HYDROLOGIC SOIL TYPE

Clase	Ksat ($\mu\text{m/s}$)	Ksat (mm/h)	Descripción
1A	> 10	>36	
1B	> 4 - \leq 10	> 14.4 - \leq 36	Depth to water impermeable layer > 100 cm, and/or Depth to
1C	> 0.4 - \leq 4	> 1.4 - \leq 14.4	high water table > 200 cm
1D	\leq 0.4	\leq 1.4	
2A	> 10	>36	
2B	> 4 - \leq 10	> 14.4 - \leq 36	Depth to water impermeable layer > 100 cm, and/or Depth to
2C	> 0.4 - \leq 4	> 1.4 - \leq 14.4	high water table 100-200 cm
2D	\leq 0.4	\leq 1.4	
3A	> 40	>144	
3B	> 10 - \leq 40	> 36 - \leq 144	Depth to water impermeable layer > 100 cm, and/or Depth to
3C	> 1 - \leq 10	> 3.6 - \leq 36	high water table 50-100 cm
3D	\leq 1	\leq 3.6	
4A	> 40	>144	
4B	> 10 - \leq 40	> 36 - \leq 144	Depth to water impermeable layer 50-100 cm, and/or Depth
4C	> 1 - \leq 10	> 3.6 - \leq 36	to high water table < 50 cm
4D	\leq 1	\leq 3.6	

CUENCA DEL RÍO LOS GAVILANES

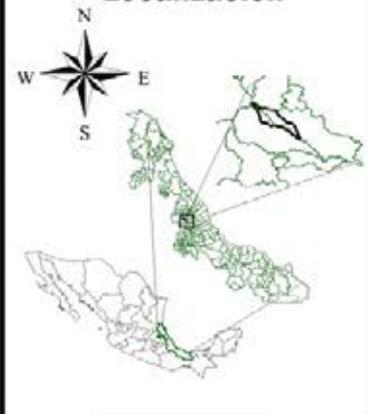
Simbología

- Limite de la Cuenca
- Construcciones Aisladas
- ▭ Limite Municipal
- ~ Hidrología

Precipitación

- 1800 - 2000 mm
- 2000 - 2200 mm
- 2200 - 2400 mm
- 2400 - 2600 mm
- 2600 - 2800 mm

Localización

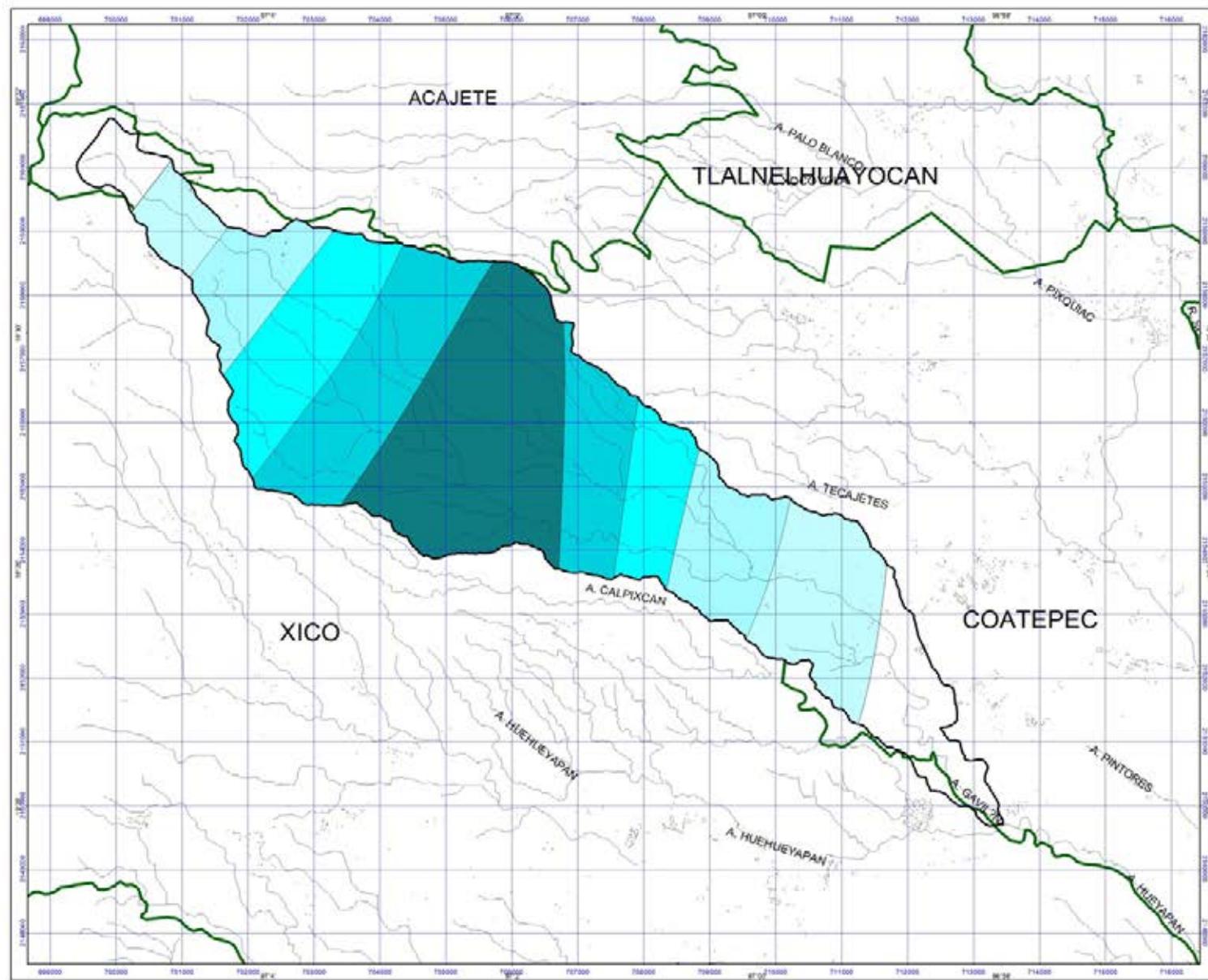


Escala



Edición

Maria de Lourdes Cabrera
File Cartografía Digital SIGSA (2002)
Escala 1:20,000
Cartas: E14T179, E14T189, E14T270, y E14T280
INEGI (1995)

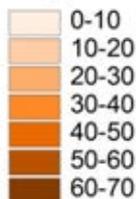


CUENCA DEL RÍO LOS GAVILANES

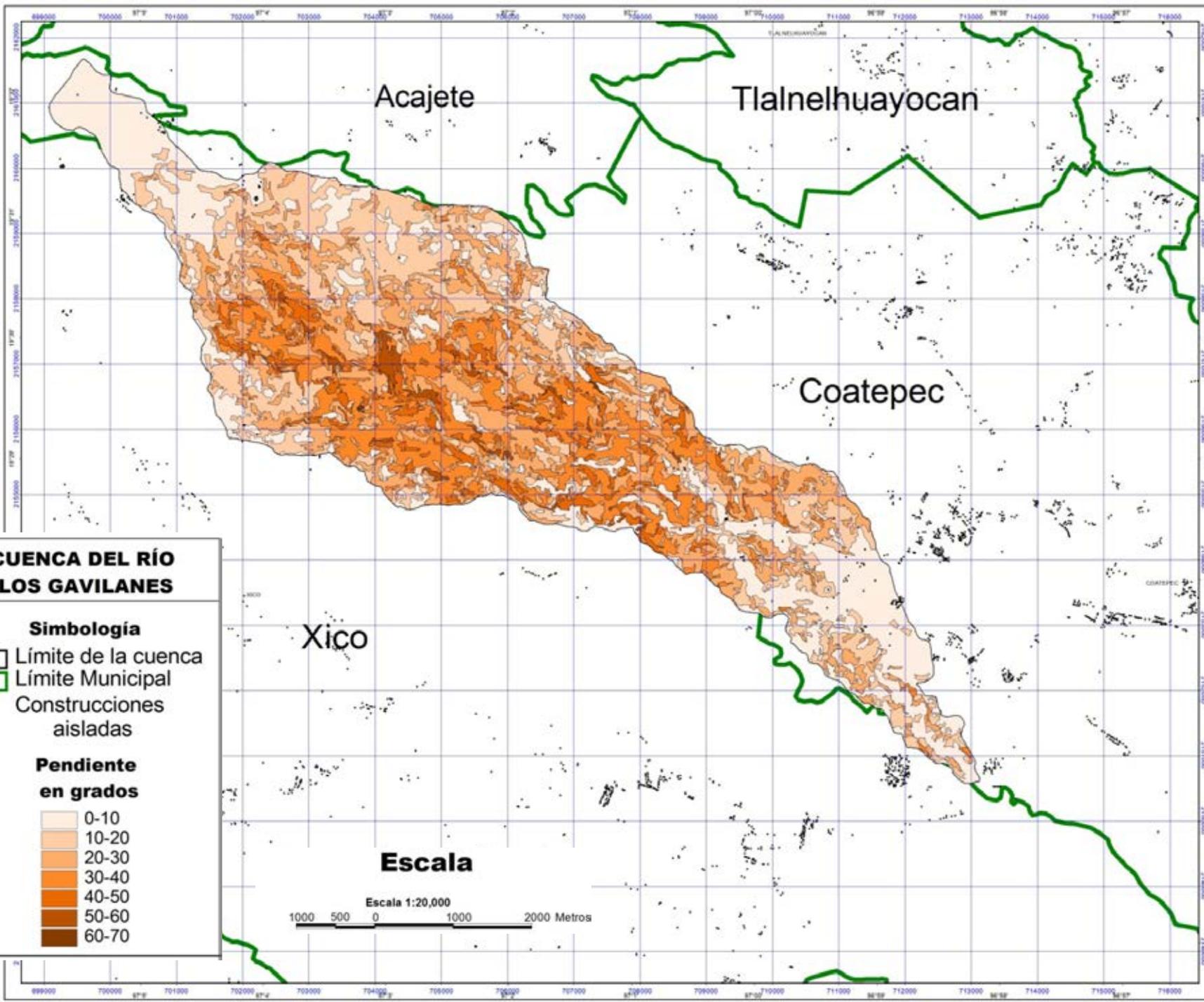
Simbología

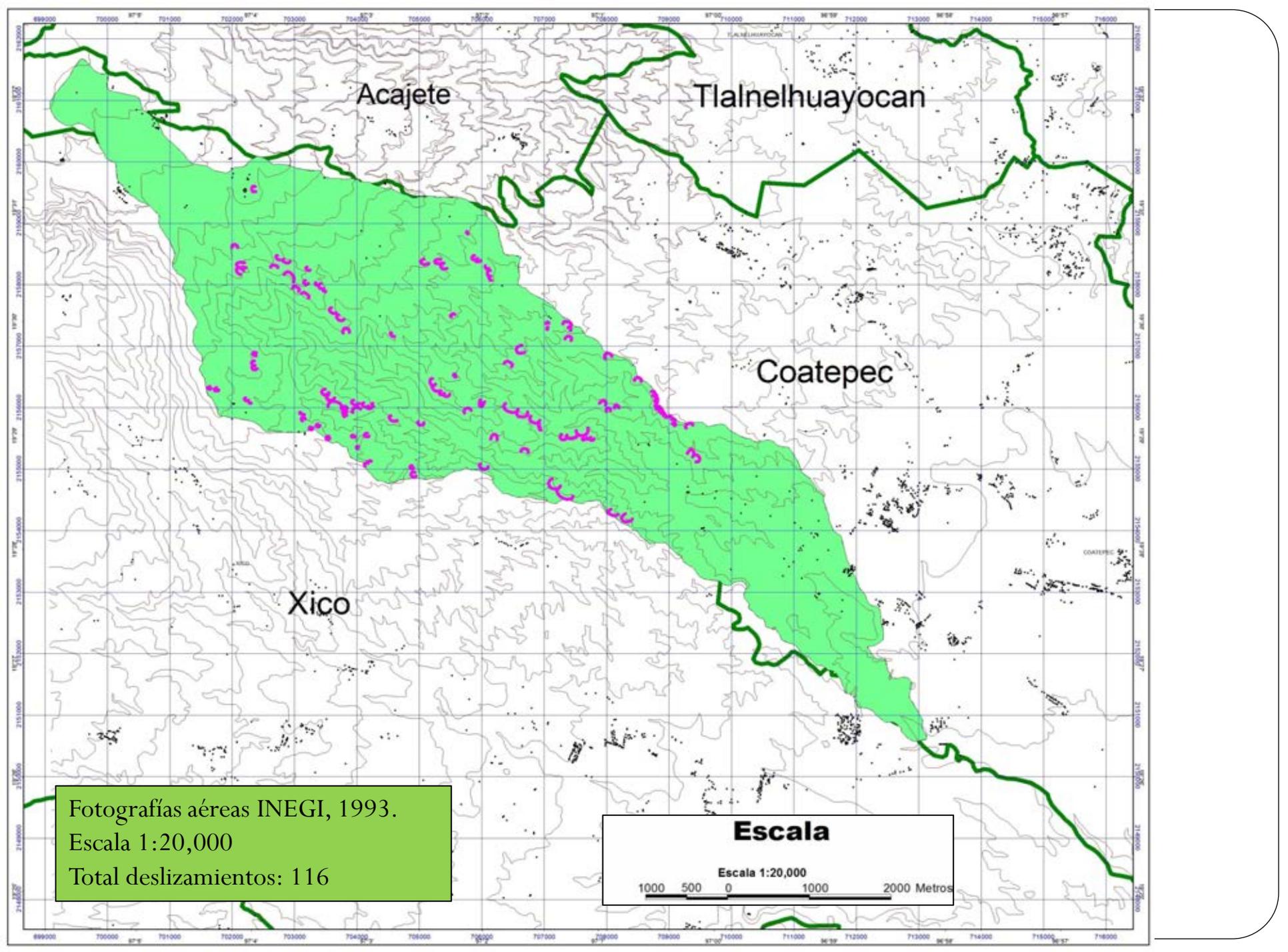
- ▭ Límite de la cuenca
- ▭ Límite Municipal
- Construcciones aisladas

Pendiente en grados



Escala





Tipos de deslizamientos *(Cabrera, 2011)*

		Tamaño corona (m)		
		< 60	60 - 120	120 - 180
Profundidad (m)	< 2	52	41	1
	2 - 10	5	3	1
	> 10	4	4	0

- dominancia de deslizamientos superficiales pequeños a medianos.
- baja cantidad de deslizamientos semi-profundos y profundos.
- casi no hay deslizamientos de gran amplitud de corona.

Relaciones ambientales

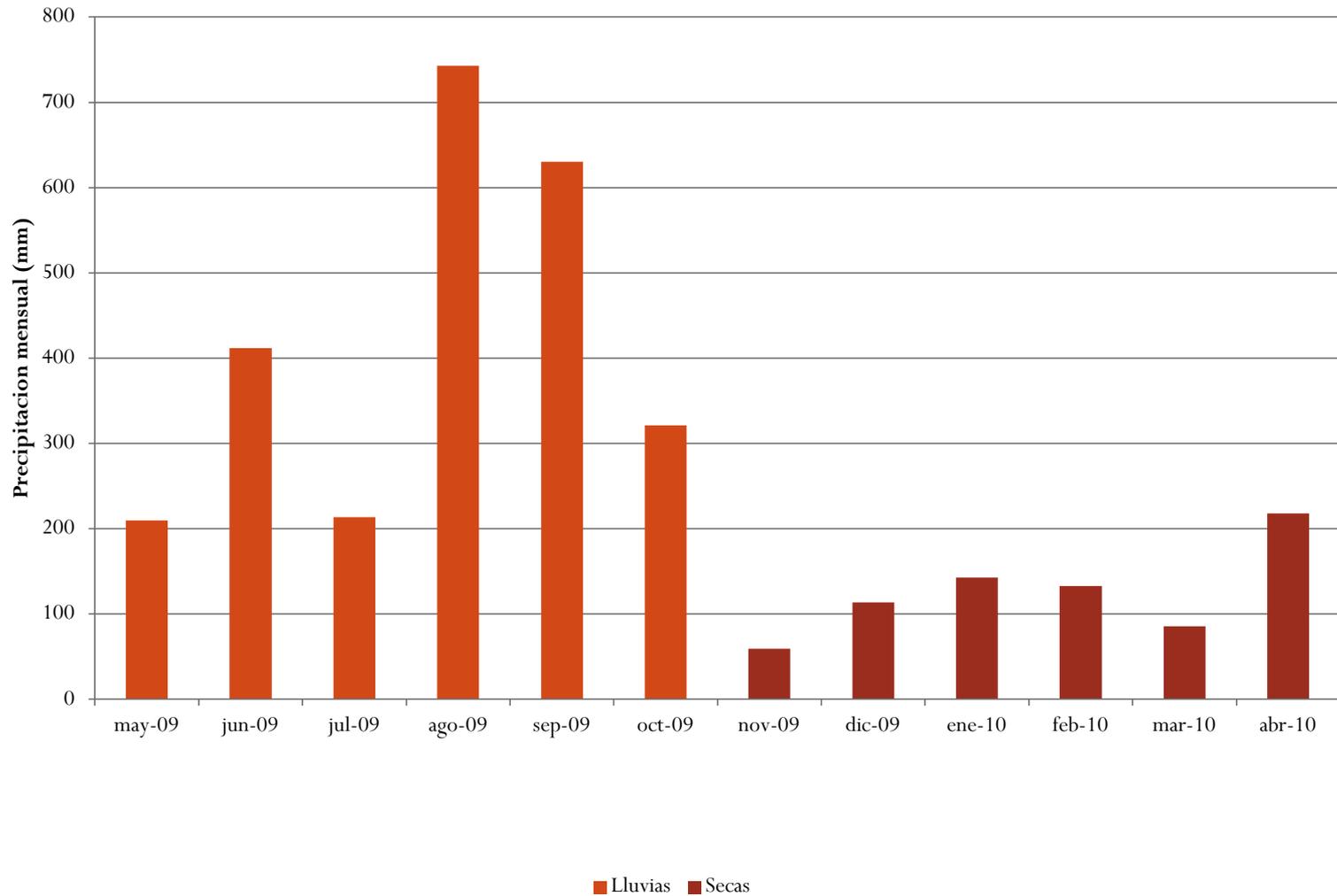
- 64% de los deslizamientos en rango de precipitación 2,400 – 2,800 mm/año.
- 78% de los deslizamientos en rango de pendiente 20°- 40°.
- 100% de los deslizamientos en suelos de tipo Andosol (materiales piroclásticos deleznable).
- 64% de los deslizamientos se ubican bajo bosque mesófilo; 32% en pastizales y matorrales.

Condiciones de la humedad del suelo

(Castro, 2012)

- Sitio: bosque de niebla, reserva la Cortadura, municipio de Coatepec.
- Período de análisis: mayo de 2009 a abril de 2010.
- Precipitación total anual de 3281 mm acumulada en 246 eventos.
- La precipitación promedio acumulada por evento fue de 13.4 ± 18.0 mm, la duración promedio de cada evento fue de 4 horas 30 min.
- Período de lluvias (mayo-octubre), con precipitación acumulada de 2529.49 mm (77% de la precipitación total anual).
- Período seco (noviembre 2009 a abril de 2010), con 751.79 mm (23% de la precipitación total anual).

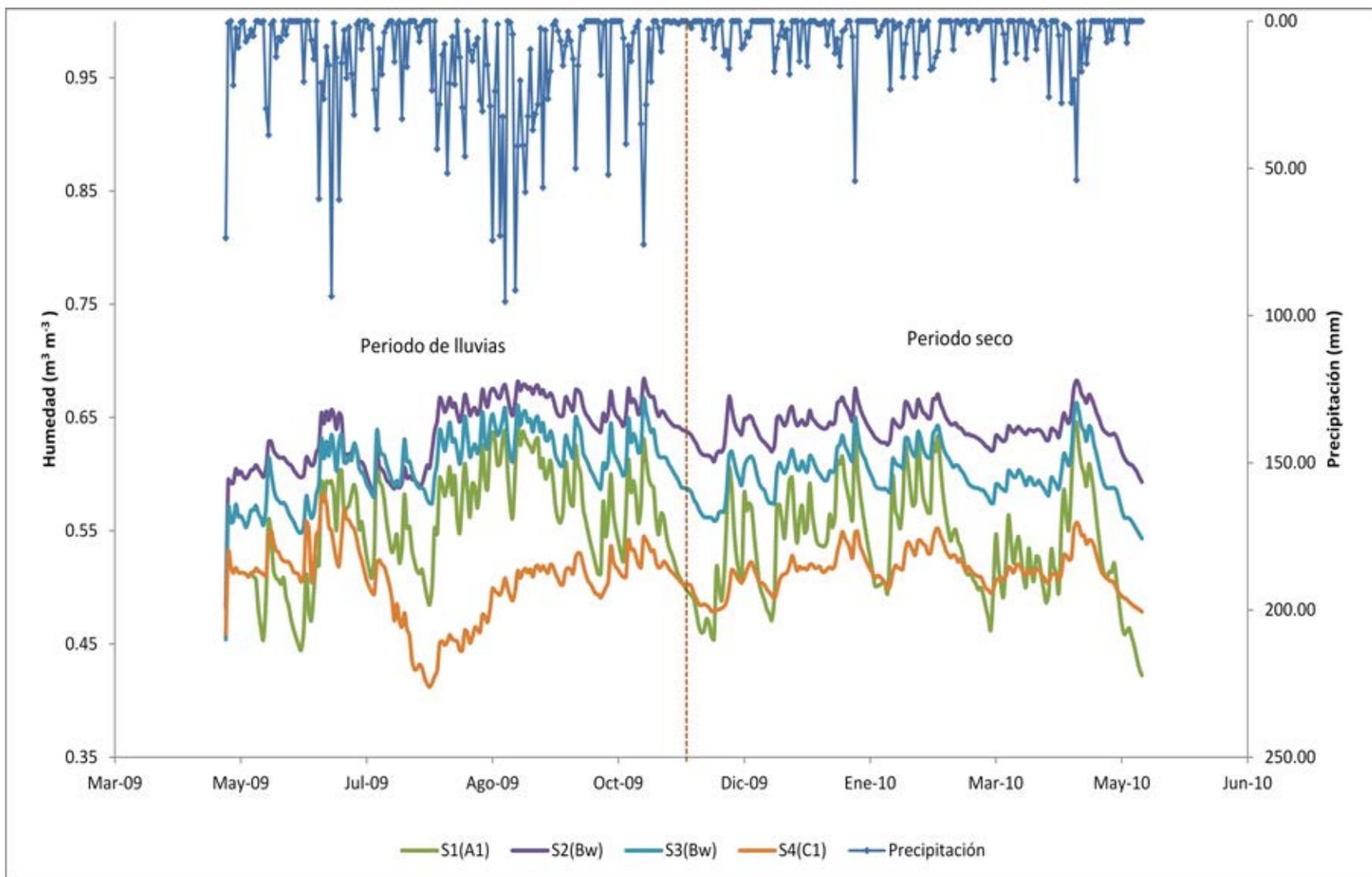
Distribución de la lluvia en La Cortadura



Condiciones del suelo

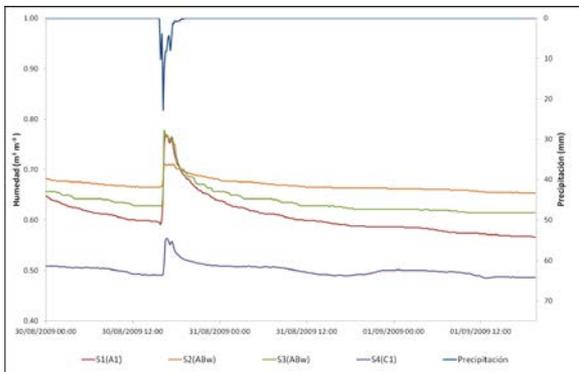
Andosol aluándico dístrico, desarrollado en una capa delgada de cenizas cubriendo un lava andesítica intemperizada. Suelo moderadamente profundo (1-1.5 m), de textura franca a franco-arcillosa. Infiltración: 61 cm/h (*Marín, 2010*).

Profundidad (cm)	Horizonte	Porosidad total (%)	Grado saturación período húmedo (%)	Grado saturación período seco (%)	Ksat (cm/h)
0-18	A1	84.6	66.2	63.8	77
18-42	Bw	85.1	71.7	70.5	32
42-70	C1	83.2	60.1	61.3	74

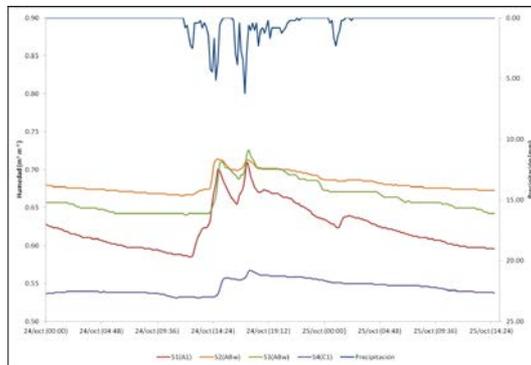


Evolución anual de la humedad del suelo y de la precipitación (valores promedios diarios).

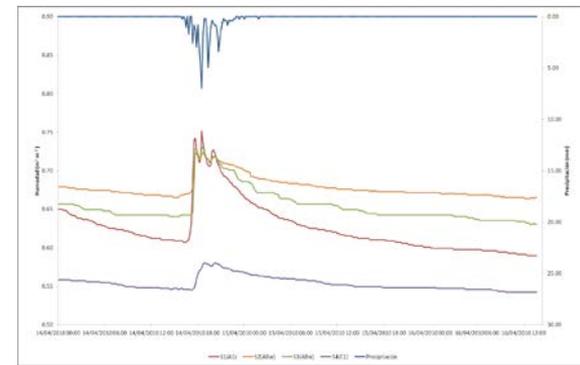
Fecha	Horizonte	Pt (mm)	Duración (h:min)	Intensidad (mm/h)	Hum antec. (%vol)	Hum máx. (%vol)	Tiempo respuesta (min)	Grado de saturación del suelo (%)
30/08/2009	A1	95.2	03:20	29.75	60	77	30	91
	Bw				63	78	30	92
	C1				49	56	40	67
24/10/2009	A1	83.5	12:00	6.93	59	70	50	83
	Bw				64	71	120	83
	C1				53	54	150	65
14/04/2010	A1	53.3	10:00	5.43	61	75	60	89
	Bw				64	73	80	86
	C1				55	58	120	70



30/08/2009



24-25/10/2009



14-15/04/2010

Evento de lluvia del 25/07/2010

- Sitio La Cortadura, Coatepec
- Microcuenca de orden 1, cauce perenne
- Bosque mesófilo secundario
- Precipitación antecedente: 199.14 mm en 6 días y 19:20 hrs
- Precipitación del evento (inicio 19:30 hrs): 117.1 mm caídos 4:10 hrs
- Intensidad: 28.1 mm/h; instantánea 38.29 mm/30 min
- En 4 horas cayó la misma cantidad de agua que en los 4 días anteriores
- RESULTADO??

25/07/2010

**Deslizamiento en cabecera y
flujo de escombros en cauce**

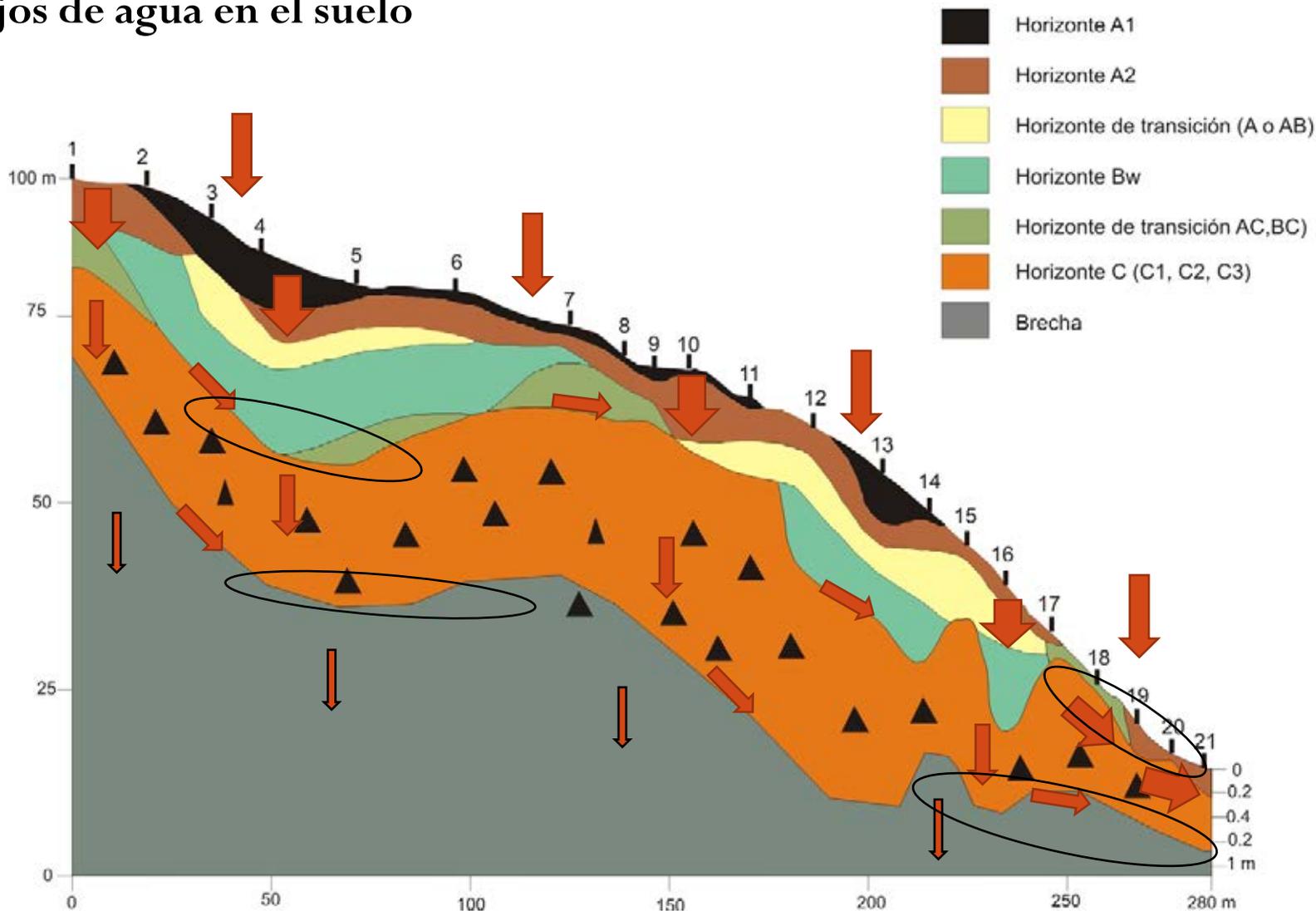
Superficie de ruptura





Bosque Mesófilo Secundario

Flujos de agua en el suelo



Condiciones hídricas que favorecieron el flujo de escombros

- La generación de escorrentía y el alto caudal pico en esta corriente de 1er orden, fueron los mecanismos detonadores del flujo de detritos.
- La escorrentía suministró agua a las masas de detritos ya acumuladas en el cauce y esto aumentó la presión de poros dentro del material, lo cual inició el flujo en el contacto con la capa menos permeable.
- La alta capacidad de infiltración del suelo y la inclinación, forma y rugosidad de la pendiente de la microcuenca, determinaron la altura del caudal pico, y por ende, la presión máxima del fluido dentro de los escombros.

CUENCA DEL RÍO LOS GAVILANES

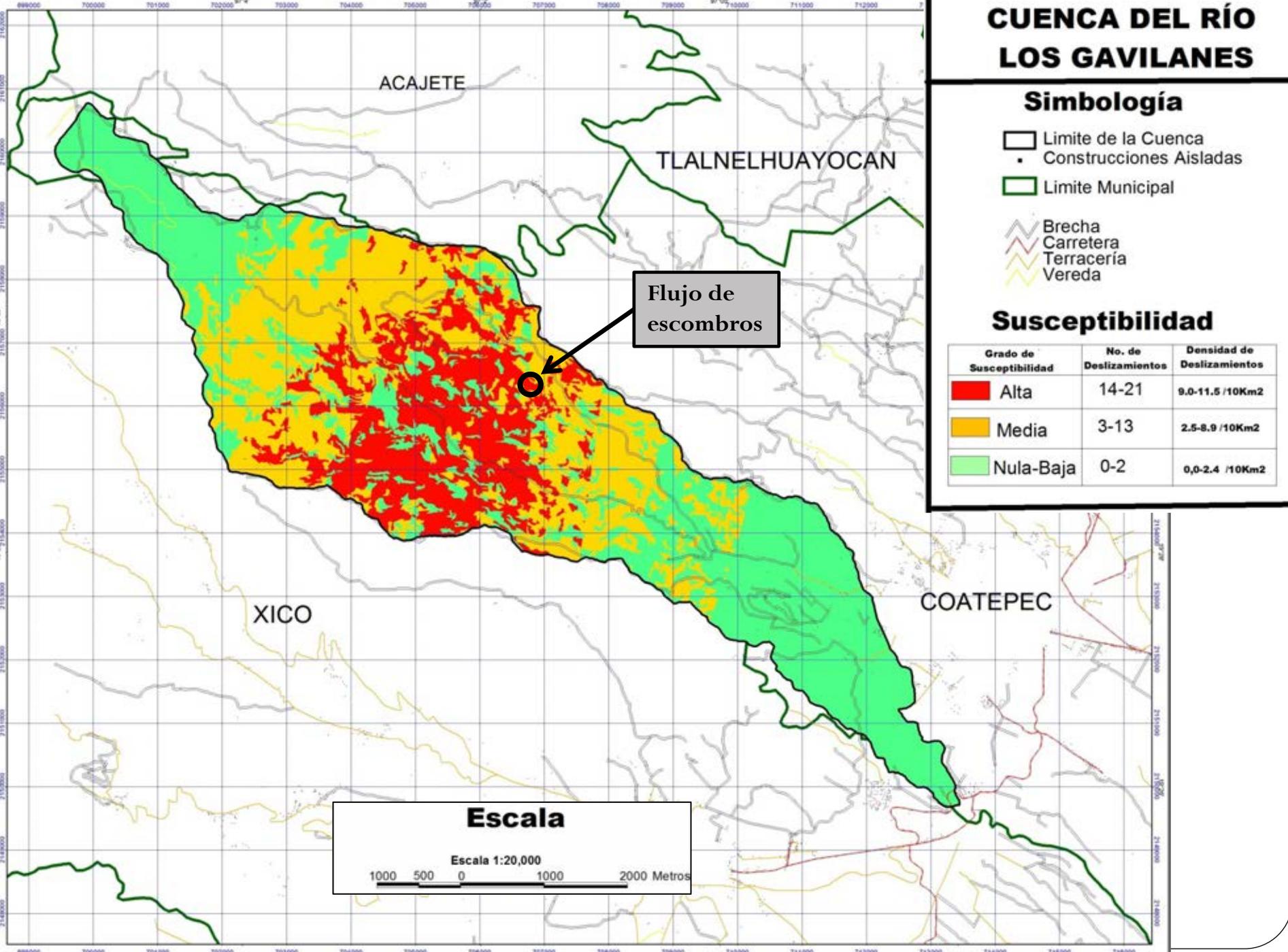
Simbología

-  Limite de la Cuenca
-  Construcciones Aisladas
-  Limite Municipal
-  Brecha
-  Carretera
-  Terracería
-  Vereda

Susceptibilidad

Grado de Susceptibilidad	No. de Deslizamientos	Densidad de Deslizamientos
 Alta	14-21	9,0-11,5 /10Km2
 Media	3-13	2,5-8,9 /10Km2
 Nula-Baja	0-2	0,0-2,4 /10Km2

Flujo de escombros



Generalización sobre deslizamientos

- Los **deslizamientos superficiales** son los más comunes en todas las zonas climáticas. Si los suelos son poco profundos, los flujos de agua son controlados por la infiltración, la percolación no saturada del frente de humectación y la brusca elevación de niveles freáticos superficiales, como respuesta a un evento de lluvia (*Haneberg and Onder Gocke, 1994*).
- Las condiciones que favorecen el movimiento de estos suelos no necesariamente dependen de una presión de poro positiva a lo largo de la superficie de deslizamiento.
- El movimiento puede ocurrir, a una profundidad crítica determinada por la cohesión del suelo y el ángulo de pendiente, cuando el contenido de agua del suelo se acerca a la saturación, lo cual reduce considerablemente su cohesión y resistencia (*Van Asch and Sukmantalya, 1993; Iida, 1999*).
- Los **deslizamiento profundos** son provocados, en la mayoría de los casos, por la presión de poro positiva a lo largo del plano de deslizamiento, ocasionada por la elevación de niveles freáticos locales. Esto significa que, para iniciarse, los deslizamientos profundos requieren de mayores cantidades de agua que los superficiales (*Van Asch , Buma, Van Beek, 1999*).

Inestabilidad de laderas en el centro del estado de Veracruz

Escorrentía y erosión

ANTECEDENTES

- La erosión hídrica es un problema de gran magnitud en las cuencas hidrográficas, tanto en áreas rurales como urbanas, porque deteriora la calidad del suelo y del agua, provoca sedimentación e incrementa el riesgo de inundación.
- Se debe a los efectos adversos sobre la infiltración, la capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de materia orgánica, el espesor del suelo y la biota edáfica (Pimentel, 2000).
- México tiene una larga historia de erosión, debido a la conversión de áreas forestales en campos agrícolas y pastizales.

Erosión y RUSLE (Sánchez, 2011)

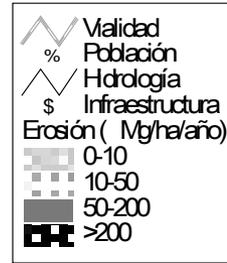
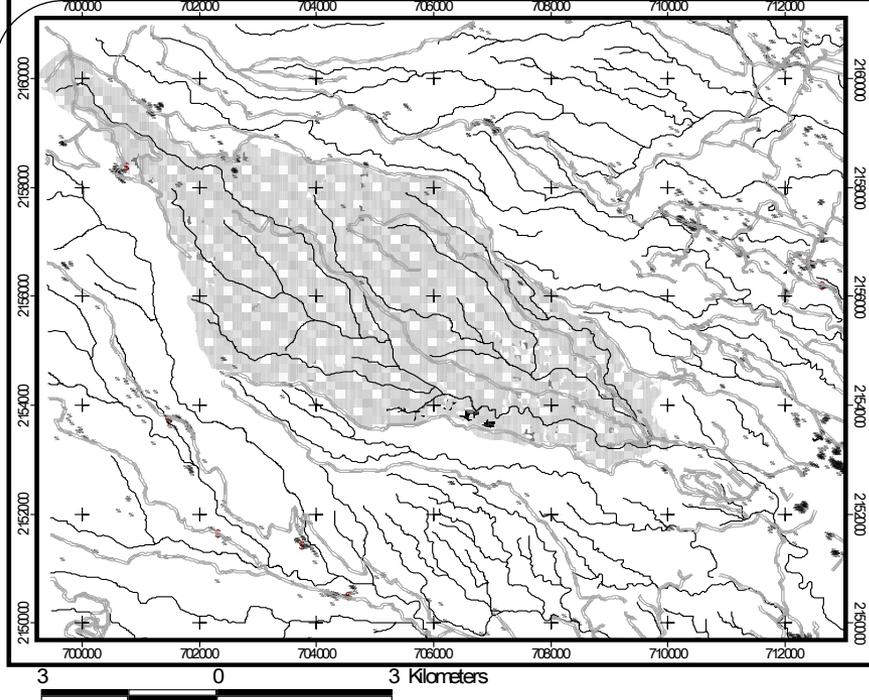
- La estimación de la pérdida de suelo anual (A) actual se obtuvo en formato raster en el software ArcView 3.2, a partir de la multiplicación de los factores R, K, LS, C y P, mediante la ecuación:

$$A = R * K * LS * C * P$$

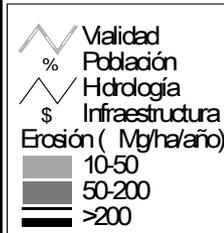
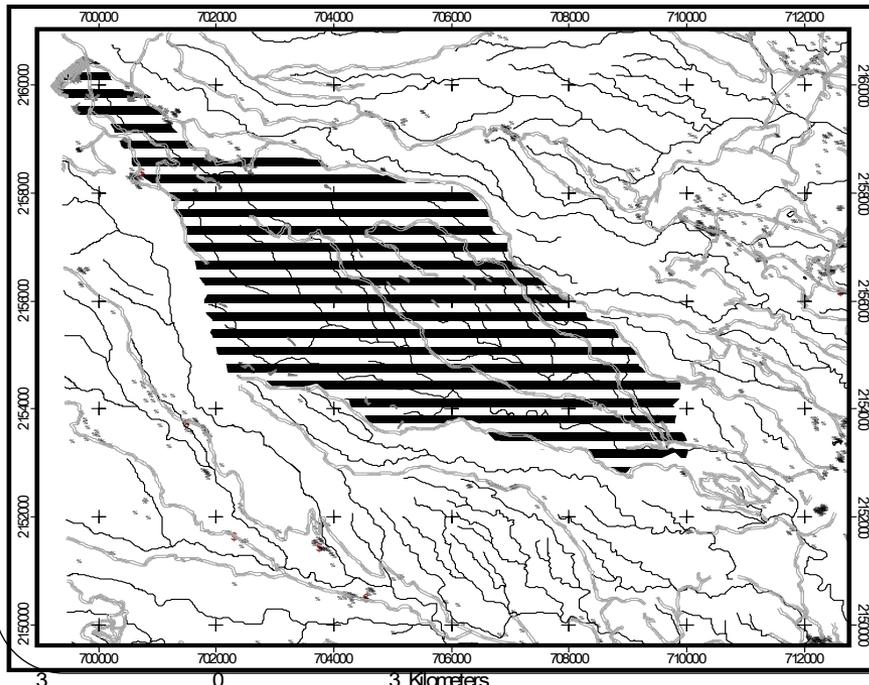
donde:

- A = Pérdida de suelo anual (Mg/ha/año)
- R = Factor de erosividad (MJ.mm/ha/h/año)
- K = Factor de erodabilidad de suelo (Mg.ha.h/MJ/ha/mm)
- LS=Factor de longitud y factor de inclinación de la pendiente (adimensional)
- C = Factor de manejo de cultivos (adimensional)
- P = Factor de prácticas de conservación (adimensional).

$$\text{Erosión actual} = R * K * LS * C * P$$



Tasa Mg/ha/año	Erosión actual (% superficie)	Erosión potencial (% superficie)
0 – 10	91.8	0.0
10 – 50	7.9	11.6
50 – 200	0.3	0.3
> 200	0.0	88.1



$$\text{Erosión potencial} = R * K * LS$$

Erosión actual para la subcuenca =
11.8 Mg/ha/año

- La erosión se produce en áreas con escasa cobertura vegetal y la tasa de pérdida de suelo se incrementa conforme aumente la pendiente.
- Los usos de suelo detonadores de erosión son en orden descendente: agrícola > pastizal > regeneración de bosque mesófilo de montaña > bosque mesófilo secundario > cafetal > matorral de *Pteridium* > matorral de *Bacharis* > plantación > bosque de pino > bosque mesófilo relictos > bosque mesófilo de montaña > humedal.

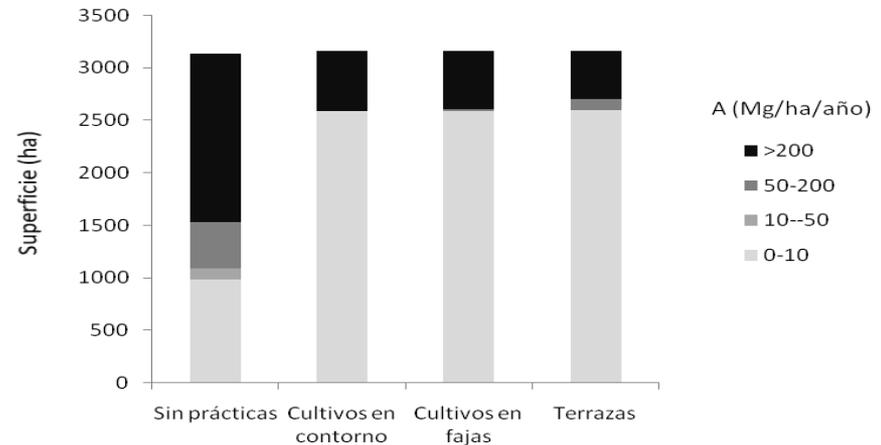
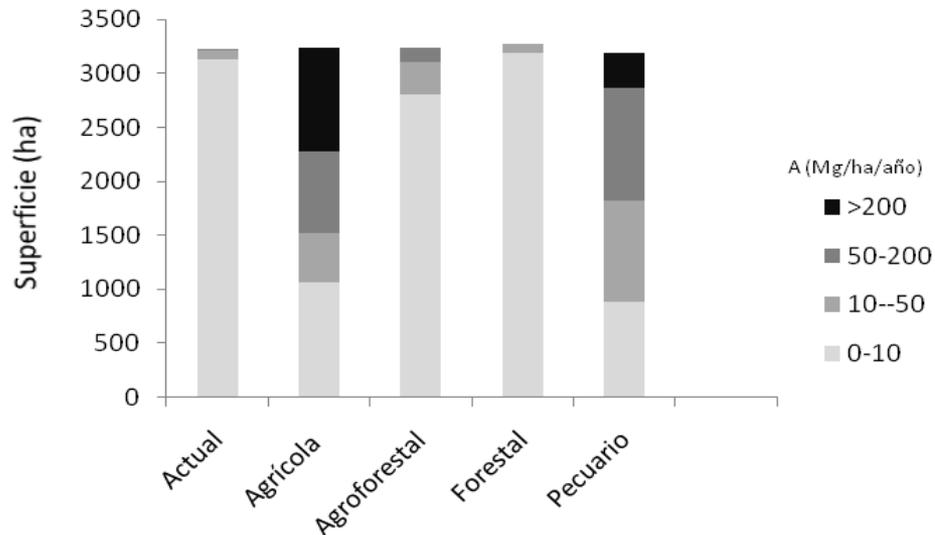


- **La erosión actual en el área de estudio es moderada**, con un promedio de 11.8 Mg/ha/año. El 97% de la cuenca se encuentra dentro de los límites de tolerancia de pérdida de suelo (< 10 Mg/ha/año).
- **Los usos de suelo que fomentan un mayor grado de erosión son el agrícola y el pecuario**; se deben establecerse medidas de conservación de forma prioritaria en estos sistemas.
- **La cobertura vegetal es el factor determinante**, ya que controla la erosión en las áreas con topografía accidentada. El suelo, por sus bajos valores de erodabilidad, es el factor que mitiga la erosión de forma natural.



- **Se recomienda privilegiar los usos forestales y agroforestales,** para que la subcuenca pueda proveer de forma duradera servicios hidrológicos y de retención de sedimentos.
- **Para usos agrícolas y pecuarios, las estrategias de conservación de suelos y agua dependerán del factor topográfico.** La implementación de cultivos en contorno, en fajas y terrazas es eficaz para pendientes leves y moderadas, mientras que en pendientes pronunciadas se recomienda el cambio de uso de suelo a forestal, combinado con prácticas de conservación en los sitios requeridos.

Escenarios de cambios de usos

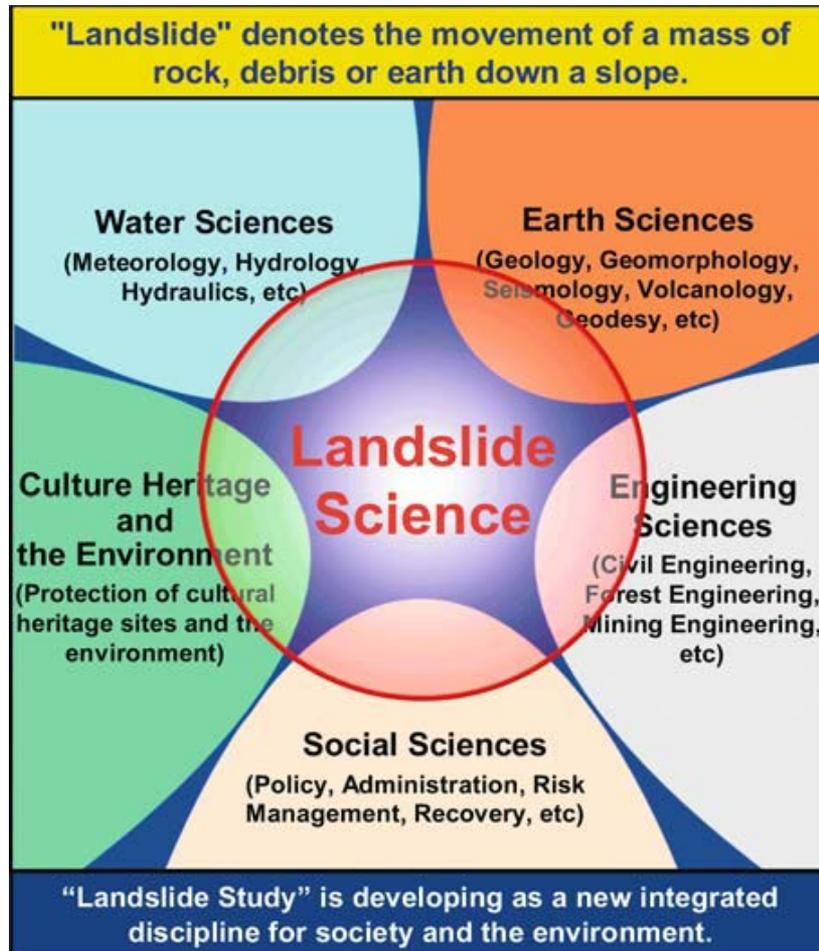


Escenarios de prácticas de manejo

Conclusión

- La inestabilidad de laderas es un problema general, desde áreas de alta montaña hasta zonas costeras, desde zonas muy húmedas hasta secas, desde áreas sujetas a terremotos y erupciones volcánicas, hasta áreas tectónicamente inactivas.
- Los procesos de ladera, erosivos, de remoción en masa y de hundimientos, son naturales y no se pueden evitar; pero muchos son también inducidos por las actividades humanas y la mala planeación del uso de la tierra.
- Para mitigar los efectos negativos de estos procesos y reducir los riesgos que pueden causar, se requieren estudios multidisciplinarios, y una colaboración entre las instituciones académicas, de gobierno y de la sociedad civil involucradas.

¿Necesidades de investigación y búsqueda de soluciones?



Posibles acciones:

1. Promover la investigación sobre la inestabilidad de laderas, para el beneficio de la sociedad y del medio ambiente;
2. Integrar la ciencia y la tecnología dentro del marco cultural y social, para evaluar el riesgo de inestabilidad de laderas en áreas urbanas y rurales, y contribuir a la protección del medio ambiente natural y transformado;
3. Combinar y coordinar "expertise" nacional e internacional sobre la evaluación de riesgos y la búsqueda de soluciones de mitigación y restauración; y
4. Promover un programa de acción concertado, multidisciplinario y multiinstitucional.

Gracias



Agradecimiento
SEP-CONACYT 106788