

Criterios geológico-hidrológicos para recomendaciones del uso de suelo en zonas conurbadas sujetas a afectaciones por lluvias intensas. Caso de estudio: sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Recibido: 12 de enero de 2012. Aceptado en versión final: 22 de junio de 2012.

Gloria Espíritu Tlatempa*

Resumen. Actualmente en la zona conurbana sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se manifiestan movimientos geológicos en donde la urbanización promueve su propia vulnerabilidad principalmente ante lluvias intensas provocadas por fenómenos hidrometeorológicos como tormentas tropicales y huracanes, e incluso de lluvias ordinarias, impactando además a otras partes bajas de la ciudad. Este trabajo determina zonas potencialmente activas e inactivas y su vulnerabilidad física en cuatro cuencas a escala 1:20 000, lo que permite integrar criterios que identifican localmente a los procesos evolutivos de movimientos de masas en laderas,

determinando escenarios temporales de actividad peligrosa. Para la obtención de elementos categóricos, los resultados muestran los peligros diferenciados en geológicos y los que tendrán su máximo desarrollo en lluvias extraordinarias; de los cuales se deriva a la determinación de sitios para la conservación, rehabilitación y con menor restricción de uso urbano.

Palabras clave: Movimientos de masa, potencial hídrico, cuencas hidrológicas, zona conurbada, mitigación de riesgos.

Hydrological and geological criteria for recommending the use of land in suburbs subject to effects caused by weather conditions. Case study: South of the city of Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Abstract. Currently in the urban zone south of the city of Tuxtla Gutierrez, manifest geological movements, where urbanization promotes its own vulnerability to heavy rains mainly by weather phenomena such as tropical storms and hurricanes and even ordinary rain, impacting also to other parts lowest in the city. This paper identifies potentially active and inactive areas and their physical vulnerability in four basins to 1:20 000, which can integrate locally criteria identifying the evolutionary processes of mass movements on slopes, determining temporal scenarios of dangerous

activity. Are processed in GIS, 28 factors of quality and quantity of such geological and hydrological and land use, to obtain categorical elements. The results show differentiated geological hazards and those who have their maximum development in extraordinary rainfall, which is derived from the identification of sites for conservation, rehabilitation and less constraint for urban use.

Key words: Mass movements, water potential, watersheds, metropolitan area, risk mitigation.

* Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Blvd. Juriquilla No. 3001, 76230, Querétaro, México. E-mail: espiritug@hotmail.com; gloria.espiritu.t@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Existe una gran necesidad de dimensionar los eventos antiguos, actuales y futuros de reciente desarrollo que determinan su vulnerabilidad ante riesgos, es el caso del espacio urbano a conurbano en la zona sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, que continúa las pautas de desarrollo urbano periférico, no planeado, dominado por la especulación inmobiliaria, devoradora de tierra agrícola y reservas naturales, similar a lo declarado para la Ciudad de México por Pradilla (en Calva y Aguilar, 1995). Aunque aún se conservan áreas de biodiversidad (Cerro Hueco, ZOOMAT, Monte Cielo y Reserva Mactumatzá), con pérdidas de especies endémicas (Cancino, 1999), son evidencia del intento por mantener condiciones ambientales bajo presión de crecimiento urbano (Fernández, 2010).

Algunas viviendas y comercios empresariales ya han sido afectados por movimientos de masas principalmente en lluvias, son peligros o fenómenos potencialmente dañinos en un cierto periodo de tiempo en un sitio dado (Westen, 2008). Esta acelerada exposición a ellos que provoca afectaciones, se suma a otras que en las últimas décadas se han multiplicado por diez (EDES0, 2008); de ahí que deba darse la valoración de la información geocientífica como herramienta básica para la toma de decisiones del proceso de planificación, ordenamiento de territorio y mitigación de riesgos considerando su vulnerabilidad, y que actualmente es desarrollada en otros países como los europeos a escalas 1:10 000 a 1:20 000 (Segura y Regueiro, 2009).

El objetivo general es establecer el uso de suelo pertinente en la zona conurbada, mediante el análisis espacial de las condiciones y fenómenos geológicos potenciales que se manifestarán aún más por la presencia de lluvias de 5 y 25 años.

- a) Analizar variables físicas geológicas e hidrologicas locales que promueven fenómenos geológicos, dando categorías a su potencialidad mediante la integración de relaciones espaciales y funcionales.
- b) Establecer un escenario mediato que demuestra la vulnerabilidad del terreno ante el desarrollo urbano con fines de prevención.

LOCALIZACIÓN

La zona en estudio se encuentra ubicada en la Provincia Fisiográfica denominada Depresión Central, en la ladera norte de la Mesa Copoya (Figura 1), muy cerca del límite con la subprovincia de la Meseta Central o Valle Central de Chiapas que a su vez pertenece a la Provincia Geológica Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas (Ortega *et al.*, 1992).

ESPECIFICACIONES DEL MÉTODO

Se hizo análisis cartográfico en un sistema de información geográfica (SIG), interpretación en geoimagen del 2004 a escala 1:10 000 y en fotografías aéreas años 1991, 1994, 2001. La descripción morfológica, estructural y parte de la litológica utilizando el corte de los modelos de elevación MDE n164500s163000e093000o0932000 y srtm CHIAPAS_18_09, con los cuales se detalló el contorno topográfico con curvas de nivel a cada 10 m y hasta 5 m, también para la delimitación de cuencas y detalle de hidrografía y mediante el módulo HEC RAS.

Determinación de fenómenos geológicos potenciales asociados a agua

Determinación de fenómenos geológicos potenciales

Se realizó análisis cualitativo, espacial y verificación en campo de las condiciones geológicas reconociendo elementos del posible movimiento en cuatro cuencas, aspectos litológicos en donde se determinan el grado de intemperismo de 16 muestras petrográficas y el de alteración por el tipo de estructura, según Therzagui (Chávez, 2006), que son sumadas para la obtención de un grado de alteración total (GA); así como la presencia de estructuras locales (IF) y el grado de exposición (GE); se integran para determinar tres tipos de grados que se suman a los de roca y geoforma (Tabla 1), para identificar el peligro geológico (terminología de CENAPRED, 2006) con alguna particularidad o característica del proceso, como movimientos antiguos de deslizamientos, caídas de roca en el escarpe y zonas de intenso fracturamiento o remanentes de

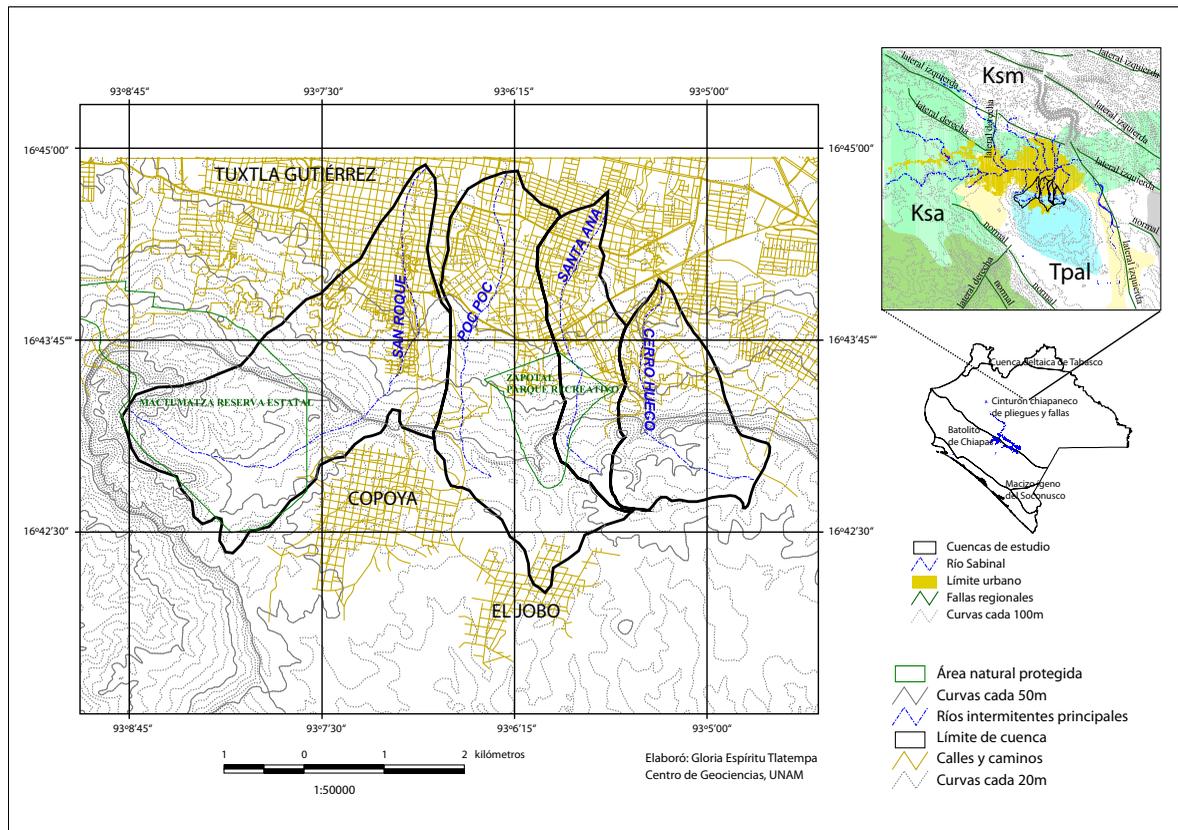


Figura 1. Ubicación, formaciones geológicas y geofomas en cuatro cuencas al sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Tabla 1. Método de trabajo para la determinación de peligros geológicos

	Grados	Variable	Observación
Superficies cartográficas de tipo de roca y geofoma +	Grado de exposición = categoría por pérdida de suelo + tipo de vegetación (GE)	categoría de pérdida de suelo	Baja: <10 a 50 ton/ha/a; media: 50-100 ton/ha/a; alta: 100-200 ton/ha/a; muy alta: >200 ton/ha/a.
		tipo de vegetación	Expuesto: arbóreo; medio expuesto: arbusto-pastizal; muy expuesto: sin vegetación.
	Grado de densidad de estructuras (IF)	longitud de estructuras	Densidad por tamaño (m) y número de fracturas, fallas, diaclasas, escarpe por tipo de roca.
		número de estructuras	
	Grado de alteración = grado de intemperismo + alteración (GA)	intemperismo	Alto: fracturas y oxidación; medio: fracturas u oxidación; bajo: no se aprecia ninguno.
		alteración	Alto (7) estratos delgados a masivos; bajo (1) masivo en una escala de 1 a 7.

movimientos en la parte baja de las laderas. Para lo anterior se detalla lo siguiente:

a) Grado de alteración. Para éste se consideraron dos factores: *a1)* Grado de intemperismo: tanto en rocas sanas como intemperizadas se distinguieron fracturas abiertas y rellenas, contenido mineral y su alteración; entre ellos, elementos oxidados, tipos de cementante, dedolomitización, fósiles y tipo de roca según Petijon y Folk (Palacios, 1992). Algunas rocas con grado de intemperismo alto, son calizas masivas cársticas fracturadas con vetillas rellenas y óxidos. *a2)* Grado de alteración (Therzagui): se han establecido siete grados para especificar la estructura de la roca desde la que se presentan estratos (1) hasta la masiva (7) con relativa presencia de fracturas, consideradas más alteradas (varias de ellas se encuentran en la zona de escarpe). Sumado este grado con el de intemperismo, se determinó el grado de alteración de la roca.

b) Grado de intensidad de estructuras. Se manifiestan fallas que pueden estar vinculadas al comportamiento regional, otras como fallas laterales, que aparentemente no son activas y están asociadas a la presencia de manantiales al igual que algunas fracturas locales; otras son detectadas en obras civiles como las de gravedad sobre las laderas y en el escarpe. También las diaclasas verticales observadas en algunos afloramientos calcáreos fueron consideradas por su relación con dolinas y simas. El grado está determinado por la cantidad y longitud de estructuras, principalmente de origen regional.

c) Grado de exposición. Está dado por la relación de pérdida de suelo y cobertura vegetal, principalmente en rocas clásticas, considerando cuatro grados, los extremos se refieren al alto en áreas con pérdida de suelo de >200/ton/ha/a, cobertura vegetal arbustiva, pastizal y zona pavimentada con pendientes fuertes y sobre todo suelos granulares. Este método es útil aunque, obviamente, existe una mayor complejidad en el medio ambiente (SEMARNAT-INE, 2003).

Determinación de potencial hídrico, estimaciones hidrologicas

En la evaluación se seleccionan once variables independientes para la determinación de potencial hidrográfico e hidrológico superficial según Horton (1945) y Aparicio (2009), resultando nueve variables principales (Tabla 2), usadas para indicar dos tipos de potencial (PH1 y PH2) con los cuales se establecen las relaciones algebraicas (Tabla 3), obteniendo una función que determina el grado de potencialidad hídrica (PH3).

a) Potencial hidrográfico

Se seleccionan seis tipos de variables físicas de la cuenca, consideradas independientes ya que son relativas a las condiciones del relieve y su composición; así como las longitudes y número de ríos primarios que se tienen en ella para la determinación de las densidades que a su vez dependen del área de cuenca por lo que son consideradas variables independientes.

Tabla 2. Método para obtención de potencial hídrico

Categorías		Variables dependientes	Variables independientes
potencial hídrico	potencial hidrográfico (PH1)	Densidad hidrográfica (número de ríos NR/km ²); densidad de escurrimiento (longitud de ríos LR/km ²).	Variables independientes: área orográfica (A), pendiente en porcentaje (S), perímetro de cuenca (P), longitud de río principal (L) y de cuenca (Long C), forma (Coeficiente de compacidad de Gravelius K).
	potencial hidrológico (PH2)	Volumen medio, máximo y mínimo anual. Gasto máximo por método racional modificado con curvas de intensidad de lluvia (SCT, 2005), (Q). Tiempo de concentración según Kirpich (tc), Vaciado (V), N° Froude	Las anteriores y lluvia media por isoyetas (PM), máxima y mínima anual, coeficiente de escurrimiento Chapingo, 1989 (Ce).

Tabla 3. Funciones utilizadas en la determinación de potencial hídrico a partir de variables básicas independientes

Potencial hidrográfico	$PH1 = NR/LR \cdot LR \cdot 0.28(P/RAIZ(A))$
Potencial hidrológico	$PH2 = 151.699(PM \cdot S \cdot A(0.2)/Long C(0.77)) \cdot L$
Potencial hídrico	$PH3 = NR \cdot Long C(0.77) \cdot A(0.3)/L \cdot LR \cdot PM \cdot S \cdot P$

b) Potencial hidrológico

Las variables hidrológicas se integran espacialmente en sus aspectos físicos, para la determinación de un potencial hidrológico (PH2) algunas implícitas: coeficiente de escurrimiento (Ce), pendiente (S) y uso de suelo y vegetación, para la determinación de gastos máximos esperados a 10 y 25 años (Q); y los tiempos de concentración (tc) y de vaciado (V), referidos a eventos de lluvias medias.

c) Potencial hídrico

Las relaciones físicas y matemáticas de dichas variables PH1 y PH2, son integradas al respecto de características de cuenca incluida en PH3, observando siete variables hidrográficas y una climática (lluvia media PM), todas ellas independientes que constituyen un valor adimensional.

Peligro geológico potencial asociado al agua y afectaciones

Para determinar el peligro asociado (PGAA) se adicionaron los valores de PH3 (Cuadro 1) con la clasificación de peligro geológico, considerando las evidencias de movimientos en lluvias máximas, y así su posible detonación posterior para un periodo de retorno de cinco años.

Por otra parte, las afectaciones o vulnerabilidad física son consideradas aquí como daño total de superficie y longitud de la zona urbana e infraes-

Cuadro 1. Relación para determinar el peligro asociado a agua

<p>PELIGRO GEOLÓGICO POTENCIAL ASOCIADO A AGUA (PGAA) = PELIGRO GEOLÓGICO (PG) + POTENCIAL HÍDRICO (PH3)</p>
--

tructura vial en donde se encuentra el peligro geológico potencial (Cuadro 1). Partiendo de que el riesgo depende además del peligro, de la vulnerabilidad de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el sistema perturbador (CENAPRED, 2006), para este caso se estimó la posible pérdida en viviendas y caminos.

RESULTADOS

Aspectos geológicos y geomorfológicos para determinar peligros geológicos

La Mesa Copoya se distingue por un paisaje meocárstico predominante limitado por escarpes, en donde se observan afloramientos de rocas semicompactas del Terciario Medio y Superior (Formaciones El Bosque, San Juan y Copoya) y material del Cenozoico (Qal y Qcol) sobreyacentes a las rocas del Paleoceno de la Formación Soyalo o Ti (González, 1966) que han aportado detritos a las zonas de piedemonte con material constituido por lutitas, margas, coluviones y fragmentos de areniscas y calizas inmersos en materiales sueltos. Estas formaciones han sido afectadas regionalmente por un sistema de fallas en su mayoría laterales dextrales, prevaleciendo las del norte con orientaciones promedio NE-SW y las del río Grijalva al SE con orientación NE-SW, y también por fracturas que iniciaron en el Cretácico y hasta el Terciario (Figura 2).

Las rocas del Terciario se formaron en un ambiente de relativa estabilidad en mar abierto y sobreyacen al basamento del Grupo Sierra Madre (CFE, 1989), con alternancia de lutitas y areniscas (Figura 2) en la periferia norte y oriente de la Mesa, con un espesor aproximado de 200 m, capas muy fracturadas de 10 a 20 cm que forma suelos de composición limo arcillosa. Posteriormente hubo aporte de terrígenos en el Eoceno Inferior (Fm. El Bosque), con areniscas rojas (Ar5) y cuarzos de hasta 5 cm de diámetro, que aflora en una cantera abandonada cerca del El Jobo.

En el Eoceno Medio la Fm. San Juan (Ferrusquía, 2000), tiene variedades de calizas fosilíferas (Cz3), areniscas (Ar4) y conglomerados, distribuida en las zonas de parteaguas de las cuencas sur orien-

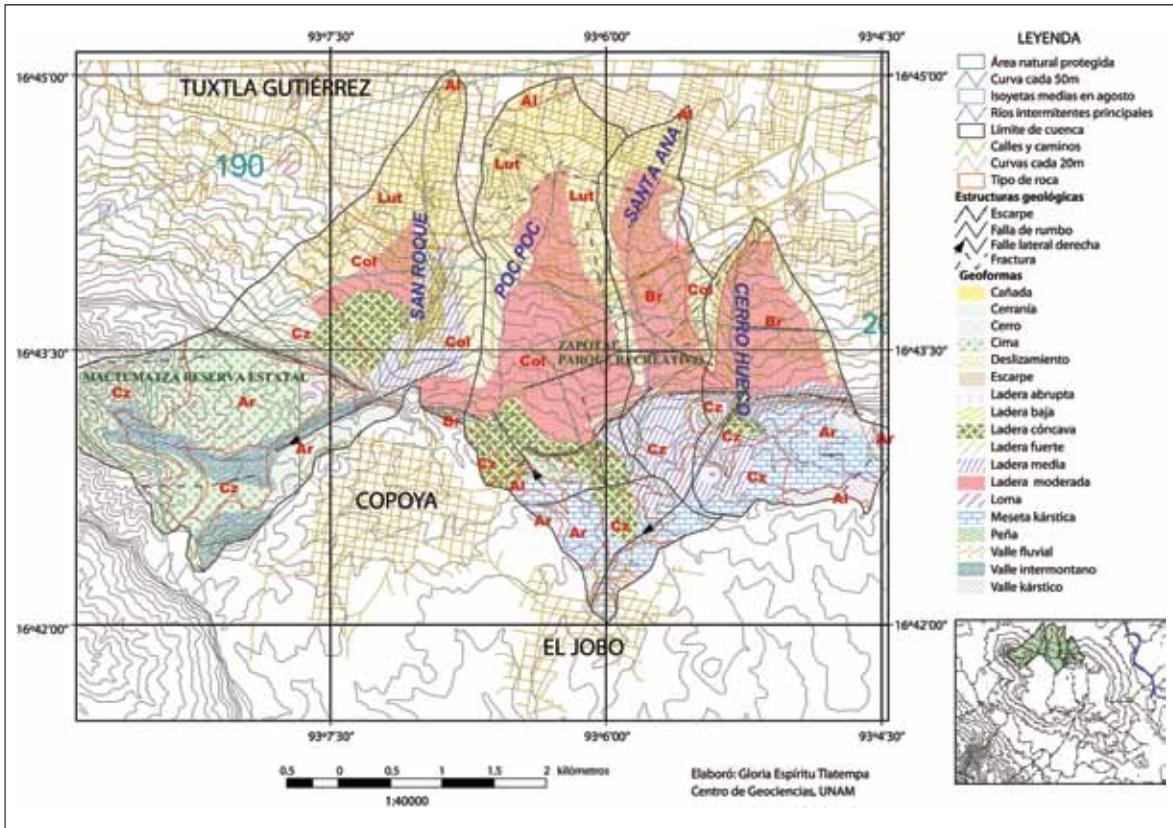


Figura 2. Litología, geomorfos, estructuras en las cuencas de análisis. Se muestran también isoyetas máximas en el área.

te, con estratos medios cuyo espesor de 30 cm. Y en algunos sitios con estratos masivos y con cavidades de disolución de espesor hasta 100 m. Se presentan algunos estratos calizos interestratificados con lutitas y areniscas de manera horizontal hacia el oriente en la “Cascada”. Sobre la superficie de la Mesa los relieves tienen pendientes de 0 a 10°, algunos son rellenos de material clástico que representan cauces antiguos.

En el Eoceno Superior, la Formación Copoya (CIGM, 2000), caliza tipo packstone de plataforma marina (Cz). Aflora en la parte oriente, en el manantial Cerro Huevo y los manantiales El Sope y El Tapir. Dominan en ella fracturas de corta extensión N-S y E-W que intersectan a una falla lateral derecha paralela al escarpe norte con dirección NE-SW y un cambio al NW por una fractura que la intersecta; sobre su eje, la disolución es más intensa, localizándose en ella la caverna del “Cerro Huevo” con una longitud aproximada de

1.10 km, que está clasificada como húmeda por la permanencia de agua en las bóvedas y galerías.

Para el Oligoceno, la Caliza Indiferenciada aparece en la zona del parteaguas sur, sobre camino de terracería a Rancho Tres Hermanos, que consiste en bancos de ostras junto a afloramientos de lutitas. Hacia el norte y descendiendo en las cuencas, se presentan fracturas E-W que pueden originar deslizamiento ya que son originadas por la falta de apoyo en la ladera acantilada en donde el talud está representado por lutitas y limolitas laminares interestratificadas, cubiertas en su mayor parte por depósitos fragmentos de rocas con bloques con tamaños de 2 a 3 m de calizas, principalmente en las partes altas del zoológico (ZOOMAT) y caídos, por lo que se manifiestan cierta inestabilidad actual.

En el Cuaternario se tienen dos categorías según su origen: Aluvial (Al) y Coluvial (Qal). El primero, en las partes bajas de las cuencas, en las zonas conurbadas y valles internos por procesos de

gravitación; el segundo, en las zonas de formaciones de procesos evolutivos con fragmentos irregulares y clastos de caliza en matriz arenosa, y las terceras, en las zonas de depósito de cauces fluviales con arenas (Ar1), limos y cantos rodados. Debido a la naturaleza y constitución de la zona intermedia de los detritos de los taludes, algunos movimientos se manifiestan con algunas fracturas norte sur (como en Av. del pozo) y otras en Cueva del Jaguar.

Hay un equilibrio morfológico de las cuencas en desarrollo juvenil pero con variantes de depósito tanto litológico (Figuras 2 y 3) como edáfico: a mayores altitudes de 900 msnm se tienen rendzinas (INEGI, 2009), de 800 a 900, rocas del escarpe, de 630 msnm hasta los 800 msnm hay predominancia de cantos rodados, prácticamente sin arcilla con litosoles y regosoles, y a altitudes menores histosoles y vertisoles con predominancia de arena hasta arcilla.

Sobre la superficie de la Mesa Copoya se tienen dos dolinas, una cueva y cuatro simas, lapiaz en los valles desnudos y diaclasamiento vertical en los afloramientos rocosos masivos y estratos horizontales de las rocas carbonatadas en la mayoría en valles kársticos (crema); mientras que otros como los fluviales (morado) están constituidos por material aluvial con excepción de Poc poc, así como laderas bajas (guinda); mientras que los mayores porcentajes de areniscas afloran en la mesa dentro las cuencas

de Cerro Hueco y Poc poc. En caso de brechas (Br) y coluviones resaltan las laderas cóncavas (verde) de San Roque y moderadas (naranja) de Cerro Hueco, con un gran porcentaje de lutitas (lut) en sus laderas bajas.

Típicamente la Mesa presenta simas que limitan a la zona impermeable de la Formación Soyaló, manifestando a su vez movimiento vertical de las masas de agua en zonas de fracturas que en su mayoría son los cauces de arroyos actuales.

Aspectos hidrológicos para determinar peligros geológicos potenciales

La superficie total analizada es de 19.7 km² distribuida en cuatro cuencas: Cerro Hueco (Arroyo Grande), Santa Ana, Poc poc y San Roque, todas ellas son tributarios importantes al río Sabinal, afluente del río Grijalva (INEGI, 2009). Sus características se muestran en la Tabla 5, con rangos de altitud de 500 a 1 000 msnm. Según los coeficientes de compactación, las cuencas Santa Ana y Poc poc son alargadas, por lo que los escurrimientos superficiales responden más rápido a la recarga por lluvia, además de la recarga por manantiales en lluvias (700 a 850 msnm).

Dentro de los aspectos hidrológicos se considera el tipo de clima ya que de éste depende el escenario del comportamiento hidrológico también a futuro. Este clima es cálido subhúmedo con temperatura

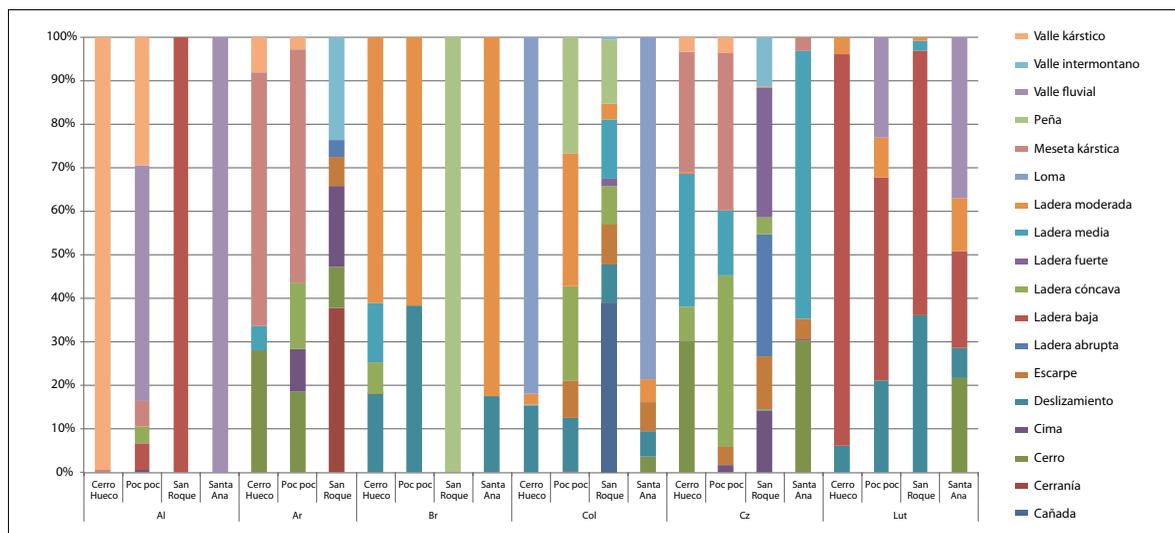


Figura 3. Porcentaje de superficie ocupada de geofomas en las cuencas por grupo de roca.

media anual de 24.55° C, régimen de lluvias en verano y lluvias invernales menores al 5% de la precipitación total, Awo (w) igw” (modificado por García, 1988). La precipitación media anual en esta zona es de 1 058 mm, manifestando lluvias durante el año, en el periodo hidrológico desde mayo a octubre de 1 004.8 mm, y en meses más secos de noviembre a abril de 53.2 mm. El mes más lluvioso es junio con 263 mm, siguiendo agosto, septiembre y julio, y el más seco enero con 0.8 mm siguiendo febrero y marzo con 2.3 y 2.7 mm, respectivamente. La estación ZOOMAT (CONAGUA, 2011) ubicada en la parte alta de la cuenca del río Santa Ana, tiene precipitación más alta que en las otras estaciones ubicadas al centro de la ciudad Palmas Tuxtla, Observatorio Tuxtla.

Cerca de la zona del ápice a menos de 700 msnm, en la pared de los cauces, suelen presentarse escurrimientos que representan el flujo de las laderas durante los meses de agosto y septiembre, con gastos máximos inferiores (0.005 l/s), los tramos de área hidráulica en las cuencas son pequeños y contienen sedimentos limoso-arcillosos, son arrastrados desde las laderas de las partes alta y media cercanas. En el caso del Arroyo Grande, con un área hidráulica pequeña de 1.2 m² con 0.21 m de alto, se observan sedimentos finos del 10%, mientras en mayor proporción son arenas 60% y guijarros de media a 2” con 25% en lluvias con velocidades según Manning de 1.4 m/s y gasto de 22 l/s, aunque no se categoriza como caudal torrencial ya que Froud es de 0.5, es decir, menor a uno, no manifiesta aún un régimen torrencial debido a la presencia de “saltos” que amortiguan la velocidad, en donde los sedimentos granulares son depositados en pozas en donde se desintegran químicamente cuando el cauce ya comienza su vaciado.

Las pendientes hidráulicas son variables, de 20 a 60° sobre el escarpe, mientras que aguas abajo disminuye hasta en un 50% y cerca del ápice de las cuencas se tienen pendientes de 10°. Esto obedece también a la distribución de partes planas, semiplanas y pequeñas cascadas y pozas en el cauce, por lo que el comportamiento varía tanto espacial como longitudinalmente. De acuerdo con lo anterior, el potencial hídrico está en función de las condiciones de máximo escurrimiento, aunque el medio y el mínimo juegan un papel relevante que indica su frecuencia; como el tiempo de concentración que relaciona la velocidad del escurrimiento según la longitud de la cuenca y el tiempo de vaciado considerando una base impermeable.

De estas variables fueron consideradas de más importancia las densidades y el escurrimiento, ya que la mayoría de los drenes son cortos y de primer orden y pueden ser de segundo orden en lluvias mayores de 100 mm en los meses de agosto y septiembre (Figura 4). La cuenca del río Poc poc puede en esta época dar aceleración al desarrollo de procesos, principalmente a su lado occidente con la reactivación de deslizamientos de derrubios antiguo muy cercano al cauce en la zona de coluvión y sus valores mayores, determinan una potencialidad mayor que la tendencia general (Tabla 5).

En la Tabla 4 se observa que el potencial hídrico calculado (PH3) es mayor en Cerro hueco y Poc poc, aunque el potencial hidrológico (PH2) sea mayor en Santa Ana y Poc poc con el máximo estimado para el potencial hidrográfico (PH1) en esta última.

Al respecto de las condiciones hidrológicas no existe mucha diferencia en valores (PH2), lo que indica un comportamiento similar en las cuencas; y el valor alto hidrográfico para la cuenca del río Poc poc, no significa que en todos los casos la cuenca sea

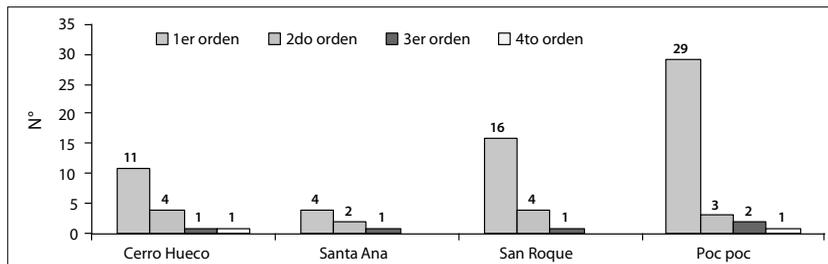


Figura 4. Orden de corriente en lluvias en cuatro cuencas de la zona sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Tabla 4. Comparación de las categorías de potencial hídrico

Cuenca	PH1 (hidrográfico)	PH2 (hidrológico)	PH3 (hídrico variables integradas)
1. Cerro Hueco	0.012	12	0.00184
2. Santa Ana	0.007	14	0.00036
3. San Roque	0.010	12	0.00137
4. Poc poc	0.024	15	0.00177

la de mayor peligrosidad, ya que las condiciones litológicas manifiestan que hay procesos que no dependen de la presencia de agua, o que pueden iniciarse aun con poca cantidad de ella, donde el proceso es permanente o incluso en la zona de inicio del fenómeno.

Los resultados de la Tabla 5 indican que los valores de potencial hidrológico son directamente proporcionales para cada cuenca; pero no se comportan de la misma manera al conjuntarlos con los hidrográficos (Tabla 4); es el caso de relacionar el número de escurrimientos con el coeficiente de escurrimiento en la cuenca Santa Ana, en donde

Tabla 5. Características físicas y potencialidad de agua en cuatro cuencas

Parámetros hidrográficos	Cerro Hueco	Santa Ana	San Roque	Poc poc	Parámetros hidrológicos	Cerro Hueco	Santa Ana	San Roque	Poc poc
Nº Escurrimiento	17	7	21	35	Lluvia media anal (mm de CONAGUA, 2011), isoyetas	1,032	1,032	998	1,032
Longitud río principal (km)	3.5	3.7	7.5	4.2	Coefficiente de escurrimiento (Ce)	0.49	0.59	0.42	0.46
Longitud escurrimiento (km)	3.5	4.6	5.9	4.8	Volumen medio anual de agua captado por cuenca (m ³)	1.7E+06	1.6E+06	3.4E+06	2.9E+06
Área (km ²)	3.25	2.52	7.90	5.98	Volumen mínimo anual (m ³)	6.5E+05	4.7E+05	1.2E+06	8.7E+05
Área de cuenca hidrográfica (km ²)	3.27	2.54	8.00	6.01	Volumen máximo anual de agua captada por cuenca (m ³)	4.8E+06	4.5E+06	9.4E+06	8.4E+06
Longitud media cuenca (km)	1.8	1.62	2.83	2.46	Acumulada de lluvia máxima anual (mm)	3,000.0	3,000.0	2,800.0	3,000.0
Área (km ²)	3.3	2.5	8.0	6.1	Intensidad de lluvia máxima en una hora (mm/h) para un periodo de retorno (T) de cinco años	70	70	75	65
Perímetro (km)	8.20	9.35	13.03	14.59	Q máx (Lt/s) método racional modificado T= 5 años, i=10 cm curvas	14.30	13.40	29.80	24.80
Densidad hidrográfica (Nº/m ²)	0.000005	0.000003	0.000003	0.000006	Q máx (Lt/s) método racional modificado T= 25 años, i=15 cm curva	21.70	20.40	45.40	37.70
Densidad de drenaje (m/m ²)	0.001	0.002	0.001	0.001	Q máx (Lt/s) método racional a 24 horas de Gregory Arnold	41.90	39.30	81.70	72.80

se observa que entre mayor distribución de agua superficial exista en la cuenca el coeficiente disminuye, esto debido a que no se tienen escurrimientos primarios en zonas no urbanizadas como en la de San Roque que cuenta con un área mayor.

Tipos de peligros geológicos potenciales (PG) y asociados al agua (PAA)

Básicamente se localizaron los siguientes peligros geológicos (Figura 5), algunos de los cuales se manifiestan como gravitacionales, pero tienen un incremento evolutivo cuando están asociados al agua.

Hundimiento. Se manifiestan los procesos de corrosión continua por clima tropical sobre el diaclasamiento en estratos de la Caliza Copoya, principalmente en los valles, aunado al fracturamiento local en la meseta. Lentitud del proceso de

relativa estabilidad; con presencia de simas y de agua perenne en galerías y salas con fondos de bloques rocosos, indica el desarrollo progresivo de cavidades internas en esta parte alta de las cuencas. Tres simas están ubicadas hacia el sur cerca de los parteaguas del Poc poc y Santa Ana, y conducen el agua de lluvia hacia el manantial Cerro Hueco (cuenca Arroyo Grande), por lo que se encuentran arenas cuarzosas y limos como sólidos suspendidos en lluvias, al A. Grande. Entre los principales aportadores al río Poc poc, se han determinado áreas susceptibles al hundimiento; por su grado de alteración y exposición alto, con desarrollo de lapiaz, simas verticales, roca expuesta (raquíticamente suelo y vegetación, exposición alta) y presencia de fracturas y diaclasas verticales. En esta parte se determina potencial hidrológico alto,

Tabla 5. Continuación

Parámetros hidrográficos	Cerro Hueco	Santa Ana	San Roque	Poc poc	Parámetros hidrológicos	Cerro Hueco	Santa Ana	San Roque	Poc poc
Elevación máxima (m)	930	920	1,020	880	Q máx (Lt/s) método racional convencional	19.00	21.60	91.00	57.70
Elevación mínima (m)	560	520	540	520	tc (min) según Kirpich	2.77	2.65	4.32	4.05
Rango hipsométrico (m)	370	400	480	360	vaciado (días)	16.61	15.79	19.87	18.80
Pendiente (H/L)	0.20	0.25	0.17	0.15	velocidad media (m/s)	5.60	6.07	6.52	6.95
Pendiente (grados)	6.9	7.9	8.9	9.9	Froude >1 régimen fluvial medio anual	0.04	0.05	0.04	0.04
Pendiente (radianes)	0.1	0.1	0.2	0.2					
Pendiente (%)	12.0	13.8	15.5	17.2					
Coefficiente de compacidad Gravelius (Kc)	1.3	1.6	1.3	1.7	Potencial hidrológico	0.012	0.007	0.010	0.024
Coefficiente de compacidad Gravelius (Kc)	poco cuadrada	alargada	poco cuadrada	alargada	Importancia relativa	Medio	Bajo	Medio	ALTO
Radio de circularidad (Ri)	0.6	0.4	0.6	0.4	Potencial hidrográfico	12	14	12	15
Radio de circularidad (Ri)	relieve marcado	relieve poco marcado	relieve marcado	relieve poco marcado	Importancia relativa	Medio	Alto	Medio	ALTO

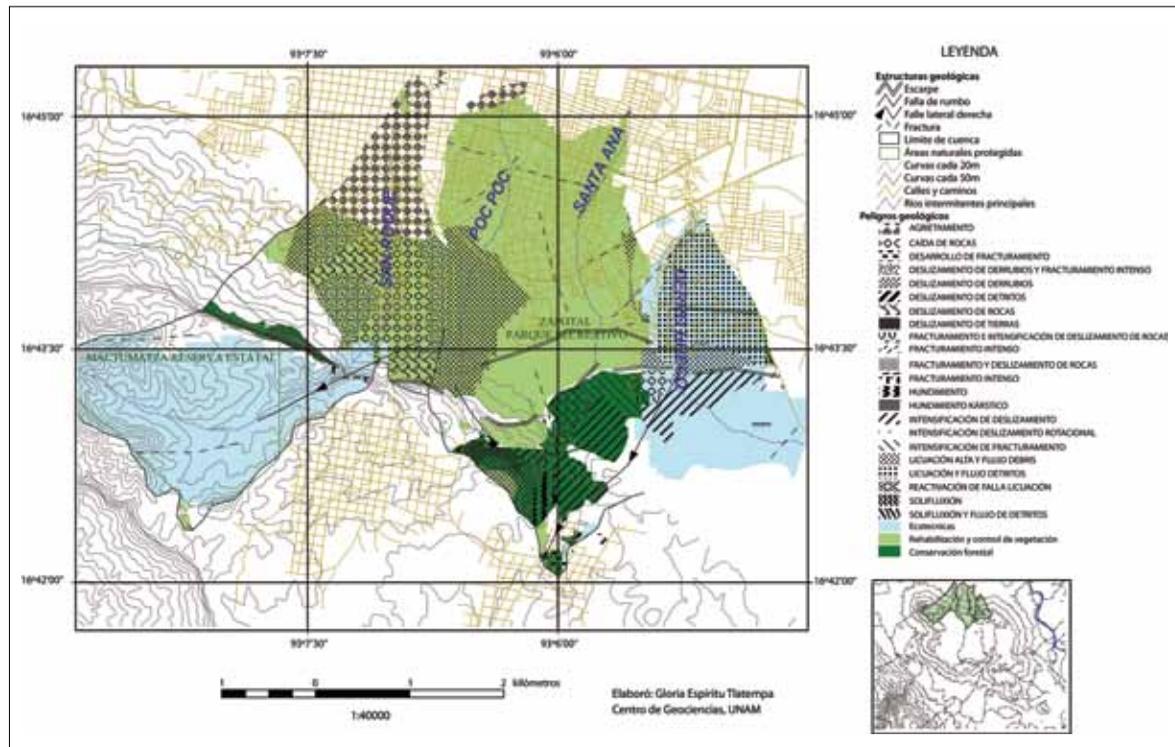


Figura 5. Tipos de peligros geológicos permanentes (rojo), asociados al agua (azul).

debido principalmente a la cantidad de lluvia media anual (más de 350 mm).

Caída de rocas. Sobre el escarpe los movimientos más frecuentes son caídas libres de roca que generalmente pertenecen a la caliza packstone, arenisca calcárea o arenisca de las Formaciones Copoya y San Juan del Eoceno. En la primera, su movimiento se inicia en la superficie de la mesa con agrietamiento paralelo al escarpe; debido al fracturamiento vertical de bloques de roca intemperizados con volcamiento anterior y de movimiento lento. Este tipo de peligro no se ha catalogado como alto, ya que a pesar de que el agua pluvial en esta zona juega un papel importante, el grado de exposición es aún bajo por el tipo de desarrollo del agrietamiento transversal solo en la roca compacta, no paralelo en el escarpe.

En la segunda, la caída libre se presenta en zonas con fracturamiento predominante y aberturas de paleocauce sobre el escarpe, en donde se observan fragmentos de roca sueltos tal vez conducidos por corrientes subterráneas hacia el talud. O simple-

mente, sobre el material de ladera en donde ya sea por socavación alrededor del bloque de roca, se promueve la caída libre. En las cuencas A. Grande y Santa Ana solo se observaron dos, una en la ladera poniente de C. Hueco (junio 2 de 2009, frente al MUCH) y otra en ladera fuerte del ZOOMAT (septiembre de 2009).

Deslizamiento de derrubios (también en cauces). Se sabe que un deslizamiento es el movimiento de cierto tipo de material (roca, detritos, suelo o tierra) sobre un plano de superficie de deslizamiento dentro la clasificación de remoción de masas (Alcántara *et al.*, 2008), transportado por gravedad o por agua. En este caso los deslizamientos se manifiestan en las zonas de talud aledaño a los límites de la mesa cárstica. La composición básicamente es detrítica, aunque en zonas en donde la mesa presenta arenisca tiene material removible en tamaños menores, lo que lleva a diferenciar entre detritos y suelo principalmente.

En la parte media, al occidente de las cuencas río Poc poc y Santa Ana, se determinaron varios

deslizamientos estimulados por cantidad de lluvias y/o escurrimientos sobre el material coluvial en laderas medias a fuertes, cóncavas y cañada, localizándose dos tipos de desplazamientos antiguos en el parteaguas compartido por las dos cuencas y al occidente de la cuenca de San Roque, los cuales cubrieron áreas de afloramientos de lutita del Paleoceno, al norte.

De la misma forma se tienen deslizamientos antiguos sobre los parteaguas compartidos de Santa Ana y Arroyo Grande, aunque prevalece el material tipo brechoide por el tamaño y angulosidad de fragmentos rocosos. En la zona alta de fuerte pendiente, de estos deslizamientos, los materiales se consideran fracturados y susceptibles, Es importante decir que un movimiento actual, que se desarrolla en la cuenca R. Grande, es el de reptación, originado desde las partes altas desde donde prevalece el desarrollo de fracturamiento.

Se observaron deslizamientos sobre cauce, se analizó material detrítico del lecho en temporada seca y a finales del periodo de lluvia (noviembre-diciembre). Se tomaron en dichos sitios muestras representativas de sedimentos, observando macroscópicamente su composición mineral, textura, tamaños, otros objetos extraños (como vegetación) y el porcentaje relativo de los elementos. Se observa que el tipo de material es limo arcilloso por lo que en temporada de lluvias se obtuvieron daños en la unidad habitacional ubicada sobre este estrato sin tratamiento desde el 2004.

En estos casos se determinaron varios tipos de deslizamientos con *categorías medias altas*, debido a sus condiciones físicas con grados altos pero con bajo a medio potencial hídrico en comparación con la zona de mayor recarga al sur.

Deslizamiento de suelos y tierras. Los deslizamientos de suelos se manifiestan sobre esta superficie de brechas calcáreas en donde los bloques se encuentran a profundidades de 6 m (Av. del pozo en la Cuenca Santa Ana), estos movimientos son lentos en la Cuenca R. Grande, pudiendo ser detonados en lluvias (falla rotacional en el mismo lugar). Para el caso de los sitios de fraccionamientos se tiene suelo tipo arcilloso de hasta 12 m, que sobreyace a este material brechoide por lo que se ha manifestado desde el 2003, esto es deslizamiento de suelo sobre

todo en lluvias. Es importante mencionar que existe agua subsuperficial en esta época y que las cargas de estos fraccionamientos motivaron el desarrollo de movimiento translacional con la creación de escalones cuando ya se manifestaba la ladera hacia abajo con expansión de suelo propia de la reptación.

De acuerdo con Penck (1953), la remoción de masas puede deberse al transporte por agua, en este caso, cuando los detritos son susceptibles a ello, se pueden manifestar procesos de soliflucción y licuación, sobre todo si se tienen partículas arenosas en mayor proporción como es el caso muy cercano a los cauces de los arroyos; se considera que estos procesos se desarrollan como tipos de flujos desde detritos hasta el debris.

Flujo de detritos. En el caso de flujos, éstos son desarrollados por el contenido de agua en exceso, con suelo expuesto en pendiente fuerte. Su presencia ha sido retribuida al tipo y tamaño de sedimentos que cubre a las lutitas pero aún no se manifiesta este fenómeno de manera masiva; aunque se sabe que los detritos están presentes en esta zona catalogada de baja potencialidad hídrica, no se descarta la posibilidad de un fenómeno local, ya que puede variar de lento a moderadamente rápido, con coeficientes de escurrimiento que tienden a incrementarse por la pavimentación creciente. Los flujos considerados como peligros de potencial alto (Tabla 6), se deben a las condiciones de estructuras geológicas y a su respuesta inmediata a un incremento de lluvia.

Flujo de suelos. Cuando la arcilla es socavada y debido a la presión subyacente de roca más compacta provoca rompimiento y deslizamiento continuo en bloques sobre lodo arcilloso y se manifiesta en movimiento rotacional, en suelos la duración es muy repentina (minutos, horas) o flujo de lodo, como lo observado en la parte media de las cuatro cuencas estudiadas. Según Carson y Kirby (1972) sus velocidades promedio son de 10-1 hasta 10-3 cm/seg. Se consideró alto en cuanto a sus grados, principalmente de estructura y tipo de roca, así como de potencial de agua, en donde se considera un incremento gradual del coeficiente de escurrimiento por el área de pavimentación.

Flujo debris fenómeno. Este tipo de movimiento es dado en materiales predominantemente

Tabla 6. Determinación de categorías para tipos de peligros geológicos asociados fuertemente al agua (superficie en km²)

Cuencas en este trabajo/peligros potenciales	Poc poc	Cerro Hueco	San Roque	Santa Ana
Preferencia en peligros geológicos: estructuras	Muy alta- Alta	Alta	Muy alta	Alta
Alteración	Alta-Media	Alta-Media	Media	Alta
Exposición	Alta-Media	Alta-Media	Media	Media-Alta
Potencialidad hídrica	Baja-Media	Muy baja	Alta	Sin presencia
Agrietamiento	21.87		1.11	48.59
Hundimiento de clásticos	1.88		0.17	
Hundimiento kárstico	1.58		1.20	
Intensificación de deslizamiento	9.03			10.47
Intensificación de fracturamiento	3.18			
Reactivación falla licuación	0.24			
Deslizamiento de derrubios			7.12	
Deslizamiento de tierras			0.18	
Desarrollo de fracturamiento			0.03	
Deslizamiento de rocas		0.05		4.67
Fracturamiento de intensificación deslizamiento de rocas	0.01			1.20
Intensificación de deslizamiento rotacional	1.33		1.01	0.09
Intensificación de fracturamiento		0.10		7.47
Licuación alta y flujo debris		0.02		4.66
Licuación y flujo de detritos		1.00		
Solifluxión				1.64
Solifluxión y flujo de detritos		0.31		
Reactivación de falla licuación	0.24			
Fracturamiento y deslizamiento de rocas			0.01	
Fracturamiento intensificación deslizamiento rotacional				1.20
Potencialidad hídrica (preferencia con lluvias)	Alta	Alta	Alta	Alta
Exposición	Alta	Alta	Baja	Alta
Alteración	Alta	Media	Media	Media
Estructuras	Alta activa	Media activa	Muy alta	Media activa
Área de cuenca (km ²)	5.98	3.25	7.90	2.52
Porcentaje afectación potencial (%)	43.2	1.7	10.8	80.0
Afectación por lluvias (%)	5.6	4.6	8.4	84.8

arenosos a finos, aunque dentro de los finos contiene más limo, es muy rápido y se origina en el parateguas alto entre las cuencas Santa Ana y Grande de forma alargada con una longitud aproximada de 1 km hacia el libramiento sur en la cuenca Santa Ana. Su potencial es alto.

En la Figura 4 y en la Tabla 6 se observa la categoría de las relaciones; el orden de ellas se considera básico para la determinación de peligro geológico (prioritarios estructuras y alteración); o asociados al agua con potencial hídrico y exposición.

VULNERABILIDAD FÍSICA POR PG Y PAA

Las manifestaciones principales son en fraccionamientos de reciente construcción que incluso han provocado afectación a zonas aledañas, como en La Cueva del Jaguar (desde 2003), y otros como el MUCH (2010), avenida del pozo (desde 2000), carretera a Suchiapa (2010), entre otros. Generalmente estos sitios están ubicados en los depósitos coluviales del Terciario.

Los procesos más evidentes en las cuatro cuencas de este trabajo (Figura 4), están referidos a procesos lentos que se manifiestan durante y después de la construcción (Home Depont y Hotel Camino Real); es decir, procesos de reptación que evolucionan a deslizamiento de suelos en lluvias mayores a 100 mm, en los meses de agosto y septiembre se presentan sobre laderas urbanizadas sin obras de mitigación (Fracc. Cueva del Jaguar) ya que están ubicados sobre material arcilloso-arenoso proveniente de lutitas. El deslizamiento de suelos también se presenta de acuerdo con Bloom (1998) sobre las cañadas expuestas principalmente cerca a corrientes superficiales desprovistas también de cobertura u obra de mitigación (arroyo Grande de la cuenca Cerro Hueco). Soliflucción y reptación son procesos lentos que rara vez generan pérdida de vidas humanas como es el caso de los procesos rápidos; en ambos casos se provocan diversos daños económicos (EDES0, 2008).

Para el caso de la Cuenca Cerro Hueco, los movimientos en temporada de estiaje ya están presentes y es posible que evolucionen algunos a

(Figura 5) asociados al agua, zona intermedia de la cuenca (718 msnm), a 300 del Río Grande. Impacto en obras de construcción y pavimentación, en la zona media de la cuenca, con depósitos de talud.

Adicional al fracturamiento local por el desarrollo de una geoforma y la desecación del material. La grieta sobre el pavimento tiene una abertura de hasta 25 cm y profundiza en el material de talud, en dirección noreste sobre la construcción, originando un movimiento de masas en forma semicircular, hacia la parte sur de la zona. A nivel de superficie (m²), el área urbana está asociada a las categorías de potencialidad, como ya algunos de los fraccionamientos lo manifiestan recientemente. Algunos de éstos (Figura 5) llegarán a afectar aún más tramos de calles (Tabla 7) como el ejemplo por agrietamiento esperado para el caso de la cuenca San Roque, principalmente.

Las cuencas tendrán mayores afectaciones por los fenómenos geológicos asociados a agua (potencial alto), siguiendo el grado de exposición e intensidad de estructuras y alteración en rocas clásticas de las laderas.

La mayoría de los tramos de calles afectadas (Figura 6), están asociados a deslizamientos y fracturamiento de la lutita, hacia las cuencas San Roque (64%), siguiendo Cerro Hueco (19%), Poc poc (13%) y Santa Ana (2%), esta última debido a la presencia de áreas naturales (ZOOMAT) que fungen como amortiguadores para el control de escurrimiento en la parte alta de las cuencas.

DISCUSIÓN

Debido a las características geológicas, geomorfológicas, e hidrológicas, la zona de estudio está sujeta a dos evidentes grupos de procesos: carsitividad y deslizamientos; el primero se observa superficialmente en las cabeceras de cuencas que puede evolucionar a hundimientos promovidos por presencia de fracturas más que por agua; está caracterizado como procesos de remoción de masas sobre las laderas de las cuencas, siendo más frecuentes los deslizamientos con posibilidad de desarrollo o detonación en presencia de lluvias. En este sentido, el análisis se centra en la formulación

Tabla 7. Posibles afectaciones (en metros) por peligros geológicos en lluvias extremas

Peligros potenciales	Avenidas	Calles	Ríos	Kilómetros
Alta	4 150	8 850		12 960
Agrietamiento		3 950		3 950
Desarrollo de fracturamiento		177		177
Deslizamiento de derrubios	3 740	2 710		6 450
Fract. Intensificación deslizamiento de roca		78		78
Hundimiento		70		70
Hundimiento kárstico	95	11		105
Intensificación de deslizamiento		35		35
Intensificación de fracturamiento		241		241
Licuación alta y flujo debrís	276	895		1 170
Licuación y flujo de detritos		154		154
Reac. Falla licuación		370		370
Soliflucción		7		7
Soliflucción y flujo de detritos		157		157
Baja		11 910	1 650	13 560
Agrietamiento		42		42
Caída de rocas		97		97
Desarrollo de fracturamiento		86		86
Deslizamiento de derrubios		4		4
Deslizamientos de detritos		73		73
Frac. Intensificación deslizamiento de roca		2		2
Licuación alta y flujo debrís		364	154	518
Licuación y flujo de detritos		11 150	1.50	12.65
Media	2 690	37 460	3 370	43 520
Agrietamiento	2 610	20 400	1 320	24 320
Caída de rocas		8 610	1 440	10 050
Desarrollo de fracturamiento		650		650
Deslizamiento derr. fracturamiento intenso		4 260	297	4 560
Deslizamiento de rocas	83	3 460	319	3 870
Deslizamiento de tierras		81		81
Total general (metros)	6 800	58 220	5 020	70 040

de relaciones de fenómenos geológicos asociados al agua, para mejorar el detalle de generación de mapas de peligros geológicos tipo.

Las relaciones entre potencial geológico (Tabla 1) y el hídrico (Tabla 3) son directamente o inversamente proporcionales, ya que en espacial dependen

de tres comportamientos: la composición litológica, tipo de geoforma y concentración de intensidad de lluvia. Aunque en la Tabla 4 se observa una ligera variación entre los resultados de la potencialidad hidrográfica y la hidrológica. En este trabajo se utilizó la adición tratando de dar un mismo peso

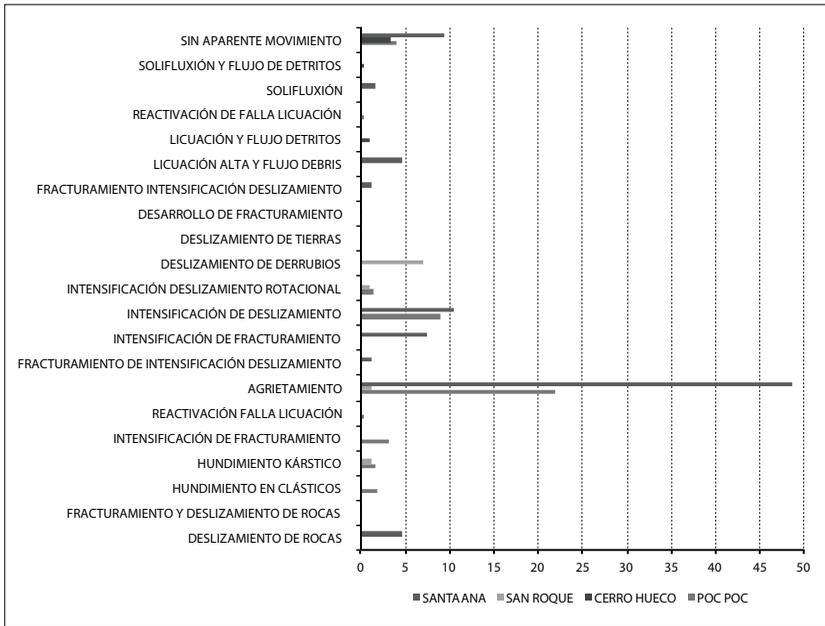


Figura 6. Superficie en porcentaje que se afectará por peligro geológico potencial.

ponderado a las condiciones geológica e hidrológica en cada cuenca, que se consideran generan los peligros geológicos asociados al agua (PAA, Cuadro 1). Así entre los resultados, mientras la intensidad de precipitación sea mayor, las cuencas en esta zona en sus partes media y baja contendrán mayores gastos (Q máximo $T=5$) debido al incremento de C_e considerando que existirá una superficie de pavimentación mayor a futuro, sobre todo cuencas como Poc poc, Cerro Hueco y Santa Ana.

Los resultados integrados de estimaciones en la cuenca (Tabla 4, Figura 5) y evidencias de campo, demuestran un desarrollo progresivo determinante por el tipo de material lítico coluvial no expuesto en algunas zonas arboladas como el área natural ZOOMAT-El Zapotal por lo que se mitiga el movimiento de tierras, ya que de acuerdo con Goodman (2010), la vegetación actúa como retenedor de sedimentos en materiales y suelos residuales evitando la erosión rápida de suelos en taludes y controlando el escurrimiento del subsuelo, por lo que aquí se recomienda su conservación, que por otra parte limita la urbanización en zonas de peligro.

Las zonas expuestas con desarrollo potencial evolutivo de peligros, no excluye la posibilidad de que se tenga una detonación en cualquiera de éstos debido a que las intensidades de lluvia pueden

variar espacialmente, según el comportamiento de lluvias extraordinarias; sin embargo, en cuanto a cantidades, considerando el periodo de retorno de cinco años, los gastos máximos serán desde 13.4 a 29.8 l/s (el aforo en Cerro Hueco (luego de una lluvia de 125 mm) resultó en 22 l/s y el cálculo de 21.7 l/s con una $T=25$ años del método racional (Tabla 5) y solo se percibió un sitio de movimiento en deslizamiento de suelos urbanos. Lo importante es saber que el fenómeno se puede incrementar debido a la exposición, alteración y estructura de la roca que promueve a su vez la pérdida de sedimentos por gravedad o por agua superficial. Con ello se prevé que los peligros pueden incentivarse sobre laderas con calles aunque sean pavimentadas por flujo de detritos o de tierras provenientes del escarpe y los márgenes de los arroyos principales en donde hay evidencia en época de lluvias (como en la cuenca Poc poc).

Las cuencas que ya tienen gastos máximos mayores sobre el cauce principal y a su vez en los arroyos de primer orden, promueven el arrastre de sedimentos sobre las geoformas de antiguos deslizamientos, en donde ya existe un gran porcentaje de área urbana, del orden de 60 al 85% de su área total de cuenca (Poc poc y Cerro Hueco). En este sentido la dinámica de flujos de suelo y deslizamientos de

tierra serán promovidos con lluvias con periodos de retorno de cinco años en sitios de cambio de uso de suelo por pérdida de vegetación según la carta de uso de suelo y vegetación 2011 de SEMAVIH.

Para lluvias intensas, los resultados de las cuencas Santa Ana y Poc Poc indican un porcentaje de mayor afectación potencial (las evidencias de campo son mayores en la primera) que las otras cuencas (Tabla 6 y Figura 6), debido al urbanismo, sobre pocos metros de calles (Figura 7), que impactaría si éste creciera aún más al sur debido a que presenta agrietamientos y fracturamientos en lutitas y coluvión asociados a deslizamientos antiguos; para el caso de la cuenca Cerro Hueco los movimientos son permanentes y muy lentos, acelerándose en lluvias aun no intensas, muy localizados solo sobre material fino, aquí el proceso de reptación no depende de su potencialidad hídrica, la cual es menor a 25 años (Tabla 5), pero en algunas zonas cercanas a los ríos, el proceso de licuación puede presentarse en lluvias.

Las categorías de peligro mostradas en la Figura 7 son afectaciones lineales, pero en el caso de superficies están determinadas por la superficie de las cuencas; es el caso de deslizamiento de derrubios, licuación, flujos y hundimientos aun con lluvias medias principalmente en Poc poc, en donde se aprecian (Tabla 6) valores mayores de potencialidad hídrica (PH3) para la reactivación de falla rotacional y de licuación con (PH3) alta con un porcentaje total de afectación del 43.2%

de su superficie con (PH3) media a alta. En este sentido, es importante mencionar que en el caso de la cuenca Santa Ana se tiene una similitud de incentivarse movimiento con o sin PH3 debido al gran porcentaje de fracturamiento en su superficie, sobre sus laderas (Figura 3).

Conociendo esta dinámica, el ingeniero proyectista tanto como el planificador, deben atender de manera especial y local la posibilidad de conservación o mitigación en áreas naturales; ya que la construcción de cualquier obra en estas zonas, representa fuertes inversiones y elaborados diseños de ingeniería, además de poner en riesgo la zona urbana cercana; el seguimiento a este trabajo es la obtención de mayores aproximaciones en las predicciones de dirección y dimensión del movimiento inestable, debido a la mayor exactitud en las mediciones de campo y ensayos de laboratorio, por la compacidad más homogénea de la roca, según el campo de la geotecnia (Goodman, 2010).

Las recomendaciones generales como se muestra en la Figura 5 para la mitigación, son ingeniería geotécnica en zonas ya urbanizadas, rehabilitación con vegetación para mitigación de movimiento de sedimentos y la no urbanización en zonas estratégicas de inicio de movimientos de masas y hundimientos. Es importante considerar que en la mayor parte de las laderas hacia el oriente de la cuenca Cerro Hueco, el tipo de suelo es arcilloso, 12 m aproximadamente (Díaz, 2007) sobre roca lutita, por lo que se manifiestan los problemas de

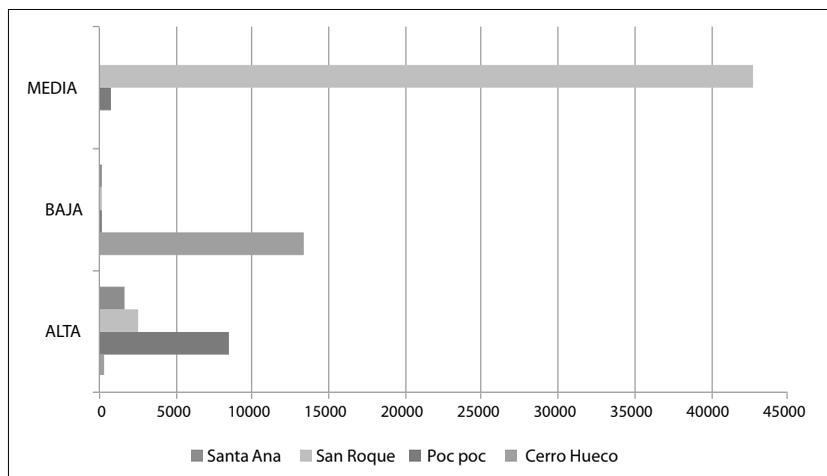


Figura 7. Categorías de peligro potencial en la infraestructura vial (metros) sobre las laderas.

obras con deslizamientos sobre todo en terrenos húmedos; las obras civiles recomendadas aun con métodos de control de taludes indican quitar el material deslizable para una mayor seguridad de la obra ($FS > 1.5$), así como la realización de obras secundarias necesarias, que permitan el drenaje superficial apropiado y el drenaje subterráneo para eliminar filtraciones al hacer muros que soporten los taludes inestables (Vidal, 2003). En este sentido, también las vías de acceso pueden ser conservadas ante peligros geológicos asociados a agua, mediante la construcción de drenes pluviales, lavaderos, guarniciones, alcantarillas, muros de retención y cultivo de especies vegetales ya que garantizan el control de escurrimiento y ayudan a estabilizar el talud tendido (Ruiz, 2000).

En el diseño de escenarios, las relaciones que existen de los elementos que originan la evolución de erosión permanentemente gradual y que en un futuro pueden ser susceptibles de desarrollarse en eventos extraordinarios, como altos volúmenes de escurrimiento provocados por lluvias extraordinarias o sequías de duración prolongada o incluso construcción de obras civiles que no hayan considerado relaciones hidro-geomorfológicas de desarrollo permanente.

REFERENCIAS

- Alcántara Ayala, I. y F. G. Murillo García (2008), "Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 66, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 457-64.
- Aparicio, M. F. (2009), *Fundamentos de hidrología de superficie*, Limusa, pp. 113-208.
- Bloom, A. (1998), *Geomorphology. A systematic analysis of late Cenozoic landforms*, 3a. ed., Prentice Hall, pp. 169-197.
- Calva, J. y A. Aguilar (1995), *Desarrollo Regional y urbano. Tendencias y Alternativas*, tomo 2, Seminario Internacional sobre alternativas para la economía mexicana.
- Cancino Hernández, D. (1999), *Factores asociados a la regeneración del chicozapote Manilkara Zapota Van Royen (Sapotaceae, en el Centro Ecológico y Recreativo "El Zapotal", Tuxtla Gutiérrez Chiapas, México*, CATIE, Turrialba Costarrica.
- Carson, M. A. and M. J. Kirby (1972), *Hillslope forms and process*, Cambridge University Press, London.
- CENAPRED (2006), *Glosario de términos relacionados a peligros geológicos* [http://www.cenapred.gob.mx/es/Glosario/Glosario_A-Z.php].
- CENAPRED (2011), [Erosión. www.cenapred.gob.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/Fenomenos-Meteorologicos/Erosion/].
- CFE (1989), *Geología del estado de Chiapas*, Subdirección de construcción U. Estudios de Ing. Civil, Subjefatura de estudios geológicos, Depto. de Geología, Superintendencia de estudios zona sureste, pp. 40-52.
- Chávez, A. J. (2006), *Geotecnia*, CFE-UNAM, p. 147.
- CIGM (2000), *Estudio geológico ambiental del área donde se ubica el zoológico regional "Miguel Álvarez del Toro" (ZOOMAT), de Tuxtla Gutiérrez*, Colegio de Ingenieros Geólogos de México, Comité Técnico, México.
- CONAGUA (2011), Datos de estaciones climáticas ZOOMAT, Las Palmas CFE, Observatorio Tuxtla y Boquerón.
- Díaz García, V. H., G. Alonso Solís, J. Ordoñez Ruiz y F. Nanguelú Hernández (2007), "Propuesta de zonificación geotécnica de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez", *Rev. Pakal*, Facultad de Ingeniería UNACH, año 6.
- Edeso, J.-M. (2008), "Peligros geológicos y geomorfológicos", *Rev. Lurralde: Investigación espacial*, núm. 31. p. 38.
- Fernández, M. Y. (2010), *Percepciones ambientales sobre una Reserva Ecológica Urbana: el caso de la Reserva Ecológica, "El Zapotal" Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. tesis Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable, Colegio de la Frontera Sur, México.
- Ferrusquía, V. I. (2000), "Terciario tardío de la Meseta Copoya", *Revista paleontológica de la UNAM*.
- Horton, R. E. (1945), "Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology", *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 13.
- García, E. (1988), *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*, Talleres Larios, México.
- Goodman R. E. (2010), "El comportamiento de la roca en taludes", *Tercera Conferencia Marsall*, Congreso de Geotecnia.
- INEGI (2009), Cartografía digital de temas de edafología, clima e hidrología superficial escala 1:50 000, Imagen SRTM de CHIAPAS_18_09.
- Ortega, G., S. Mitre, Q. Roldán, G. Aranda, Z. Morán, A. Alaniz y S. Nieto (1992), *Texto explicativo de la Quinta Edición de la Carta Geológica de la República Mexicana Escala 1:2 000 000*, UNAM-SEMIP-RM, México, p. 12.
- Palacios, S. H. (1992), *Manual para el estudio microscópico de rocas sedimentarias*, Instituto Politécnico Nacional, México.

- Penck, W. (1953), *Morphological analysis of land forms*, St. Martin's, New York.
- Ruiz, D. (2000), *Conservación de carreteras federales*, Memoria Técnica, tesis UNACH.
- Segura, S. R. y M. Regueiro (2009), *Mapas de riesgos naturales en la ordenación territorial y urbanística*, Ministerio de Vivienda, Universidad Complutense de Madrid.
- SEMARNAT-INE (2003), *Introducción al análisis de riesgos ambientales*, p. 68.
- SEMAVIH (2011), *Bases cartográficas de uso de suelo y vegetación en la Reserva El Zapotal y área de influencia sur*.
- Vidal, N. M. A. (2003), *Estudio geotécnico para estabilidad de suelos, talud y terraplén en el acceso al hotel Camino Real*, tesis, UNACH.
- Westen, C. (2008), *Vulnerabilidad*, Departament Earth Systems Analysis, ITC, ONU.