

TRABAJO FÍN DE MASTER: TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID. CURSO 2011-2012.

“SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA DE MOVIMIENTOS DE LADERA MEDIANTE S.I.G. EN EL MUNICIPIO DE BERLÍN, EL SALVADOR”.



Alumno: Jorge Navarro Vidal.

Tutores: David Palacios Estremera.

Alicia Rivas Medina.



Contenido

1	Introducción	6
2	Objetivos y Motivación	8
2.1	Objetivos	8
2.2	Motivación	8
2.3	Antecedentes de colaboración.....	9
3	Encuadre Territorial	10
3.1	Encuadre de la región.....	10
3.2	Encuadre del municipio.....	11
4	Características del medio físico y humano.....	13
4.1	Medio Físico	13
4.1.1	Marco tectónico y geológico.	13
4.1.2	Propiedades Geotécnicas de los suelos.	14
4.1.3	Climatología.....	14
4.1.4	Vegetación.....	15
4.1.5	Usos del suelo.....	16
4.2	Medio Humano	16
5	Conceptos generales	18
5.1	Movimientos de laderas.....	18
5.1.1	Clasificación de los movimientos de ladera.	18
5.1.2	Causas de los movimientos de ladera.	21
5.1.3	Movimientos de ladera en el municipio de Berlín.	23
5.2	Susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo	23
6	Metodología de cálculo.....	25
6.1	Diseño del Sistema de Información Geográfica (SIG).....	25
6.1.1	Antecedentes	25
6.1.2	Características del SIG.	26
6.1.3	Información de partida.....	26

6.2	Cálculo de la susceptibilidad.....	27
6.2.1	Variables de cálculo.....	27
6.2.2	Metodologías utilizadas.....	34
6.2.3	Resultados y conclusiones del cálculo de la susceptibilidad.....	50
6.3	Cálculo de la amenaza.....	52
6.3.1	Factor detonante. Amenaza sísmica.....	52
6.3.2	Fuente Sísmica.....	52
6.3.3	Modelización de la amenaza sísmica.....	55
6.3.4	Amenaza de deslizamientos de laderas.....	61
6.3.5	Conclusiones a la amenaza de movimientos de ladera.....	64
7	Análisis de las precipitaciones.....	65
8	Elementos vulnerables.....	68
8.1	Nucleos de población.....	68
8.2	Red viaria.....	70
9	Conclusiones y recomendaciones finales.....	72
	Bibliografía:.....	76

AGRADECIMIENTOS

En estas líneas me gustaría agradecer a las personas y a los equipos de trabajo de diversas instituciones que me han apoyado en la elaboración de este trabajo fin de master.

A Alicia Rivas Medina, tutora de este proyecto, por su continua dedicación a este trabajo, por sus enseñanzas diarias y por su motivación en los buenos y malos momentos.

A la Dra. M^ª Belén Benito Oterino, catedrática de la ETSI de Topografía , Geodesia y Cartografía, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), por su apoyo y confianza en mi trabajo y en los diferentes proyectos llevados a cabo dentro del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica.

Al Dr. David Palacios Estremera, catedrático de Geografía Física de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), cotutor de este proyecto, por su revisión y por sus valiosas enseñanzas en el master y a lo largo de toda la licenciatura de Geografía en la UCM.

A todo el personal de la gerencia de Geología de la Dirección General del Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, en especial a Manuel Díaz, Walter Hernández, Luis Mixco y Luis Hándal por la información geográfica aportada, por sus aportaciones teóricas y prácticas y por facilitar mi estancia en El Salvador.

A Milagro Rodríguez y Mercedes Gómez de la municipalidad de Berlín por la información geográfica aportada.

A Julio Alberto Guidos y Carlos Ricardo Medrano de LaGeo, por el mapa litológico de Berlín.

A Jorge Gaspar, Román Hernández, Raúl García, María Pilar González, Alejandra Staller y todos los demás miembros del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica de la UPM, por sus contribuciones en este trabajo.

A la Dra. Rosa Mecha López, profesora del departamento de Geografía Humana de la UCM por haberme guiado durante la licenciatura en la concepción de una geografía de la cooperación al desarrollo.

A Daniel Boyano Sotillo por su amistad, por sus aportaciones sobre Geografía Humana de El Salvador y del municipio de Berlín y por servirme de guía durante mi estancia en El Salvador.

1 Introducción

El presente trabajo fin de master pretende evaluar la susceptibilidad y la amenaza de movimientos de ladera en un ámbito local, el municipio de Berlín, situado en el departamento de Usulután, Republica de El Salvador, Centroamérica.

El Salvador es un país localizado en una zona de subducción, donde existe una alta actividad sísmica y volcánica que se ha evidenciado en el pasado por la ocurrencia de sismos destructores y erupciones volcánicas. Uno de los principales riesgos derivados de la alta peligrosidad sísmica del país han sido los movimientos de ladera, como así lo atestiguan los más de 500 eventos que se produjeron a raíz de los terremotos de 2001.

Los movimientos de ladera pueden ser inducidos por diversas causas, que actúan como factor detonante. Los más frecuentes son las fuertes lluvias y los terremotos, que en principio pueden considerarse independientes, aunque se ha evidenciado que muchos terremotos han disparado mayor número de deslizamientos en zonas previamente afectadas por fuertes lluvias.

Cuando una amenaza natural afecta a la sociedad, entendida en un contexto amplio que abarca a personas, estructuras, infraestructuras, actividades económicas, etc., ésta constituye un riesgo. La reducción del riesgo o minimización de los efectos adversos de los deslizamientos de ladera demanda caracterizar, en primer término, la amenaza que a la que está sometida el territorio de estudio.

Desde una perspectiva social, el aumento y densificación de la población en torno a los grandes centros urbanos, como San Salvador, provoca que cuando se presentan fenómenos naturales tales como sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos, etc. se presenten graves daños sobre las personas, sus bienes y su infraestructura, causando enormes pérdidas, que en ocasiones pueden llegar a afectar de en forma muy severa al el desarrollo económico y social del país.

Desde el punto de vista de la ordenación del territorio los análisis geográficos, geológicos, ecológicos, de infraestructura, etc. y por lo tanto de susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo deben ser los más completos posibles, puesto que son determinantes para la orientación de los usos potenciales del suelo y para la definición de intervenciones sobre el medio natural y los asentamientos humanos.

Para desarrollar estudios de análisis de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo desde el enfoque integrador que supone la ordenación territorial, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), suponen una herramienta de ayuda muy adecuada para llevar a cabo análisis multicriterio.

En el presente estudio se evalúa la susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera dentro de un SIG, que integra factores condicionantes de la inestabilidad de laderas y técnicas de evaluación multicriterio. Este método se ha aplicado en una escala municipal, que engloba la mayor parte del término municipal de Berlín (El Salvador), el cual por sus condiciones orográficas y geológicas, le hacen propenso a sufrir movimientos de ladera, como atestiguan los eventos asociados a factores detonantes como sismos y fuertes precipitaciones ocurridos en esta zona en el pasado.

El área de Berlín, está considerada como prioritaria en la prevención y mitigación de amenazas naturales para el gobierno de la República de El Salvador.

2 Objetivos y Motivación

En este apartado se definen los objetivos a lograr en el presente proyecto y los elementos que han motivado su ejecución.

2.1 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es calcular la susceptibilidad y la amenaza de movimientos de ladera en el municipio de Berlín, El Salvador, para poder incluir sus resultados en los futuros planes de ordenación territorial y de mitigación del riesgo a nivel departamental y municipal.

El objetivo final será obtener una base científica que permita proponer acciones que puedan ser replicadas en otros municipios en El Salvador con alta amenaza de movimientos de ladera. Dichas acciones podrán regular los futuros usos del suelo, consiguiendo con ello disminuir la vulnerabilidad de la población.

Para ello se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Actualización, análisis y depuración de las bases de datos de deslizamientos existentes en el municipio mediante un Sistema de Información Geográfica.
- Recopilación y análisis de la cartografía temática de la zona que reflejan las variables más importantes a tener en cuenta para estimar la susceptibilidad del terreno a sufrir un deslizamiento.
- Estudio de diferentes métodos de cálculo de la susceptibilidad y la amenaza a los movimientos de ladera y su aplicación en la zona de estudio.
- Obtención de mapas de susceptibilidad del terreno en el municipio de Berlín.
- Modelización de un posible detonante sísmico y cuantificación de su peligrosidad en la zona estudiada.

2.2 Motivación

A raíz del huracán Mitch en 1998 y de los terremotos de enero y febrero en 2001, se genera en la República de El Salvador un importante volumen de datos que han constituido la base documental para la aplicación metodológica a desarrollar en el presente proyecto fin de máster.

En los terremotos de enero y febrero de 2001 fallecieron 1.142 personas y cerca de 8.000 resultaron heridas. De esas 1.142 víctimas mortales, 585 personas fallecieron a causa del deslizamiento de Las Colinas (Santa Tecla).

Con este proyecto se pretende contribuir a delimitar futuros escenarios de peligrosidad de movimientos de ladera y con ello, poder prevenir sus consecuencias y facilitar el desarrollo económico y social del municipio objeto del estudio.

2.3 Antecedentes de colaboración

En este apartado se explicarán los diferentes proyectos de cooperación previos a la realización del presente proyecto fin de master, las cuales han proporcionado la base necesaria para establecer el presente estudio de carácter municipal.

Como trabajos previos cabe destacar los enmarcados dentro de la línea de cooperación abierta tras los sismos de 2001 entre diversas instituciones de El Salvador y España. El Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía de la UPM, del cual formo parte, ha trabajado en todo estos proyectos:

- “Riesgo Sísmico y Peligro de deslizamientos de Laderas en El Salvador I”, año 2004 a través del cual se formalizó institucionalmente la cooperación entre la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.
- “Riesgo Sísmico y Peligro de deslizamientos de Laderas en El Salvador II”, año 2005.
- “Riesgo Sísmico y Peligro de deslizamientos de Laderas en El Salvador III”, año 2006”.
- “Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica (Proyecto RESIS II), coordinado por el gobierno de Noruega y del CEPREDENAC, año 2008.
- Tesis doctoral “Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos” realizada por Maria José García, año 2008.

3 Encuadre Territorial

En el presente apartado se realizará un encuadre territorial que irá de lo regional a lo local, es decir se encuadrará primero territorialmente El Salvador y luego el municipio de Berlín.

3.1 Encuadre de la región

El Salvador es el país más pequeño y más densamente poblado de América Central, con una superficie de 21.041 km². Se localiza en la Costa del Pacífico, limitado al oeste por Guatemala, al norte y este por Honduras y al este por el Golfo de Fonseca. Geográficamente está ubicado entre las coordenadas, latitud: 13° 9' N/ 14° 26' N y longitud: 87° 43' W/ 90° 08' W.

Su capital, San Salvador, es la ciudad de mayor población del país, con cerca de dos millones de habitantes. Esta población corresponde a más de una cuarta parte de la población total del país, la cual fue estimada en el censo de 2011 en 6.090.646 habitantes.

A pesar de ocupar la posición 105 (0,674) en el Índice de Desarrollo Humano (Informe PNUD año 2011) de un total de 177 países, es decir calificado con un Desarrollo Humano medio, El Salvador es un país que sigue acrecentando graves diferencias socio-económicas entre la población, especialmente en las áreas periféricas de los núcleos urbanos y de las zonas rurales.

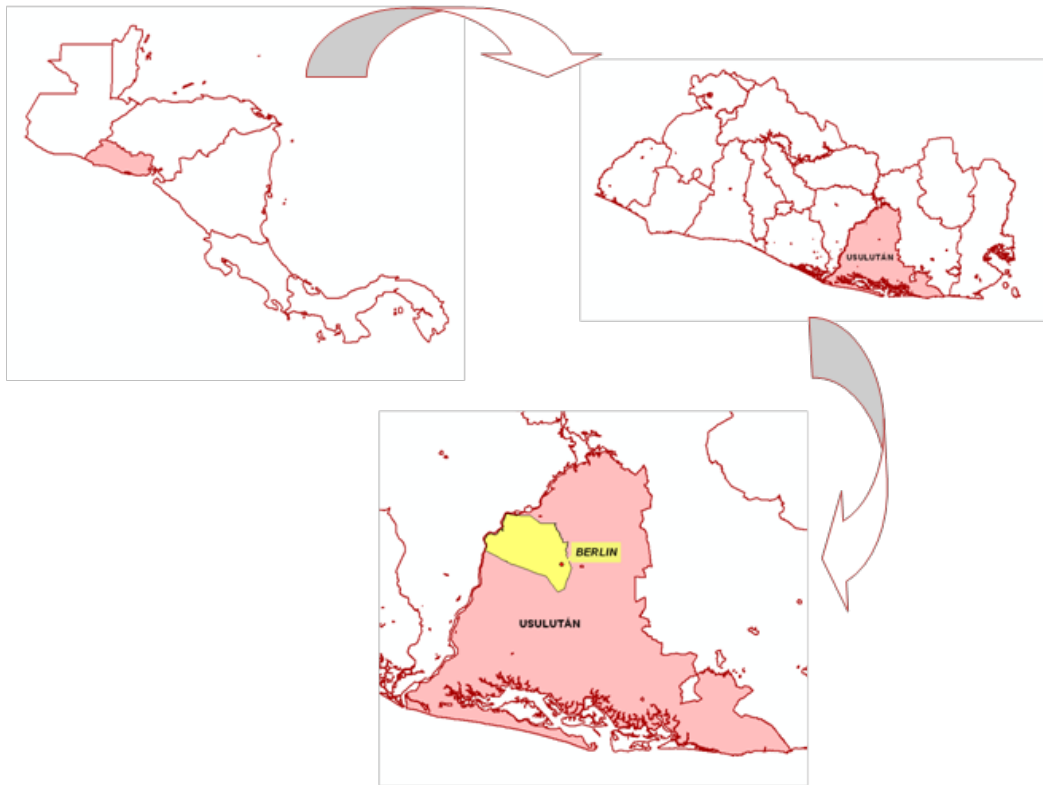


Figura 1. Encuadre del municipio de Berlín en su departamento, en el país y en la región de Centroamérica.

3.2 Encuadre del municipio

El municipio de Berlín está situado en el departamento de Usulután; el municipio está limitado al norte por los municipios de: San Vicente y Mercedes Umaña; al noreste por el Municipio de Mercedes Umaña; al este por los municipios de Alegría y Mercedes Umaña y al sureste por el Municipio de Tecapán; al sur por los Municipios de San Francisco Javier y Tecapán; al suroeste, y al oeste por el Municipio de San Agustín; al noroeste por los Municipios de San Vicente y San Agustín. Está ubicado a 112 Kilómetros de San Salvador, y se encuentra en la zona central de la cadena montañosa del país.

La cabecera municipal es la ciudad de Berlín, situada a 1.020 m.s.n.m, entre las coordenadas geográficas centrales: 13°29'43" N y 88°31'50" W. La extensión total del municipio es de 146.96 Km².

Según el último censo de población realizado por el Ministerio de Economía, Dirección General de Estadísticas y Censos en el año 2007, el municipio de Berlín tiene 17.787 habitantes (49,20% hombres y 50,80% mujeres). La población de la zona urbana, incluida la periurbana, es de 9.782 personas, 5.107 mujeres y 4.675 hombres.

Berlín pertenece al Departamento de Usulután, el cual tiene una extensión de 2.130,44 km² y una población de 344.235 habitantes. Según el Mapa de Pobreza Extrema elaborado por FLACSO (Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales) El Salvador y el FISDL (Fondo de Inversión Social para el Desarrollo Local), el 56.52% de los municipios de Usulután se

encuentran en el rango de Extrema Pobreza Alta, entre los que se encuentran los municipios de Alegría y Berlín.

Debido a su ubicación este departamento está sometido a varias amenazas naturales; volcánicas, sísmicas, inundaciones y deslizamientos de tierra.

4 Características del medio físico y humano.

4.1 Medio Físico

4.1.1 Marco tectónico y geológico.

El relieve de El Salvador está fuertemente relacionado con la tectónica regional centroamericana y su vulcanismo asociado. El Salvador se encuentra situado en el llamado Cinturón de Fuego Circumpacífico, donde en el caso centroamericano se produce una subducción de la placa del Coco, de naturaleza oceánica, bajo la del Caribe, de carácter continental. Esta subducción provoca diferentes fenómenos: intensa actividad sísmica y vulcanismo, siendo la Cordillera volcánica de El Salvador el resultado de este proceso.

Berlín, se sitúa en la Cordillera volcánica de El Salvador, que como se ha mencionado anteriormente tuvo su origen en la subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe. Este fenómeno, también llamado arco volcánico, presenta una línea de volcanes paralela a la zona de subducción.

El vulcanismo en El Salvador es reciente. Nos encontramos ante un territorio geológicamente joven, donde afloran litologías que van desde el presente Cuaternario hasta el periodo Jurásico. La mayor parte del país se compone de materiales volcánicos, aflorando únicamente en el extremo noroeste una pequeña secuencia estratigráfica sedimentaria del Mesozoico.

La superposición de diferentes edificios volcánicos, así como la existencia de materiales piroclásticos provenientes de grandes erupciones a centenares de kilómetros, hacen que la comprensión de la estratigrafía de la mayor parte del país sea una labor muy compleja.

En términos generales, un gran conjunto de los materiales geológicos pertenece a una alternante sucesión de rocas volcánicas. El carácter volcánico fundamental se puede presentar a su vez, como lavas originalmente líquidas o como piroclastos volcánicos sólidos, que aparecen generalmente como piroclastitas: consolidadas (tobas) o no consolidadas (cenizas). Al meteorizarse estos piroclastos se denominan epiclastitas. Las lavas se asocian a emisiones más tranquilas y los piroclastos a las más violentas, de tipo explosivo.

Berlín, presenta materiales que van desde el Plioceno (finiterciarios) hasta el Cuaternario, por lo tanto dentro de la juventud del territorio salvadoreño, Berlín está formado por materiales geológicos muy jóvenes propios de un vulcanismo reciente: andesitas, tobas volcánicas, piroclastos, ignimbritas, pómez y basaltos.

4.1.2 Propiedades Geotécnicas de los suelos.

La caracterización geotécnica de los suelos es una labor fundamental para cualquier estudio sobre movimientos de ladera. Los diferentes materiales geológicos descritos con anterioridad presentan diferente grado de consolidación, factor que más tarde aplicaremos en las metodologías para determinar la susceptibilidad a los movimientos de laderas.

El suelo más comúnmente involucrado en los deslizamientos que se producen en El Salvador se denomina *Tierra Blanca*. Este suelo volcánico es uno de los más jóvenes encontrados, originado en las erupciones piroclásticas de las calderas volcánicas de Ilopango y Coatepeque, 430 años D.C. La caracterización geotécnica de la Tierra Blanca, ha sido investigada desde el punto de vista de la contribución a la inestabilidad de taludes y a la erosión en El Salvador por diferentes autores (Bommer, J.J y Rodriguez, C. 2003).

Otros suelos que suelen estar relacionados con el desarrollo de deslizamientos son los depósitos marrones y volcánicos piroclásticos llamados *Tobas Color Café*, que contribuyen también a la formación San Salvador y que normalmente aparecen bajo las Tierras Blancas. Estos suelos tienen horizontes de acumulación bien desarrollados, que indican un buen desarrollo edáfico y formación de arcillas con color marrón rojizo. Se trata por tanto como se citaba en el apartado anterior, de una meteorización de los piroclastos llamada epiclastita en términos litológicos.

Las Tobas Color Café son un material de granulometría limo-arenosa, muy susceptible al colapso mecánico que pierde con facilidad los minerales alterables, permaneciendo solo las arenas y arcillas resistentes, conformando en su conjunto un material sin cohesión, poco consolidado y muy alterable por la lluvia.

4.1.3 Climatología.

Según la clasificación climática de Koppen, El Salvador, al igual que la costa pacífica centroamericana, posee un clima tropical: Aw (con estación seca durante el invierno del respectivo hemisferio). Las temperaturas bajan a medida que uno se adentra en el interior del país, existiendo dos estaciones fundamentales: la de sequía (de noviembre a abril) y la temporada de lluvias (que abarca de mayo a octubre).

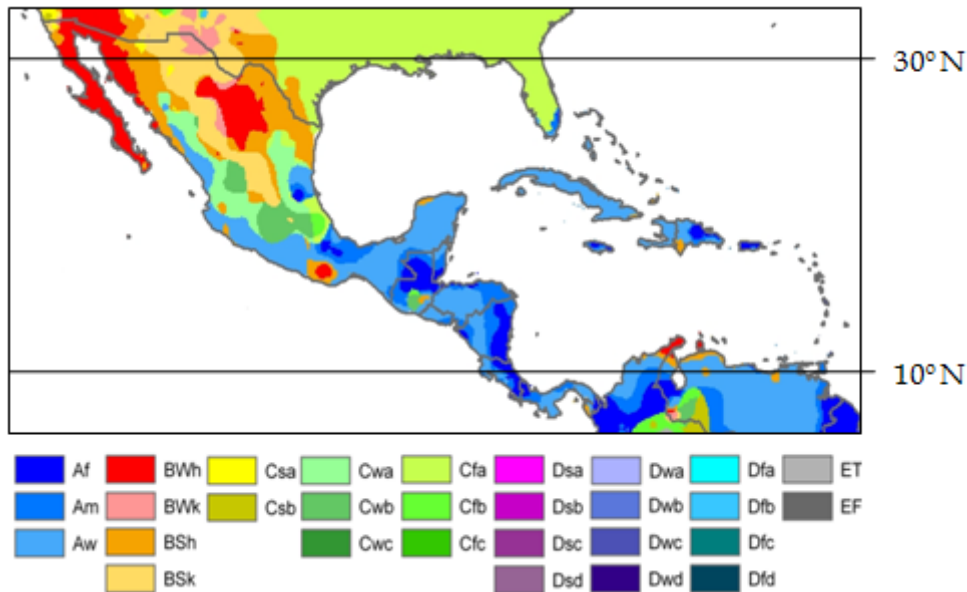


Figura 2. Clasificación climática de Koeppen en América Central. Fuente: http://huracanescribe.blogspot.com.es/2011/04/blog-post_9787.html

En función de ciertos elementos, como la altitud, el régimen de vientos y la distancia al océano, el país se subdivide en seis zonas climáticas: Regiones costeras, Pequeñas mesetas, Sabanas y grandes mesetas situadas a hasta 1000 metros de altitud, Cumbres montañosas y volcánicas (de hasta 2.000 metros) y Laderas montañosas y sierras (cafetales). Es en esta última región, donde se encuentra el municipio de Berlín, caracterizándose por tener un clima templado con una temperatura media de 21°C y una precipitación media anual de 1900 mm.

Las precipitaciones son uno de los factores más importantes tanto en la susceptibilidad como en la amenaza de movimientos de ladera. La humedad de los suelos y la capacidad de estos para retener el agua influyen de manera decisiva en la susceptibilidad a los movimientos de ladera. Además las lluvias actúan como un factor detonante de los movimientos de laderas y la humedad también influye en la mayor o menor meteorización de los materiales.

4.1.4 Vegetación

El Salvador tiene una vegetación típica de bosque de pluvial ecuatorial. No obstante, debido al marcado carácter de las dos estaciones existen variedades como el bosque semiombrófilo, el bosque seco, muy abierto y con tendencia a las zonas con gramíneas. En estas condiciones el bosque de galería en torno a los ríos, así como la vegetación de sotobosque que lleva asociada, es especialmente importante. También existen bosques de coníferas en las montañas, aunque están muy afectadas por la intervención humana.

La vegetación salvadoreña ha sufrido tremendamente la intervención humana. El monocultivo de las grandes plantaciones de café ha provocado el retroceso del bosque hasta quedarse en poco más de 5% de la superficie del país. Un claro ejemplo de ello lo tenemos en el municipio de Berlín, donde más de un 35% de nuestro área de estudio está asociado al cultivo del café.

Las formaciones de manglares de la costa presentan problemas derivados de un incipiente aumento del turismo. Se han sustituido muchas especies naturales por especies ornamentales. Las áreas pantanosas han aumentado desde el impacto del huracán Mitch en 1998.

4.1.5 Usos del suelo

La ocupación del suelo también será un factor influyente en los movimientos de laderas. Algunos tipos de usos del suelo, especialmente la vegetación leñosa con sistemas de raíces grandes y fuertes, proveen efectos mecánicos e hidrológicos que favorecen la estabilidad de las laderas (Montgomery et al., 2000). Debido a esto, se ha comprobado que muchos deslizamientos son iniciados en zonas con escasa vegetación, suelos desnudos, deforestados o reforestados con otras especies vegetales. El mapa más actualizado de usos del suelo de El Salvador fue realizado en el año 2003.

4.2 Medio Humano

La cabecera municipal de Berlín y los diferentes cantones están conectados en su red vial, por calles de tierra que se encuentran en óptimo estado en la época seca pero se convierten en intransitables durante la época de lluvias.

A través de la Carretera Panamericana CA-1 se establece la infraestructura vial regional, desviándose esta en km 105 hacia el municipio de Mercedes Umaña. En carretera secundaria se recorre un tramo pavimentado de 10.50km hasta la ciudad de Berlín. Esta infraestructura es complementada con carreteras secundarias en regular estado de Berlín al municipio de Alegría y de este destino al municipio de Santiago de María para establecer conexión con la cabecera departamental que es Usulután. Existe otra conectividad intermunicipal en el tramo Berlín-San Agustín-CA-2 de 26.50km, la cual está en mal estado y reporta inseguridad ciudadana por la delincuencia.

La organización social del municipio de Berlín está constituida por las diferentes ADESCOS (Asociaciones de Desarrollo Comunal) ubicadas en los cantones del municipio.

Por otro lado, los gobiernos locales en consonancia con las directivas de las distintas comunidades son las encargadas de promover el desarrollo del municipio.

La actividad económica del municipio de Berlín se basa en el sector primario, la población del municipio se dedica predominantemente al sector agrícola y actividades agropecuarias combinadas. El 85 % de la población se dedica a esta actividad primaria y la actividad terciaria que constituye la actividad comercial y los servicios constituyen el 15 % restante.

En las actividades agrícolas, las mujeres tienen una mínima participación, ya que un gran porcentaje se dedica a los quehaceres del hogar, con excepción de la recolecta de café donde aumenta la participación femenina. (Boyano Sotillo, 2011).

En el área urbana, la actividad económica principal es el comercio, que es ejecutado mayoritariamente por hombres. Aunque no se tienen datos concretos se estima que la tasa

específica de participación de la mujer en el mercado de trabajo es menor del 38.7%, lo cual refleja el desplazamiento que se está produciendo respecto al ámbito del hogar. (Boyano Sotillo, 2011).

Aunque la economía del municipio está basada en el cultivo del café, la agricultura de subsistencia, principalmente el cultivo de maíz y frijol adquiere cada año mayor interés debido principalmente a la inestabilidad del cultivo del café.

5 Conceptos generales

5.1 Movimientos de laderas.

Se entiende como movimiento de ladera “slope movement” (Varnes, 1978), el movimiento de una masa de roca, suelo o derrubios, de una ladera en sentido descendente.

Los tipos, actividades y definiciones de movimientos de ladera son definidos por la Commission of Landslides que forma parte de la Asociación Internacional de Ingeniería Geológica (IAEG). Soeters y van Westen (1996) formularon que los procesos de inestabilidad de laderas son el producto de las condiciones locales geomorfológicas, hidrológicas y geológicas, las cuales pueden verse modificadas por los procesos geodinámicos, vegetación, usos del suelo y actividades humanas y por la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y de la sismicidad de la zona.

5.1.1 Clasificación de los movimientos de ladera.

La clasificación de movimientos de ladera va a permitir la identificación y descripción de los cuerpos que están en movimiento relativo. La clasificación de Varnes (1978) es una de las más completas y por lo tanto una de las más utilizadas, la cual se basa principalmente en características geomorfológicas (Figura 3). A continuación, se describe cada tipo englobado en esta clasificación.

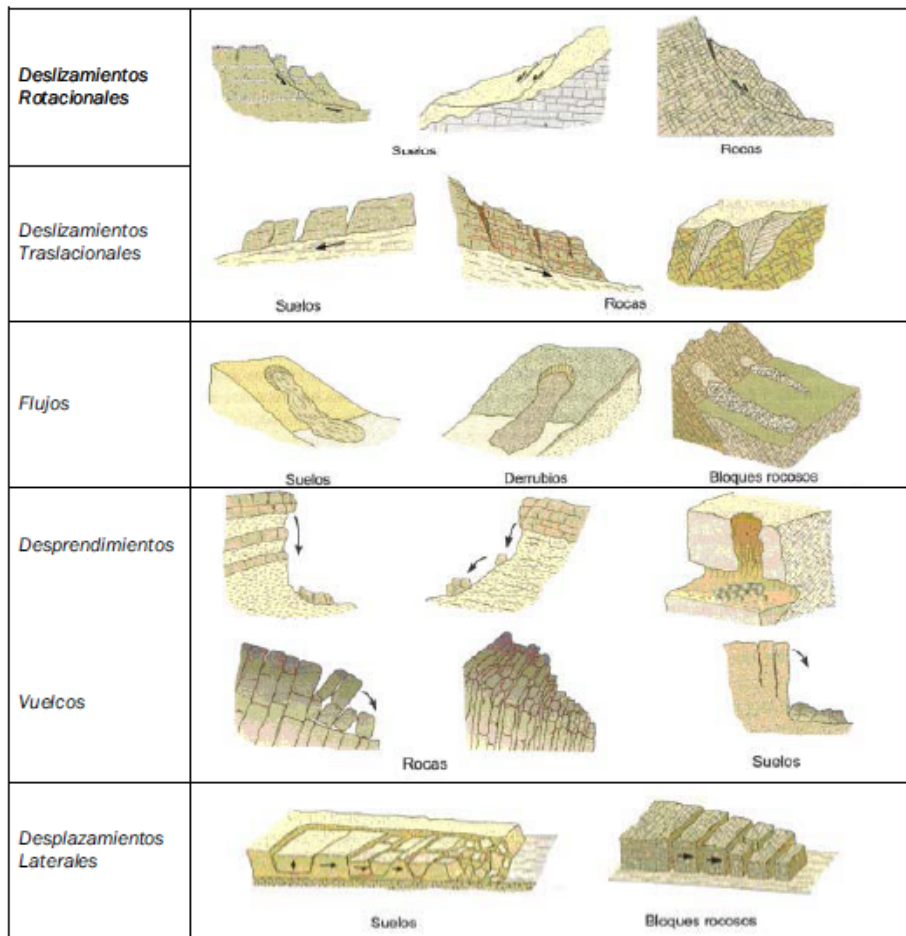


Figura 3. Clasificación de movimientos de laderas según el mecanismo de ruptura. Fuente: González de Vallejo (2002).

Deslizamientos: En este tipo de movimiento de ladera, el desplazamiento del terreno se produce sobre una o varias superficies de rotura bien definidas. La masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad, prácticamente sin deformación interna en su recorrido. La velocidad es variable y a menudo implica desplazamiento de grandes volúmenes. En función de la geometría de la superficie de rotura se diferencian entre:

- Deslizamiento rotacional: la superficie de rotura es de forma cóncava y se producen generalmente en materiales homogéneos o en macizos rocosos muy fracturados y se suelen diferenciar por una inclinación contrapendiente de la cabecera.
- Deslizamiento traslacional: la superficie es un plano con una inclinación más o menos constante y suelen producirse sobre materiales heterogéneos con superficies de discontinuidad bien definidas.
- Deslizamientos compuestos: movimientos de ladera que tienen una superficie de rotura con una geometría mixta.

Desprendimientos: Corresponden al rápido movimiento de una masa de cualquier tamaño de roca o de suelo en forma de bloques aislados o material masivo. Los desplazamientos se producen por caída libre, son típicos en macizos rocosos y generalmente están asociados a las discontinuidades. Requieren una topografía con escarpes o pendientes muy fuertes y se caracterizan por la acumulación de bloques de tamaño variable en el pie de la ladera.

Flujos: En ellos se producen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Según Varnes (1978), estos movimientos tienen en común la deformación interna y continua del material, y ausencia de una superficie neta de desplazamiento. En algunos casos la superficie de rotura se puede asimilar a toda una franja de deformación. Las diferencias estriban en el material implicado, su contenido en agua y la velocidad de desarrollo, de lenta (reptación) a súbita (flujos de rocas). Los más comunes son:

- Movimientos en suelo: flujos de tierra o barro.
- Flujos de derrubios (debris flow) (Figura 4): movimientos que engloban a fragmentos rocosos, bloques, cantos y gravas en una matriz fina de arena, limo y arcilla (en general los gruesos representan un porcentaje superior al 50%). Este tipo de movimientos tienen lugar en laderas cubiertas por material no consolidado y donde la humedad del suelo suele ser el factor desencadenante principal del proceso. Se trata de movimientos muy rápidos.



Figura 4. Quebrada por donde descendió el debris flow ocasionado en Berlín el 29 de mayo de 2007, ocasionando la muerte de 4 personas. Fuente: SNET.

Desplazamientos laterales: movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherente sobre un material blando y deformable. Como consecuencia de esta diferencia entre el material suprayacente y el infrayacente, se produce la fragmentación de las capas superiores. Los bloques se desplazan lateral y lentamente a favor de pendientes muy bajas. No son movimientos frecuentes y suelen ser bastante extensos.

Movimientos complejos (Figura 5): resultan de la combinación de dos o más tipos de movimientos elementales descritos anteriormente. Estos movimientos alcanzan generalmente gran tamaño, afectando a veces a laderas completas.



Figura 5. Imagen del deslizamiento complejo de Las Colinas (Santa Tecla), El Salvador, causado por el terremoto del 13 de enero de 2001 (M: 7,7) Fuente: USGS.

5.1.2 Causas de los movimientos de ladera.

La distribución espacial y temporal de los movimientos de ladera está condicionada por factores propios de la ladera y/o factores externos a ella. Se clasifican estos factores en tres grupos (Suarez, 1998):

- Condiciones originales del talud, que determinan la susceptibilidad al deterioro y son inherentes a la topografía, geología y características de los materiales, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc.
- Factores de deterioro, que producen una modificación lenta de las condiciones originales del talud y son capaces de producir movimientos leves.
- Factores detonantes, que activan el movimiento.

Otros autores como Mora y Vahrson (1994) y Soeters y van Westen (1996) distinguen solo dos grupos de factores, los debidos a la susceptibilidad y los de disparo. Así, según Mora y Vahrson (1994):

- Factores de susceptibilidad: aquellos que intrínsecamente forman parte de las propiedades y comportamiento del medio, es decir, que constituyen los elementos pasivos. Tal es el caso de la pendiente, la litología y las condiciones naturales de humedad, además de muchos otros dependiendo de las características locales de cada talud.
- Factores de disparo (detonante): aquellos factores externos que inducen a un comportamiento dinámico activo, y que a partir de las condiciones iniciales

generarán mayor o menor intensidad del fenómeno. Fundamentalmente son inherentes a la intensidad del movimiento sísmico y a las lluvias.

Los terremotos pueden provocar movimientos de ladera de todo tipo, dependiendo de las características de los suelos (derivadas de la geología), de la magnitud del sismo y de la distancia al foco. Derrumbes, deslizamientos y flujos pueden ocurrir durante las sacudidas sísmicas. Algunos ejemplos de movimientos de ladera causados por terremotos son los más de 10.000 eventos provocados por el terremoto de Guatemala de 1976 (Magnitud 7.6), el devastador deslizamiento de Las Colinas de Santa Tecla, causado por el terremoto del 13 de enero de 2001 en El Salvador (Figura 5) y los numerosos deslizamientos inducidos por el terremoto de Sichuan, al suroeste de China en 2008.

Los movimientos de ladera causados por lluvias están relacionados con el volumen, intensidad y distribución de dichas precipitaciones. En consecuencia, es importante tener en cuenta la respuesta del terreno a precipitaciones durante horas, días, meses, años o incluso durante ciclos de lluvia y sequía de varios años. Cuando la precipitación cae sobre una ladera, un porcentaje de ella es interceptado por la vegetación, otro se infiltra en el suelo o se almacena en las depresiones para luego infiltrarse. El proceso de infiltración continúa, aún después del cese de las lluvias y en algún momento pueden crearse condiciones críticas, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, incrementando la presión de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y, por tanto, la resistencia al esfuerzo cortante. Es entonces cuando se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o toda la ladera.

Entre los numerosos casos de movimientos de ladera causados por lluvias se puede destacar el deslizamiento en el volcán Casitas, ocurrido en Nicaragua durante las lluvias del huracán Mitch en 1998 o los más de 800 movimientos de ladera acontecidos en El Salvador durante las elevadas precipitaciones de la Depresión tropical 12E en octubre de 2011.



Figura 6. Distribución espacial de las lluvias en El Salvador durante la Depresión tropical 12E, octubre 2011. Fuente: SNET.

5.1.3 Movimientos de ladera en el municipio de Berlín.

Las características del medio físico del municipio de Berlín descritas en los anteriores apartados hacen de este espacio un territorio muy susceptible a sufrir movimientos de ladera: materiales volcánicos no consolidados, fuertes pendientes y elevadas precipitaciones.

Se ha dispuesto de un inventario de movimientos de ladera históricos en el municipio que más adelante nos servirá para el cálculo de la susceptibilidad. Además, la Dirección General del Observatorio Ambiental, antes llamado Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador (SNET), realiza fichas de campo con los movimientos de ladera más significativos del municipio en donde se establecen las causas que generaron los eventos.

A continuación, se destacan los siguientes eventos por su gran daño causado ordenados por fecha y por causa:

- Debris flow ocasionado el 31 de octubre de 1998 por el huracán Mitch en el Cerro Pelón, situado a 1,5 km de la ciudad de Berlín. El flujo se canalizó por las quebradas llegando a la ciudad de Berlín y ocasionando graves daños.
- Deslizamiento (sin especificar tipo), ocasionado el 13 de enero de 2001 por el terremoto magnitud 7,7. En talud cercano a la carretera en el cantón San Lorenzo. Se derrumbaron suelo, rocas y árboles.
- Deslizamiento (sin especificar tipo), ocasionado el 13 de enero de 2001 por el terremoto de magnitud 7,7. En Loma Alta. Se deslizaron 1500 m³ de material.
- Deslizamiento superficial degenerado en debris flow (encauzado por las quebradas), ocasionado el 29 de mayo de 2007 por lluvias intensas de 170mm en el Cerro Pelón. Fluyeron 2500 m³ de material (suelo, rocas y árboles) Este evento provocó la muerte de 4 personas.

El municipio cuenta además con una base de datos georreferenciada en la que se representan los movimientos de ladera ocasionados por los terremotos de 2001 y también los producidos por el huracán Mitch en 1998. Además se cuenta con los movimientos de ladera tipo: debris flow ocasionados en el municipio.

5.2 Susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo

La susceptibilidad del suelo a los movimientos de ladera (S), se define como la favorabilidad del ambiente físico y de los elementos inherentes de las masas de terreno y superficie como la geología, pendiente, geomorfología, usos del suelo, etc., a la ocurrencia de deslizamientos. Indica la predisposición del terreno a deslizarse pero no implica el aspecto temporal del mismo. En este trabajo, se utilizarán los factores de susceptibilidad en función de la disponibilidad de datos en nuestra escala de trabajo.

El detonante (T), es la acción de inicio o disparo del fenómeno del movimiento de ladera, que normalmente se identifica con fuertes lluvias o con terremotos.

La amenaza o peligrosidad a los movimientos de ladera (H), se define como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área específica. Implica por tanto, localizar las áreas inestables y las potencialmente inestables. La amenaza se expresa como función de la susceptibilidad del terreno a deslizarse y el detonante.

La vulnerabilidad (V), se define como la predisposición que tiene un elemento u objeto a ser afectado.

El riesgo de movimientos de ladera (R), se obtiene al relacionar la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento de ladera, con la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Se puede distinguir entre riesgo específico (Rs), como grado de pérdidas esperadas en un cierto elemento; y riesgo total (Rt), como número de vidas perdidas, daños materiales, etc.

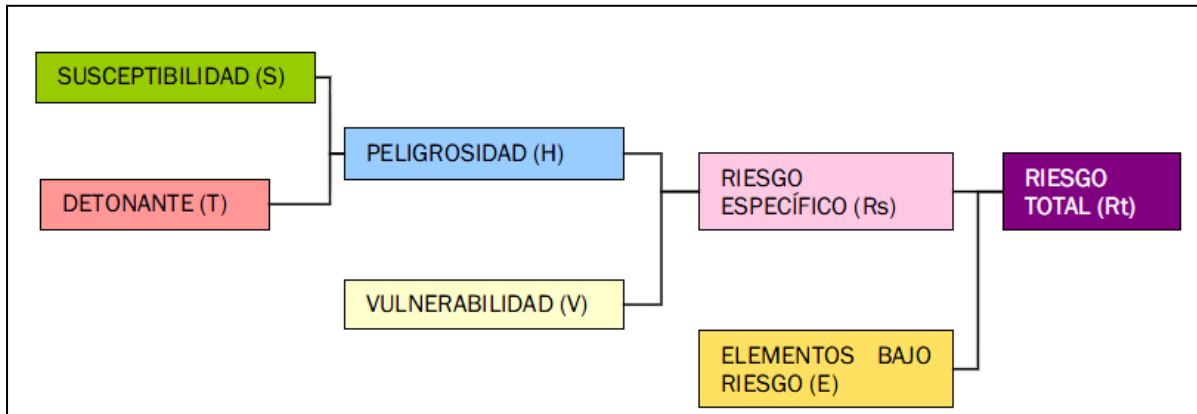


Figura 7. Esquema de las relaciones existentes entre diferentes conceptos relacionados con el riesgo. Fuente: María José García Rodríguez, 2008.

6 Metodología de cálculo

6.1 Diseño del Sistema de Información Geográfica (SIG).

6.1.1 Antecedentes

Los mapas de “susceptibilidad” a los movimientos de ladera fueron desarrollados por primera vez, por Brabb en San Mateo County (California), para el United States Geological Survey (USGS) en 1978. Estos primeros mapas se realizaban superponiendo capas con los diferentes factores geológicos que influían en las fallas de los taludes (zonas donde comienza el movimiento de laderas). En 1988, se inició el uso de Sistemas de Información Geográfica para la elaboración de los mapas de susceptibilidad.

Existen diversos métodos de evaluación de la susceptibilidad a los movimientos de ladera a través de SIG, Soeters y van Westen (1996) y Aleotti y Chowdhury (1999), entre otros autores. Todos ellos, proporcionan una amplia visión de los más utilizados, entre los que se incluyen principalmente los métodos estadísticos, determinísticos, de indexación y de evaluación directa de la susceptibilidad. La aplicabilidad de cada método a una zona determinada depende sobre todo de las características y extensión de dicha zona, del tipo y extensión de los deslizamientos existentes, de los datos geotécnicos e hidrogeológicos disponibles y de la escala de trabajo.

Con respecto a la utilización de los SIG en estudios de amenaza de deslizamientos, Mora y Vahrson (1993) realizaron estudios de casos de fallas de taludes en Centroamérica y propusieron un método de predicción de amenaza. En este método se incluyeron tres factores relacionados con la susceptibilidad que son: Relieve relativo, condiciones litológicas y humedad.

Adicionalmente, se consideraron dos factores relacionados con el evento detonante, que son: la sismicidad y la intensidad de las lluvias. Combinando estos factores, se encontró un grado de amenaza a deslizamiento de los taludes:

$$HI = (Sr * SI * Sh) * (Ts + Tp)$$

Donde:

HI = índice de amenaza a deslizamiento

Sr = índice de relieve relativo

S_l = susceptibilidad litológica

S_h = influencia de la humedad natural del suelo

T_s = influencia de la sismicidad

T_p = influencia de la intensidad de la precipitación

Incluir la influencia de las precipitaciones en un estudio municipal es algo muy complicado salvo que en dicho espacio tan pequeño haya variaciones significativas de precipitación y datos de diferentes estaciones meteorológicas, lo cual en El Salvador es muy difícil.

6.1.2 Características del SIG.

- Marco de trabajo: En función del Modelo Digital de Elevaciones (tamaño de celda 10x10metros) y del mapa litológico (E: 1:25.000) de la zona de Berlín disponibles, nuestro estudio se encuadra en una superficie de 10x15 km y que comprende el término municipal de Berlín y parte del término municipal de Alegría, situados ambos en el Departamento de Usulután, El Salvador.
- Sistema de coordenadas: Se ha utilizado el elipsoide de referencia de CLARKE 1866, el datum *North American 1927* y como proyección cartográfica, la proyección Cónica Conforme de Lambert.
- Resolución espacial: La resolución espacial que vamos a utilizar en este trabajo será de 10x10 metros (tamaño del píxel)
- Software: Para este estudio se ha utilizado el programa ArcGIS v 10 de ESRI.

6.1.3 Información de partida

Modelo Digital del Terreno (MDT): Este modelo está en formato ráster (tamaño de celda: 10 x 10 metros) generado por la Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA) dependiente del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN), y fue obtenido a partir de la interpolación de curvas de nivel de los cuadrantes topográficos digitales del Instituto Geográfico Nacional de El Salvador con escala 1:25.000.

Base de datos de movimientos de ladera: Los eventos han sido recopilados por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador después del huracán Mitch de 1998, y de los terremotos de enero y febrero de 2001. Asimismo, la base de datos que se generó en El Salvador se completó con otros movimientos registrados por el *United States Geological Survey* (USGS). Esta base de datos comprende diferentes tipos de movimientos:

- Eventos desencadenados tras los terremotos de enero y febrero de 2001.
- Base de datos de *debris flow*.
- Base de datos de eventos desencadenados por el huracán Mitch en 1998.

Para nuestro estudio utilizaremos únicamente los eventos registrados en dicha base de datos que afectan a nuestro marco de trabajo, definido en el apartado 5.1.3 Movimientos de ladera en el municipio de Berlín.

Mapa litológico: mapa litológico de la zona de Berlín en formato vectorial realizado por la empresa LaGeo a escala 1:25.000

Mapa de usos del suelo: realizado por el Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador a escala 1:50.000.

Núcleos de población: Se han editado digitalmente con el software ArcGIS 10, tomando como base imágenes de satélite con fecha de 2009. El poblamiento disperso y no cartografiado en otros mapas consultados justificó esta labor de edición.

Carreteras: Cartografía de la red viaria de 1º, 2º, 3º y 4º orden de El Salvador proporcionada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

6.2 Cálculo de la susceptibilidad.

Para el cálculo se deben primero definir los factores o variables que intervendrán en la susceptibilidad, que en este caso se han elegido según la disponibilidad que se ha tenido de acceso a la información. No debemos olvidar que el presente trabajo es un estudio en un municipio de El Salvador, un país en vías de desarrollo.

6.2.1 Variables de cálculo.

Pendiente: se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie y la vertical. Es decir, se mide calculando la tangente a la superficie. Su valor puede condicionar la estabilidad de una ladera, puesto que de ella dependen las componentes de las fuerzas favorables al movimiento y de las fuerzas resistentes al mismo, que determinan su equilibrio. Así, al aumentar la pendiente aumenta también la componente tangencial de la gravedad y por tanto a mayores pendientes, será necesaria una mayor cohesión de la ladera para mantener su estado de equilibrio (Figura 8).

En el software ArcGIS se *calcula*¹ el valor de la pendiente a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT). Puesto que el MDT está en formato ráster, el programa calcula el valor de la máxima pendiente a partir del máximo valor de gradiente de las 8 celdas adyacentes.

¹ Herramienta *Slope*. *Spatial Analyst Tools*.

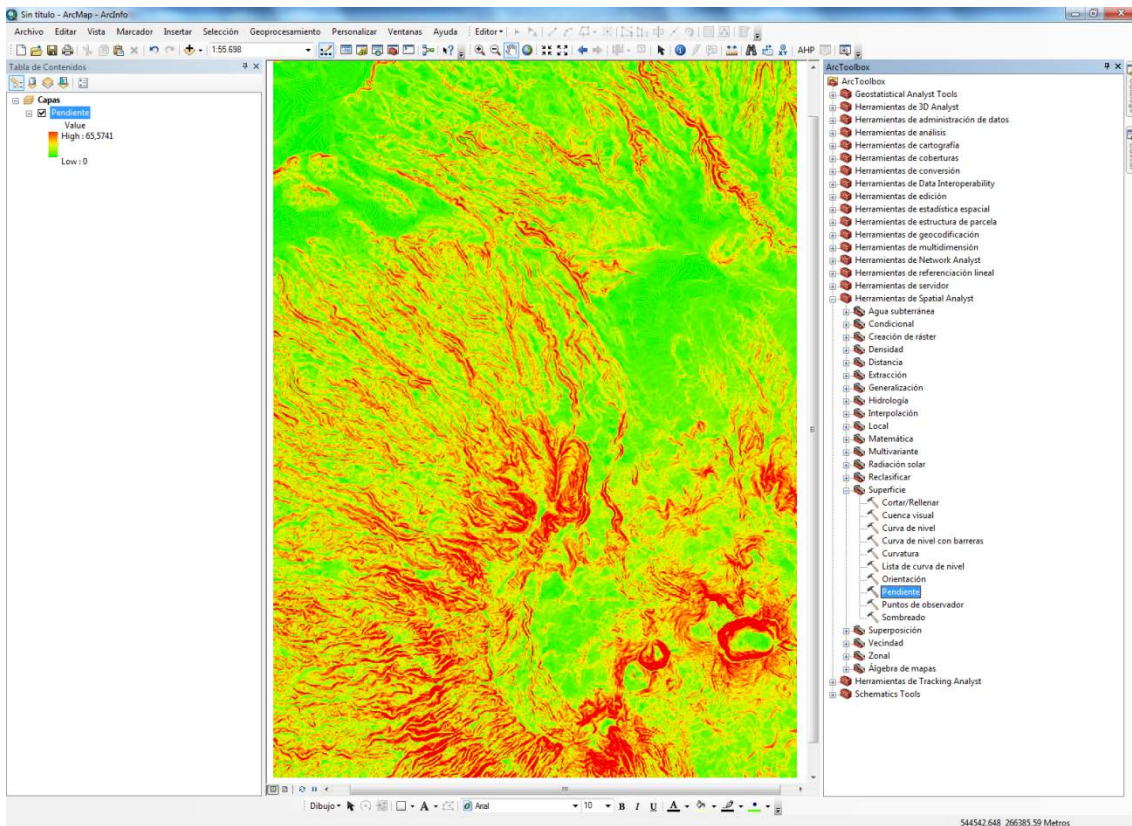


Figura 8. Vista de la capa de pendientes.

Orientación: El factor de orientación puede influir en el inicio de un movimiento de ladera, puesto que está afectado por la humedad retenida y la cobertura vegetal, y a su vez está condicionada por la consolidación de los suelos. (Figura 9).

En ArcGIS el valor de las orientaciones se *calcula*² como la pendiente a partir del MDT.

² Herramienta *Aspect*. *Spatial Analyst Tools*.

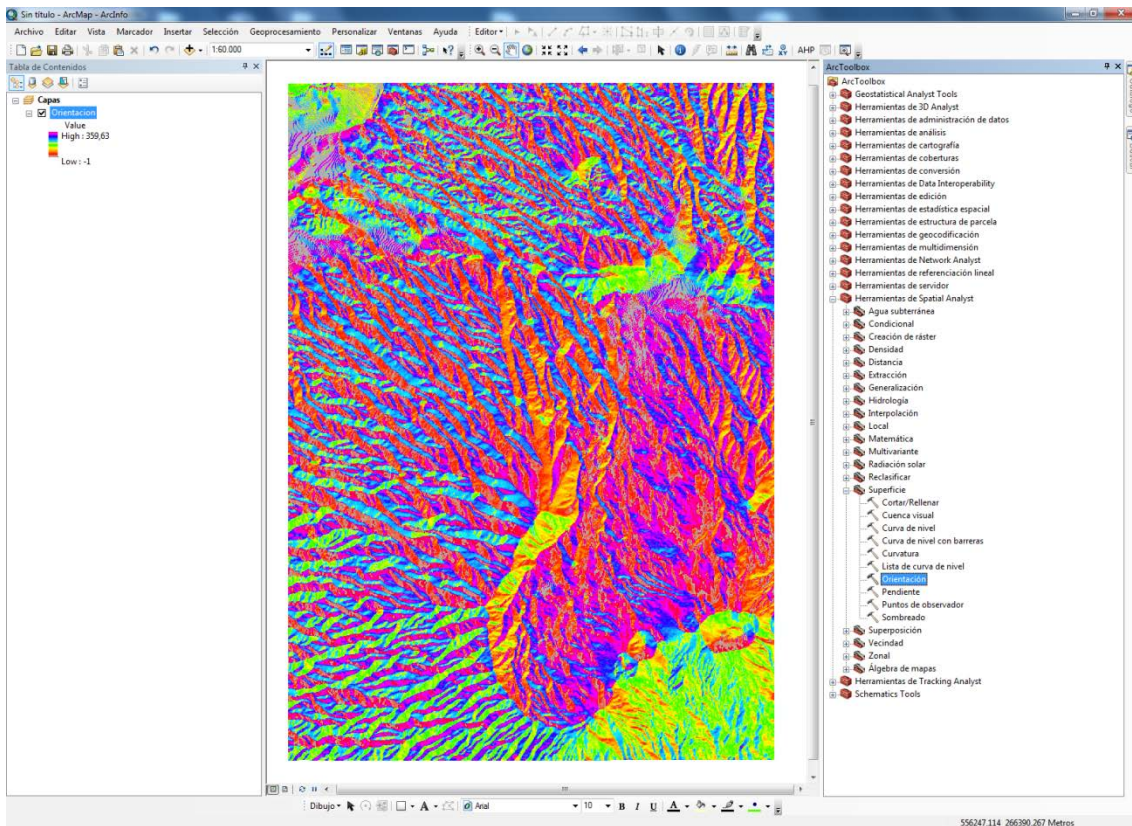


Figura 9. Vista de la capa de orientaciones.

Curvatura: Se define como la derivada segunda de la superficie. Representa la concavidad y la convexidad del terreno. Se calcula celda por celda, aplicando una transformación polinómica de cuarto orden de la forma:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

Esta fórmula se ajusta a una superficie compuesta por una ventana de 3x3. Los coeficientes A, B, C.... se calculan a partir de esta superficie.

En ArcGIS el valor de la curvatura se calcula como las dos anteriores a partir del MDT³.

³ Herramienta *Curvature*. *Spatial Analyst Tools*.

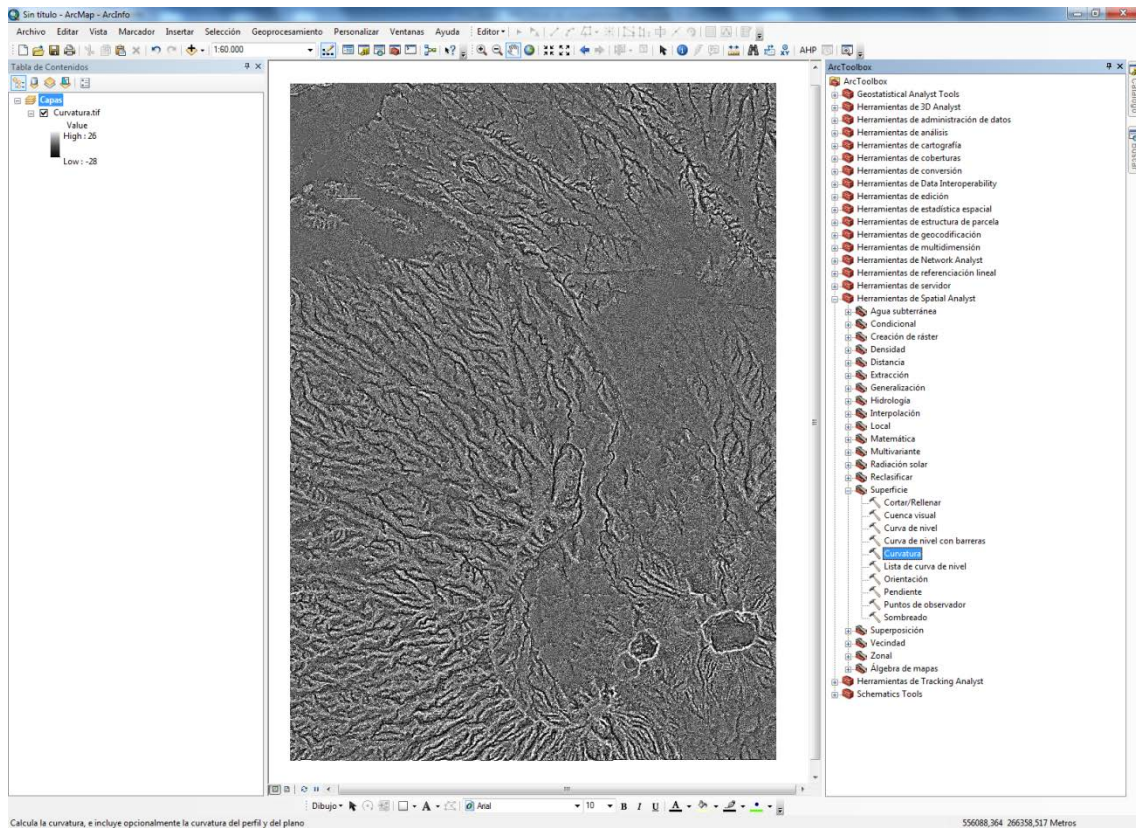


Figura 10. Vista de la capa de curvatura.

Rugosidad: Se define como la ondulación de la superficie topográfica y es una derivada de las pendientes y de las orientaciones.

En este trabajo se ha calculado mediante la aplicación de la fórmula:

$$W = 1 - R/9$$

Donde W es la Rugosidad y $R = \sqrt{(\sum X_i)^2 + (\sum Y_i)^2 + (\sum Z_i)^2}$ y a su vez:

$$X_i = \sin \gamma * \cos \phi$$

$$Y_i = \sin \gamma * \sin \phi$$

$$Z_i = \cos \gamma$$

Donde γ y ϕ representan la pendiente y la orientación en el punto i respectivamente.

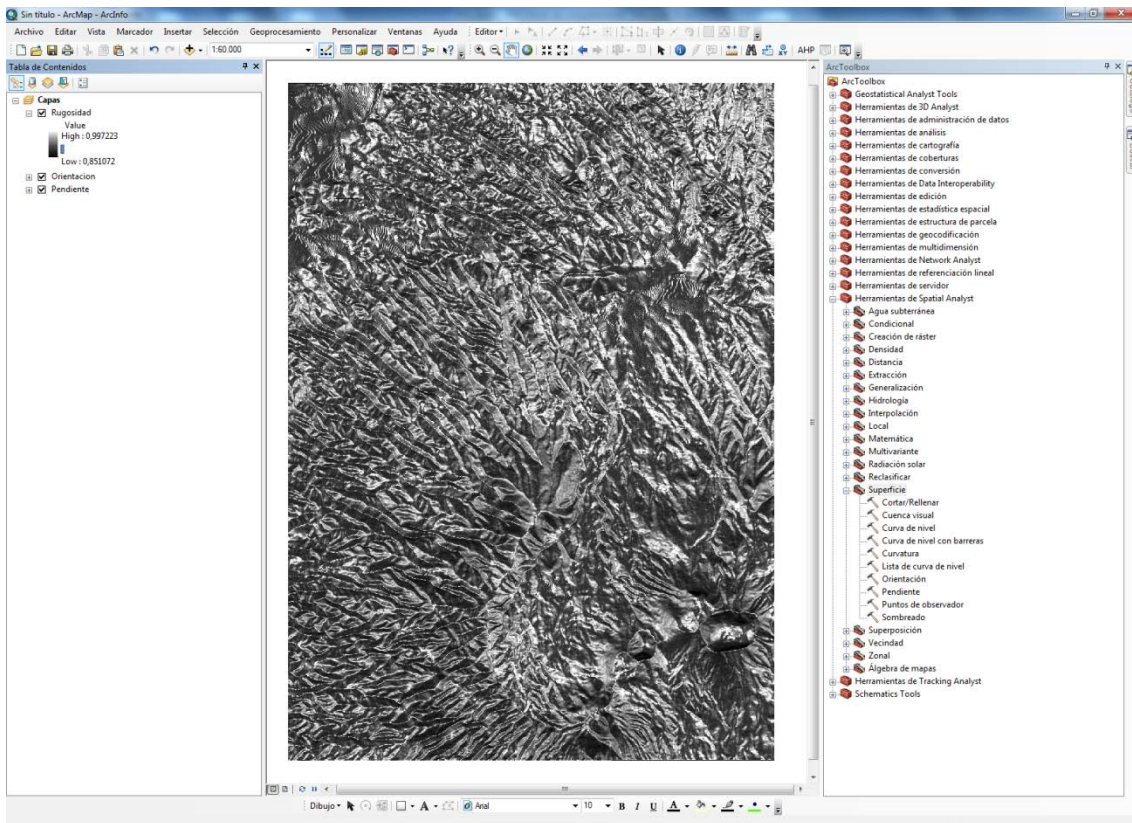


Figura 11. Vista de la capa de rugosidad del terreno.

Litología: Esta capa tiene información sobre el tipo de materiales geológicos en el área de estudio. Esta capa originalmente se obtuvo en formato vectorial (poligonal) y el tratamiento que ha tenido en el SIG ha sido su *conversión*⁴ a capa en formato ráster.

En esta capa se diferencian 10 tipos de litologías diferentes dentro del área de estudio (Figura 12).

⁴ Herramienta *Polígono a Ráster*, *Conversion Tools*.

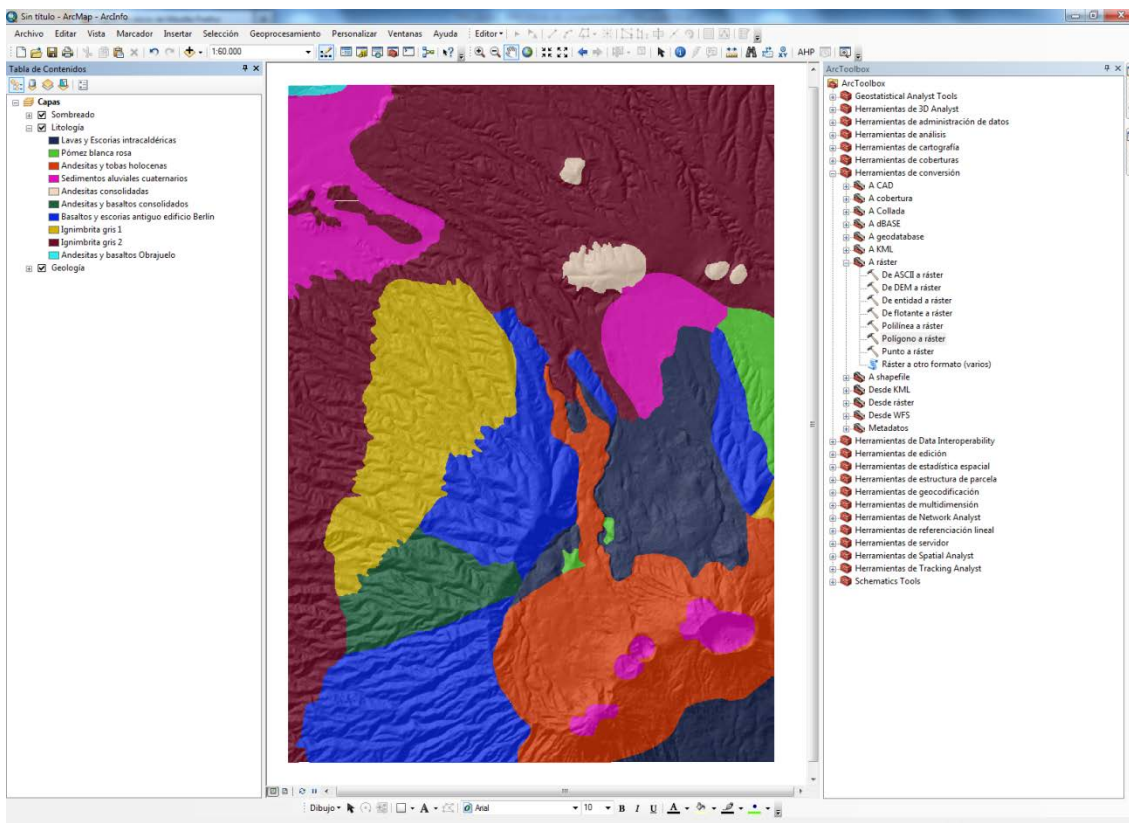


Figura 12. Vista de la capa de litología.

Geotecnia: Esta capa tiene información acerca del grado de consolidación de los materiales. Se ha derivado del mapa geológico mediante las tablas de correspondencia del Ministerio de medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador (MARN) 2003. Para ello, se ha *reclasificado*⁵ la capa de litología.

De las 10 litologías descritas en el mapa geológico se establecen 4 categorías de agrupación: roca dura, roca blanda, suelo consolidado y suelo no consolidado. (Figura 13)

⁵ Herramienta *Reclasificar*, *Spatial Analyst Tools*.

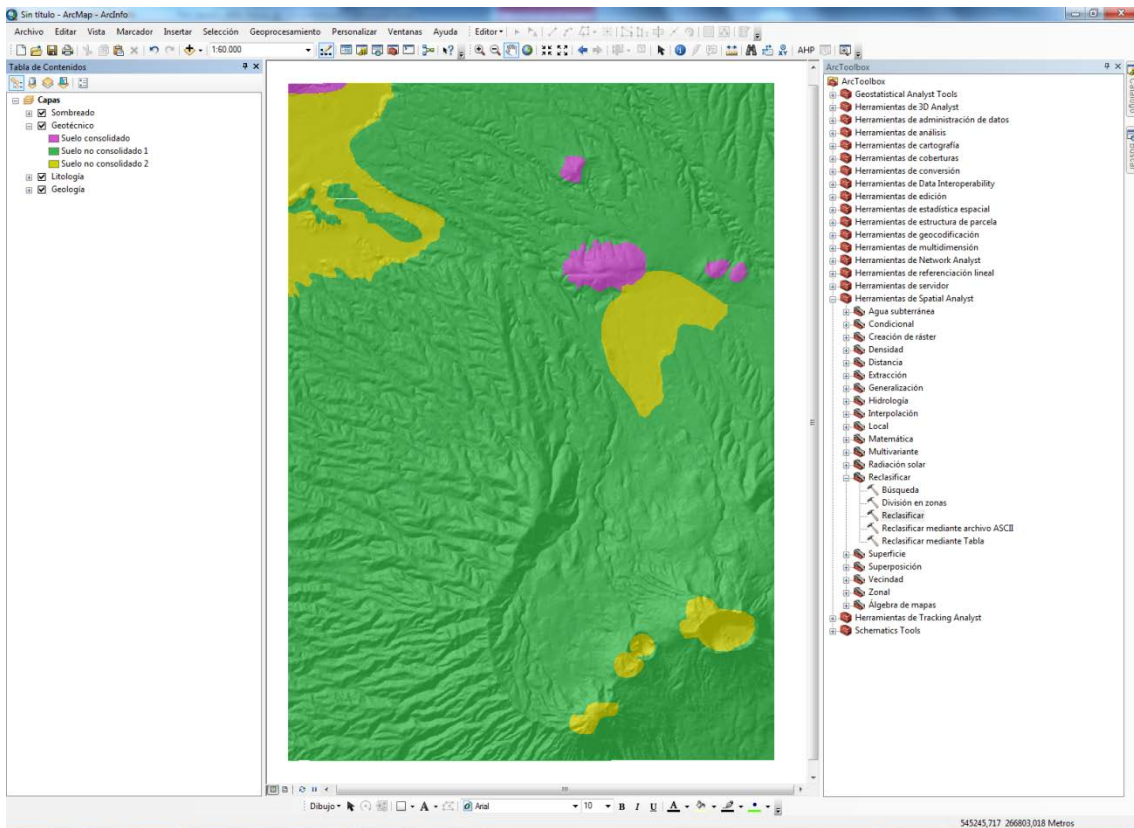


Figura 13. Vista de la capa de geotecnia.

Usos del suelo: Esta capa representa la ocupación y utilización del territorio. Se obtuvo en formato vectorial, por lo que, al igual que con el mapa litológico, ha sido necesario hacer una *conversión*⁶ a formato ráster.

En esta capa, se diferencian 10 usos de suelo diferentes (Figura 14)

⁶ Herramienta *Polígono a Ráster*, *Conversión Tools*.

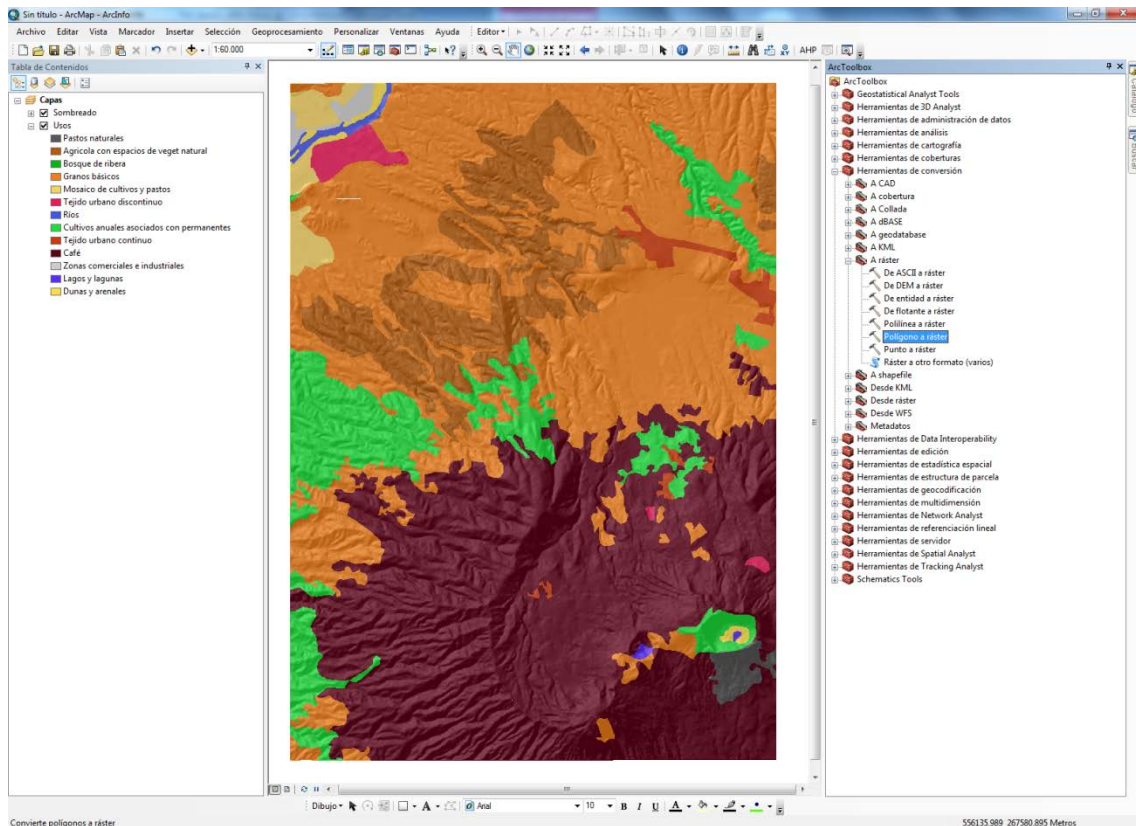


Figura 14. Vista de la capa de usos del suelo.

6.2.2 Metodologías utilizadas

La susceptibilidad en este trabajo se ha calculado mediante dos métodos diferentes.

- A. Cálculo de la susceptibilidad mediante análisis de las frecuencias de deslizamientos de laderas.
- B. Cálculo de la susceptibilidad mediante Evaluación Multicriterio.

En cada método se ha optado por diferenciar entre dos tipos de movimientos de ladera: **debris flow** (generalmente ocasionados por lluvias) y **deslizamientos** (mayoritariamente generados por terremotos), dado que su posterior análisis arroja importantes diferencias.

A. Cálculo de la susceptibilidad mediante el análisis de las frecuencias de movimientos de ladera.

En este método se ha desarrollado un análisis estadístico de la frecuencia de eventos ocurridos en Berlín, y que tenemos registrado en nuestra base de datos, y los valores de las variables de susceptibilidad que han sido seleccionadas para el estudio.

Para ello, se han seleccionado los eventos ocurridos únicamente en el área de estudio, ya que son los únicos movimientos de ladera que intervienen en las frecuencias de cada factor a la hora de calcular la susceptibilidad del municipio.

El objetivo será hallar las frecuencias de evento ocurrido en cada clase de cada variable utilizada. Es decir, conocer el número de eventos que se han producido en un determinado material geológico, en un determinado intervalo de pendiente, etc. Los factores que se analizarán serán los descritos en el apartado anterior y se enumeran a continuación:

1. Pendiente
2. Orientación
3. Rugosidad
4. Curvatura
5. Litología
6. Geotécnico
7. Usos del suelo.

Para poder trabajar con todas las variables y la base de datos de eventos, debemos homogeneizar toda la información. Esta se llevo a cabo en dos pasos.

Primero se *ajustaron*⁷ todas las variables (factores de susceptibilidad) al área de estudio fijado previamente en el diseño del SIG.

En segundo lugar, se homogeneizó la geometría de la base de datos de eventos, en este caso, los derrumbes, disparados por el terremoto de enero de 2001, estaban representados por una capa puntual que identificaba la cabecera del movimiento, mientras que los flujos de derrubios, causados por el huracán Mitch de 1998, estaban representados por una capa poligonal que identificada toda la superficie de terreno afectada por ese flujo.

Para salvar esta diferencia, se ha optado por identificar la cabecera de los flujos de derrubio y *editar*⁸ un punto en los vértices iniciales de cada polígono (Figura 15). Con este cambio, se hace posible integrar todos los eventos a estudiar en una misma capa de trabajo y poder analizar la frecuencia de eventos en cada capa de una forma similar.

⁷ Herramienta *Extraer por rectángulo*. *Spatial Analyst Tools*.

⁸ Herramienta *Editar entidades*.

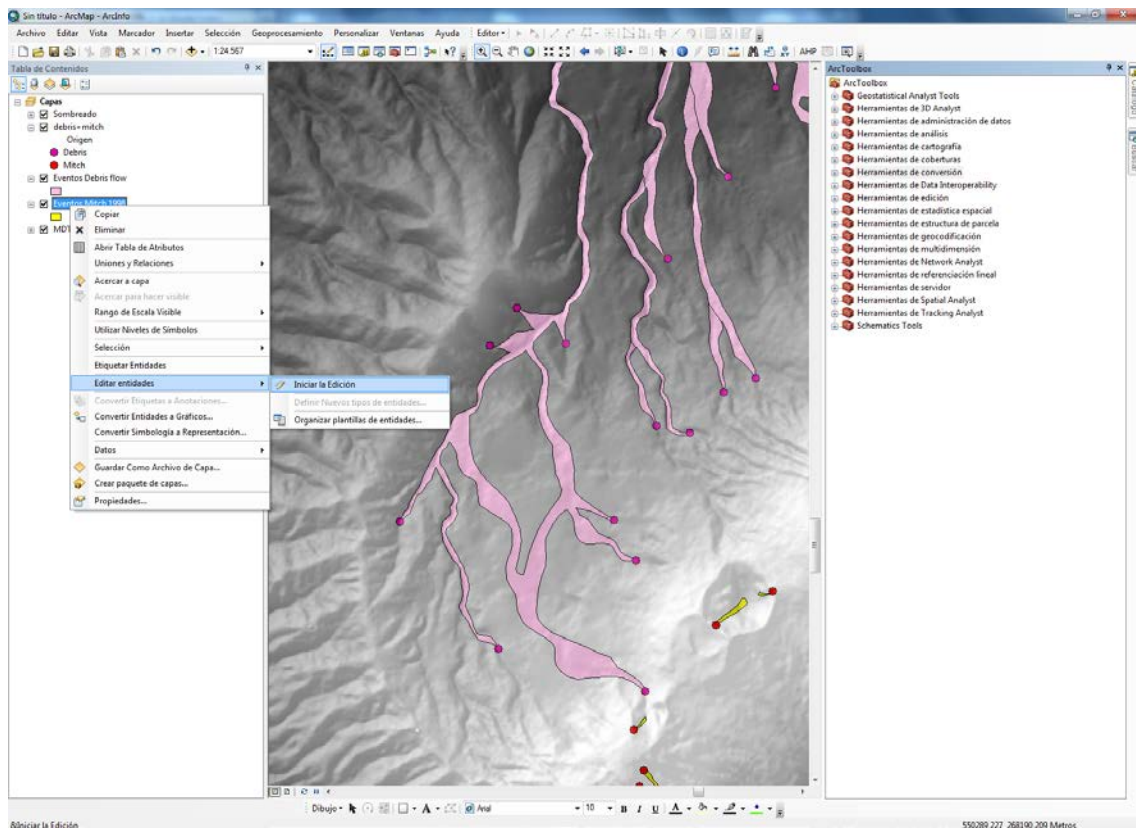


Figura 15. Edición mediante puntos (rojo) en el comienzo de cada polígono que representa a los flujos de derrubios.

- Obtención y análisis de las frecuencias de los eventos

Una de las grandes ventajas que ofrecen los SIG es su potencialidad a la hora de superponer objetos para facilitar la comprensión de fenómenos en el mundo real. El programa ArcGIS nos posibilita la *extracción de valores múltiples*⁹ de un ráster.

Mediante una extracción de valores, vamos a obtener el valor de cada celda en las capas ráster que se encuentran debajo de cada evento. Con ello tendremos una tabla en la que estarán registrados los valores de cada factor de susceptibilidad (pendiente, orientación, rugosidad, curvatura, litología, geotecnia y usos del suelo) que tiene cada evento. (Figura 16)

Una vez identificados los valores de cada variable en cada evento registrado, exportamos la tabla a una hoja de cálculo (Excel) para calcular las frecuencias con mayor comodidad. A continuación, se muestran las tablas resultantes del cálculo de frecuencias normalizadas para cada tipo de evento: los movimientos de ladera causados por el terremoto de enero de 2001 y los debris flow ocasionados generalmente por fuertes lluvias como las producidas por el huracán Mitch en 1998.

⁹ Herramienta *Extraer valores múltiples a ráster*.

FID	Shape	Id	Origen	Slope_MDT	Aspect_MDT	geober	usos_2003	Reclass_ge	W	Curvatu MD
8	Point	0	Mitch	36.6236	42.273701	3	11	4	0.894392	3
9	Point	0	Mitch	47.715302	40.3894	4	13	5	0.882021	2
10	Point	0	Mitch	48.970798	224.119	3	1	4	0.884292	2
11	Point	0	Mitch	25.4538	150.06799	3	11	4	0.892517	-4
12	Point	0	Mitch	23.025499	180	3	6	4	0.880692	-2
13	Point	0	Mitch	33.8913	225	3	6	4	0.899943	4
14	Point	0	Mitch	37.768501	100.222	4	6	5	0.929148	5
15	Point	0	Mitch	51.479198	137.42	4	6	5	0.880624	2
16	Point	0	Mitch	57.1647	162.14999	4	6	5	0.858927	1
17	Point	0	Mitch	55.267502	154.323	4	6	5	0.864478	-3
18	Point	0	Mitch	47.788799	150.819	4	6	5	0.872785	-2
19	Point	0	Mitch	45.578999	149.036	4	6	5	0.876003	2
20	Point	0	Mitch	38.279999	240.593	4	11	5	0.912188	4
21	Point	0	Mitch	39.050701	236.31	4	11	5	0.906733	8
22	Point	0	Mitch	42.383099	156.595	4	11	5	0.873479	3
53	Point	0	Sismo_13Enero_2001	25.651899	308.66	7	11	4	0.915551	0
54	Point	0	Sismo_13Enero_2001	28.7356	313.15201	7	11	4	0.907109	2
55	Point	0	Sismo_13Enero_2001	37.674301	299.05499	3	11	4	0.913263	0
56	Point	0	Sismo_13Enero_2001	48.801899	156.80099	3	11	4	0.868016	3
57	Point	0	Sismo_13Enero_2001	24.7005	227.203	3	11	4	0.911375	1
58	Point	0	Sismo_13Enero_2001	11.0041	315	7	11	4	0.918619	11
59	Point	0	Sismo_13Enero_2001	36.006699	3.94519	3	11	4	0.871338	-4
60	Point	0	Sismo_13Enero_2001	20.387699	227.726	7	11	4	0.915831	-2
61	Point	0	Sismo_13Enero_2001	12.1768	190.008	7	11	4	0.888098	-3
62	Point	0	Sismo_13Enero_2001	26.1737	277.306	3	11	4	0.948993	-3
63	Point	0	Sismo_13Enero_2001	11.3099	90	3	11	4	0.978209	-3
64	Point	0	Sismo_13Enero_2001	45.445099	13.5232	4	6	5	0.866062	-3
65	Point	0	Sismo_13Enero_2001	10.6427	3.81407	3	11	4	0.887252	0
66	Point	0	Sismo_13Enero_2001	13.5197	98.972603	4	4	5	0.968774	-4

Figura 16. Tabla en la que se muestran los eventos con el correspondiente valor de cada factor de susceptibilidad.

Gráficas de frecuencias de eventos de las variables dependientes de la superficie del terreno (Figura 17). En color rojo se representan los eventos producidos por el sismo del 13 de enero de 2001 y en azul los eventos tipo debris flow ocasionados generalmente por lluvias.

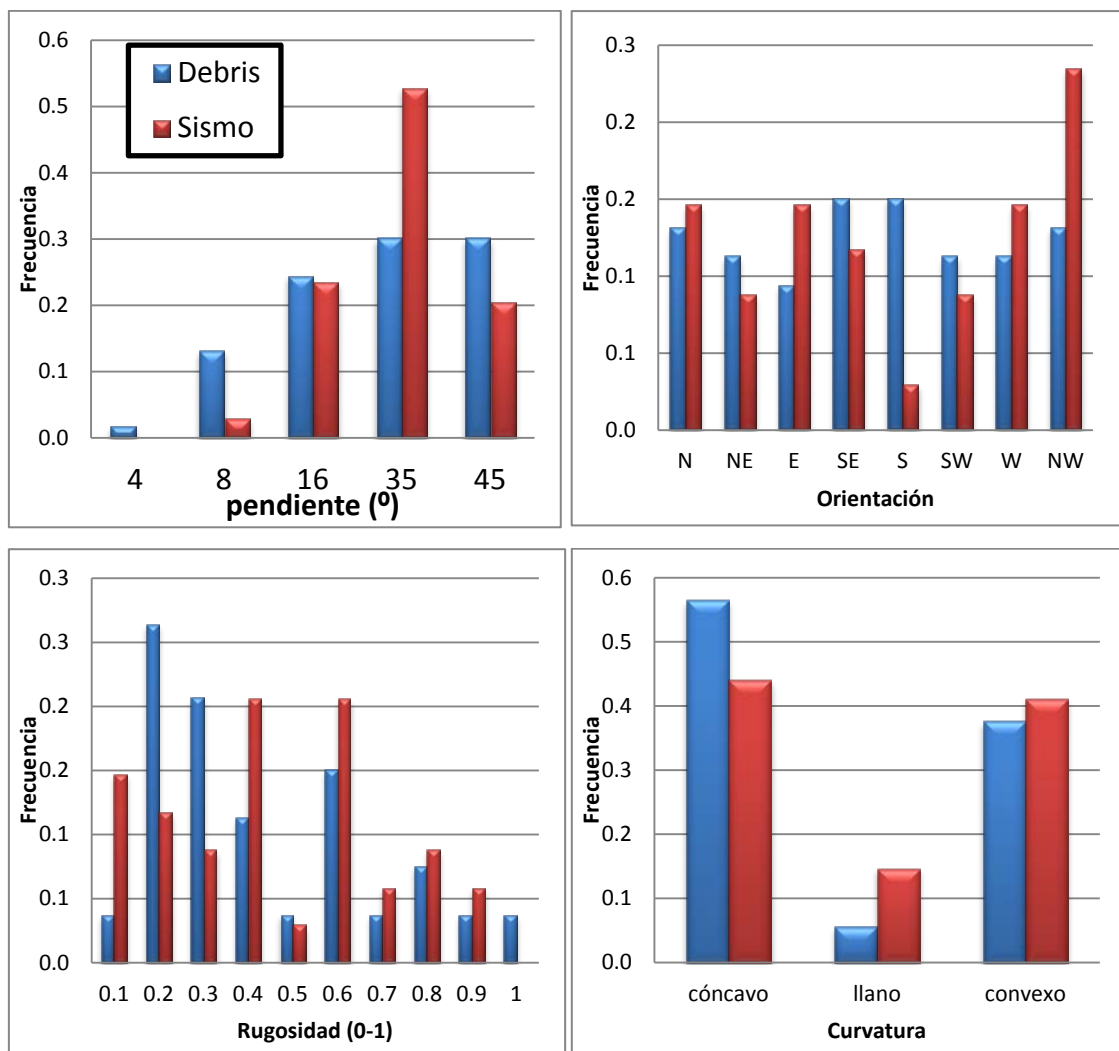


Figura 17. Gráficas de frecuencias de eventos de las variables dependientes de la superficie del terreno.

Gráficas de frecuencias de eventos de las variables dependientes de las características del suelo (Figura 18). Se muestra también (Tabla 1 y Tabla 2), el código utilizado para litología y para cada uso del suelo.

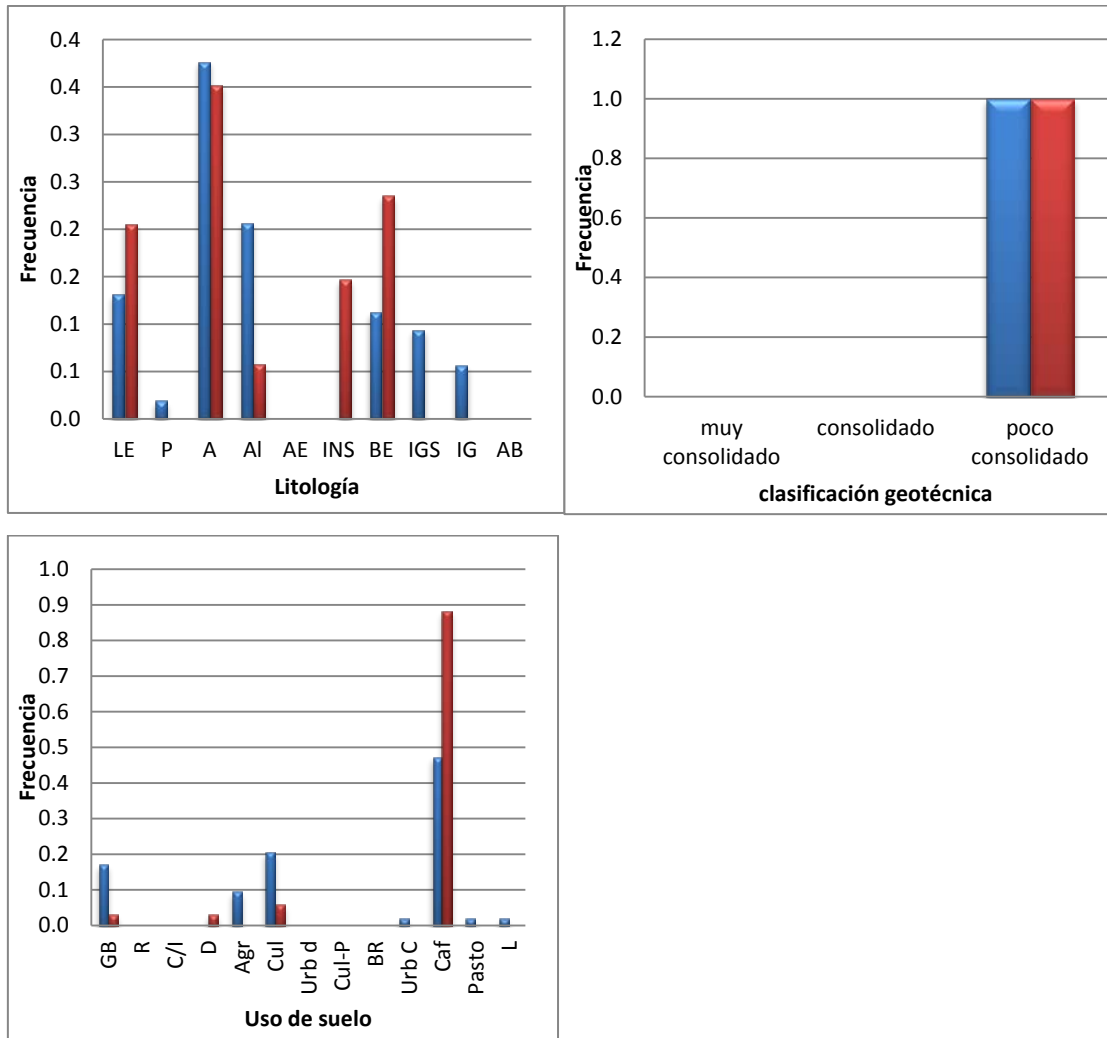


Figura 18. Gráficas de frecuencias de eventos relacionadas con las características de los suelos.

Tabla 1. Códigos utilizados para denominar las diferentes litologías.

Código	Descripción
A	Andesita intercaladas con tobas líticas
AB	Andesitas y basaltos Obrajuelo
AE	Andesitas y escorias Portillo Capules
AI	Aluviales
BE	Basaltos y Escorias
IG	Ignimbritas grises, andesitas
IGS	Ignimbritas grises, andesitas sobrepuestas a lavas basálticas y escorias
INS	Ignimbritas negras, andesitas sobrepuestas a lavas basálticas y escorias
LE	Lavas y Escorias intracaldéricas
P	Pómez Blanca Rosa

Tabla 2. Códigos utilizados para denominar los diferentes usos del suelo.

Código	Descripción
GB	Granos Básicos
R	Ríos
C/I	Zonas Comerciales o Industriales
D	Playas, dunas y arenasles
Agr	Terrenos agrícolas con importante vegetación
Cul	Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes
Urb d	Tejido urbano discontinuo
Cul-P	Mosaico de cultivos y pastos
BR	Bosques de ribera
Urb C	Tejido urbano continuo
Caf	Cafetales
Pasto	Pastos naturales
L	Lagos y lagunas

La propia frecuencia es la que va a otorgar el peso a cada factor.

La información que se observa en las Figura 17 y Figura 18, fruto del análisis de las frecuencias de eventos, puede proporcionar mucha información sobre la posible influencia del valor de una determinada variable en los movimientos de laderas registrados. Así por ejemplo, en el factor pendiente y en el caso de los eventos acontecidos tras el terremoto del 13 de enero de 2011 observamos como no ha habido ningún evento en el intervalo de pendiente inferior a 4°. Ha habido un evento entre 4° y 8°; ocho eventos entre 8° y 16°; dieciocho eventos entre 16° y 35° y 7 eventos en las pendientes superiores a 35°. Esto supone una frecuencia de 0,5 para el intervalo de pendiente entre 16° y 35°, que es aquel en el que se han producido mayor número de eventos.

En el caso de los debris flow generados por el huracán Mitch de 1998 y por otras causas (generalmente lluvias), observamos como en el factor pendiente la distribución de las frecuencias es algo más uniforme en los intervalos que van desde 8° a 16°, 16° a 35° y más de

35°. Se ha producido un evento en pendientes inferiores al 4°; siete eventos entre 4° y 8°; trece eventos entre 8° y 16°; y dieciséis eventos en los dos últimos intervalos de mayor pendiente: de 16° a 35° y mayor de 35°.

En el factor orientación observamos como en los eventos desencadenados por el terremoto de enero de 2001 parece haber una tendencia hacia el noroeste, norte y oeste. En el caso de los debris flow generados por lluvias no existe una dirección de las orientaciones que sea dominante.

El factor de rugosidad no parece tener ninguna frecuencia claramente dominante y se han producido eventos de los dos tipos tanto en rugosidades altas como bajas.

En el factor curvatura observamos una distribución bastante homogénea. Se han producido eventos fundamentalmente en superficies cóncavas o convexas, y muy pocos en superficies llanas. Parece haber una tendencia a que los debris flow se desencadenen más sobre zonas cóncavas, ya que los flujos de derrubios se pueden formar en las quebradas con mayor facilidad debido a su carácter, más parecido al comportamiento de los fluidos.

En la litología se observa muy bien como en los materiales competentes: Andesitas y Basaltos Obrajuelo y en las Andesitas Portillo Capules, no se producido ningún evento de ninguno de los dos tipos. En los demás materiales destacan por su alta frecuencia las Andesitas intercaladas con Tobas Líticas que forman la mayor parte de las laderas del edificio volcánico de Berlín (Figura 19). Estas andesitas y tobas se encuentran muy meteorizadas y son los materiales más susceptibles al deslizamiento. Este tipo de cono del edificio volcánico de Berlín, se caracteriza por tener sus capas proclives a la ladera, es decir, que favorecen las condiciones del deslizamiento, situación que se acentúa cuando entre una capa y otra existen paleosuelos.

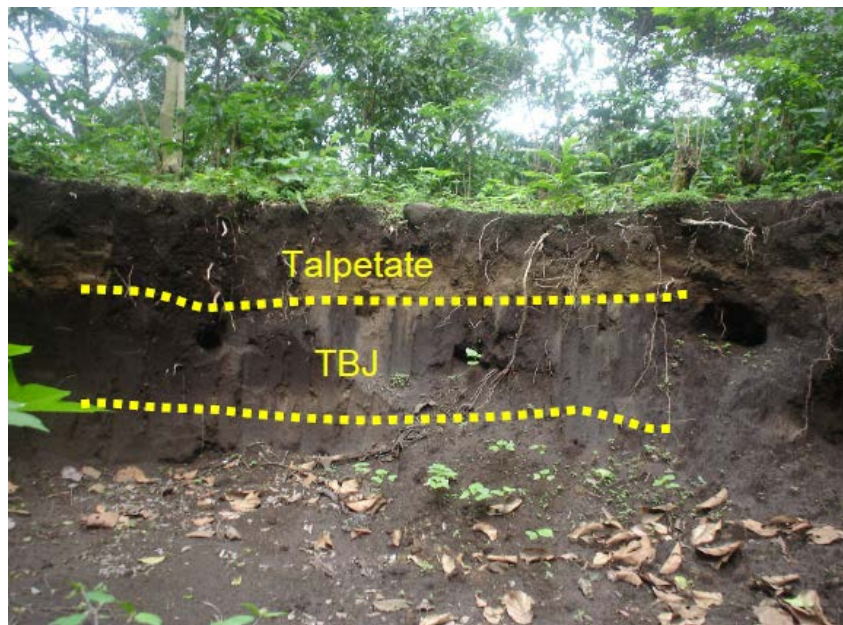


Figura 19. Imagen de los materiales resultantes de la meteorización de las Andesitas y que son muy susceptibles al deslizamiento. Fuente: SNET.

Esta zona del edificio volcánico de Berlín está compuesto por material escoriáceo, con eventuales coladas lávicas intercaladas y en la superficie posee una cobertura de oleada piroclástica, de granulometría fina, de color pardo debido a la meteorización. En las partes más bajas afloran depósitos de Tierra Blanca Joven (TBJ) procedente de la erupción explosiva de la Caldera de Ilopango (430 años D.C); que están subyacentes a los depósitos de oleadas piroclásticas, localmente conocidos como Talpetate y que proceden de la erupción freatomagmática del Cerro El Hoyón ocurrida hace 700 años.

En el factor geotécnico todos los eventos se han producido en el denominado suelo no consolidado, que solo excluye a los materiales competentes comentados con anterioridad: Basaltos Obrajuelo y Andesitas Portillo Capules.

El caso de los usos del suelo es bastante significativo. La gran mayoría de los eventos se han producido sobre las zonas de cafetal. Lo que a priori pudiera parecer una clara concordancia entre este tipo de uso del suelo y la alta susceptibilidad, pudiera no serlo tanto si tenemos en cuenta que los cafetales se encuentran casi siempre en zonas de alta pendiente.

- Asignación de frecuencias a las variables

El siguiente paso será hacer una *reclasificación*¹⁰ de todas las variables, asignando a cada clase el valor de la frecuencia normalizado que se ha obtenido del análisis anterior.

Una vez asignados los valores frecuenciales, se *sumaron*¹¹ las variables linealmente y se obtuvo un mapa de susceptibilidad para todo el área de estudio. En la (Figura 20) se muestra un diagrama con todos los pasos descritos con anterioridad.

A continuación, se presentan los resultados del análisis estadístico de frecuencias de eventos mediante dos mapas. Uno para los eventos producidos tras el terremoto del 13 de enero de 2001 (Figura 21.) y otro para los debris flow, eventos producidos generalmente por lluvias como las del huracán Mitch de 1998 (Figura 22).

¹⁰ Herramienta *Reclasificar*, *Spatial Analyst Tools*.

¹¹ Herramienta *Calculadora Ráster*, *Spatial Analyst Tools*.

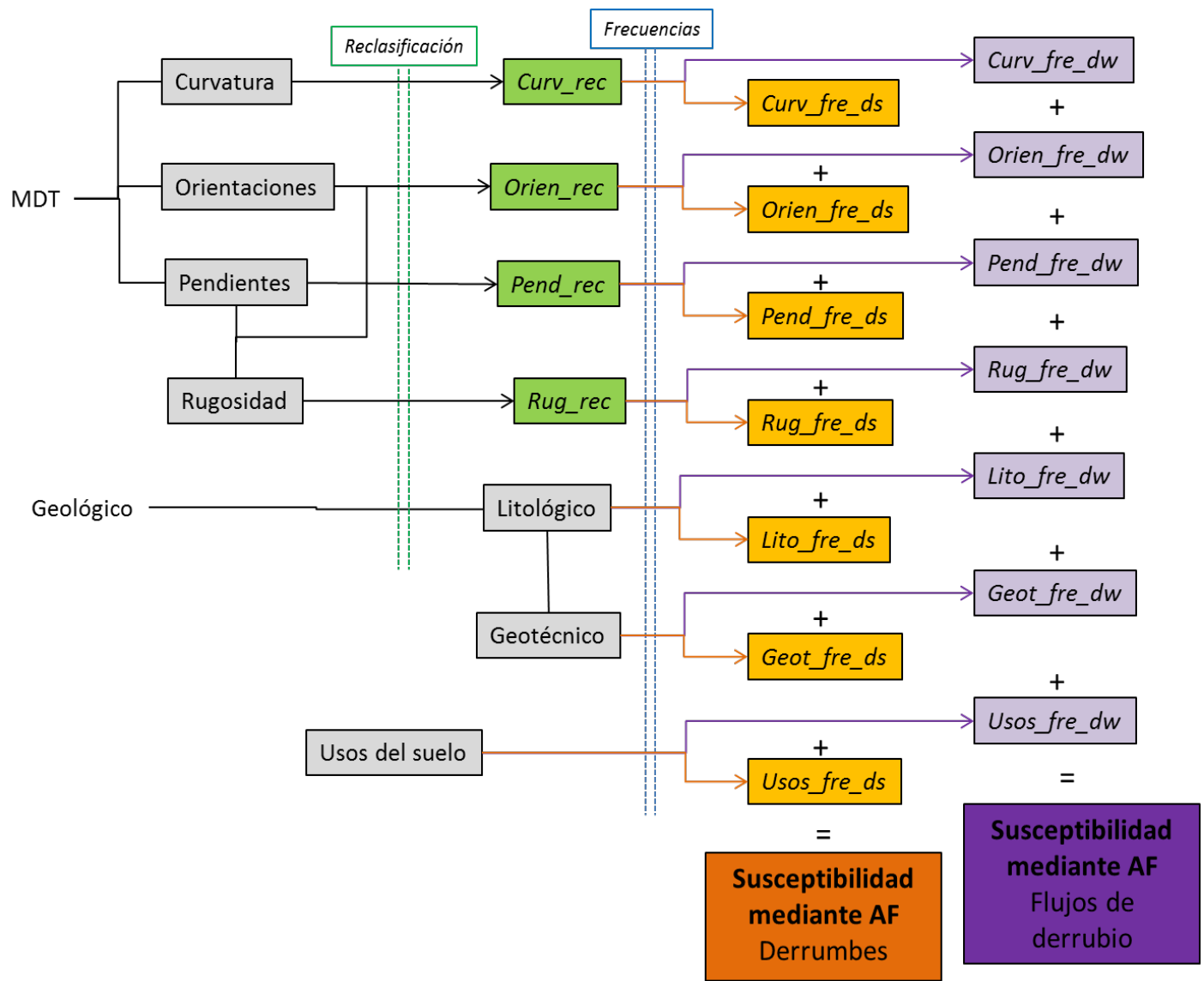


Figura 20. Diagrama de procesos. Análisis de frecuencias.

Susceptibilidad a movimientos de ladera por el método de análisis de frecuencias de eventos producidos por sismos. Berlín-Alegría. Departamento de Usulután. El Salvador

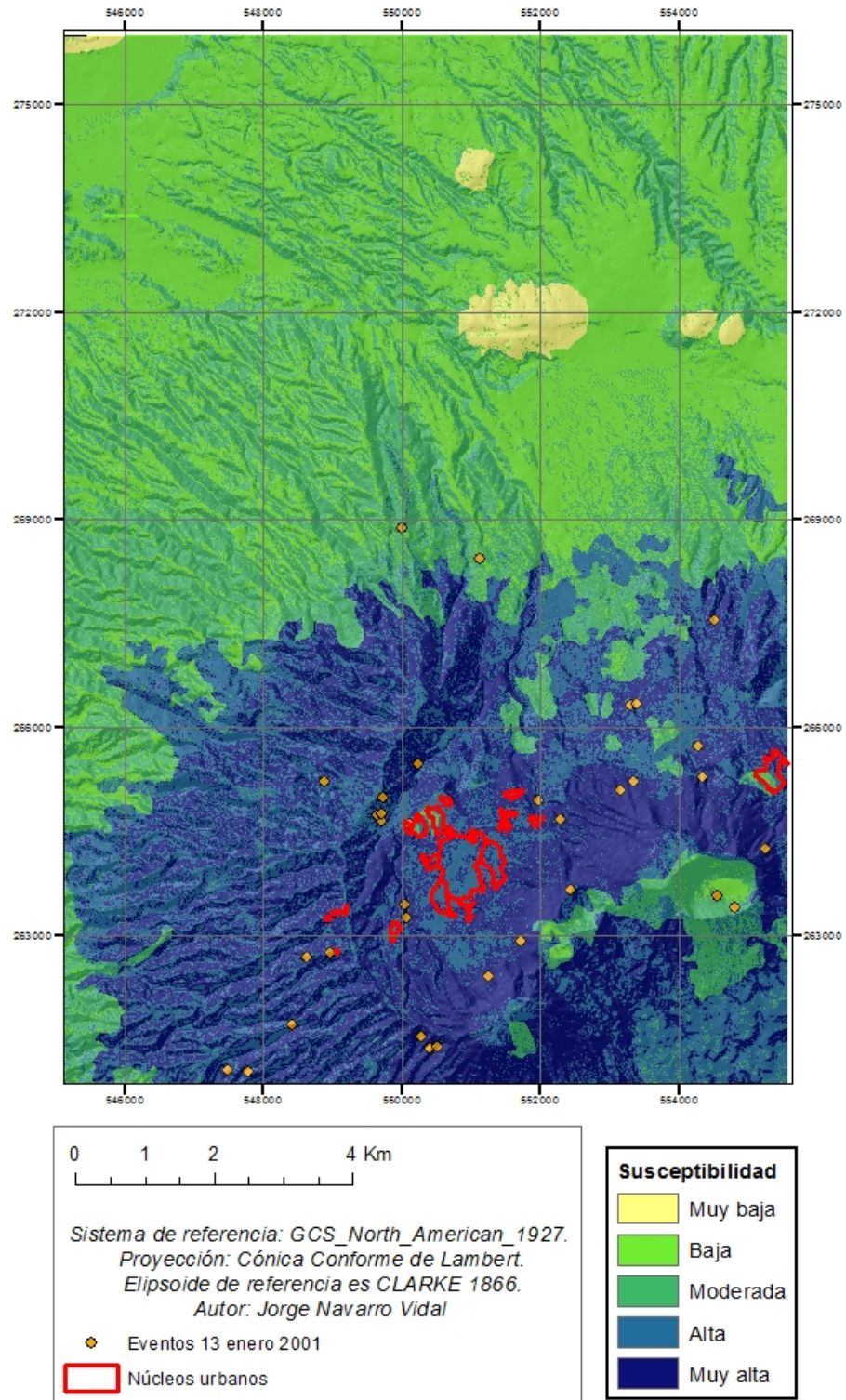


Figura 21. Mapa de susceptibilidad. Frecuencias de eventos producidos por sismos.

Susceptibilidad a flujos de derrubios por el método de análisis de frecuencias. Berlín-Alegría. Departamento de Usulután. El Salvador

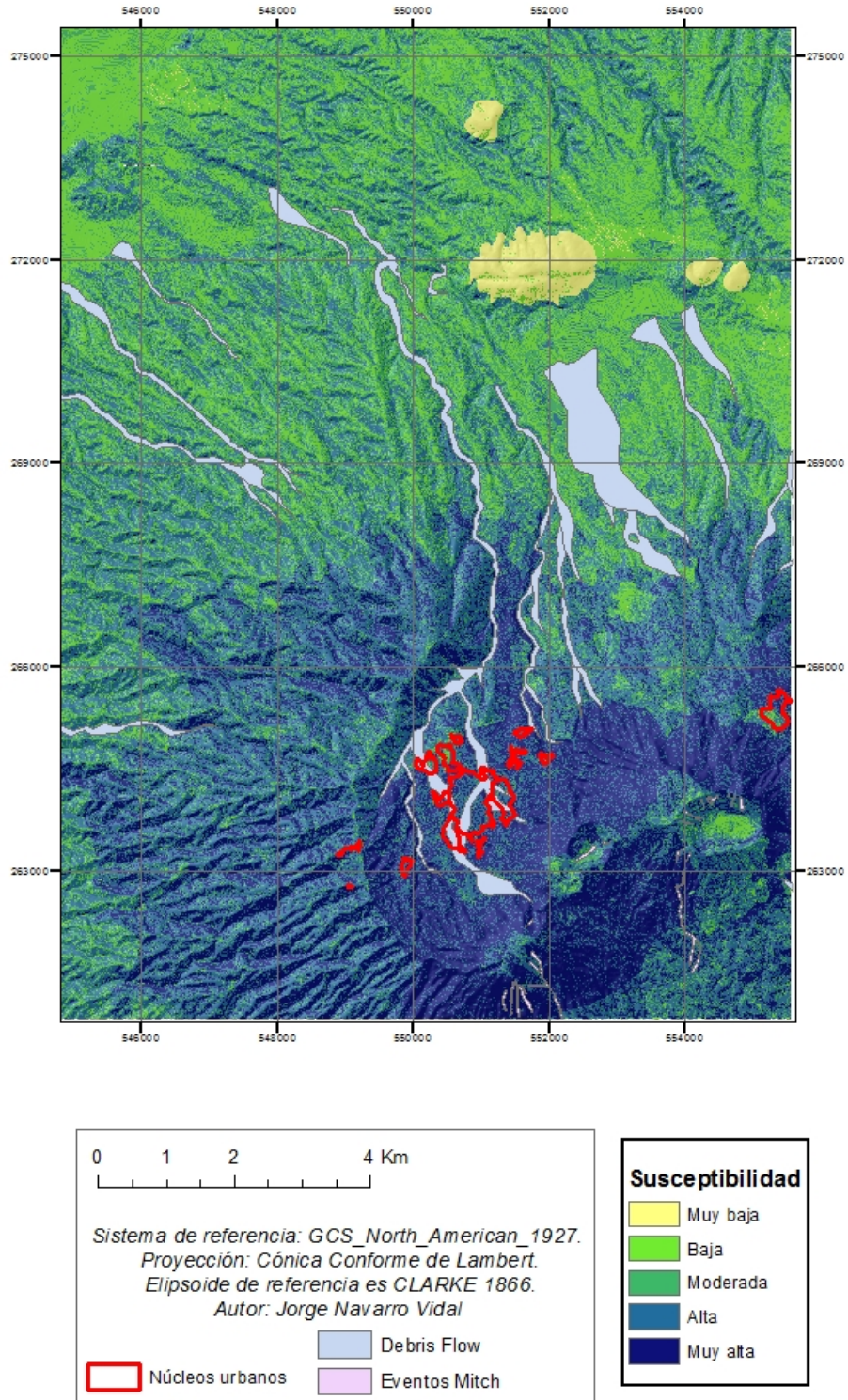


Figura 22. Mapa de susceptibilidad. Frecuencias de eventos tipo debris flow.

B. Cálculo de la susceptibilidad mediante Evaluación Multicriterio.

De acuerdo con Pietersen (2006), el objetivo general de la evaluación multicriterio (EMC) es auxiliar al decisor a escoger la mejor alternativa entre un rango de posibilidades en un entorno de criterios en competencia y conflicto; y los objetivos pueden ser económicos, ambientales, sociales, institucionales, técnicos y estéticos. Cuando las decisiones implican alcanzar varios objetivos o criterios, ellas se denominan decisiones multiobjetivo o decisiones multicriterio, respectivamente.

Las técnicas de EMC consisten en una primera etapa en el diseño de una matriz con los criterios y las alternativas definidos; la siguiente etapa consiste en la agregación de las distintas puntuaciones de los criterios, tomando en cuenta la preferencia de los expertos expresada en término de pesos que se asignan a los diferentes criterios; ese procedimiento o técnica permite al decisor comparar entre las diferentes alternativas con base a los pesos asignados.

En este caso, seguiremos una técnica de EMC implementada en SIG y aplicada a la susceptibilidad a movimientos de ladera. Una vez normalizados los factores que influyen en la susceptibilidad asignaremos los pesos con la técnica de la AHP, Matriz de Jerarquización Analítica (Figura 23.). Este método, fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty, y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico. El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo jerárquico.

Una vez construido el modelo jerárquico, se realizan comparaciones en pares entre dichos elementos y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas expertas en la materia, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas. Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9.

$1/9$	$1/7$	$1/5$	$1/3$	1	3	5	7	9
Extrema	Fuerte	Moderada	Igual	Igual	Moderada	Fuerte	Fuerte	Extrema
Menos importante					Más importante			

<i>FACTOR</i>	a	b	c	d
a	1			
b	$P_{b,a}$	1		
c	$P_{c,a}$	$P_{c,b}$	1	
d	$P_{d,a}$	$P_{d,b}$	$P_{d,c}$	1

Figura 23. Matriz de Jerarquías Analíticas. Fuente: Saaty.

Una vez obtenidos los pesos de los factores se sumarán con la *calculadora ráster*¹² mediante una Suma Lineal Ponderada (SLP). La ponderación lineal es un método compensatorio que permite abordar situaciones de incertidumbre en varios niveles de información. En este método se construye una función de valor para cada una de las alternativas y es completamente compensatorio y puede resultar dependiente y manipulable en la asignación de pesos a los criterios o en la escala de medida de las evaluaciones.

En este caso, multiplicaremos cada factor ya normalizado (pendiente, rugosidad, litología, geotecnia, usos del suelo y curvatura), por su peso correspondiente y posteriormente se sumaran los resultados. Se ha optado por descartar el factor de las orientaciones en esta metodología multicriterio debido su difícil normalización y se ha optado por incluir solamente las orientaciones como parte del factor rugosidad.

- Normalización de factores:

Antes de introducir los factores o indicadores en el modelo, es necesario estandarizar las variables en una misma escala para hacerlos comparables, debido a que el rango de valores finales de cada indicador es diferente. Para ello se ha realizado un ajuste de tipo lineal, utilizando un rango de estandarización de 10 categorías. La fórmula del ajuste de tipo lineal es la siguiente:

$$F_i = (v_{\max} - v_i) / (v_{\max} - v_{\min}) * 10$$

Donde:

F_i = valor del factor normalizado; v_i = valor origen del factor; v_{\max} = valor máximo; v_{\min} = valor mínimo.

La normalización o estandarización de las variables es un paso de gran importancia tanto para el desarrollo metodológico de los modelos multicriterio, como para una correcta valoración en cada indicador.

- Ponderación de pesos:

Para asignar los pesos se ha optado por utilizar el método de las jerarquías analíticas o comparación por pares (Saaty, 1977). Este método consiste en la elaboración de una matriz de comparación por pares, en la que se especifica la importancia relativa de cada indicador respecto a los demás (Figura 24). La escala de medida que se usa a la hora de cuantificar la importancia relativa es una escala de tipo continuo o de razón.

Para la toma de decisiones a la hora de valorar la importancia de un factor con respecto al otro se ha consultado a expertos sobre deslizamientos.

¹² Herramienta *Calculadora ráster, Spatial Analyst Tools*.

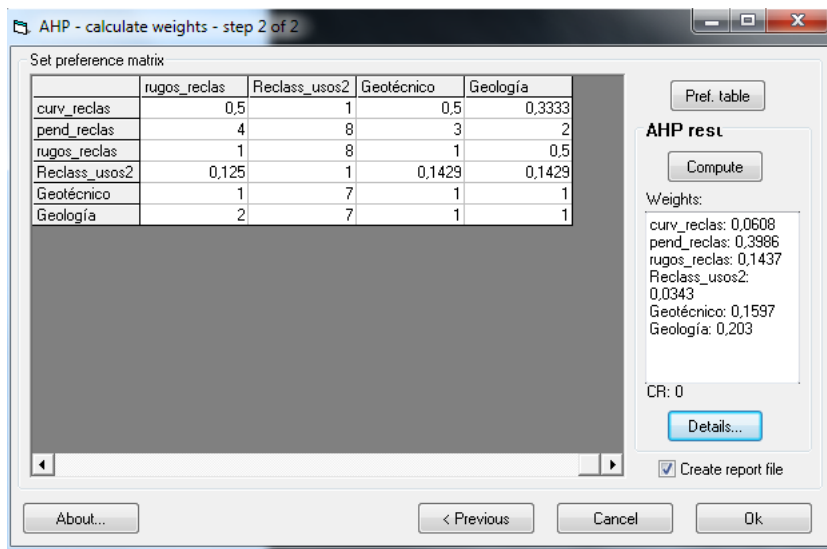


Figura 24. Asignación de pesos mediante la matriz de jerarquías analíticas en ArcGIS.

Los pesos asignados mediante el método AHP en base a la opinión de expertos otorgan más importancia a la pendiente, seguido de la litología, la geotecnia, rugosidad, curvatura y por último los usos del suelo.

Pesos ponderados de los factores:

- Pendiente: 0,398
- Litología: 0,203
- Geotecnia: 0,159
- Rugosidad: 0,143
- Curvatura: 0,060
- Usos del Suelo: 0,034

Una vez obtenidos los pesos de los factores, se obtiene finalmente un índice de susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante *la suma lineal ponderada*¹³ (Hervás de Diego y Barredo Cano, 2001) de pesos de factores y clases, según la expresión:

$$I = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

Donde I es el índice de susceptibilidad; w_j es el peso del factor j; x_{ij} es el peso de la clase i del factor j. Finalmente se clasifican los índices en unos pocos intervalos iguales de susceptibilidad, más estandarizados y de interpretación intuitiva.

A continuación se muestra un diagrama de procesos de la metodología de evaluación multicriterio. (Figura 25).

El resultado de esta suma lineal ponderada es el mapa de susceptibilidad mediante evaluación multicriterio. (Figura 26).

¹³ Herramienta Calculadora ráster, Spatial Analyst Tools.

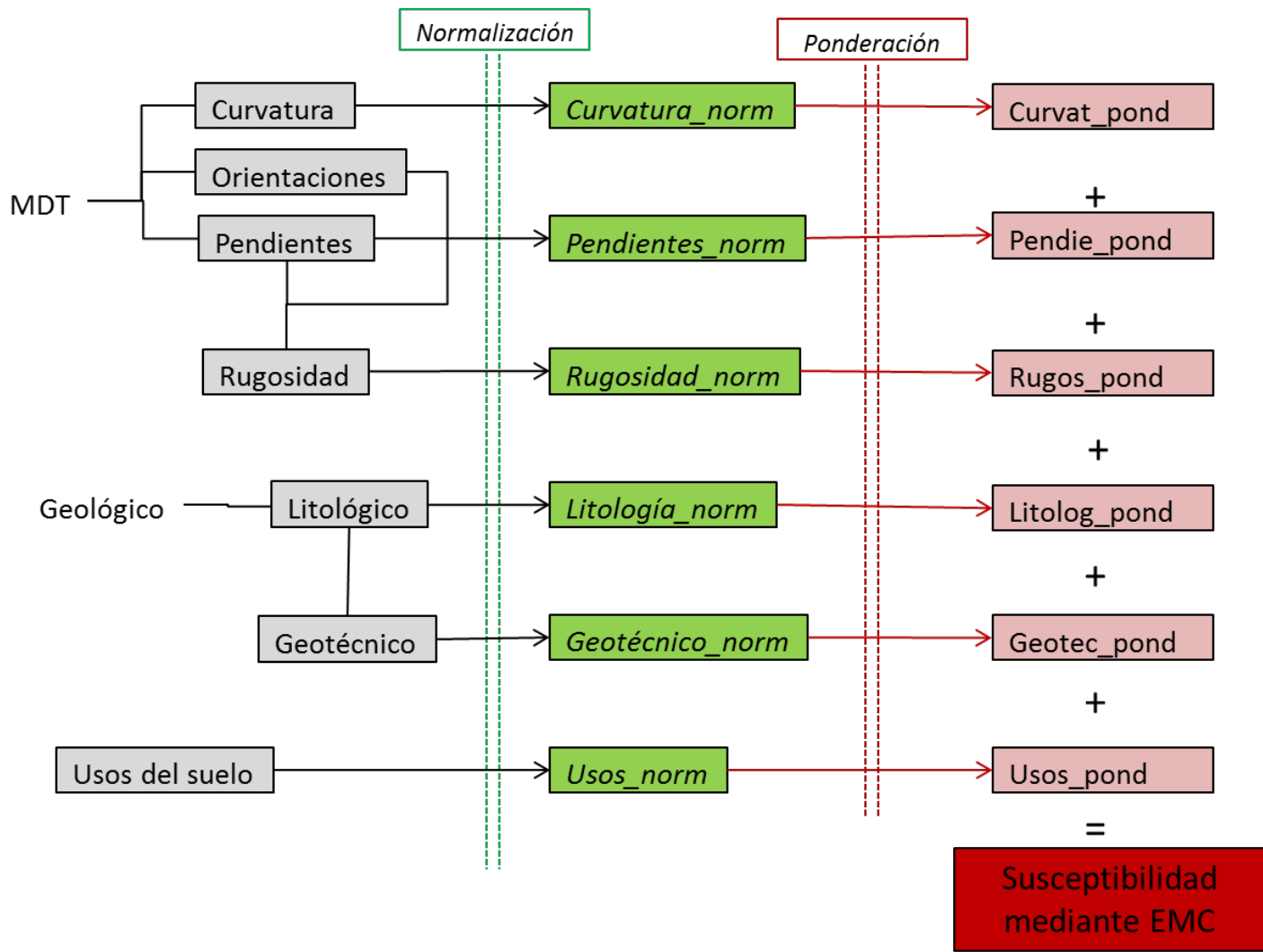


Figura 25. Diagrama de procesos. Evaluación Multicriterio.

**Susceptibilidad a movimientos de ladera
mediante Evaluación Multicriterio
por el método de Suma Lineal Ponderada.
Berlín-Alegría.
Departamento de Usulután. El Salvador**

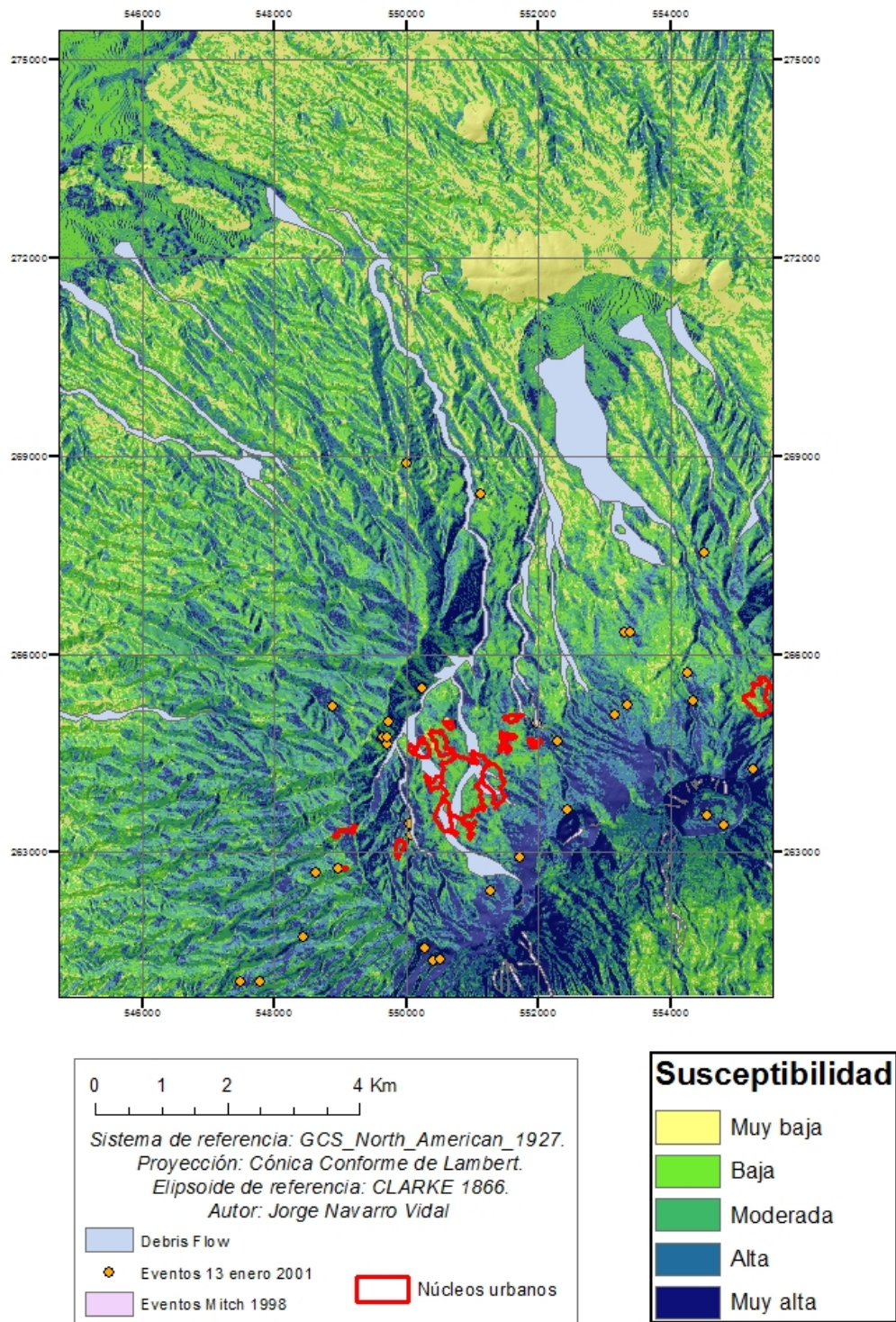


Figura 26. Mapa de susceptibilidad mediante Evaluación Multicriterio.

6.2.3 Resultados y conclusiones del cálculo de la susceptibilidad.

El cálculo de la susceptibilidad a movimientos de ladera mediante las dos metodologías propuestas permite sacar conclusiones acerca de la idoneidad de cada método.

Al comparar ambas metodologías parece muy claro que el método de análisis de frecuencias está más alejado de la realidad ya que en ambos mapas de frecuencias (para los diferentes tipos de eventos) se representan como muy susceptibles áreas con muy poca pendiente.

Esto es debido al excesivo peso que tienen los usos del suelo en esta metodología, ya que cada frecuencia de eventos implica el peso de ese factor en la suma final. En el caso de los usos del suelo, la distribución espacial de los eventos es casi exclusiva en el cafetal, sobre todo en los eventos ocasionados a causa del terremoto de enero de 2001. Ello supone que aparezcan representadas en el mapa las zonas de cafetal como muy susceptibles a sufrir deslizamientos aunque dichas áreas tengan poca pendiente o poca rugosidad.

La mayoría de los eventos se han producido sobre zonas cafetaleras porque en esas zonas la pendiente casi siempre es fuerte, pero hay zonas en las que la pendiente es más suave pero también están cultivadas con café.

El método de Evaluación Multicriterio mediante suma lineal ponderada se ajusta mucho mejor a la realidad, ya que en Berlín la susceptibilidad a movimientos de ladera depende de varios factores y entre ellos el más importante es la pendiente del terreno (Figura 27 y Figura 28).

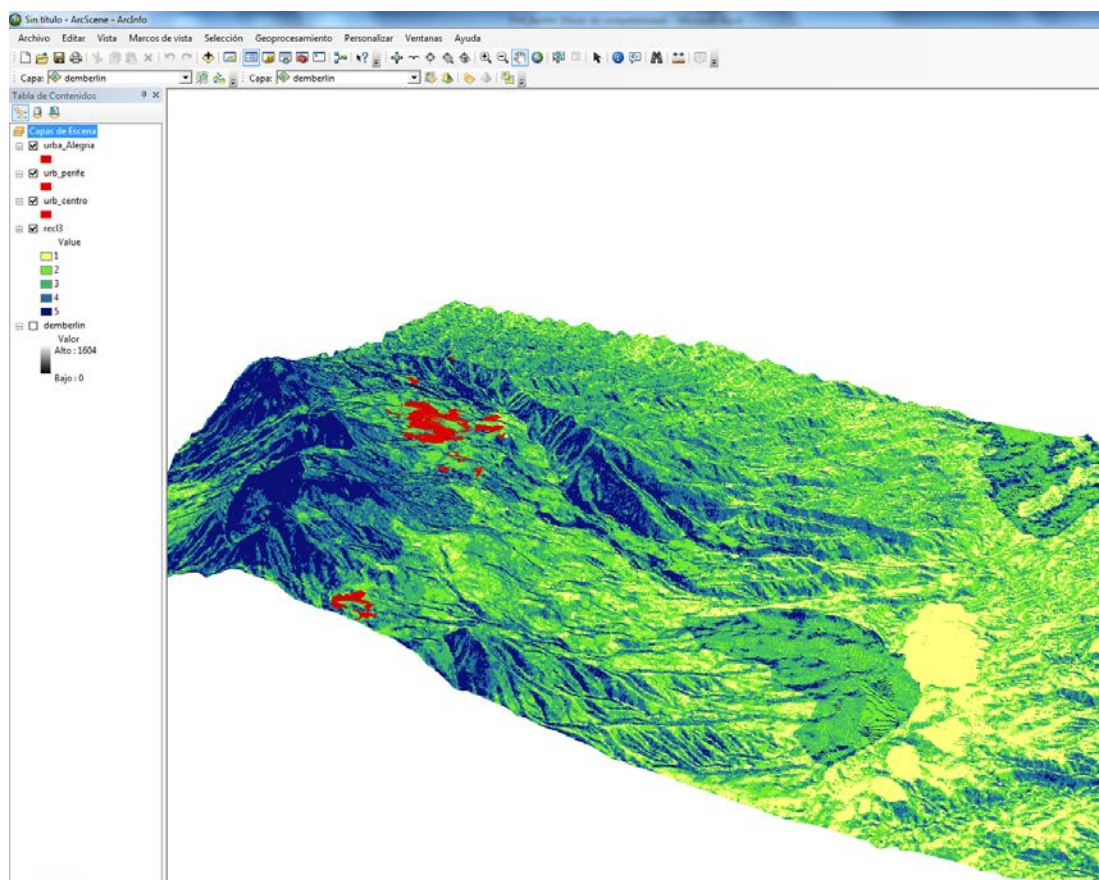


Figura 27. Vista en 3D desde el este de la caldera volcánica que rodea la ciudad de Berlín en el mapa de susceptibilidad obtenido por Evaluación Multicriterio. En rojo se representan los núcleos urbanos.

El cálculo de los pesos mediante la matriz jerárquica otorga mayor preponderancia al peso establecido en los criterios sobre los valores asignados a las alternativas en el proceso de toma de decisiones (Barredo, 1996). Esto significa en nuestro caso, que el índice de susceptibilidad a movimientos de ladera obtenido depende fundamentalmente del peso asignado a los factores y en menor medida de la asignación de pesos a cada clase dentro de un factor, por lo que la subjetividad y ausencia de control inherentes a éste último proceso no influye sobremanera en el cálculo de la suma final.

En el mapa obtenido mediante Evaluación Multicriterio se puede ver con facilidad como las áreas de baja pendiente situadas en el interior de la caldera volcánica de Berlín, donde se sitúa la ciudad de Berlín, son calificadas como de susceptibilidad baja.

El interior de los conos volcánicos en esta metodología aparece representado como muy susceptible, no siendo así en la metodología de análisis de frecuencias ya que en esas zonas no existe el uso del suelo cafetal. En las laderas interiores de los conos volcánicos de los cerros Pelón y Las Palmas existe una muy alta susceptibilidad a movimientos de ladera como así lo demuestran los informes técnicos de la DGOA del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, sobre los eventos ocurridos en el pasado en dichas áreas.

En consecuencia con estos resultados, se ha optado por desestimar para el posterior cálculo de la amenaza los dos mapas de análisis de frecuencias y utilizar únicamente el mapa de susceptibilidad calculado con análisis multicriterio.

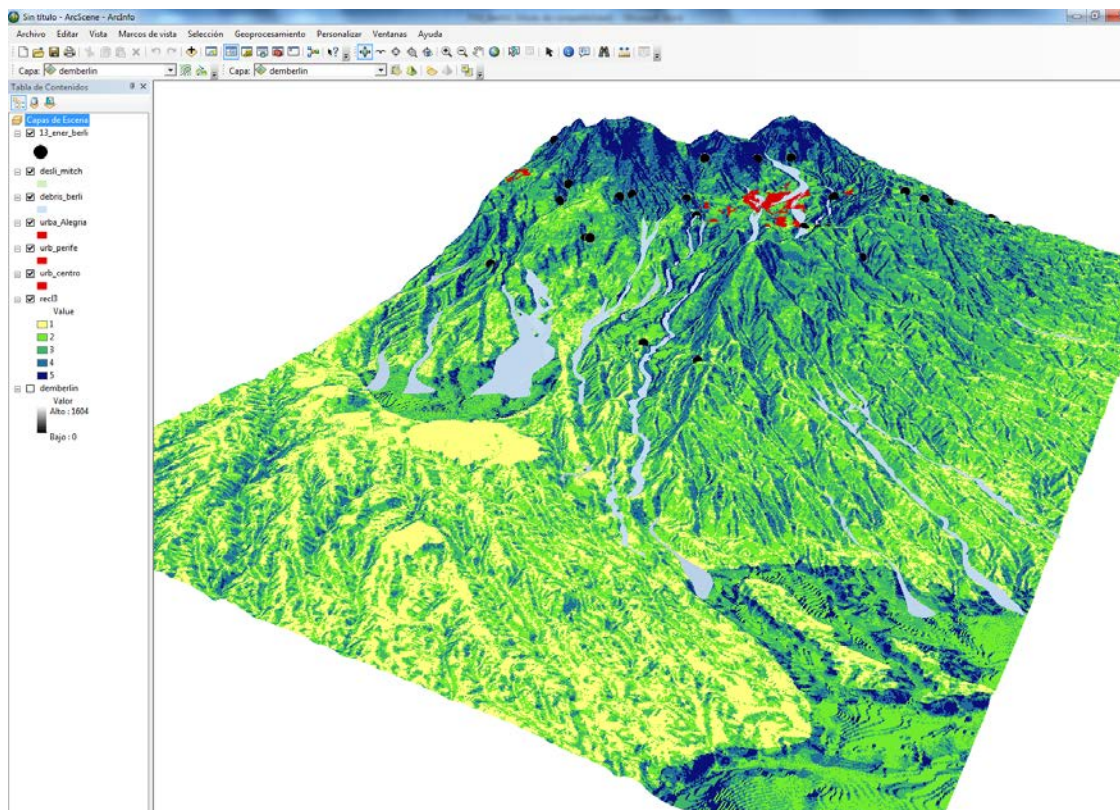


Figura 28. Vista en 3D desde el norte del mapa de susceptibilidad calculado mediante Evaluación multicriterio. Se representa también la base de datos de eventos. Los debris flow se simbolizan en azul y los eventos ocurridos tras el sismo del 13 de enero de 2001 en negro.

6.3 Cálculo de la amenaza.

Como se mencionó con anterioridad en el Apartado 5 Conceptos generales, la amenaza de movimientos de ladera se define como la probabilidad de ocurrencia del fenómeno dentro de un periodo de tiempo determinado y en un área específica. Debemos sumar a la susceptibilidad el factor de disparo de los movimientos de ladera.

Una vez se ha calculado la susceptibilidad y se ha determinado que el método que más se ajusta a la realidad es el de Evaluación Multicriterio, a continuación se va a calcular el factor detonante o de disparo, que en este trabajo, será el sísmico.

6.3.1 Factor detonante. Amenaza sísmica.

En el cálculo de la amenaza de movimientos de laderas basada en un detonante sísmico se pueden considerar dos posibles escenarios:

Escenario determinista, asociado a un terremoto concreto y donde se estima el movimiento del suelo esperado en un emplazamiento o región debido a la ocurrencia del mismo.

Escenario probabilista, definida como la probabilidad de que se iguale o supere un determinado nivel de movimiento del terreno, como resultado de la acción de terremotos en el área de influencia, durante un periodo de tiempo especificado (p.ej., Schenk, 1989).

El escenario probabilista, requiere de un estudio detallado de todas las fuentes sismogénicas del entorno y la modelización de todas ellas, por lo que el cálculo de dicho escenario excede de las capacidades y objetivos de este trabajo. Por este motivo, se ha decidido considerar como detonante de disparo de posibles deslizamientos de laderas en el área de estudio, el escenario determinista, estando este asociado a un posible terremoto que puede producirse en las proximidades de Berlín.

6.3.2 Fuente Sísmica.

Como ya se menciona en el Apartado 4 Características del medio físico y humano., las fuentes sismotectónicas de El Salvador, y por lo tanto, las fuentes generadoras de terremotos, están agrupadas en dos zonas claramente definidas (Figura 29.).

Zona de subducción: la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe provoca una intensa actividad sísmica al sur-suroeste de la zona de estudio. Esta fuente sísmica está localizada a unos 150 km de Berlín y se caracteriza por generar terremotos de gran magnitud, como fue el caso del terremoto del 13 de enero de 2001, de magnitud 7.7, ó el terremoto del pasado 27 de agosto de este año, de magnitud 7.4.

Zona de Cadena Volcánica: Es una zona de fallas corticales que recorre el país de este a oeste. Está orientada aproximadamente en dirección paralela a la línea de costa a unos 40-70 kilómetros tierra adentro. Estas fallas presentan una alta actividad sísmica con un mecanismo predominantemente de desgarre. Los terremotos que se producen en esta zona son de magnitud inferior a los producidos en la zona de subducción (magnitud ente 5.5 y 6.5), pero su

proximidad a las zonas pobladas y su poca profundidad hace que sean terremotos con alto riesgo sísmico para la población.

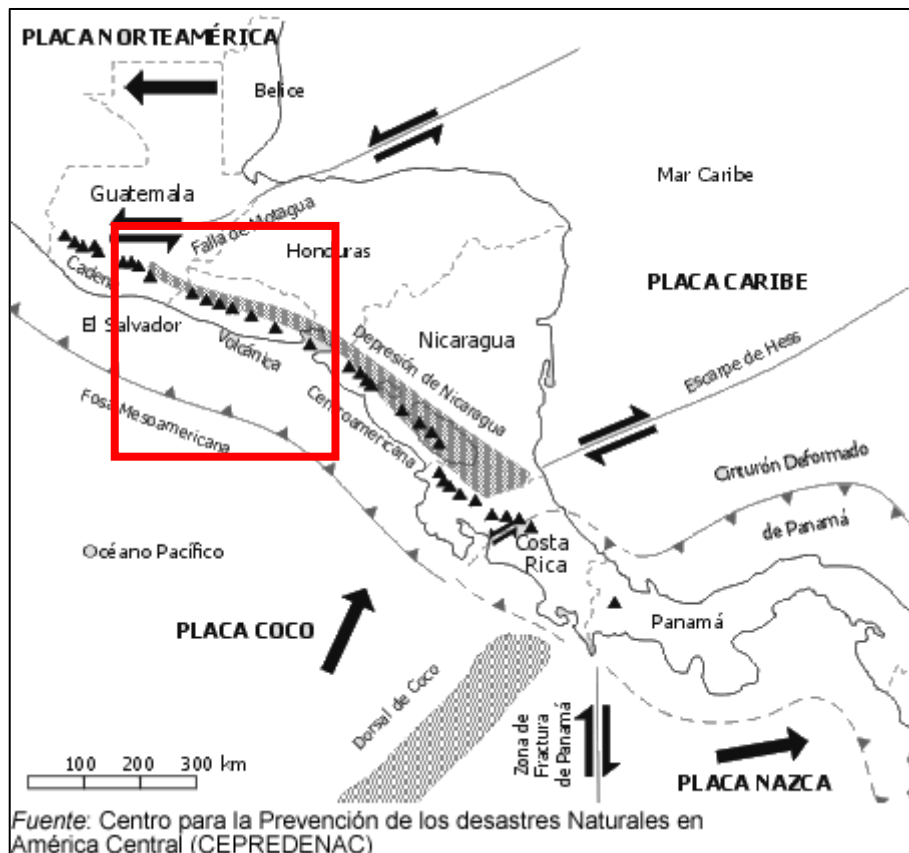


Figura 29. Marco tectónico de Centroamérica.

El municipio de Berlín, se encuentra en la Cadena Volcánica, teniendo en sus límites municipales una falla activa de potencial sísmico significativo. Esta falla, conocida como Falla “El Triunfo”, será la fuente sísmica elegida como fuente generadora del escenario sísmico debido al alto potencial sísmico (puede generar terremotos de hasta 6.7 grados de magnitud) y su gran proximidad a la zona de estudio.

La falla El Triunfo se encuentra dentro del denominado segmento Berlín, el cual tiene una zona de desplazamiento principal muy clara de dirección E-O, en la que se concentra la deformación, y varias fallas secundarias con direcciones NO-SE (Figura 30).

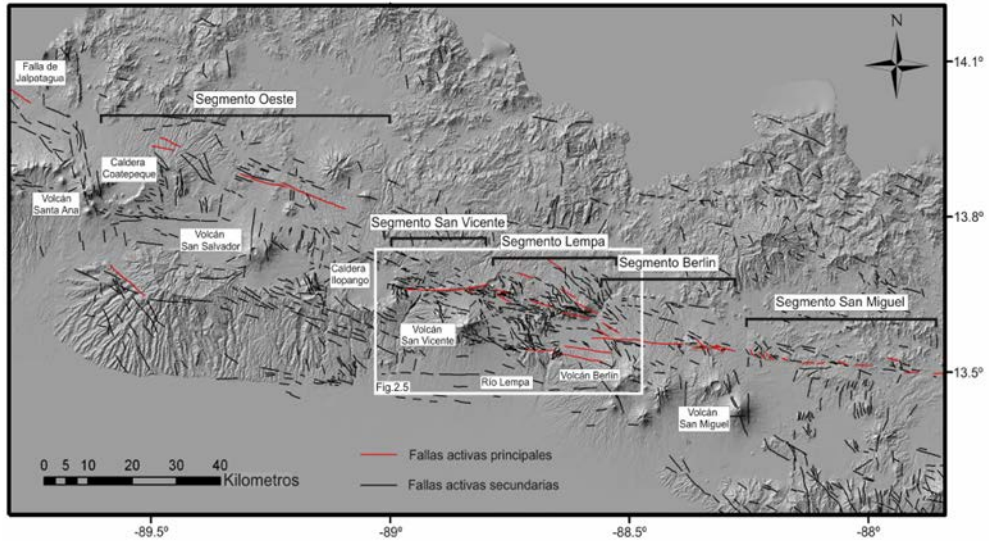


Figura 30. Principales fallas activas (rojo) y segmentos que componen la Zona de Falla de El Salvador.

Las características de la falla se muestran en la tabla 3:

Tabla 3. Características de la Falla El Triunfo. Fuente: Staller (2012). Comunicación personal.

Nombre=El Triunfo Fault (ETF)	Longitud= 31.41 km Acimut=274° 41' Buzamiento: 90° aprox. Profundidad: 15 km aprox.	
Mecanismo: desgarre.		
Coordenadas de la traza de la falla.	longitud	latitud
	-88.2801	13.5449
	-88.3478	13.5502
	-88.4146	13.5555
	-88.4893	13.5615
	-88.5695	13.5678

En la (Figura 31), se muestra una vista del plano de falla (gris), del posible plano de ruptura (rojo), de la localización del hipocentro que se considerará como fuente sísmica y su posición relativa al área de estudio.

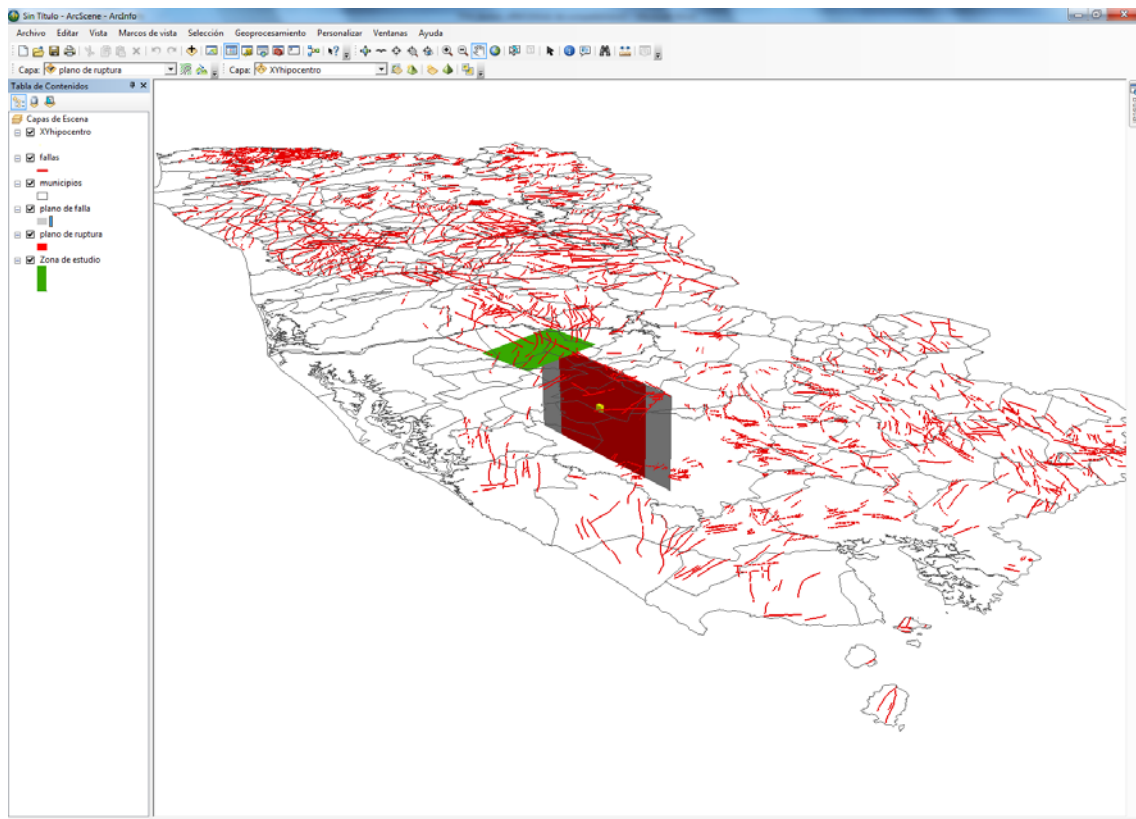


Figura 31. Vista de la fuente sísmica (plano de ruptura e hipocentro) y su posición relativa con el área de estudio (zona verde). En rojo se destacan las fallas de El Salvador. En gris el contorno de los municipios del país.

6.3.3 Modelización de la amenaza sísmica

La peligrosidad sísmica se puede representar por medio de diversos parámetros que representan la sacudida sísmica. Estos están relacionados esencialmente con la amplitud del movimiento, el contenido frecuencial y la duración. Cuando se quieren predecir movimientos futuros, dichos parámetros deben ser estimados mediante modelos matemáticos.

En este caso, el parámetro con el que mediremos la amenaza sísmica de la zona de estudio será la aceleración pico del terreno, denotado por PGA (Peak Ground Acceleration). Este parámetro representa la amplitud máxima de la historia temporal de aceleración del suelo. Las unidades de medida que utilizaremos para el mismo serán cm/s^2 .

Para modelizar la amenaza sísmica que representa el terremoto seleccionado en el área de estudio, se utilizará un modelo de movimiento fuerte (MMF) empírico, tal y como se suelo considerar en estos casos.

Los MMF, son modelos matemáticos que estiman la aceleración esperada en el emplazamiento de cálculo en función de la magnitud del terremoto (M) y la distancia a su foco (D), y por tanto consideran la atenuación de la energía sísmica a lo largo del trayecto que va desde el foco al emplazamiento.

Efecto local

El efecto local es una cuestión a tener en cuenta cuando se realiza un cálculo de amenaza sísmica. Las características geotécnicas del suelo (relacionadas con las condiciones litológicas y de la estructura del subsuelo) provocan un aumento o disminución de la aceleración en el emplazamiento de cálculo (Figura 32). Así, suelos blandos, poco cohesionados, amplifican el movimiento del terreno considerablemente, y emplazamientos sobre roca dura apenas amplifican el movimiento. Por ello, debe también conocerse esta característica del suelo que se está estudiando y, de ese modo, obtener un modelo más ajustado a la realidad.

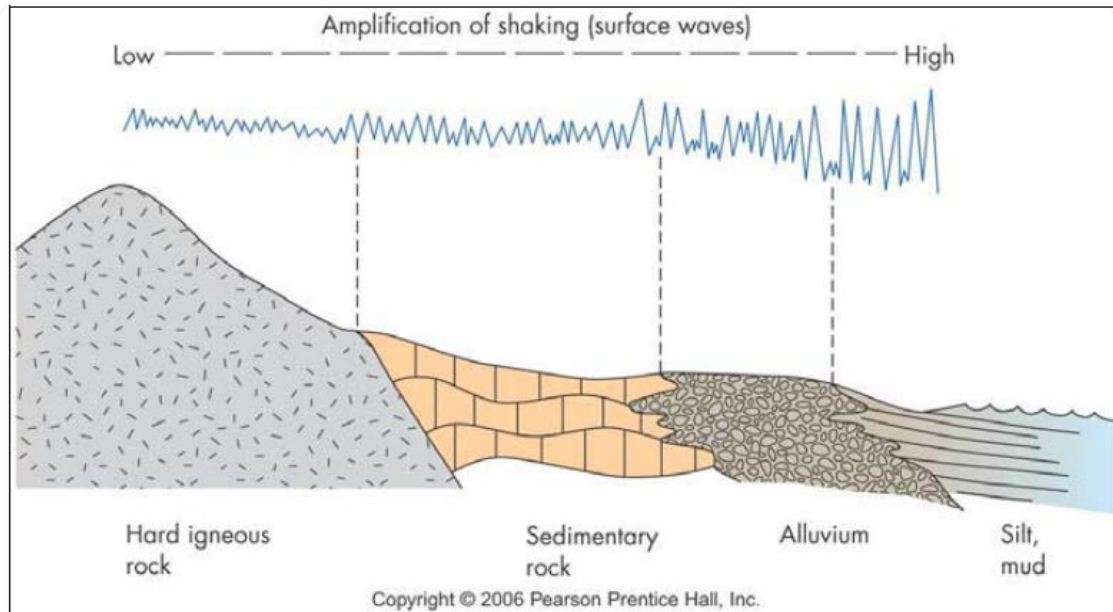


Figura 32. Variación de la señal sísmica en función del tipo de suelo.

En el caso de este estudio, ya se había desarrollado una clasificación geotécnica del terreno, distinguiéndose tres tipos distintos: suelo duro y dos tipos de suelos blandos. Esta clasificación será la que se utilice en este apartado para estimar la aceleración esperada en el terreno debido al sismo.

Modelo de movimiento fuerte

Dentro de todos los modelos que ofrece la literatura, se ha seleccionado el modelo desarrollado por Schimdt en 2011, por ser el último modelo desarrollado con datos de la región y que está siendo utilizado en los últimos cálculos de amenaza sísmica de Centroamérica.

La forma funcional que proporciona este modelo presenta 6 coeficientes

$$\log Y = b_1 + b_2 * M + b_3 * \log(v(D^2 + b_4)) + S * b_5 + H * b_6$$

Donde:

Y es la variable dependiente, que suele ser considerada como la aceleración pico del suelo, la aceleración espectral, la velocidad espectral o la velocidad pico del suelo. En esta investigación se trabajará con los dos primeros casos.

S es una variable binaria que representa la geología local del sitio,

Donde: Y es la PGA en cm/s^2 , log corresponde al logaritmo en base 10, b1 a b6 son los términos a ser obtenidos por medio de la regresión y no es considerado el termino correspondiente a la atenuación inelástica.

b1	b2	b3	b4	b5	b6
0.12602	0.49081	-1.03591	4.22442	0.22075	0.11742

Variables independientes:

M es la magnitud del sismo que genero el registro; en este caso será utilizada la Mw.

D es una medida de distancia, para este trabajo se considera como la hipocentral (distancia más corta al hipocentro).

Los dos últimos términos corresponden a la condición del suelo en el sitio de registro; en caso de que sea roca, S= H= 0, si el suelo es firme, S=0 y H=1 y para suelo blando S=1 y H=0.

Cálculo de la amenaza sísmica en Berlín.

Para calcular la amenaza sísmica en Berlín, debemos conocer las dos variables independientes que entran en el modelo, la magnitud y la distancia.

En este caso, al tratarse de un escenario determinista, la magnitud será una constante (Mw=6.5). Sin embargo, la distancia será un parámetro que vaya cambiando a lo largo de la zona de estudio. Para ello, se generará¹⁴ una capa ráster de distancias, en las que el valor de cada píxel, será la distancia de ese punto al terremoto. De forma semiautomática, podremos obtener esa capa de distancias epicentrales (distancia de la proyección del terremoto en superficie a cualquier punto del terreno), como el modelo que se utilizará considera distancias hipocentrales (distancia del terremoto a cualquier punto del terreno), debemos convertir las distancias epicentrales en distancias hipocentrales. Se utilizarán las funciones matemáticas del software, donde se introducirá la siguiente expresión:

$$D_h = (D_e^2 + \text{prof}^2)^{1/2}$$

Una vez obtenidas las variables de cálculo, se estimó la aceleración esperada en el terreno incorporando la forma funcional del modelo de movimiento fuerte en el SIG (Figura 33).

¹⁴ Herramienta Coste de Distancia. Spatial Analyst.

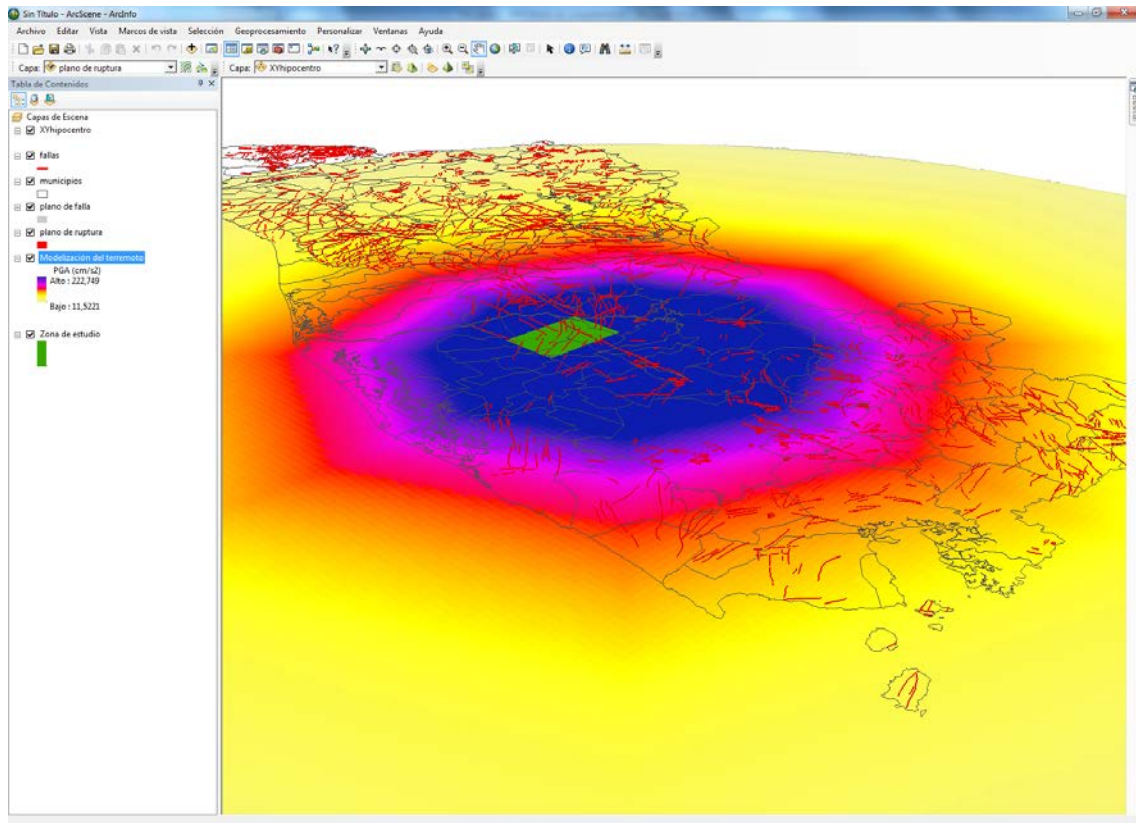


Figura 33. Vista de la modelización de la aceleración en roca estimada para el terremoto.

En la Figura 34, se presenta un diagrama de geoprocresos con todas las capas auxiliares que se han utilizado en este cálculo.

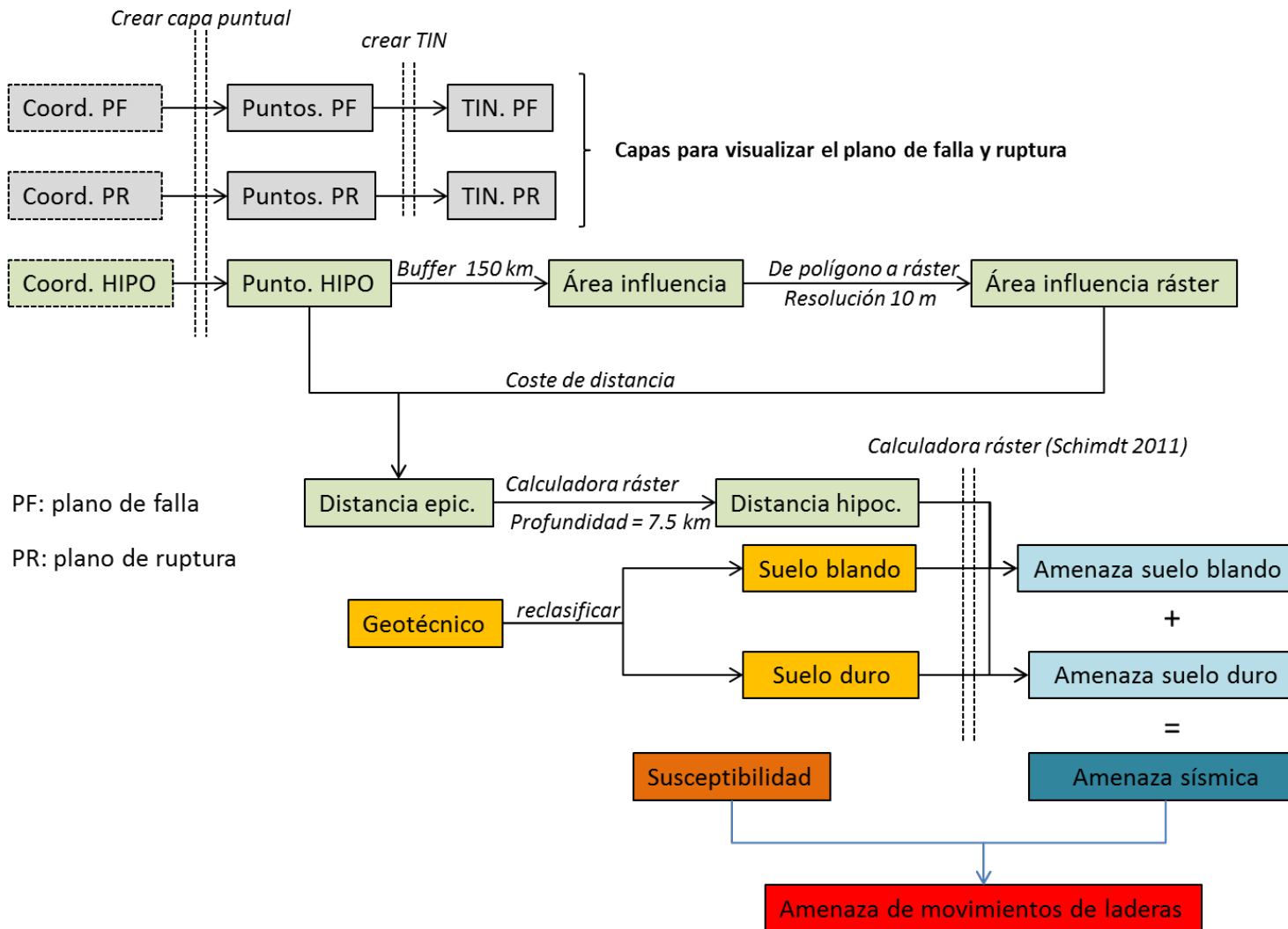


Figura 34. Diagrama de procesos. Cálculo de la amenaza.

En la Figura 35, se muestra una vista del mapa de amenaza sísmica desarrollado para la zona de estudio.

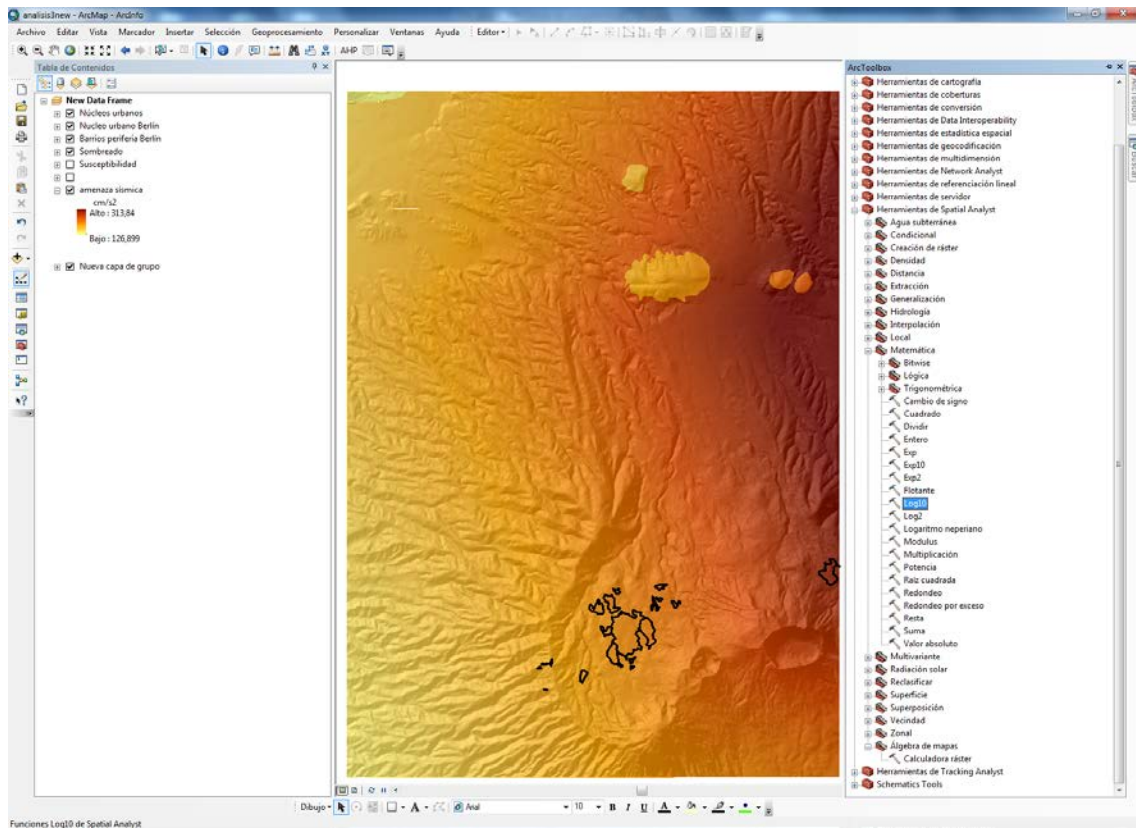


Figura 35. Vista de la amenaza sísmica.

6.3.4 Amenaza de deslizamientos de laderas.

Llegados a esta parte del estudio, la literatura ofrece pocas metodologías de estimación de la amenaza de movimientos de laderas. La combinación de la susceptibilidad y el detonante no queda clara en la mayoría de los trabajos consultados, así como la cuantificación de la amenaza.

En Maria José Garcia (2008), se normalizan las dos variables de entrada y no se explica claramente la combinación que se hace de las mismas. En Mora et al (1992), se utiliza la metodología propuesta por Trifunac y Brady (1975), en el que se clasifica la acción sísmica en 12 categorías. Esta clasificación resulta muy irregular y poco aplicable a una escala local, ya que los intervalos de aceleración resultan demasiado generales. En el trabajo realizado por Llorente y Palacios (2009), esta parte del cálculo es tratada de forma cualitativa, estableciendo relaciones lógicas entre la susceptibilidad y el detonante. En general, todos los trabajos consultados tienen en común la normalización del factor detonante en función de los valores máximos y mínimos del área del estudio y la combinación relativa de la susceptibilidad y el detonante. Por lo que se ha decidido actuar de la misma manera en este trabajo.

Se ha clasificado el detonante sísmico estableciendo cuatro categorías, Muy alta, Alta, Moderada y Baja. La calificación de muy baja no ha sido asignada en este trabajo ya que las aceleraciones mínimas obtenidas han sido superiores a 0.1g (Figura 36).

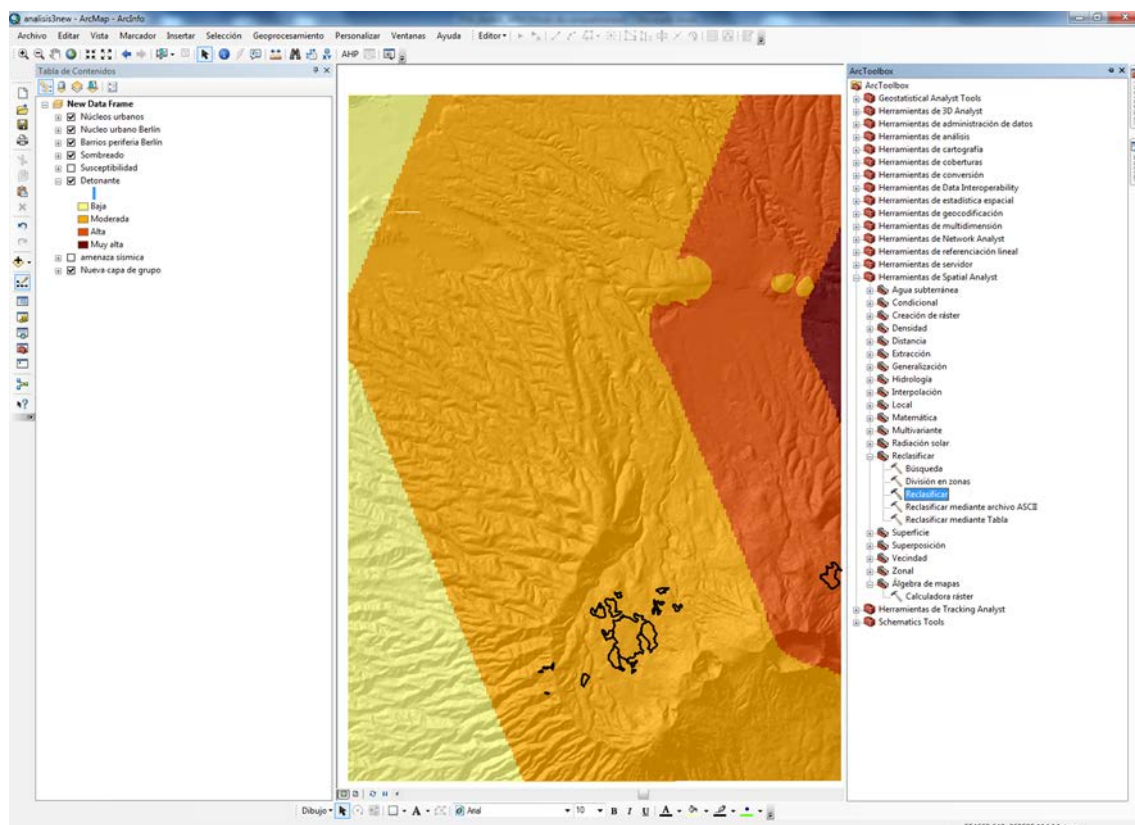


Figura 36. Reclasificación de la amenaza sísmica en cuatro categorías.

Para la combinación de la susceptibilidad y el detonante, se han utilizado las tablas relacionales presentadas en Llorente y Palacios (2009) por su fácil aplicación y su claridad. En este caso, se combinan las capas siguiendo la tabla 4, asociado cinco categorías de amenaza a los movimientos de laderas en el territorio.

Tabla 4. Tabla propuesta por Llorente y Palacios (2009) para combinar la susceptibilidad y el detonante sísmico en la estimación de la amenaza de movimientos de ladera.

Susceptibilidad	Detonante	Amenaza
Muy Alto	Muy Alto	Muy Alto
Muy Alto	Alto	Muy Alto
Muy Alto	Medio	Alto
Muy Alto	Bajo	Medio
Alto	Muy Alto	Muy Alto
Alto	Alto	Alto
Alto	Medio	Alto
Alto	Bajo	Medio
Medio	Muy Alto	Alto
Medio	Alto	Alto
Medio	Medio	Medio
Medio	Bajo	Bajo
Bajo	Muy Alto	Medio
Bajo	Alto	Medio
Bajo	Medio	Bajo
Bajo	Bajo	Bajo
Muy Bajo	Muy Alto	Bajo
Muy Bajo	Alto	Bajo
Muy Bajo	Medio	Muy Bajo
Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo

Siguiendo esta combinación, se ha obtenido el mapa de amenaza de movimientos de laderas que se presenta en la Figura 37.

Amenaza a los movimientos de ladera mediante detonante sísmico Berlín-Alegría. Departamento de Usulután. El Salvador

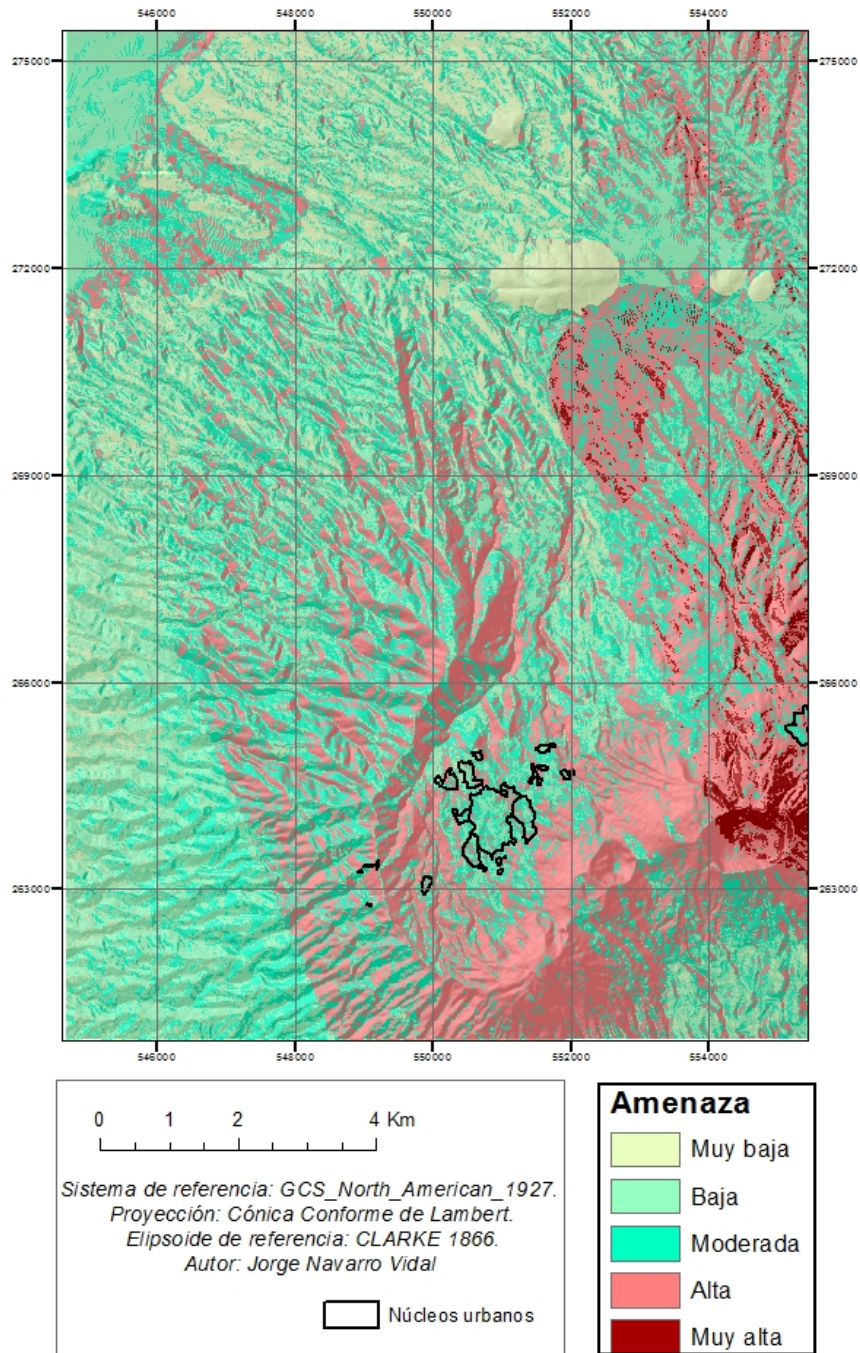


Figura 37. Mapa de amenaza a movimientos de ladera mediante detonante sísmico.

6.3.5 Conclusiones a la amenaza de movimientos de ladera

El cálculo de la amenaza de movimientos de ladera incluyendo un factor detonante por terremoto posibilita la representación de un escenario realista en la zona. Los últimos estudios sobre el comportamiento de las fallas en el área de Berlín otorgan una actividad elevada a la falla propuesta como generadora del terremoto de magnitud 6,5 que hemos supuesto. Esto hace que el escenario que se ha propuesto para este trabajo sea altamente probable en la zona.

La distancia al epicentro es muy pequeña, 6 km en las zonas más orientales de nuestro marco de trabajo, por lo que el efecto de disparo que produciría un terremoto sobre las laderas de Berlín (de alta susceptibilidad), sería de gran importancia para la planificación territorial y los planes de prevención y mitigación de dicho municipio.

En el mapa se observa como la amenaza muy alta a movimientos de ladera queda representada sobre todo en la zona sureste, salvo en las pequeñas áreas en las que existen materiales más consolidados, donde se amplifica menos la onda sísmica.

A medida que nos alejamos de la fuente sísmica la amenaza a movimientos de ladera es menor, salvo que nos encontremos con materiales blandos. Esta caída brusca de la aceleración en tan poca distancia encontrada en la zona (200 cm/s^2 en solo 14 km), es debida a la alta proximidad del sismo al área de estudio.

No obstante, la variabilidad espacial de la amenaza de movimientos de ladera dentro de la zona estudiada, se debe principalmente a la susceptibilidad del terreno, tal y como puede observarse comparando el mapa de amenaza sísmica (Figura 35) y el mapa de amenaza a los movimientos de laderas (Figura 37).

7 Análisis de las precipitaciones

Desde un primer momento se han querido integrar en este trabajo los dos factores detonantes más importantes de los movimientos de ladera, los terremotos y las precipitaciones, pero debido a la escala local en la que se ha llevado a cabo el estudio, no se ha podido establecer el factor de las precipitaciones como factor detonante.

Los datos de precipitaciones disponibles en el municipio de Berlín son de una estación pluviométrica y, por tanto, no se puede determinar una variabilidad espacial dentro del municipio con los datos de una sola estación. Por ello, se ha desestimado el cálculo del factor detonante por lluvias.

No obstante, las referencias a las precipitaciones como factor de susceptibilidad y detonante en los movimientos de laderas, tanto en las metodologías más utilizadas como en las referencias a hechos reales, ha hecho que se quiera reflejar de alguna manera esta variable en este trabajo.

Si analizamos las precipitaciones mensuales y anuales disponibles de la estación pluviométrica de Berlín en el periodo 1970 - 1993 (Tabla 5), se puede observar que Berlín cuenta con una precipitación media anual de aproximadamente 1900 mm/año. Este valor, comparado con las precipitaciones del resto del país, lo sitúa entre los municipios de altas precipitaciones (Figura 38).

Tabla 5. Promedio de precipitaciones mensuales en el municipio de Berlín. Fuente: Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales del El Salvador

Año/Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANUAL
1970	-	-	-	-	27	301	349	373	-	-	-	-	1050
1971	0	0	0	16	229	188	-	277	363	290	116	1	1480
1972	2	1	3	43	326	276	159	156	330	270	52	0	1618
1973	0	0	0	90	273	269	190	406	348	402	17	4	1999
1974	5	0	21	5	103	475	146	173	530	146	4	0	1608
1975	1	0	0	3	203	146	260	342	505	317	73	0	1850
1976	0	0	0	56	108	484	123	250	284	232	32	7	1576
1977	0	0	0	150	267	468	126	233	298	174	162	11	1889
1978	0	0	20	56	169	252	434	272	366	202	2	64	1837
1979	0	0	25	74	167	496	297	242	646	227	18	2	2194
1980	2	0	0	28	208	402	287	256	370	214	87	44	1898
1981	0	0	43	94	190	515	280	396	422	279	17	53	2289
1982	19	1	2	3	583	358	142	150	567	268	76	0	2169
1983	1	4	25	13	42	236	104	248	317	226	93	-	1309
1984	1	46	2	2	171	260	314	259	380	164	40	0	1639

1985	0	0	2	58	135	352	243	209	294	241	474	16	2024
1986	0	3	0	11	458	309	85	-	320	-	-	-	1186
1987	-	-	54	9	86	359	274	294	-	-	0	21	1097
1988	-	-	4	4	202	576	405	712	498	312	-	5	2718
1989	0	0	7	68	173	224	493	308	818	166	79	2	2338
1990	0	0	10	73	443	254	165	258	437	260	107	18	2025
1991	1	0	7	10	265	431	124	278	254	461	17	26	1874
1992	0	0	0	50	106	287	224	172	472	147	63	0	1521
1993	31	0	36	226	-	-	-	-	-	-	-	-	293
PROMEDIO	3,0	2,6	11,3	49,7	214,5	344,3	237,5	284,7	420,0	249,9	76,5	13,7	1902,8
DS.	7,6	10,0	15,7	54,3	135,0	116,7	113,5	118,8	137,9	81,4	103,4	19,2	799,9
MAXIMA	31,0	46,0	54,0	226,0	583,0	576,0	493,0	712,0	818,0	461,0	474,0	64,0	2718,0
MINIMA	0,0	0,0	0,0	2,0	27,0	146,0	85,0	150,0	254,0	146,0	0,0	0,0	0,0

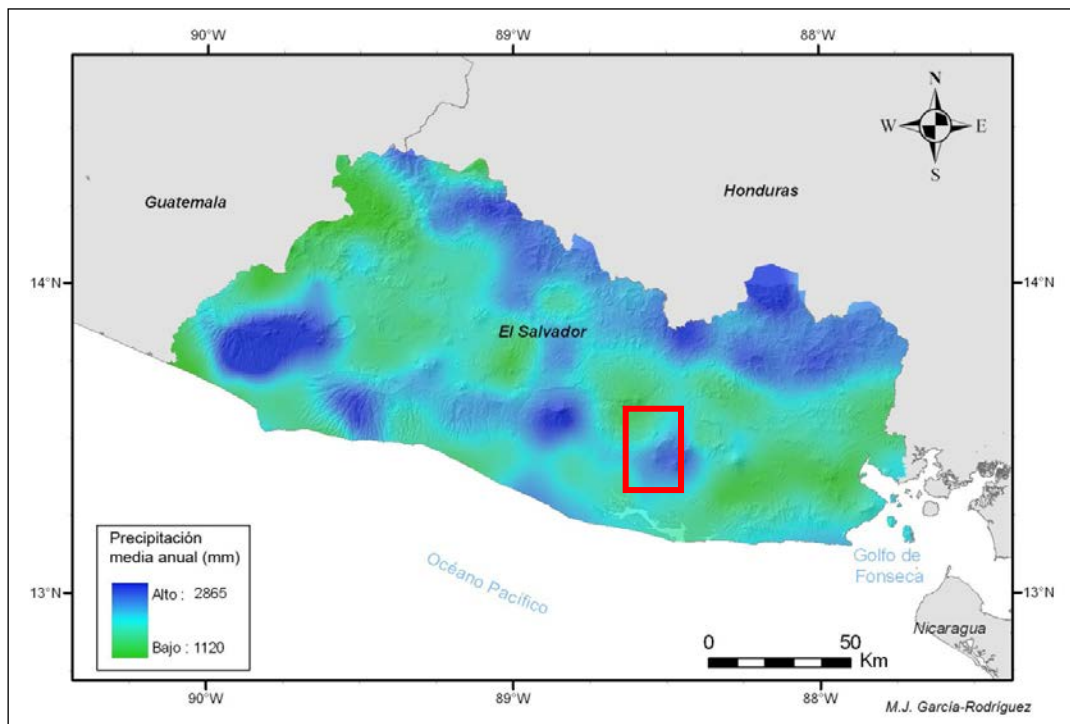


Figura 38. Mapa de precipitaciones de El Salvador. Fuente: Tesis doctoral "Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos" María José García Rodríguez.

Esta alta precipitación del país no se distribuye de manera homogénea a lo largo del año, como se puede observar en la Figura 39, la región se caracteriza por tener dos estaciones; una seca, de noviembre a abril, y otra lluviosa, de mayo a octubre.

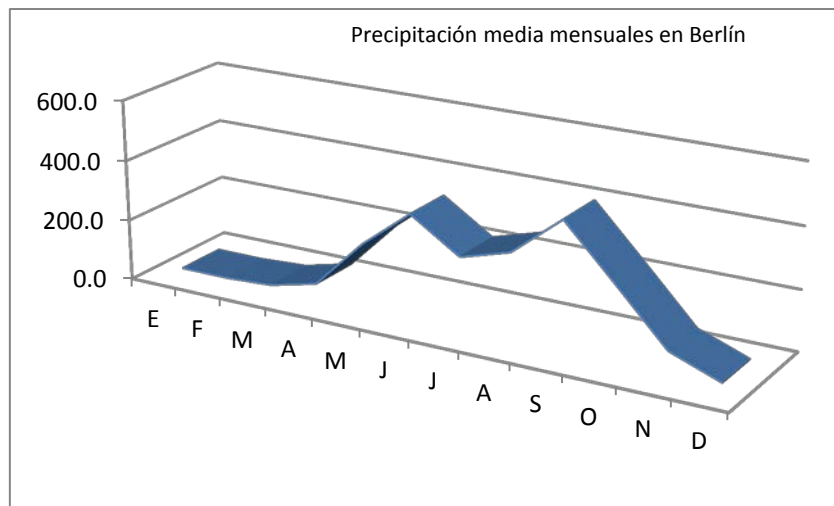


Figura 39. Distribución mensual de las precipitaciones en Berlín.

En la época de lluvias, la precipitación media asciende a 291 mm/mensuales, siendo ésta 11 veces mayor que en época seca. Estos valores de lluvia son de gran importancia para la amenaza de movimientos de tierras.

Esta alta variabilidad temporal debe tenerse en cuenta de cara a posibles planes de emergencia ante una catastrofe producida por un terremoto y sus efectos colaterales (como son los deslizamientos de laderas), ya que en el periodo de lluvias (de mayo a octubre) la amenaza de deslizamiento de laderas aumenta 11 veces.

8 Elementos vulnerables.

Una vez identificada la amenaza a los movimientos de ladera en el área de Berlín, el siguiente proceso sería la estimación del riesgo, para ello hay que tener en cuenta los elementos vulnerables. Aunque inicialmente no se planteó llegar hasta el riesgo, se ha considerado importante incluir en este trabajo una referencia a los elementos vulnerables que se encuentran en el área de estudio.

Los elementos identificados como vulnerables son las zonas urbanas y la red vial. Dentro de las zonas urbanas destacan los núcleos urbanos de Berlín y Alegría pero también los barrios exteriores del núcleo urbano de Berlín.

8.1 Núcleos de población

El municipio de Berlín cuenta con un poblamiento bastante disperso en torno al núcleo urbano central, incluso existen construcciones situadas en las laderas de los cerros que conforman el área más amenazada.

A partir de la última cartografía disponible de usos del suelo (2003) se delimitaron las zonas urbanas, pero observando imágenes de satélite actuales del municipio se decidió digitalizar las zonas urbanas ya que la extensión de éstas había cambiado de manera considerable.

Para ello se editaron polígonos con ArcGIS y se crearon tres nuevas capas en formato shapefile: núcleo urbano de Berlín, barrios periféricos de Berlín y núcleo urbano de Alegría, como se muestra en la Figura 40.

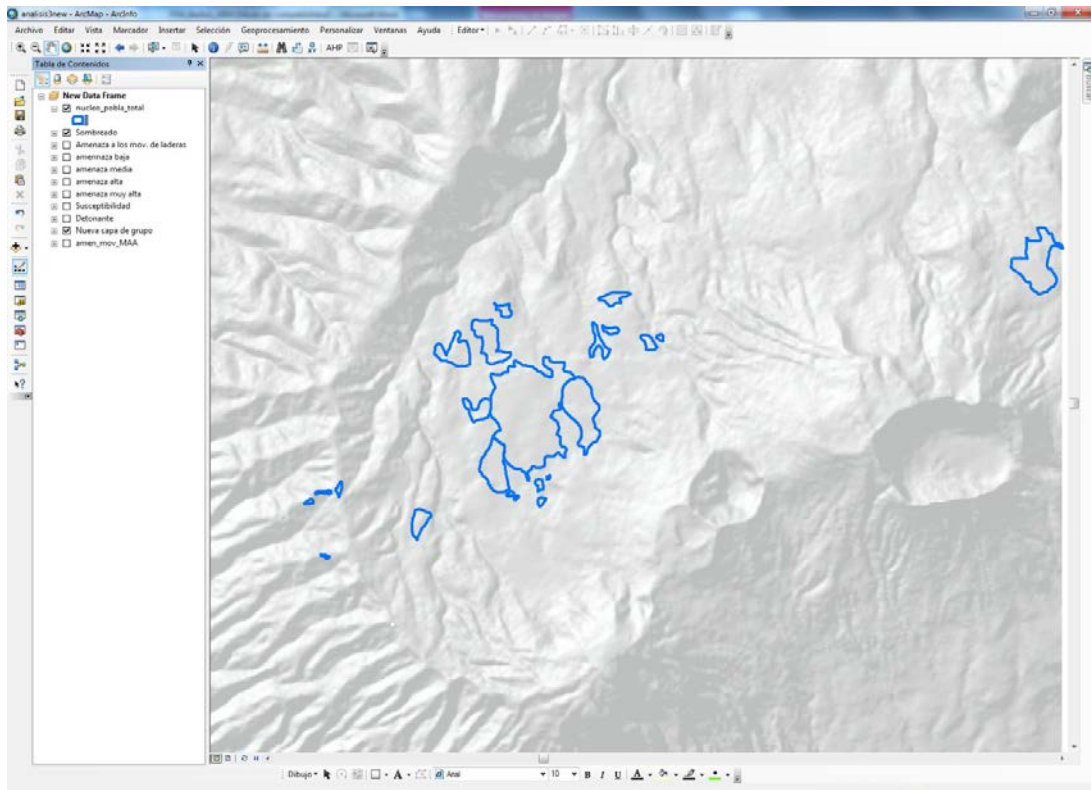


Figura 40. Vista de los núcleos urbanos central y periférico de Berlín (centro de la imagen) y Alegría (derecha).

Si se analiza esta capa con la amenaza alta y muy alta a los movimientos de laderas, se observa que el 25% de los núcleos urbanos de encuentran en zonas de amenaza alta y muy alta. Esto supone un valor de riesgo porcentual muy alto para la población (Figura 41).

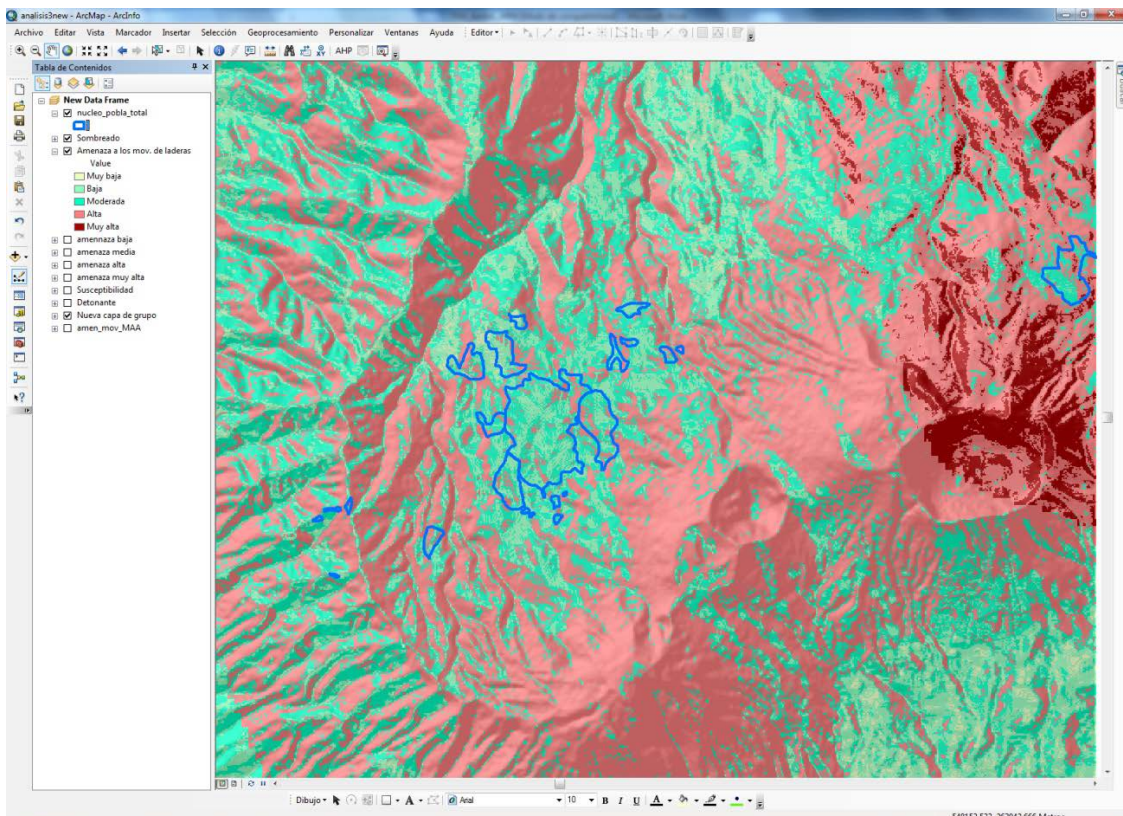


Figura 41. Vista de la amenaza alta y muy alta (diferentes tonos rojizos) y de los núcleos urbanos (contorno azul).

8.2 Red viaria

En el caso de la red viaria, se dispone de la base de datos proporcionada por la Dirección General del Observatorio Ambiental, en la que se representan las vías de primer, segundo, tercer y cuarto orden de todo el país (Figura 42).

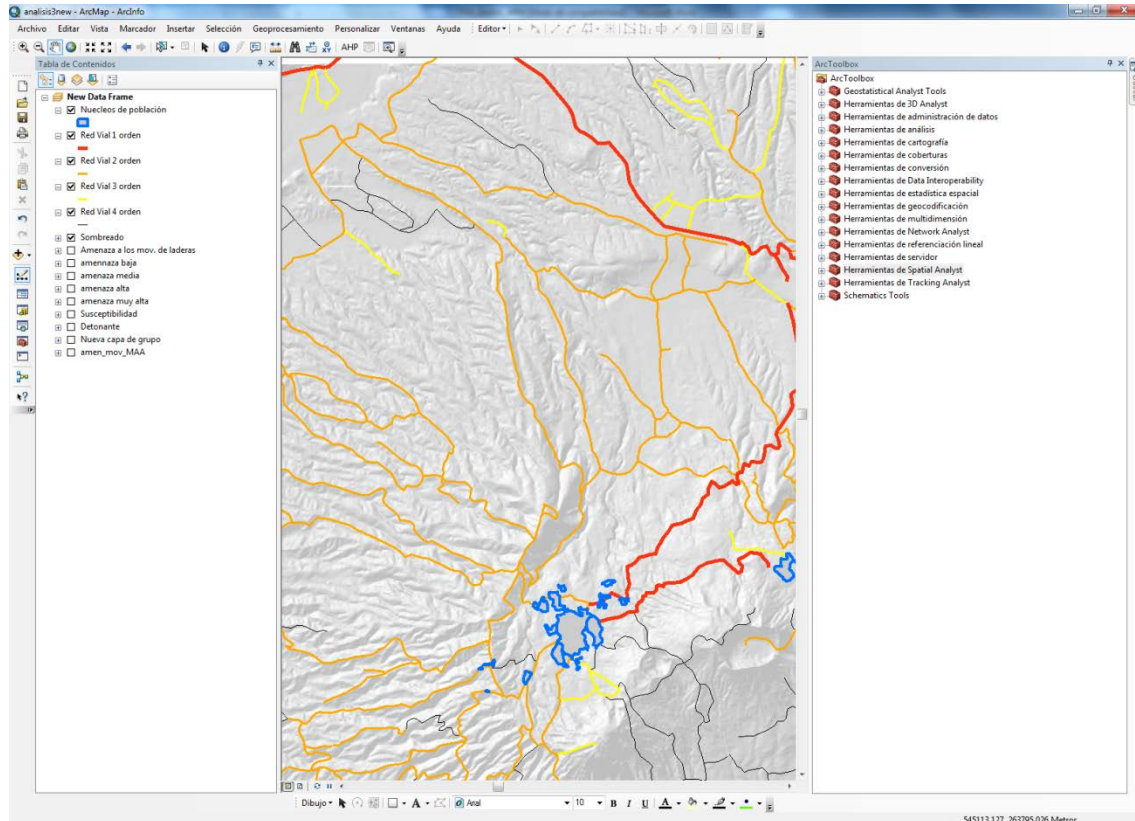


Figura 42. Vista de las carreteras de primer orden (rojo), segundo orden (naranja), tercer orden (amarillo) y cuarto orden (negro).

Si superponemos la capa de carreteras con la capa de amenaza, se puede observar que:

- El 37% de la red viaria de primer orden pasa a menos de 50 metros de zonas de amenaza alta o muy alta.
- El 28,6% de la red viaria de segundo orden pasa a menos de 50 metros de zonas de amenaza alta o muy alta.
- El 31,2% de la red viaria de tercer orden pasa a menos de 50 metros de zonas de amenaza alta o muy alta.
- El 37,8% de la red viaria de cuarto orden pasa a menos de 50 metros de zonas de amenaza alta o muy alta.

Por lo que cabe esperar un riesgo grande de que esas carreteras queden bloqueadas tras un evento como el analizado en este trabajo y, por tanto, dificulten la comunicación entre poblaciones (Figura 43).

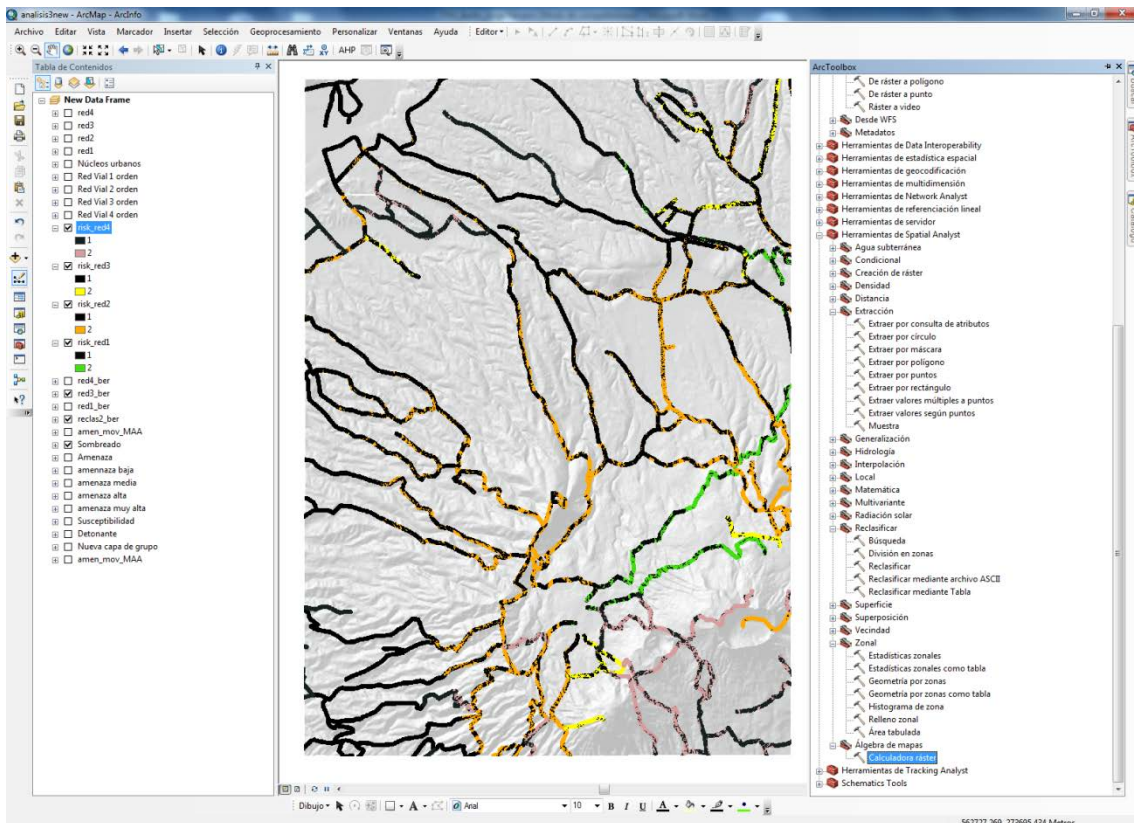


Figura 43. Vista de la red viaria. Se representa en diferentes colores el tramo de cada vía que está a menos de 50 metros de zonas de amenaza alta o muy alta.

9 Conclusiones y recomendaciones finales

A continuación se exponen las principales conclusiones deducidas del trabajo, referidas a las metodologías propuestas y a su aplicación en la escala local.

La susceptibilidad a los movimientos de ladera debe ser estudiada en cada espacio geográfico con los medios y datos disponibles, estando el estudio muy condicionado a la resolución y escala de la información de partida, en este caso principalmente, a la información disponible sobre los factores que intervienen en la susceptibilidad.

Además de los factores propuestos en las diferentes metodologías, cuando se realiza un estudio a una escala tan local como este, es muy importante recurrir a la opinión y juicio de los expertos de la zona, ya que estos aportan conocimientos sobre las particularidades concretas de la misma.

En territorios tan geológicamente inestables y jóvenes como los de El Salvador, no basta con obtener un mapa litológico de detalle del lugar que se quiera estudiar, sino que también se debe cuantificar el grado de meteorización que presenten dichos materiales, sobre todo en territorios situados en latitudes tropicales con alto grado de humedad, como es el caso de El Salvador. La meteorización es un factor difícilmente cuantificable sin un estudio de campo exhaustivo.

Siguiendo con los factores geológicos, y a modo de recomendación para trabajos futuros en la zona, se debería conocer y cartografiar en detalle la estratigrafía del edificio volcánico de Berlín. Con un estudio de la columna estratigráfica se posibilitará la comprensión de la dinámica de los materiales que afloran en superficie, ya que estos materiales se apoyan sobre los materiales subyacentes y de ello depende también la susceptibilidad al movimiento de las laderas. Este apartado es especialmente importante en esta zona, debido a la conocida aparición de “Tierra blanca” como material subyacente al llamado suelo Talpetate.

La facilidad de cálculo en los SIG nos permite obtener gran cantidad de variables relacionadas con la superficie del terreno si disponemos de un buen Modelo Digital del Terreno, en este caso, se han incluido factores derivados como la pendiente, la orientación, la rugosidad y la curvatura de manera muy sencilla. Pero no debemos olvidar que el trabajo de campo es indispensable para realizar un buen mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera.

Realizar estudios sobre movimientos de laderas, en los que se necesita una gran cantidad de información geográfica, es una labor no siempre fácil en países en vías de desarrollo. En este caso, en El Salvador se ha tenido la gran suerte de contar con la abundante información geográfica de la Dirección General del Observatorio Ambiental del Ministerio de Medio Ambiente. No obstante, podemos observar como en los promedios de precipitaciones del

municipio de Berlín faltan datos debido a la guerra civil ocurrida en los años 80 y principios de los 90.

Completar este estudio en un futuro con un mayor volumen de datos provenientes de un trabajo de campo exhaustivo y de otras técnicas de información geográfica como la teledetección, sería de gran utilidad para poder ser más precisos en el análisis de la susceptibilidad y amenaza a movimientos de ladera.

Un 25% de la superficie de los núcleos urbanos de Berlín y Alegría se encuentra sobre zonas de amenaza alta o muy alta, además de un 35% de su red vial. Estos datos deberían ser tenidos en cuenta en la futura planificación territorial, así como en los planes de mitigación y prevención del riesgo.

Por otro lado, se propone una nueva línea de estudio de carácter biogeográfico y edafológico relacionada con los cafetales situados en pendientes elevadas. El desarrollo edáfico sobre las zonas cafetaleras y su posible relación con la mayor susceptibilidad a los movimientos de laderas no está suficientemente estudiado. Las plantaciones de café quizás repercutan en la estabilidad de las laderas ya que se pasa de grandes árboles con profundas raíces, a pequeños árboles de café con raíces más superficiales.

Cuanto más exhaustivos sean los estudios técnicos y científicos realizados sobre el medio físico de un territorio, mejores herramientas de trabajo tendrán las administraciones para tomar decisiones y, por lo tanto, mayor grado de seguridad y de desarrollo presentarán los habitantes que lo pueblan.

Figura 1. <i>Encuadre del municipio de Berlín en su departamento, en el país y en la región de Centroamérica.</i>	11
Figura 2. <i>Clasificación climática de Koeppen en América Central.</i>	15
Figura 3. <i>Clasificación de movimientos de laderas según el mecanismo de ruptura. Fuente: González de Vallejo (2002)</i>	19
Figura 4. <i>Quebrada por donde descendió el debris flow ocasionado en Berlín el 29 de mayo de 2007, ocasionando la muerte de 4 personas. Fuente: SNET</i>	20
Figura 5. <i>Imagen del deslizamiento complejo de Las Colinas (Santa Tecla), El Salvador, causado por el terremoto del 13 de enero de 2001 (M: 7,7) Fuente: USGS</i>	21
Figura 6. <i>Distribución espacial de las lluvias en El Salvador durante la Depresión tropical 12E, octubre 2011. Fuente: SNET</i>	22
Figura 7. <i>Esquema de las relaciones existentes entre diferentes conceptos relacionados con el riesgo. Fuente: Maria José García Rodríguez, 2008.</i>	24
Figura 8. <i>Vista de la capa de pendientes</i>	28
Figura 9. <i>Vista de la capa de orientaciones</i>	29
Figura 10. <i>Vista de la capa de curvatura</i>	30
Figura 11. <i>Vista de la capa de rugosidad del terreno</i>	31
Figura 12. <i>Vista de la capa de litología</i>	32
Figura 13. <i>Vista de la capa de geotecnia</i>	33
Figura 14. <i>Vista de la capa de usos del suelo</i>	34
Figura 15. <i>Edición mediante puntos (rojo) en el comienzo de cada polígono que representa a los flujos de derrubios</i>	36
Figura 16. <i>Tabla en la que se muestran los eventos con el correspondiente valor de cada factor de susceptibilidad</i>	37
Figura 17. <i>Gráficas de frecuencias de eventos de las variables dependientes de la superficie del terreno</i>	38
Figura 18. <i>Gráficas de frecuencias de eventos relacionadas con las características de los suelos</i>	38
Figura 19. <i>Imagen de los materiales resultantes de la meteorización de las Andesitas y que son muy susceptibles al deslizamiento. Fuente: SNET</i>	40
Figura 20. <i>Diagrama de procesos. Análisis de frecuencias</i>	42
Figura 21. <i>Mapa de susceptibilidad. Frecuencias de eventos producidos por sismos</i>	43

Figura 22. Mapa de susceptibilidad. Frecuencias de debris flow	44
Figura 23. Matriz de Jerarquías Analíticas. Fuente: Saaty	45
Figura 24. Asignación de pesos mediante la matriz de jerarquías analíticas en ArcGIS.	47
Figura 25. Diagrama de procesos. Evaluación Multicriterio.	48
Figura 26. Mapa de susceptibilidad mediante Evaluación Multicriterio.	49
Figura 27. Vista en 3D desde el este de la caldera volcánica que rodea la ciudad de berlín en el mapa de susceptibilidad obtenido por Evaluación Multicriterio. En rojo se representan los núcleos urbanos.	50
Figura 28. Vista en 3D desde el norte del mapa de susceptibilidad calculado mediante Evaluación multicriterio. Se representa también la base de datos de eventos. Los debris flow se simbolizan en azul y los eventos ocurridos tras el 13 de enero de 2001 en negro.	51
Figura 29. Marco tectónico de Centroamérica.	53
Figura 30. Principales fallas activas y segmentos que componen la Zona de Falla de El Salvador.	54
Figura 31. Vista de la fuente sísmica (plano de ruptura e hipocentro) y su posición relativa con el área de estudio (zona verde). En rojo se destacan las fallas de El Salvador. En gris el contorno de los municipios del país.	55
Figura 32. Variación de la señal sísmica en función del tipo de suelo.	56
Figura 33. Vista de la modelización de la aceleración en roca estimada por el terremoto.	58
Figura 34. Diagrama de procesos. Cálculo de la amenaza.	59
Figura 35. Vista de la amenaza sísmica.	60
Figura 36. Reclasificación de la amenaza sísmica en cuatro categorías.	61
Figura 37. Mapa de amenaza a movimientos de ladera mediante detonante sísmico.	63
Figura 38. Mapa de precipitaciones de El Salvador. Fuente: Tesis doctoral “Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos” Maria Jose García Rodriguez	66
Figura 39. Distribución mensual de las precipitaciones en Berlín.	67
Figura 40. Vista de los núcleos urbanos central y periférico de Berlín (centro de la imagen) y Alegría (derecha).	69
Figura 41. Vista de la amenaza alta y muy alta (diferentes tonos rojizos) y de los núcleos urbanos (contorno azul).	69
Figura 42. Vista de las carreteras de primer orden (rojo), segundo orden (naranja), tercer orden (amarillo) y cuarto orden (negro).	70
Figura 43. Vista de la red viaria. Se representa en diferentes colores el tramo de cada vía que está a menos de 50 metros de zonas de amenaza alta o muy alta.	71

Bibliografía:

Artículos y libros:

- Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999). "Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58(1), 21-44.
- Ayala-Carcedo, Francisco y Olcina Cantos, Jorge. (2002). "Riesgos Naturales". Editorial Ariel. España.
- Benito, B., J. Cepeda, and J. J. Martínez-Díaz (2004). "Analysis of the spatial and temporal distribution of the 2001 earthquakes, in Natural hazards in El Salvador". Geol. Soc. Am. Special Paper 375, 339–356.
- Bollin, Christina (2001). "Planificación, Monitoreo y Evaluación para un Sistema de Gestión Local de Riesgo". Una propuesta del proyecto FEMID/GLR. Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Boyano Sotillo, Daniel (2011). "La Cooperación y la Gestión de Riesgos de desastres de origen ambiental. Caso de El Salvador".
- Bommer, J.J. and Rodriguez, C. (2003). "Earthquake-induced landslides in Central America. Engineering Geology and International Journal. Geologic and Engineering Characterization of Tierra Blanca Pyroclastic Deposits". Imperial College London.
- Carolina Canora, José J. Martínez-Díaz, Pilar Villamor, Kelvin Berryman, José A. Álvarez-Gómez, Carlos Pullinger, y Ramón Capote. (2010). "Geological and Seismological Analysis of the 13 February 2001 Mw 6.6 El Salvador Earthquake: evidence for Surface Rupture and Implications for Seismic Hazard". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100, No. 6, pp. 2873–2890.
- Chacón, C. Irigaray, Fernández R., Hamdouni. (2006). "Engineering geology maps: landslides and geographical information systems". Bull Eng Geol Environ. (2006)
- Escobar Corleto, Hugo Ernesto; Escobar Morales, María Renée; Rendón Rodríguez, José Rodrigo. (2003). "Caracterización geotécnica de las formaciones geológicas del área metropolitana de San Salvador y aplicación a la evaluación de amenaza por deslizamientos". Tesis preparada para la facultad de postgrados de la Universidad Centro Americana "José Simeón Cañas". Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- García Rodríguez, María José (2008). "Metodologías para la evaluación de peligrosidad a deslizamientos inducidos por terremotos". Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá, Universidad Politécnica de Madrid.
- González de Vallejo, Luis (2002). "Ingeniería Geológica". Capítulo 11: Prevención de riesgos geológicos. Pearson Educación. Madrid.

- Hervás de Diego, J. y Barredo Cano, J.I. (2001). "Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos mediante el uso conjunto de SIG, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación al barranco de Tirajana (Gran Canaria)". V Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables Madrid.
- Irigaray, C., Fernández, T., El Amdouni, R., Chacón, J. (2006) "Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain)". Natural Hazards (2007)
- L.González, L.Romano y L.Salamanca. (2004). "Risk and disasters in El Salvador: Economic, environmental, and social aspects. Geological Society of America. Special Paper 375.
- "Ley de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres", aprobada el 31 de agosto de 2005 por la Asamblea Legislativa de la República de El Salvador.
- Llorente, L., Palacios, E. (2010). "Diseño y desarrollo de un SIG para analizar el riesgo de deslizamientos de laderas en Tenerife ante dos factores detonantes: sísmico y pluvial". Proyecto Fin de Carrera. ETSI en Topografía, Geodesia y Cartografía. UPM.
- Montgomery, D. R., K. M. Schmidt, H. M. Greenberg, and W. E. Dietrich. 2000. "Forest clearing and regional landsliding". Geology 28:311-314.
- Mora, R. (2004). "Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, Costa Rica". Escuela Centroamericana de Geología. Universidad de Costa Rica.
- Olcina Cantos, Jorge. (2004). "Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en la escala local. El papel del planeamiento urbano municipal". Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles nº 37.
- Pietersen, K. (2006). "Multiple criteria decision analysis (MCDA): A tool to support sustainable management of groundwater resources in South Africa". Water Research Commission, Private Bag X03, Gezina, 0031, South Africa.
- Randall W. Jibson, Anthony J. Crone, Edwin L. Harp, Rex L. Baum, Jon J. Major, Carlos R. Pullinger, C. Demetrio Escobar, Mauricio Martínez y Mark E. Smith. (2004). "Landslides triggered by the 13 January and 13 February 2001 earthquakes in El Salvador". Geological Society of America. Special Paper 375.
- Roa, José Gregorio. "Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela". Universidad de Los Andes, Área de Geografía, Grupo GEOCIENCIA, Trujillo – Venezuela.
- Saaty, T.L. (1994). "Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process"; RWS Publications, Pittsburgh.
- Schenk, V. (1989). *Achievements and Probable Trends in Seismic Hazard Assessment*. Tectonophysics, Vol. 167, pp. 157-169.
- Schmidt (2010). "Avances para estudios del riesgo sísmico a escala regional y local: aplicación a América Central y a la Bahía de Cádiz (Sur de España)". Tesis Doctoral. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Soeters, R. y Van Westen, C.J. (1996). *"Slope instability recognition, analysis and zonation"*. In Turner, K. y Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*; Transportation Research Board, Special Report 247, National Academy Press, Washington DC, 129-177.
- Suárez Díaz, J (1998). *"Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales"*. Universidad Industrial de Santander, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Bucaramanga-Colombia.
- Tsige, M., I. García-Flórez, R. Capote, and R. M. Mateos (2008). *"Los grandes deslizamientos inducidos por los terremotos de El Salvador del 2001: Control litológico y estructural"*, Geogaceta 10, 1567–5172.
- Varnes, D. J. 1978. *"Slope movement types and processes"*. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.

Recursos digitales:

- Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en Centroamérica: ([CEPREDENAC](#))
- Dirección General de Protección Civil de El Salvador:
http://www.proteccioncivil.gob.sv/index.php?option=com_content&view=frontpage&limitstart=265
- Ministerio de Vivienda de El Salvador. Planes de Desarrollo:
<http://vmvdu.mop.gob.sv/sitdt/>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador. Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA): <http://www.snet.gob.sv/>
- http://huracanescribe.blogspot.com.es/2011/04/blog-post_9787.html
- Google Earth