

Análisis de la susceptibilidad a los Movimientos de Ladera en los Municipios de Guanay, Teoponte y Tipuani (Bolivia).

Aproximación mediante el método Anlityc Hierarchy/Network Process.

***Curso Herramientas GIS Aplicadas a la
Protección Civil y Emergencias.***

Escuela Nacional de Protección Civil.

Junio de 2016.

Adrián Fernández Sánchez.

***Curso Herramientas GIS Aplicadas a la
Protección Civil y Emergencias.***

Escuela Nacional de Protección Civil.

Junio de 2016.

Adrián Fernández Sánchez.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Resumen.....	4
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos.	5
2. Encuadre territorial	7
2.1. Localización y contexto geográfico.	7
2.2. Marco geológico.....	8
2.3. Características climáticas actuales	8
3. Metodología	9
3.1. Fuentes de información	9
3.2. Área de estudio elegida.....	9
3.3. Método AHP.....	9
3.4. Error asumido.....	12
4. Resultados	14
5. Discusión	23
5.1 Aproximación al Riesgo de movimiento de ladera.....	23
6. Conclusiones.....	24
7. Referencias bibliográficas	25

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Resumen.

Los deslizamientos de ladera son un problema importante en la región de los valles interandinos de Bolivia. Este estudio analiza la susceptibilidad o predisposición al movimiento de ladera de los municipios de Guanay, Teoponte y Tipuani, situados en el departamento de La Paz, Bolivia. La metodología aplicada es la Analytic Hierarchy/Network Process, o método AHP. Tras su aplicación en un Sistema de Información Geográfica, este método, devuelve valores de susceptibilidad bastante fiables. Las conclusiones que se extraen de este análisis ponen de relieve la necesidad de realizar estudios de detalle en algunas zonas de los tres municipios al haber lugares con una Muy Alta y Alta susceptibilidad al movimiento de ladera, que, además, interfieren con zonas pobladas y con caminos y carreteras principales que son importantes para la articulación social de la región.

Landslides are an important trouble in the Bolivian Interandean valleys. This study analyzes the landslide susceptibility in the Guanay, Teoponte and Tipuani municipalities, located in La Paz departamento of Bolivia. The applied methodology was the Analytic Hierarchy/Network Process, also called AHP method. After it is runned in a Geographic INformation System, this method returns very reliable values of susceptibility. Conclusions derived from this analysis hghlight the need for a more detailed study in some areas of these municipalalities where the susceptiblity reaches High and Very Hgh values, and where there are populated areas and man elements such as Highways and roads that are important for the social articulation of the region.

1.2. Justificación.

Los movimientos de ladera son relativamente frecuentes en los municipios de Guanay, Teoponte y Tipuani. Las grandes pendientes derivadas de la disección provocada por la red fluvial y los materiales relativamente sueltos, provocan que estos tres municipios tengan características considerablemente susceptibles a los movimientos de ladera por procesos de gravedad.

Es notable el calado que tienen en la conciencia de la población general boliviana los deslizamientos de ladera que ocurren en la región de los valles interandinos, hecho que pone de relieve la considerable frecuencia de los deslizamientos en la zona. Las Figuras 1.1 y 1.2 son ejemplos válidos de movimientos de ladera recientes en la zona de estudio.



Figura 1.1. Cicatriz de despegue de un deslizamiento en el municipio de Tipuani, Bolivia. Fuente: www.hoybolivia.com



Figura 1.2. Deslizamiento cerca de la localidad de Guanay, Municipio de Guanay, Bolivia. Fuente: Google Earth con vista 3D para mejorar la visualización.

1.3. Objetivos.

El objetivo principal es la caracterización de la susceptibilidad a los movimientos de ladera por deslizamiento rotacional y traslacional en tres municipios del departamento de La Paz, Bolivia.

Para alcanzar este objetivo principal, se han tratado de lograr ciertos objetivos o tareas menores:

- Caracterización de los factores físicos de la zona de estudio.
- Valoración de la importancia (enfocada a la susceptibilidad) de los factores físicos de la zona de estudio, unos respecto a otros.
- Caracterización de la Exposición al Riesgo por movimiento de ladera.
- Caracterización de la Vulnerabilidad al Riesgo por movimiento de ladera.
- Caracterización del Riesgo general a los movimientos de ladera.

2. Encuadre territorial

2.1. Localización y contexto geográfico.

La zona elegida para este estudio ha sido los municipios de Tipuani, Guanay y Teoponte, los tres en el Departamento de La Paz, en Bolivia. En el caso de Guanay, no se consideró la zona Sur y Suroeste del municipio, debido a sus condiciones de suelo “desnudo”, sus condiciones climáticas y su litología. Es decir, debido a que sus condiciones son diferentes al resto de los valles interandinos por ser parte integrada en la Cordillera Real.

La Figura 2.1, muestra un mapa de localización de los municipios elegidos como ámbito de estudio.

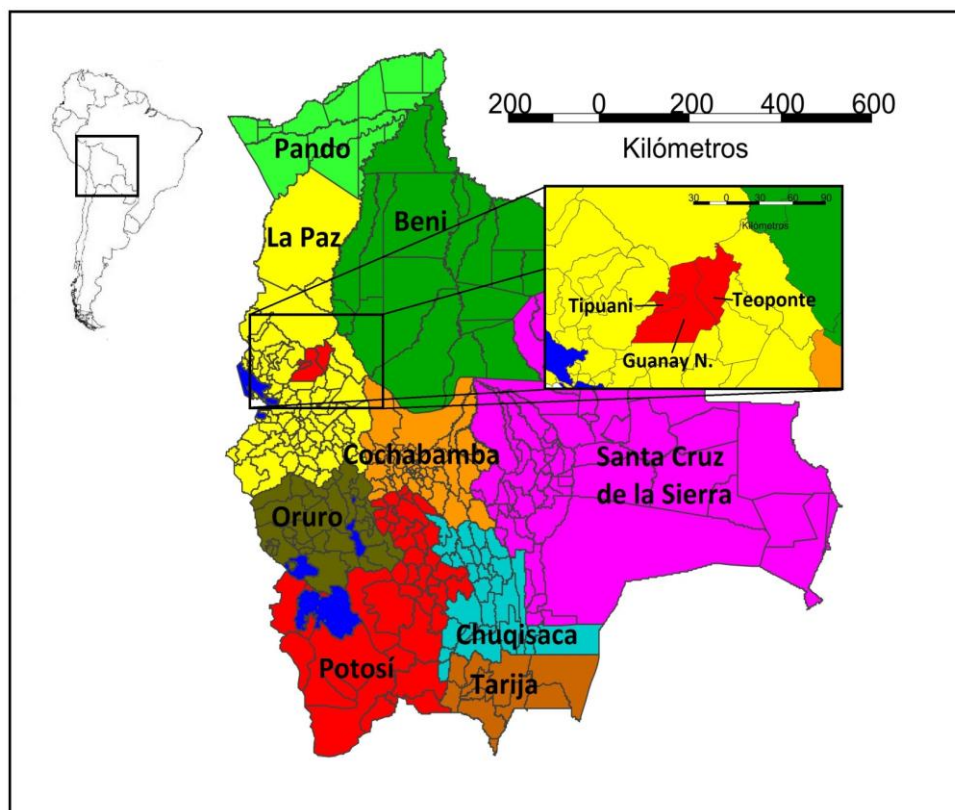


Figura 2.1. Mapa de localización de los municipios del ámbito de estudio. Capas descargadas del visor de Geobolivia.com.

El área del ámbito de estudio es de 5201 Km², conteniendo varios de los municipios más extensos del Departamento de La Paz y siendo el municipio de Guanay el más grande de los tres municipios que conforman el ámbito.

La elevación de la zona tendría un mínimo de 300 metros sobre el nivel del mar y un máximo de 4980 m.s.n.m. La media de elevación sería de 2640 metros de altitud.

2.2. Marco geológico

El contexto geológico está conformado fundamentalmente por sedimentos de diferentes ambientes. Existen litologías de origen marino como las Calizas y Margas de la zona central del municipio de Teoponte, junto a litologías de origen fluvial como las Areniscas, Lutitas y Conglomerados que conforman la mayor parte del ámbito de estudio. En la zona Suroeste del ámbito, en Guanay, se encontraría una zona de origen ígnea plutónica con litologías graníticas.

Las edades geológicas de los diferentes materiales comprenderían desde el Ordovícico hasta el Neógeno.

2.3. Características climáticas actuales

Los climas de Bolivia están fundamentalmente caracterizados por la altitud y la posición latitudinal. Son estos factores los que determinan las diferencias climáticas existentes entre las diversas regiones.

El ámbito de estudio queda dentro de la región de los valles o yungas, zona muy influida por el ascenso por las laderas de los vientos húmedos provenientes de la cuenca del Amazonas. Este ascenso de vientos húmedos provoca que la región sea muy lluviosa. En concreto la zona de estudio se caracteriza por unas precipitaciones considerables que estarían entre 40 y 250 mm mensuales, siendo el mes más seco Julio y el más lluvioso Diciembre.

Las temperaturas serían suaves casi cálidas. La media mensual se sitúa en torno a los 24° C. El mes más cálido sería Febrero con 26° C de media mensual, mientras que el más frío sería Julio con 22° C. La variación térmica anual es baja, siendo de unos 4° C. Sin embargo, se registran algunas temperaturas mínimas medias que alcanzarían los 16° C y algunas temperaturas máximas medias que llegarían a los 31° C.

La distribución de las precipitaciones permite conocer los momentos de mayor probabilidad para la ocurrencia de los deslizamientos de ladera. Como es sabido, los deslizamientos de ladera ocurren en momentos de gran saturación de agua en el suelo y en la roca, por lo que estos tendrán una ocurrencia estival, siendo el momento de mayor probabilidad la estación de Verano (Diciembre a Febrero). Es en Diciembre cuando se concentran las mayores precipitaciones en la zona de estudio, siendo, por lo tanto, este mes el más favorable a los deslizamientos de ladera.

3. Metodología

La metodología podría resumirse con la consecución de diversas tareas como han sido la descarga y generación de ficheros .shp del área de estudio, el procesamiento de las capas descargadas y la superposición de las capas de los factores elegidos según la metodología AHP.

Los programas utilizados han sido *Gvsig 2.1.1*, *ArcGis 10*, *Global Mapper 17* y *Google Earth Pro*.

3.1. Fuentes de información

Para conseguir las capas base de este estudio se dispuso de la información de varios servidores online:

El principal fue el visor *Geobolivia*, del cual se extrajeron capas en formato .shp como serían las delimitaciones municipales, la Vegetación, la Geología, la Litología, el Piso altitudinal, las poblaciones, las carreteras principales y los caminos.

Las curvas de nivel fueron extraídas del programa *Global Mapper* a partir de un área delimitada por un fichero .kmz generado con *Google Earth Pro*. El programa *Global Mapper*, utiliza la base del Modelo Digital de Elevaciones del satélite *Aster* (año 2009), el cual se basa en imágenes de pares estereográficos y adquiridos con un nadir y ángulos retraídos sobre una misma área. La resolución sería de intervalos de 30 metros. Las curvas de nivel que resultaron de este DEM, fueron generadas con una equidistancia de 20 metros. Para asegurarse de la correcta generación de las curvas de nivel, estas fueron comparadas con las hojas topográficas de escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar de Bolivia.

3.2. Área de estudio elegida

La capa de delimitación municipal se procesó con un filtro para hallar los municipios de Tipuani, Teoponte y Guanay. Esta selección, se exportó como nueva capa en formato .shp y así aislar los municipios correspondientes al ámbito de estudio. El municipio de Guanay se redujo recortando la zona Suroeste, debido a la gran diferencia con el resto del municipio (rebordes montañosos de la Cordillera Real frente a los valles interandinos).

3.3. Método AHP.

La metodología elegida para hallar la susceptibilidad a los movimientos de ladera ha sido la evaluación por el método heurístico AHP (Analytic Hierarchy/Network Process) desarrollado

por Saaty (1980) y aplicado a los movimientos en masa por Hervás *et al.* (2002) y por Yalcin *et al.* (2008). Este método se basa en el cruce de diversos factores en un Sistema de Información Geográfica. Estos factores serían más o menos favorables para los movimientos de ladera, ponderados mediante una valoración numérica extraída a partir de la metodología de matrices cruzadas. Ponderación que se puede observar en la Figura 3.1.

Factores	Lito.	Pte	Geom	Veget	Permeab.	Lito.	Pte	Geom	Veget	Permeab.	Sumat	W/Peso
Lito.	1	2	4	5	4	0.41	0.5106383	0.44444444	0.4	0.33333333	2.10	0.41931587
Pte.	0.50	1.00	3	4	3	0.20	0.25531915	0.33333333	0.32	0.25	1.36	0.27254682
Geom.	0.25	0.33	1.00	2	2	0.10	0.08510638	0.11111111	0.16	0.16666667	0.62	0.124985
Veget	0.20	0.25	0.50	1.00	2	0.08	0.06382979	0.05555556	0.08	0.16666667	0.45	0.08953693
Permeab	0.25	0.33	0.50	0.50	1.00	0.10	0.08510638	0.05555556	0.04	0.08333333	0.37	0.07320722
Sumatorio	2.45	3.91666667	9	12.5	12							

Figura 3.1. Ponderación de la importancia de los factores elegidos a partir de matrices de Saaty.

Los factores elegidos han sido: Litología, Vegetación, Permeabilidad, Pendientes topográficas y Geomorfología.

El primer paso fue generar valores espaciales de susceptibilidad de cada uno de los factores del área de estudio según las variables que componían cada factor. Estos valores también se generaron mediante las matrices de Saaty, según mayor o menor predisposición al movimiento de ladera. La valoración se muestra en las Figuras de 3.2 a 3.6. Después se procesaron las capas .shp con diferentes herramientas hasta generar capas Rasters con valores de píxeles coherentes con las variables de cada factor.

Geoformas	Peso	Ptes	Porcentaje	Peso	Permeabil.	W/Peso
Escarpe	0.53	Pte Alta a Muy Alta	100-35%	0.57	Lutitas	0.06403312
Cordillera	0.3	Pte Moderad	15-35%	0.24	Areniscas	0.41296981
Vert empina	0.11	Pte Baja	5-15%	0.12	Diamictitas	0.14935928
Llanura Aluv	0.06	Pte muy baja	menos 5	0.07	Calizas	0.10959111
					Conglom.	0.1801346
					Plutones	0.0839121

Figuras 3.2, 3.3 y 3.4. Valores de susceptibilidad para cada una de las variables que componen los factores de susceptibilidad. Los valores fueron obtenidos mediante el cruce por matrices de Saaty.

Litología	W/Peso	Vegetación	Peso
Lutitas	0.35688496	Suelo desnudo	0.65
Areniscas	0.22547878	Mezcla	0.25
Diamictitas	0.1611257	Cubierto veget	0.1
Calizas	0.07946705		
Conglom.	0.12237473		
Plutones	0.05466878		

Figuras 3.5, y 3.6. Valores de susceptibilidad para cada una de las variables que componen los factores de susceptibilidad. Los valores fueron obtenidos mediante el cruce por matrices de Saaty.

El proceso seguido fue el expuesto a continuación:

En primer lugar se usó la herramienta *Cut* situada en las funciones de Geoprocesos vectorial de *GvSig 2.1.1*, para reducir las capas descargadas y delimitarlas al ámbito de estudio.

Posteriormente se añadió una nueva columna en la tabla de atributos en la que se escribieron los valores de cada polígono correspondiente a cada variable determinada. A la capa de Vegetación se le unió un fichero digitalizado en *Google Earth* (en formato .kmz exportado después como .shp) de suelo desnudo. El proceso de unión se realizó a partir de la herramienta *Unión*, situada en las funciones de Geoprocesos de *GvSig*.

Todas las capas fueron Rasterizadas a partir del campo que contenía el valor de cada variable. La herramienta utilizada fue *Rasterización*. Estos valores son los expresados en las Figuras 3.2 a 3.6 ya comentadas.

Para generar la capa de pendientes se realizó un procesamiento especial. La capa de curvas de nivel fue procesada con la herramienta *Spatial Adjust* de *Arcgis 10*, debido a la falta de georreferencia al ser descargada de *Global Mapper*. El ajuste espacial se realizó a partir del polígono .kmz generado en *Google Earth Pro* en el paso de la extracción de las curvas de nivel ya comentado. Este fue convertido a formato .shp. Partiendo de la capa de curvas de nivel bien georreferenciadas, se generó un Modelo Digital de Elevaciones con la herramienta *Rasterización*, usando el campo de elevación. A través de la herramienta *Pendientes*, se creó un Raster de pendientes en porcentajes. Este Raster se procesó con la herramienta *Reclasificación* para poder dar un valor a cada rango de pendientes, según los valores de la Figura 3.3.

Habiéndose conseguido la expresión espacial de cada factor con su valor correspondiente a cada variable en forma de capa Raster, se llevó a cabo el cálculo de la susceptibilidad mediante el método AHP con la herramienta *Calculadora de mapa*. En la Calculadora de Mapas se introdujo la función general para el cálculo de la susceptibilidad en la cual se suman las variables correspondientes a cada factor de forma espacial y según la ponderación de la importancia de los factores. La función se expone a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Susceptibilidad} = & (\text{Valor de Geomorfología} * 0.12) + (\text{Valor de Litología} * 0.41) \\ & + (\text{Valor de Permeabilidad} * 0.07) + (\text{Valor de Vegetación} * 0.09) \\ & + (\text{Valor de Pendiente} * 0.27) \end{aligned}$$

Se obtuvo así una nueva capa con valores de susceptibilidad para cada uno de los píxeles.

Cada uno de los resultados fue tratado con la composición de mapas en el apartado *Mapa* del gestor de proyectos. Se introdujeron escalas gráficas, títulos, norteado, leyendas, Grid y objetos de texto.

Para realizar una aproximación al riesgo y debido a la imposibilidad de aplicar la ecuación general del Riesgo (Riesgo = Peligrosidad * Vulnerabilidad * Exposición), ya que *GvSig* no

acepta valores de cero en la calculadora de mapas, se superpusieron las capas .shp de Carreteras principales y Caminos con la generada de Susceptibilidad; y en otro mapa se superpuso el de Núcleos de población con la capa de Susceptibilidad. Se obtuvo así en ambos los elementos expuestos a los procesos peligrosos diferenciándose así de los lugares donde existe peligrosidad (por haber una alta susceptibilidad) pero no hay elementos antrópicos expuestos. Estas aproximaciones al riesgo también fueron sometidas a la composición de mapas.

El proceso general viene esquematizado en la Figura 3.7:

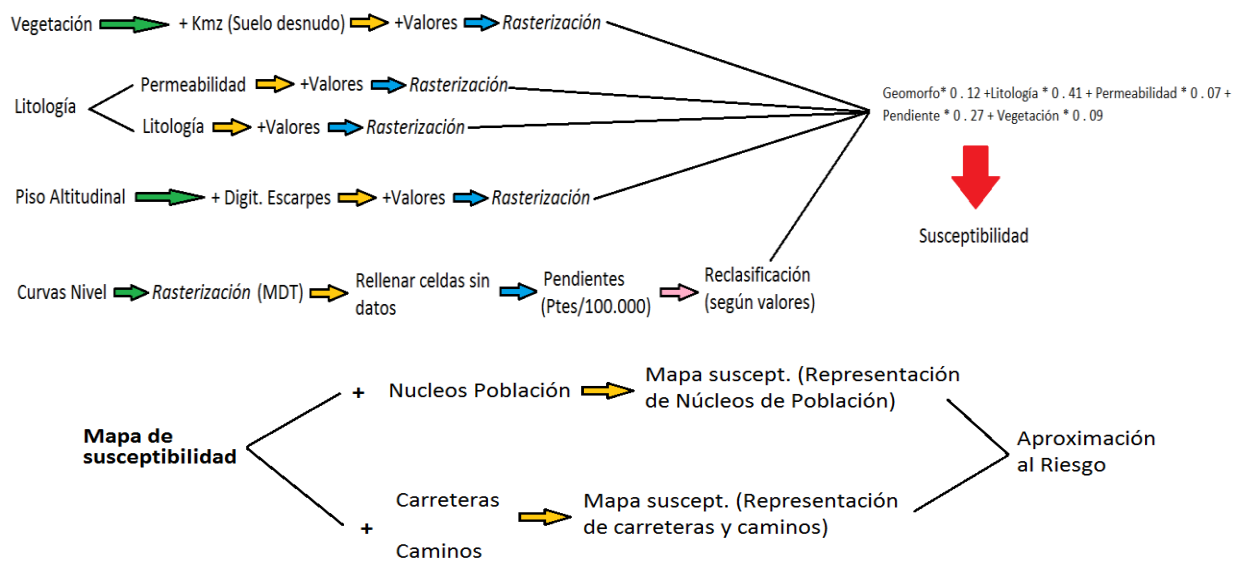


Figura 3.7. Esquemas de los procesos y pasos realizados para la obtención de resultados.

3.4. Error asumido

El error presente en este trabajo es considerable y no debe ser obviado, aunque es bajo y por tanto ciertamente asumible.

Los principales errores o imprecisiones se han podido observar en la propia parametrización o valoración numérica de factores naturales que difícilmente pueden ajustarse a funciones matemáticas, aunque estas pueden ser útiles para conseguir asemejarse a los procesos de movimientos de ladera.

La resolución podría suponer un problema, debido a que el área de trabajo es muy grande y cada *pixel* tendría una superficie de tanto, siendo demasiado grande. Debido a los geoprocursos utilizados, la cantidad de *píxeles* no podía ser demasiado grande, para que no existiesen problemas de tiempo excesivo de cálculo.

Otra de las posibles imprecisiones sería la creación del DEM debido al largo proceso que se realizó para su obtención. Este proceso podría haber acumulado error en cada una de las herramientas utilizadas y podría no ajustarse a la realidad con perfección.

Otro de los problemas observados vendría a partir de la generación de los .kmz de Núcleos de población extraídos de *Google Earth Pro*. Estos polígonos podrían generarse desplazados respecto a la localización de la población real, en caso de que *Google Earth* no tenga bien localizadas las poblaciones de una entidad pequeña. Para obviar el error se ha tratado de digitalizar el polígono .kmz a partir de los elementos antrópicos que aparecían en la propia imagen de *Google Earth*.

4. Resultados

En este apartado se muestran los mapas resultados de la rasterización de los factores y la valoración numérica de sus variables (Figuras 4.1 a 4.8). Estos son los mapas que han servido de base para realizar los cruces espaciales para otorgar un valor de susceptibilidad final, cuyo resultado se muestra en la Figura 4.6.

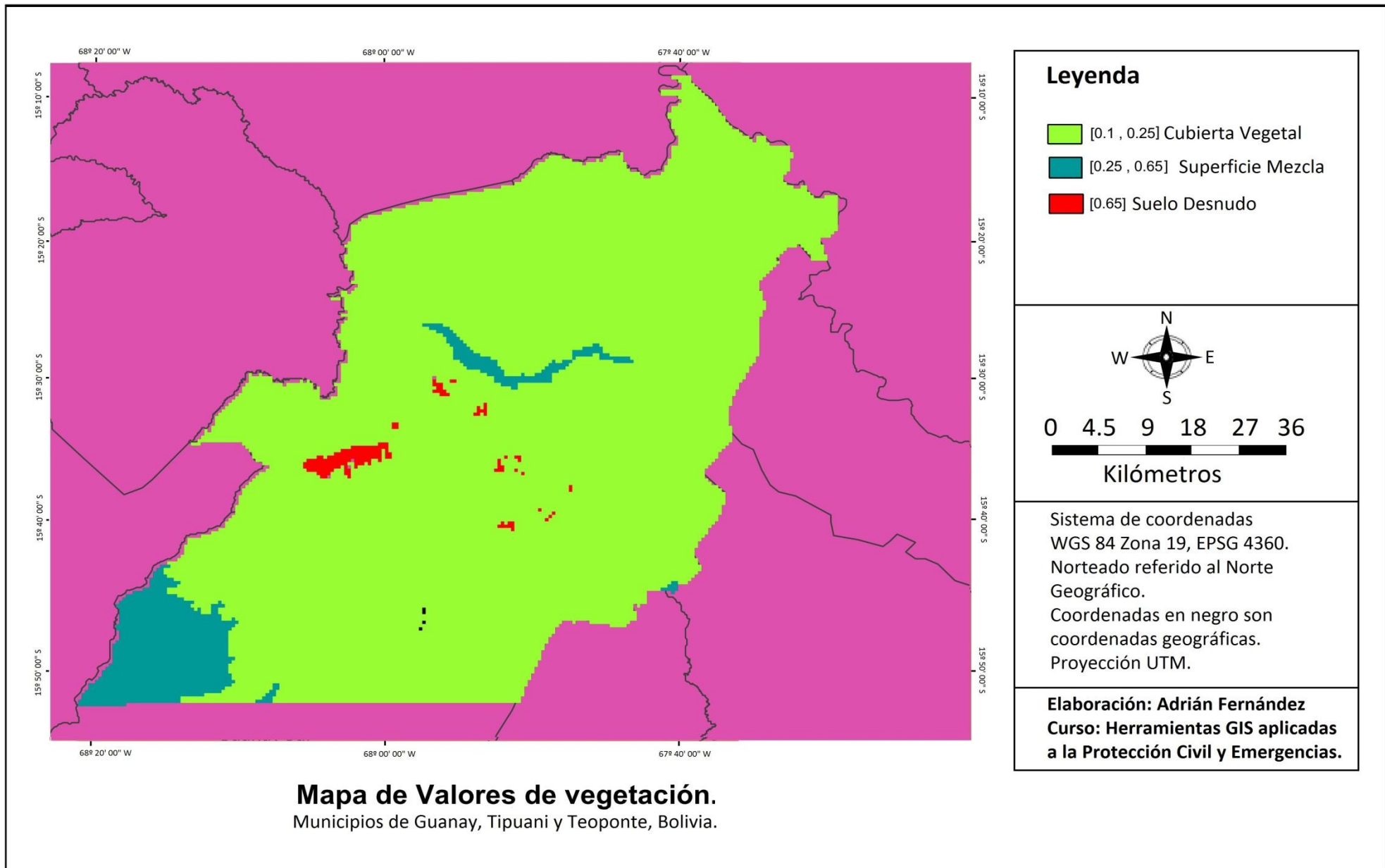


Figura 4.1. Mapa de valores de vegetación.

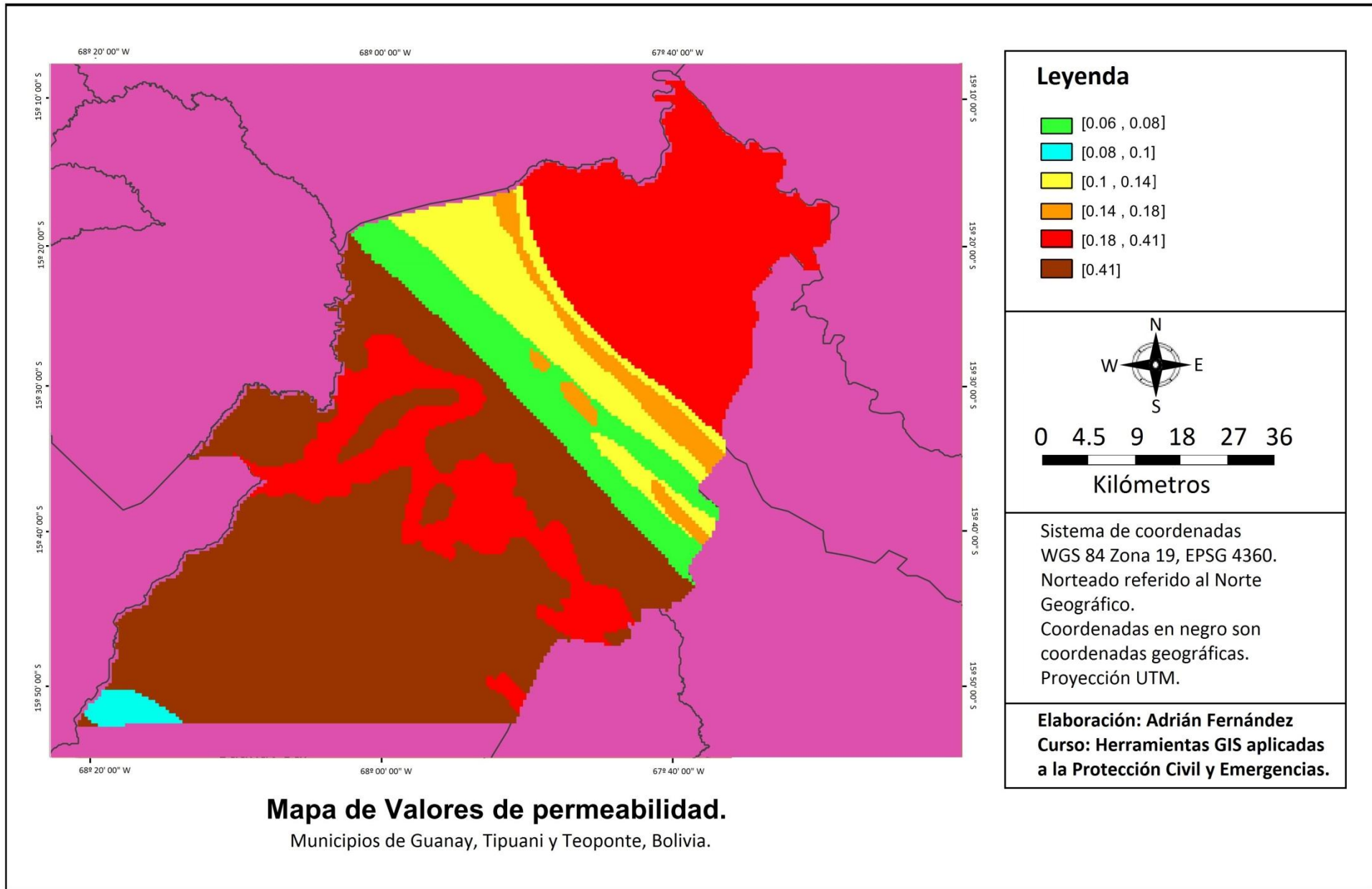


Figura 4.2 Mapa de valores de permeabilidad.

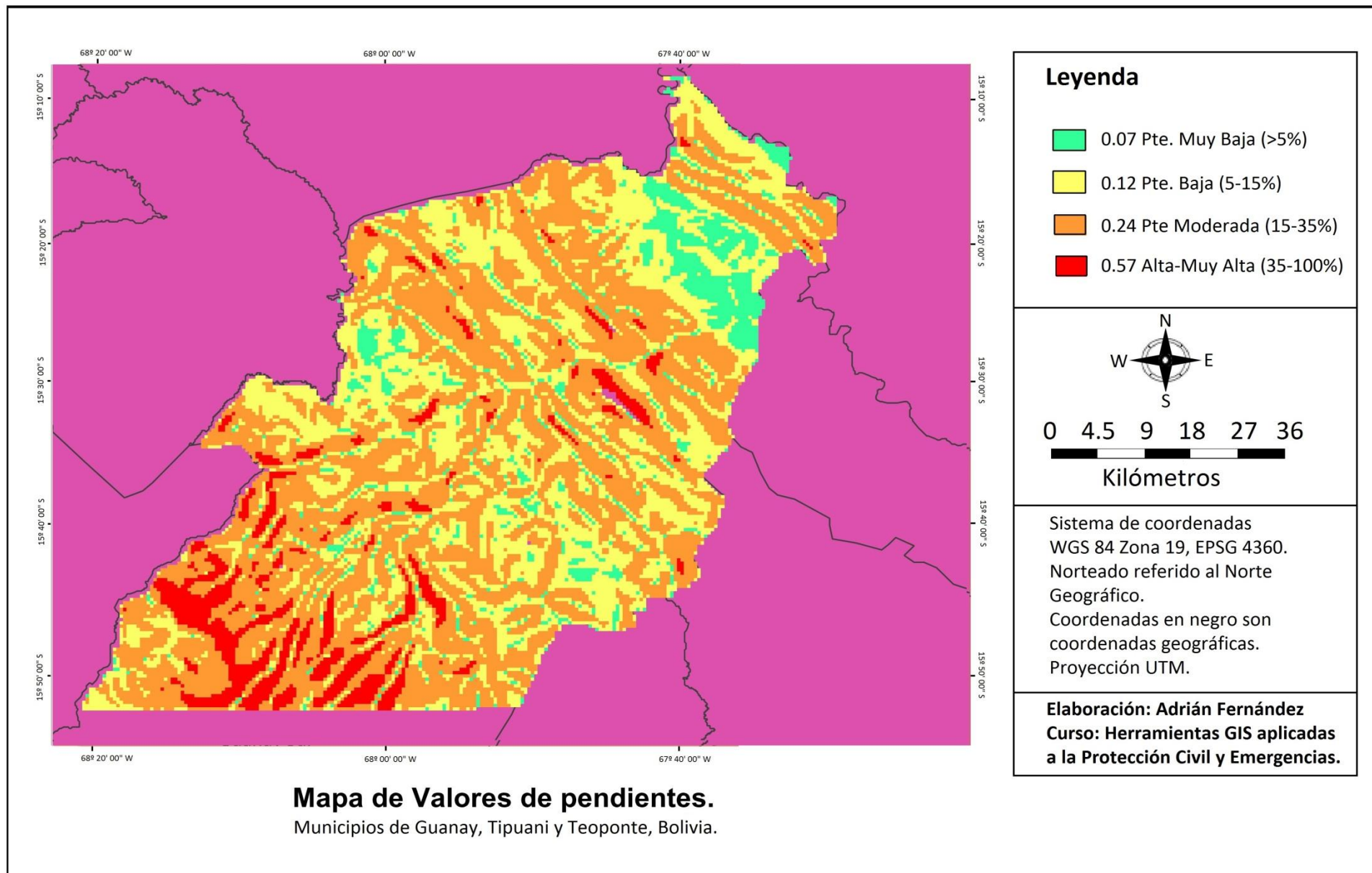


Figura 4.3 Mapa de valores de Pendientes topográficas.

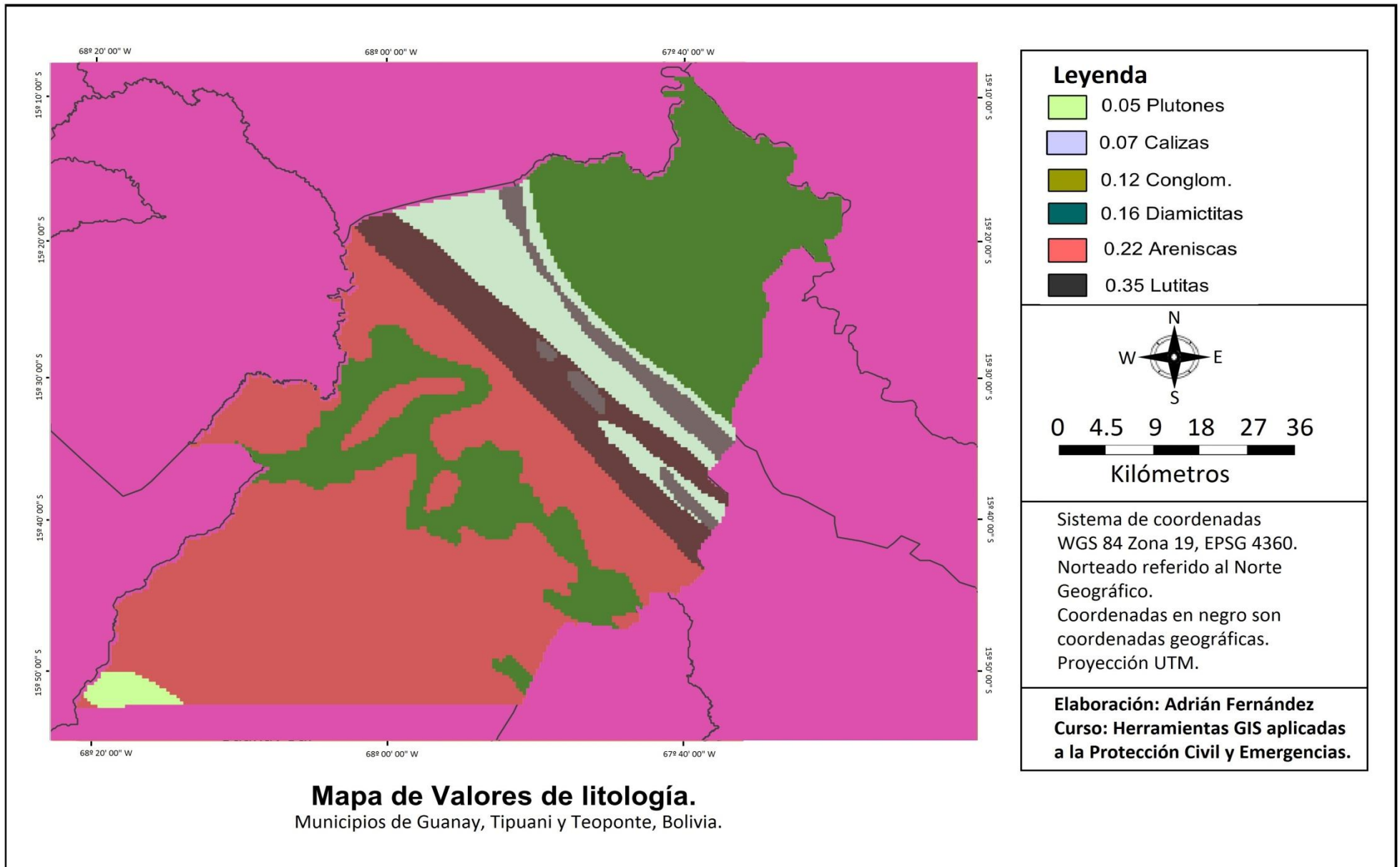


Figura 4.4 Valores de Litología.

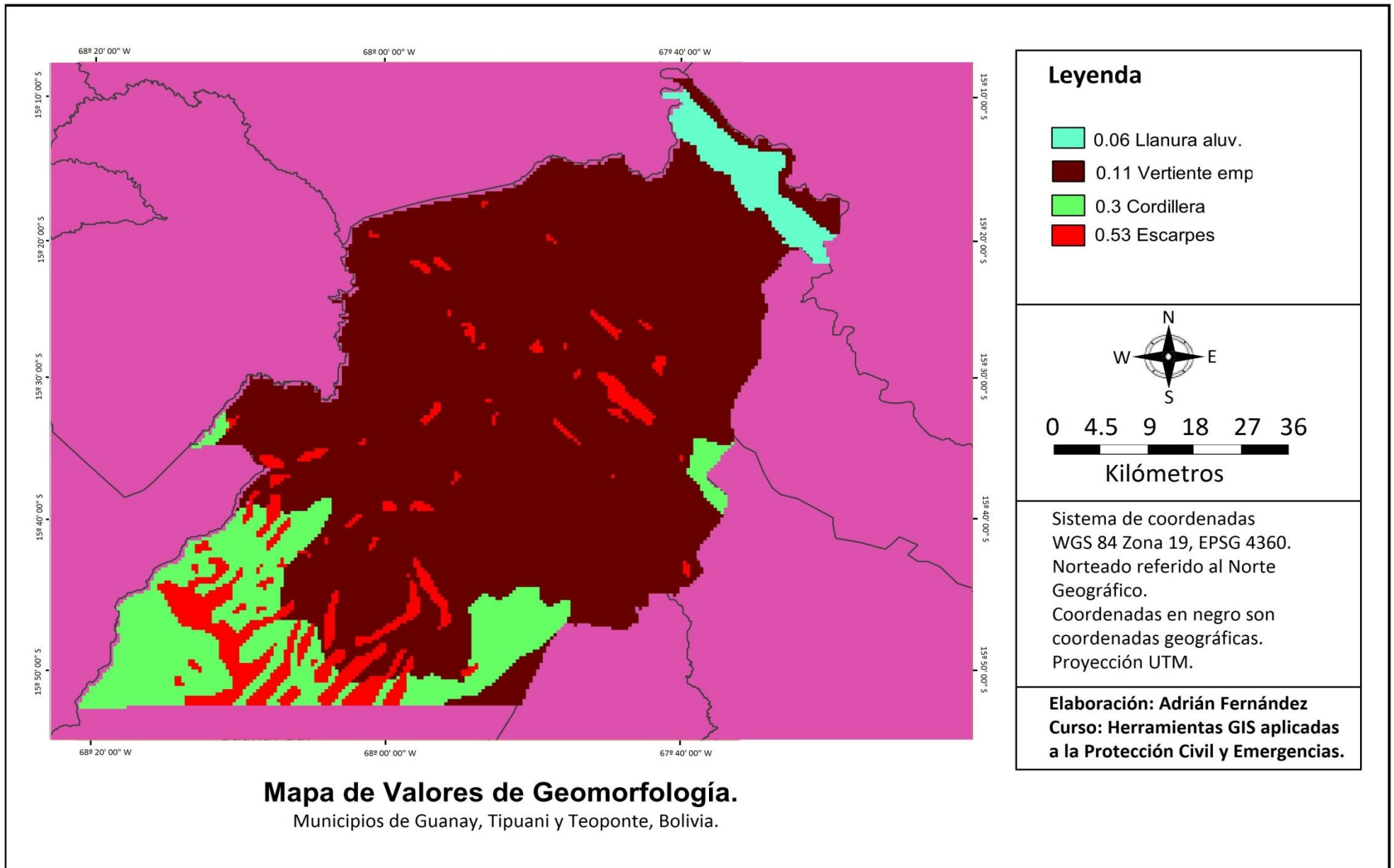


Figura 4.5. Mapa de valores de Geomorfología.

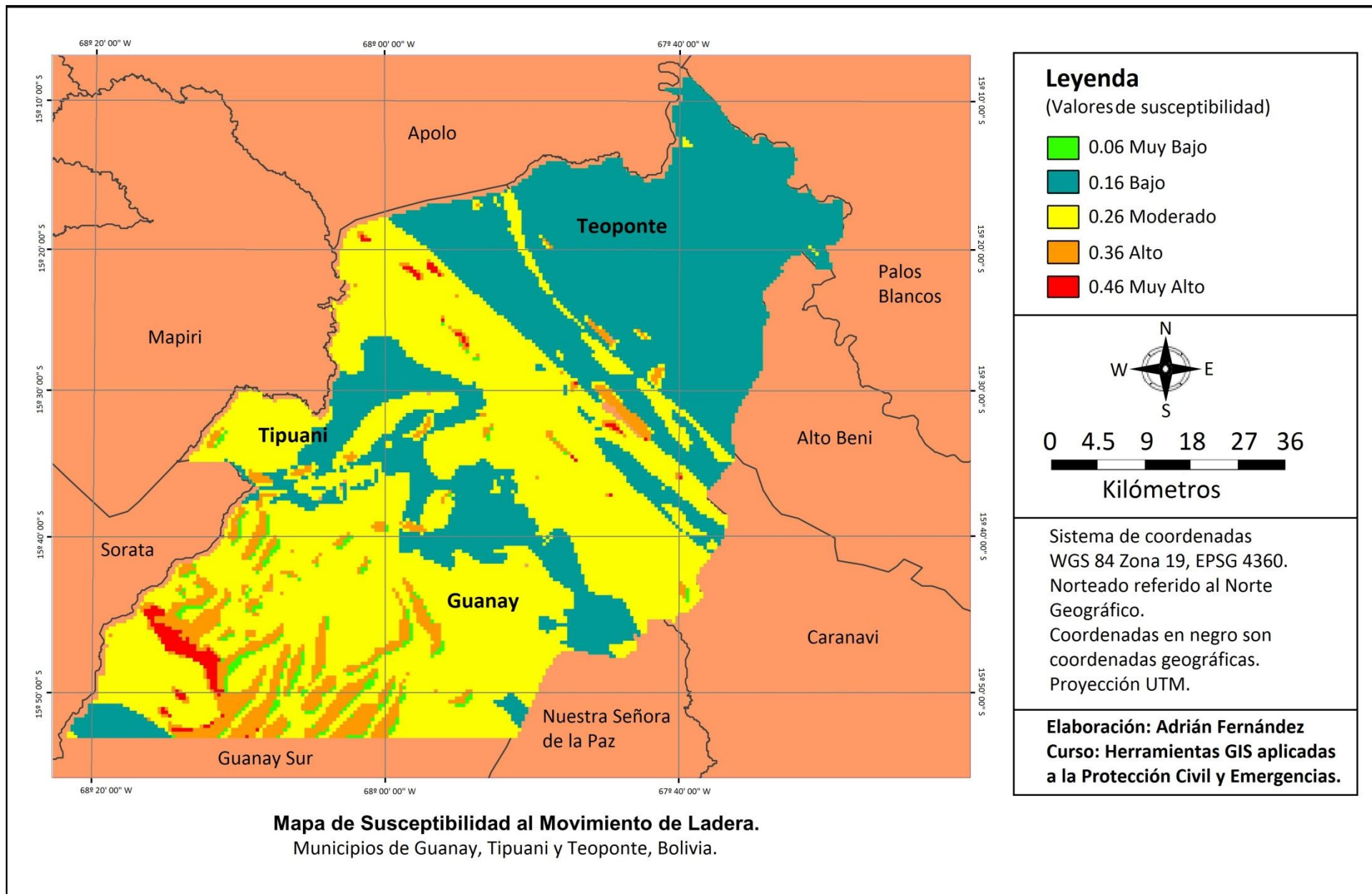


Figura 4.6. Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera.

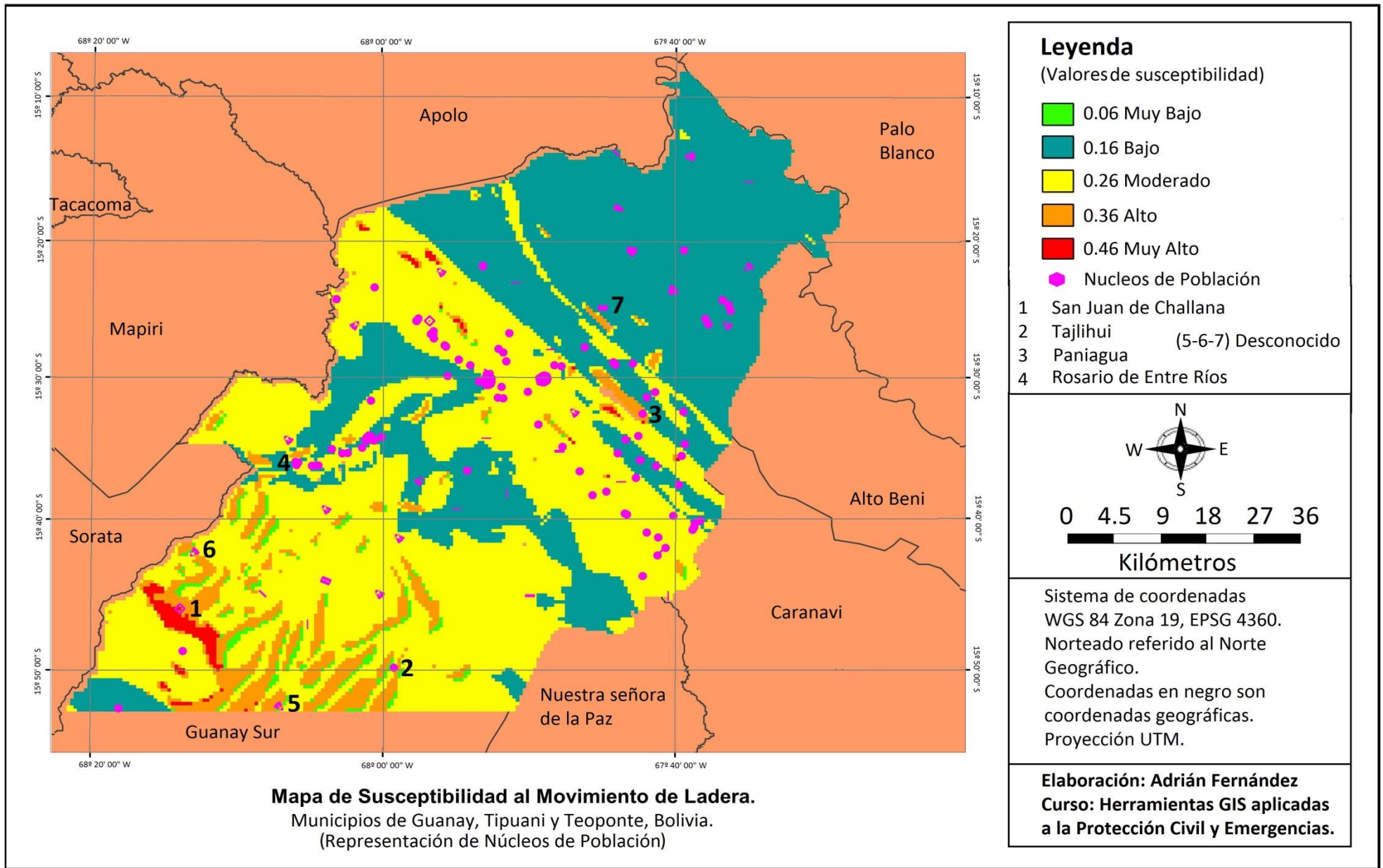


Figura 4.7. Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera y representación de los Núcleos de población (capa agrandada x5 para su correcta visualización).

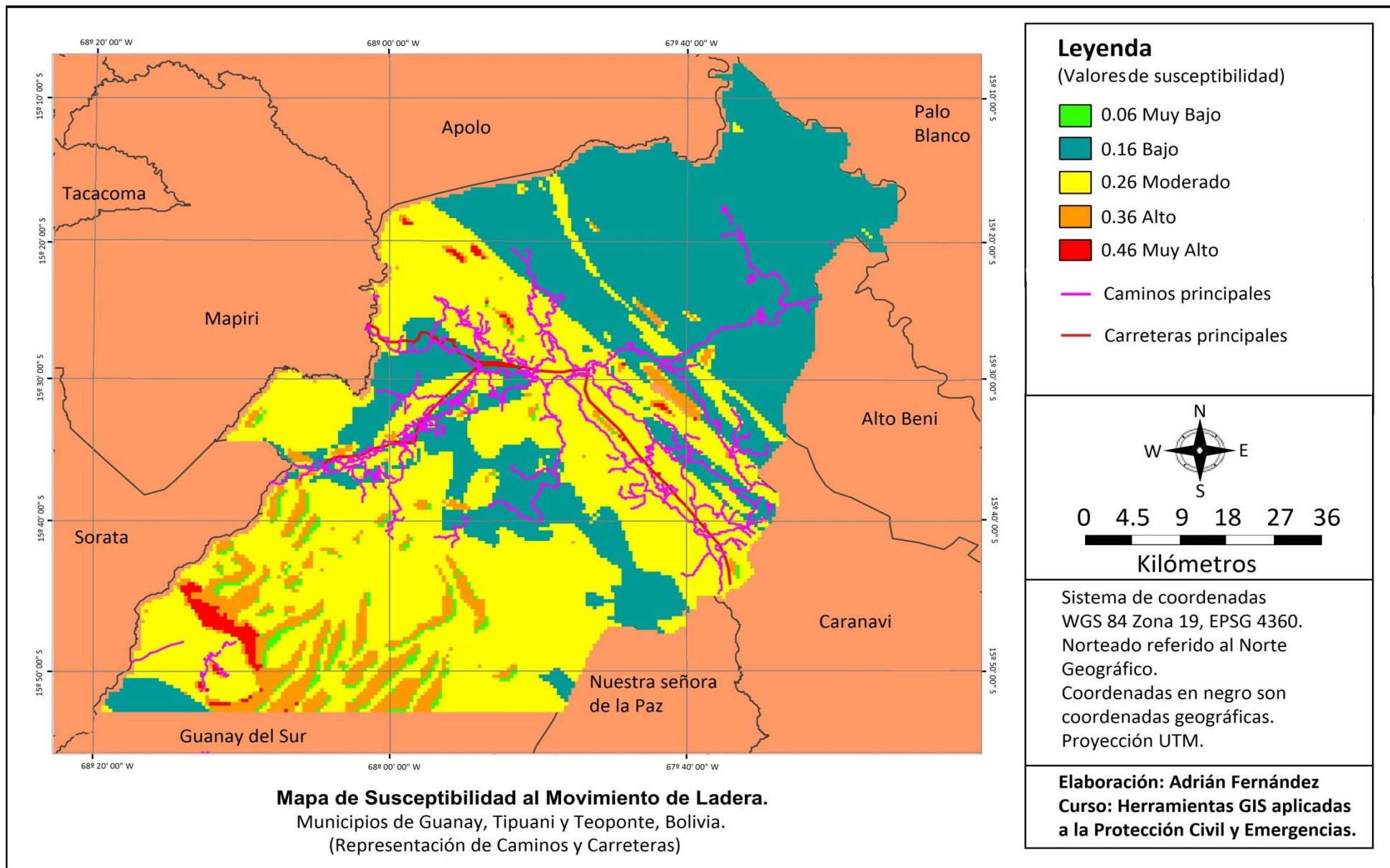


Figura 4.8. Mapa de susceptibilidad a los movimientos de ladera con representación de las carreteras principales y caminos.

5. Discusión

La susceptibilidad puede ser entendida como la probabilidad de que ocurra un proceso natural peligroso. La peligrosidad de forma general se define como la probabilidad y la intensidad del proceso peligroso. Dado que es difícil calcular la intensidad de un movimiento de ladera antes de que ocurra, se puede tomar la susceptibilidad como la peligrosidad al ser aquella, la expresión de cómo de probable es que ocurra un movimiento de ladera en un lugar dado.

En base a este criterio, la mayor peligrosidad (Muy Alta Susceptibilidad) se localiza en el suroeste del municipio de Guanay y en algunas zonas aisladas del municipio de Teoponte. Existen zonas con una susceptibilidad caracterizada como Alta en los tres municipios, pero la mayor extensión se encuentra al Sur del municipio de Guanay.

5.1 Aproximación al Riesgo de movimiento de ladera.

Dado que ha sido imposible aplicar la ecuación general del Riesgo ($\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Exposición}$), ya que *GvSig* no admite píxeles con valor 0 en la Calculadora de Mapas (siendo este valor muy importante para expresar áreas en donde no hay elementos antrópicos expuestos y donde, por tanto, no hay Riesgo), se decidió realizar una aproximación al Riesgo superponiendo las capas de Núcleos de Población con la de Susceptibilidad y la de Carreteras y Caminos también con la de Susceptibilidad.

Los núcleos de población que coincidieron con lugares con peligrosidad considerable (Susceptibilidad Alta a Muy Alta) y que, por tanto, estarían en Riesgo, serían:

- San Juan de Challana (Guanay).
- Tajlihui (Guanay).
- 2 Poblaciones de nombre desconocido (números 5 y 6 en el Mapa, municipio de Guanay).
- Rosario de entre Ríos (Tipuani).
- Paniagua (Teoponte).
- Una población de nombre desconocido (número 7 en el Mapa, municipio de Teoponte).

Las vías de comunicación afectadas estarían al Sur de Tipuani y al Suroeste de Teoponte.

6. Conclusiones

De este estudio es posible extraer diversas conclusiones relativas tanto al Riesgo y la peligrosidad en sí mismas como a la aplicación de la metodología en los SIG utilizados:

- Existe peligrosidad considerable en los tres municipios de la zona de estudio.
- La mayor peligrosidad se encuentra en el municipio de Guanay.
- Existen un número alto de poblaciones y elementos viales que se encuentran en Riesgo por movimientos de ladera, los cuales deberían ser analizados en detalle para evaluar específicamente el Riesgo y tomar medidas de protección.
- GvSig es una herramienta adecuada para el estudio de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante el método AHP. Se hace difícil una cuantificación del Riesgo por movimientos de ladera con el programa GvSig debido a metodologías de funcionamiento del propio programa.
- Este estudio es mejorable en varios aspectos: conocer una cuantificación del Riesgo, errores debidos a la falta de precisión de algunos programas como *Google Earth Pro* en la generación de los .kmz de Núcleos de Población o de *Global Mapper* en su generación de Curvas de Nivel, realización de un Modelo Digital del Terreno que no tenga en cuenta la Vegetación como sí lo tiene el Modelo Digital de Elevaciones.
- Existe una falta de confirmación de los cálculos al haber sido imposible realizar un trabajo de campo por cuestiones internas.

7. Referencias bibliográficas

Google Earth Pro (Última visita 6-6-2016).

Hervás, J., Barredo, J. y Lomoschitz, A. (2002): Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, Teledetección y Métodos de Evaluación Multicriterio. *En: Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España. Instituto Geológico y Minero de España. pp 169-180.*

Saaty, T. (2008): The Analytic Hierarchy/Network Process. *RACSAM, Vol. 102.*

Visor Geobolivia: <http://geo.gob.bo/mapfishapp/> (Última visita 6-6-2016)

Yalcin A. (2008): GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *Catena 72:1-12.*

***Curso Herramientas GIS Aplicadas a la
Protección Civil y Emergencias.***

Escuela Nacional de Protección Civil.

Junio de 2016.

Adrián Fernández Sánchez.