

Artículo Científico

DOI: <https://doi.org/10.52428/20758944.v15i46.774>**Metodología para la elaboración de mapas de micro-riesgo de deslizamientos con aplicación en la zona de San Antonio Bajo****Methodology for the elaboration of micro-risk maps of landslides with application in Low San Antonio neighborhood**

Madelene Rossiel Banús Urbina I. Waldo A. Aliaga Aranda 2.

1. Ingeniera Civil. Universidad Privada del Valle. Subsede La Paz. madeross.18@gmail.com2. Ingeniero Civil M.Sc. Docente, Universidad Privada del Valle. Subsede La Paz. waldoaliaga2009@yahoo.es**RESUMEN**

En Bolivia ocurren con frecuencia deslizamientos, principalmente en la ciudad de La Paz, por causas externas (precipitaciones y topografía), generando daños y pérdidas considerables tanto físicas como económicas en diferentes zonas; por ello, es necesario actualizar y mejorar las políticas de prevención y gestión del riesgo. Bajo este criterio, y habiendo comprendido que la elaboración de mapas de riesgo es el primer paso para una prevención y gestión del riesgo más eficiente, el proyecto buscó desarrollar una metodología ante deslizamientos a nivel micro zonas, estudiando detalladamente las características de un lugar en la ciudad de La Paz - Bolivia para conocer el verdadero grado de riesgo que posee. La metodología propuesta analizó la amenaza y vulnerabilidad del sector clasificando en áreas. Esta se estudió mediante tres métodos: heurístico, probabilístico y determinístico, los cuales permitió obtener tres distintos mapas de micro riesgo al ser combinados con el mapa de vulnerabilidad. El trabajo se desarrolló con información de campo, topografía de la zona y posteriormente las valoraciones y análisis desde el mes de mayo a diciembre del año 2017. Se aplicó la metodología en el barrio de San Antonio Bajo de la ciudad de La Paz, la cual fue sujeta a deslizamientos, obteniendo con gran precisión los distintos grados de riesgo existentes en la zona.

Palabras clave: Micro riesgo. Deslizamientos. Geomorfología.

ABSTRACT

In Bolivia, landslides occur frequently, mainly in the city of La Paz, due to external causes (rainfall and topography), generating considerable physical and economic damages and losses in different areas; Therefore, it is necessary to update and improve risk prevention and management policies. Under this criterion and having understood that the development of risk maps is the first step for more efficient prevention and risk management, the project sought to develop a methodology for landslides at the micro-zone level, studying in detail the characteristics of a place in the La Paz city - Bolivia to know the true degree of risk it has. The proposed methodology analyzed the threat and vulnerability of the sector by classifying into areas. This was analyzed by three methods: heuristic, probabilistic and deterministic, which allowed obtaining three different micro-hazard maps when combined with the vulnerability map. The work was developed with field information, topography of the area and subsequently assessments and analysis from the month of May to December of 2017. The methodology was applied in the Low San Antonio neighborhood of the city of La Paz, which was subject to landslides, obtaining with great precision the different degrees of risk in the area.

Keywords: Micro-risk. Landslides. Geomorphology.

INTRODUCCIÓN

Uno de los eventos naturales al que Bolivia es más vulnerable son los deslizamientos, siendo activados directa e indirectamente por agentes naturales y agentes antrópicos. La ciudad de La Paz es una de las ciudades más afectadas debido a su topografía con pendientes elevadas y características del terreno. El barrio San Antonio Bajo pertenece a las zonas de la ciudad de La Paz donde se han producido deslizamientos, la fotografía a continuación (Figura 1) muestra uno de los deslizamientos producidos en la zona el año 2003.

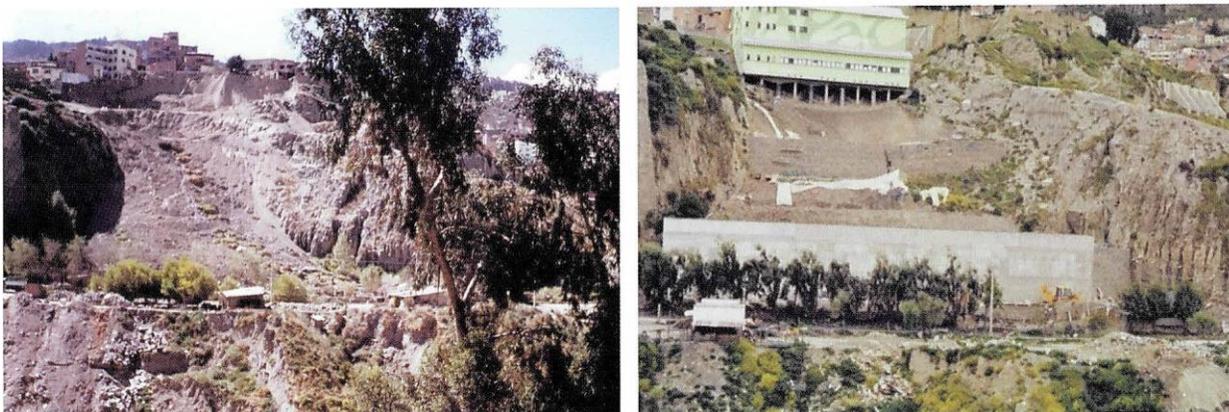
Figura N° 1. Deslizamiento en el año 2003



Fuente: Aliaga y Choque, 2003.

A pesar de ello, al igual que en otras zonas (debido al crecimiento poblacional y al desarrollo urbano), se han evidenciado asentamientos clandestinos y construcciones de grandes infraestructuras en sus laderas (ver Figura 2). Estos hechos alteran la geomorfología y combinados con la acción de las precipitaciones, incrementan la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento con resultados catastróficos.

Figura N° 2. Deslizamiento en el año 2004 y 2006



Fuente: Aliaga y Choque, 2003.

Como medida de prevención ante eventos naturales, La Paz cuenta con un mapa de riesgos elaborado el año 2011 por el Gobierno Autónomo Municipal de La Paz (GAMLP), donde se identifican las zonas con diferentes niveles de riesgo. Sin embargo, debido a la escala y método utilizados en su elaboración, no toma en cuenta factores relevantes, como ser los parámetros geotécnicos del suelo del lugar o zona, y el mapa debe ser actualizado, debido al constante crecimiento urbano.

El objetivo principal de la investigación fue elaborar una metodología basada en la utilización de tres métodos: heurístico, probabilístico y determinístico; y aplicarla a la zona de San Antonio Bajo para que sirva como referencia en la elaboración de mapas de micro riesgo de otros sectores.

El área estudiada (micro zona) se muestra en la Figura 3, la cual posee una extensión de 80 000 m² y se encuentra entre las coordenadas UTM:

COORDENADAS DEL AREA DE INVESTIGACIÓN

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. 594321.75 m E - 8175535.94 m S | 2. 594487.44 m E - 8175332.22 m S |
| 3. 594600.59 m E - 8175676.16 m S | 4. 594669.60 m E - 8175543.24 m S |

Fuente: Elaboración propia, 2018.



Fuente: Google Earth, 2017.

Este sector no genera recursos económicos; sin embargo, tiene su importancia por los antecedentes y la población que representa por las vías de comunicación existentes y por la presencia de algunas edificaciones administradas por la alcaldía, que son de uso público y generan cierta afluencia de población a este sector, como ser: un complejo deportivo, una cancha de frontón y un albergue para mascotas, entre otros.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de micro riesgos por deslizamiento en una ladera o talud consiste en obtener toda la información posible acerca del lugar en estudio, que permita realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible, como ser:

- Mapas: topográfico, geomorfológico, geológico, hidrológico y de usos del suelo.
- Imágenes satelitales antiguas, para evaluar cómo ha ido cambiando el lugar.
- Información del historial de deslizamientos suscitados en el sector de análisis.
- Resultados de ensayos de laboratorio: granulometría, peso específico, límites de Atterberg, corte directo, compresión simple y SPT.
- Información sobre los habitantes de la zona, densidad poblacional y viviendas.

Posterior a la recolección de los datos, se procede a su análisis mediante la metodología propuesta que se resume en la Figura 4:

Figura N° 4. Proceso que sigue la metodología propuesta



Fuente: Elaboración propia, 2018.

Análisis y evaluación de la amenaza

Método heurístico

El análisis de la amenaza bajo el método heurístico consiste en la superposición de los mapas recopilados del lugar respecto a pendientes, geología, hidrología y usos del suelo. La Figura 5 resume el procedimiento que sigue el método:

Figura N° 5. Procedimiento del método heurístico



Fuente: Elaboración propia, 2017.

En primer lugar, cada mapa es dividido en áreas que presentan características comunes, asignándoles a cada una un "peso", que es el valor que indica el grado de amenaza que representa cada área para la estabilidad del talud en análisis. Se tomó un rango de pesos de 0 a 2 para la investigación realizada, donde 0 es el valor que representa al grado de amenaza más baja y 2 equivale a la más alta. Este rango está basado en la clasificación que realizan Mora y Vahrson (1991).

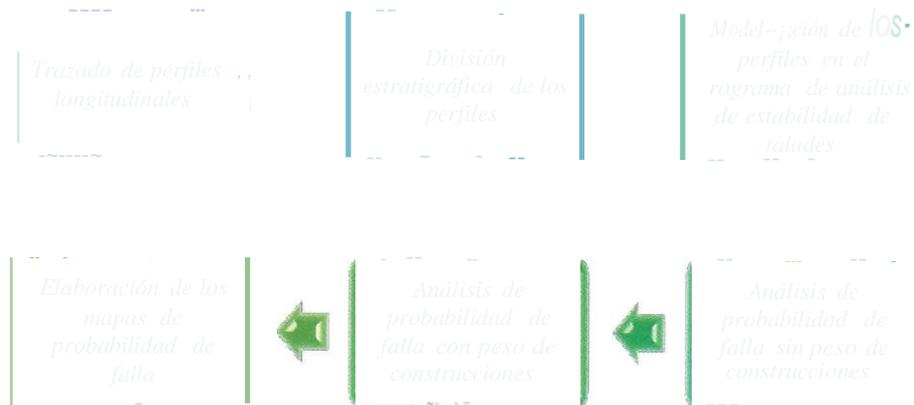
Una vez delimitadas las áreas y asignados los pesos, se procedió a superponer los cuatro mapas para poder sumar sus pesos y generar uno que combine y resuma el grado de amenaza al que está expuesto el sector en estudio. Este trabajo puede realizarse de varias formas, incluso manualmente (todo dependerá de las herramientas que se tengan al alcance), en este caso se recurrió al software ARCGIS en su extensión ARCMAP para combinar los cuatro mapas.

Con la suma de los pesos se delimitaron cinco nuevas áreas de amenaza: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Método probabilístico

El procedimiento que sigue el método probabilístico se muestra en el esquema de la Figura 6:

Figura N° 6. Procedimiento del método probabilístico



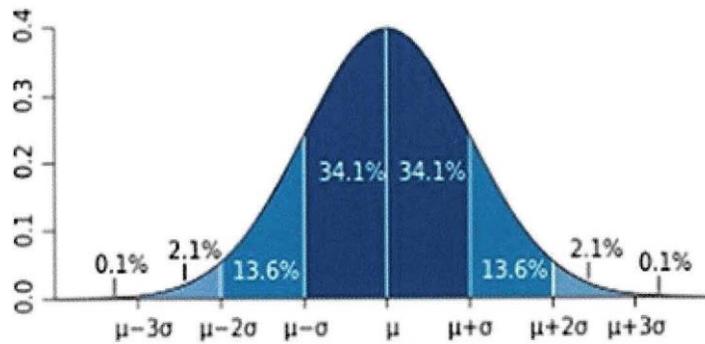
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En el método probabilístico intervienen los perfiles longitudinales del terreno, su estratificación, los parámetros geotécnicos del suelo y la fluctuación del nivel freático, además de considerar el peso de las construcciones existentes. En base a los ensayos de laboratorio (SPT, granulometría, límites de Atterberg, peso específico seco y saturado, humedad), se obtienen rangos de valores de los parámetros geotécnicos (cohesión, ángulo de fricción y peso específico) para cada tipo de material identificado en la estratificación.

Con los rangos de valores obtenidos, se realiza un análisis de probabilidad de falla en un programa de análisis de estabilidad de taludes; en este caso se utilizó el software SUDE y se utilizaron los métodos de equilibrio límite Bishop, Janbú y Fellenius.

El análisis de probabilidad se basa en el método Monte Carlo, es decir, en una función de distribución normal (Figura 7):

Figura N° 7. Gráfica de distribución normal

Fuente: <https://www.medwave.cl/>, 2017.

Donde:

$$f_x = \frac{1}{a\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2a^2}} \quad -\infty < \mu < +\infty$$

 $f(x)$ = frecuencia relativa a = desviación estándar μ = valor promedio

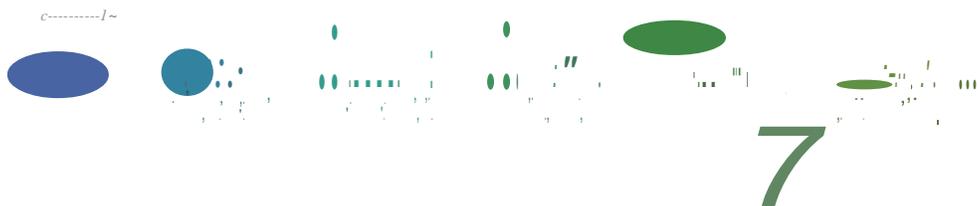
El análisis de probabilidad permite realizar varios análisis de estabilidad con los distintos valores de los parámetros geotécnicos y la variación de la presión de poros "Ru", obteniendo varios factores de seguridad y determinando el porcentaje de probabilidad de falla del plano de falla crítico con todos esos valores del factor de seguridad que fueron menores a 1 (FS<1). Con estos porcentajes de probabilidad de falla se delimitan nuevos rangos y nuevas áreas de amenaza: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Método determinístico

Para el desarrollo del análisis de la amenaza bajo este método, se debe realizar la exploración del área de estudio, obteniendo parámetros geotécnicos de muestras inalteradas, posición del nivel freático y ensayos SPT, CPT y DMT para determinar la estratificación. El talud es analizado por el método de elementos finitos (MEF).

El procedimiento por seguir para el análisis de la amenaza bajo este método se resume en el esquema de la Figura 8.

Figura N° 8. Procedimiento del método determinístico



Fuente: Elaboración propia, 2017.

En este caso, el criterio de rotura se define a partir del estado de tensiones versus deformación. El método de elementos finitos calcula el factor de seguridad de un talud (FS) mediante el Método denominada reducción de resistencia al corte (o SSR por sus siglas en inglés: ShearStrength Reduction), cuyo concepto se basa en los siguientes preceptos:

- a. Los parámetros de resistencia (cohesión c' y ángulo de fricción φ) se dividen entre un factor determinado (SRF o Strength Reduction Factor).
- b. Este proceso se repite para diferentes valores del factor de reducción de la fuerza (SRF), como un algoritmo, hasta que el modelo se vuelve inestable (los resultados del análisis no convergen).
- c. Esto determina el factor de reducción de la fuerza crítica (SRF crítico) que viene a ser el factor de seguridad del talud.

Con los factores de seguridad obtenidos para cada perfil, se delimitan nuevas áreas de amenaza: muy alta, alta, media, baja y muy baja bajo el siguiente criterio:

- $=1$ Equilibrio.
- <1 Seguridad cuestionable.
- $1-1,25$ Inestable.
- $1,25-1,40$ Seguridad Relativa.
- $=1,50$ Satisfactorio para taludes

Análisis y evaluación de la vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad del área en estudio consta básicamente de dos etapas:

- a. La identificación de los elementos expuestos, que consiste en identificar y delimitar distintas áreas sobre la imagen satelital del lugar que agrupen edificaciones o redes viales y presenten el mismo grado de vulnerabilidad ante un deslizamiento.
- b. La valoración de la vulnerabilidad, que a su vez consta de dos fases: evaluando la vulnerabilidad social (de las personas) y la vulnerabilidad física (de las edificaciones) dentro de las áreas delimitadas.

Cabe aclarar que la evaluación y cuantificación del grado de vulnerabilidad son realizadas con un rango de valores de 0 a 1, donde 0 representa a una zona de vulnerabilidad muy baja y 1 equivale a mucha vulnerabilidad en el sector. La vulnerabilidad social se analiza según las características del área delimitada, donde se toma en cuenta si la persona está dentro de un vehículo, en un área abierta o dentro de una edificación. Para evaluar la vulnerabilidad física se toma en cuenta el tipo de estructura, la altura y la conservación. Se suma la vulnerabilidad física y social para cada área y se delimitan cinco nuevas zonas de vulnerabilidad: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

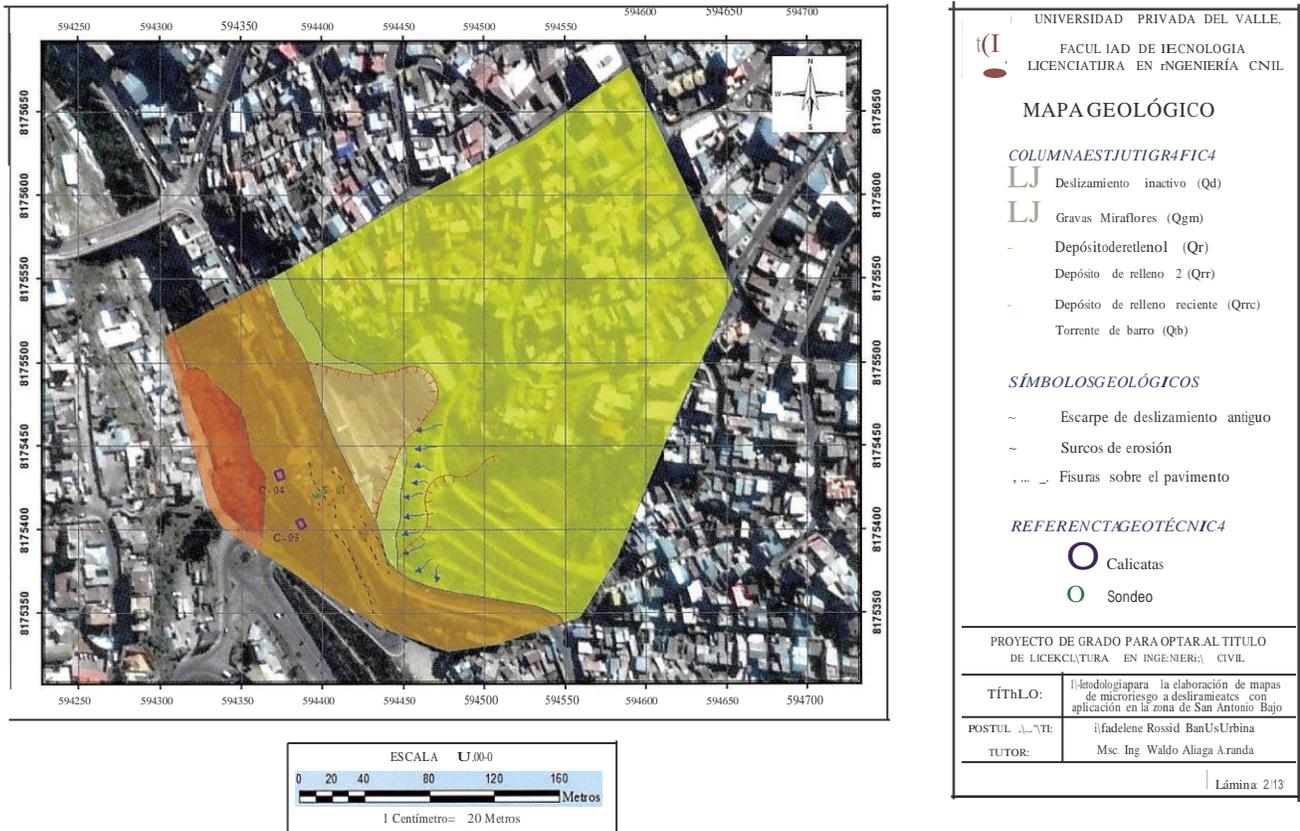
RESULTADOS

Análisis y evaluación de la amenaza

Método heurístico

Realizando el análisis adecuado para cada mapa, se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 9 y Tabla I.

Figura N° 9. Delimitación y análisis del mapa geológico



Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

Tabla N°1. Pesos asignados al mapa geológico

SIMBOLOGÍA	TIPO DE MATERIAL	CLASIFICACIÓN	PESO
Qrrc	Depósito de relleno reciente	GC, CL, SM	1,5
Qr	Depósito de relleno (1)	GP-GM, SM	1,8
Qrr	Depósito de relleno (2)	GC, SM	1,2
Qgm	Gravas Miraflores	GP-GM	1,5
Qtb	Torrente de barro	GC	1,5
Qd	Deslizamiento inactivo	SW-SM, CL	1,8

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Para la asignación de pesos en el mapa de pendientes (pendiente expresada en grados), se tomó como base la tabla elaborada por Suarez (1998), la cual se presenta en la Tabla 2.

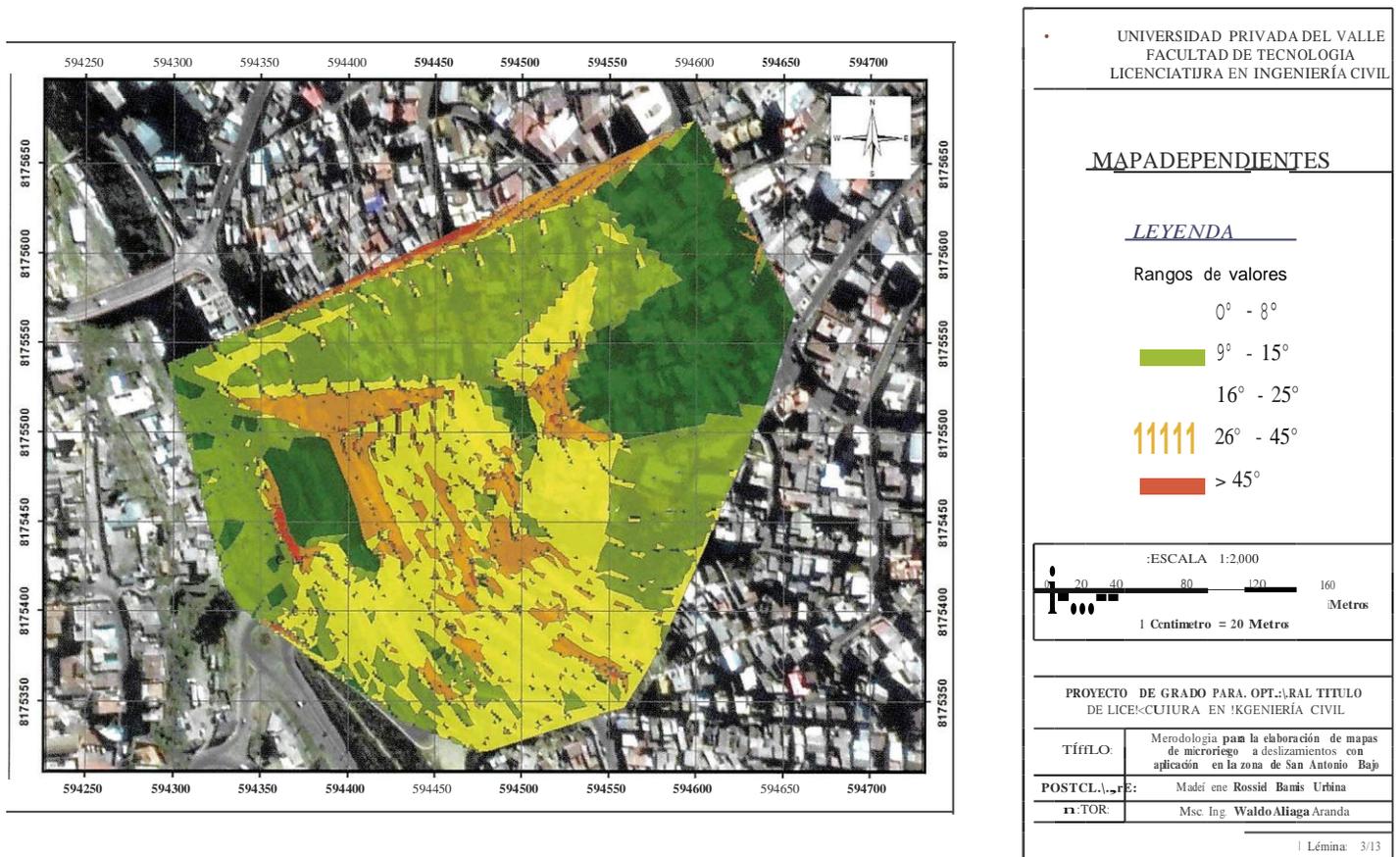
Tabla N°2. Pesos asignados al mapa de pendientes

ÁREA	PENDIENTE	PESO
I	0° - 8°	0,5
II	9° - 15°	0,8
III	16° - 25°	1,2
IV	26° - 45°	1,7
V	> 45°	2

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Las áreas delimitadas en el mapa de pendientes y su respectiva leyenda se muestran en la Figura 10.

Figura N°10. Delimitación y análisis del mapa de pendientes



Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

Para el mapa hidrológico se delimitaron dos grandes áreas: las áreas húmedas y las áreas secas, que se muestran en la Figura 12. Las áreas húmedas estarán representadas por aquellos lugares donde se presenten cuerpos de agua, en este caso ríos y lugares donde se evidencie humedad.

Figura N°12. Delimitación y análisis del mapa hidrológico



Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

Los pesos asignados a las zonas húmeda y seca se presentan en la Tabla 4.

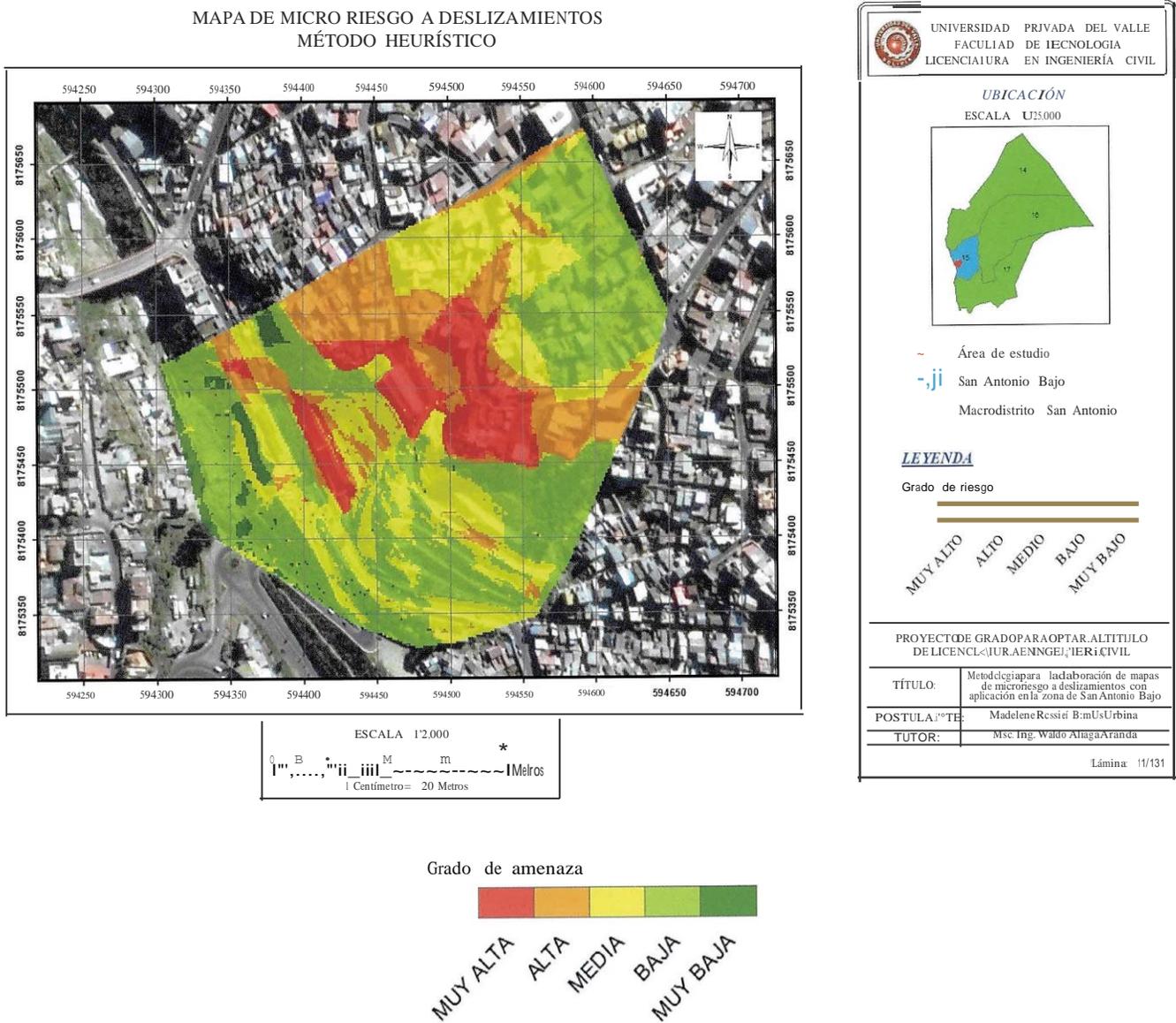
Tabla N°4. Pesos asignados al mapa hidrológico

DESCRIPCIÓN	PESOS
Zona húmeda	0,8
Zona seca	0

Fuente: Elaboración propia, 2017.

De la combinación de los anteriores cuatro mapas (geológico, de pendientes, de usos del suelo e hidrológico), resultó el primer mapa de amenaza, que se muestra en la Figura 13 y fue elaborado en ARCGIS mediante imágenes raster (de pixeles) de los mapas elaborados.

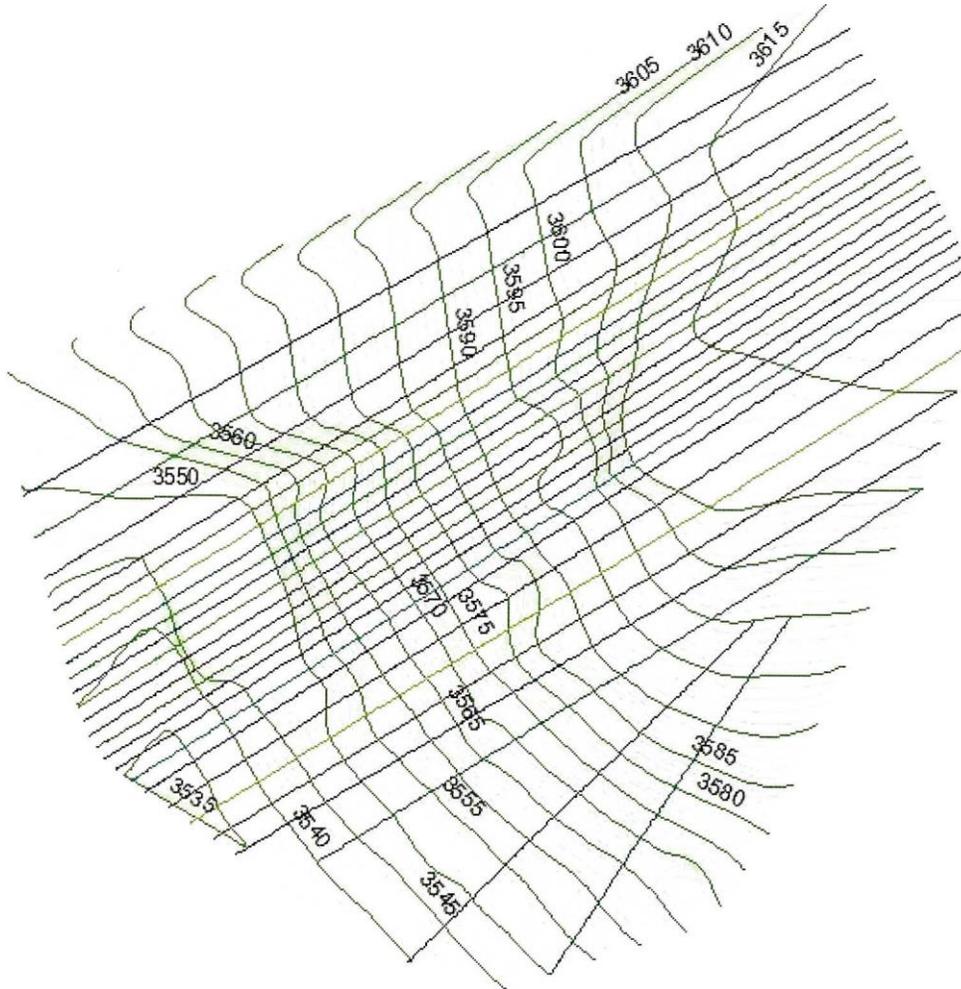
Figura N°13. Mapa de amenaza bajo el método heurístico



Método probabilístico

El inicio de la actividad corresponde que en el plano topográfico se trazaron 24 perfiles longitudinales, para los análisis y estudio del área, como se observa en la Figura 14.

Figura N° 14. Trazado de perfiles longitudinales



Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

Posterior a ello, se realizó la estratificación y se calcularon los rangos de valores de los parámetros geotécnicos para cada estrato (8 materiales identificados, ver Tabla 5).

Tabla N°5. Rangos de valores de las propiedades de los materiales utilizados en el método probabilístico

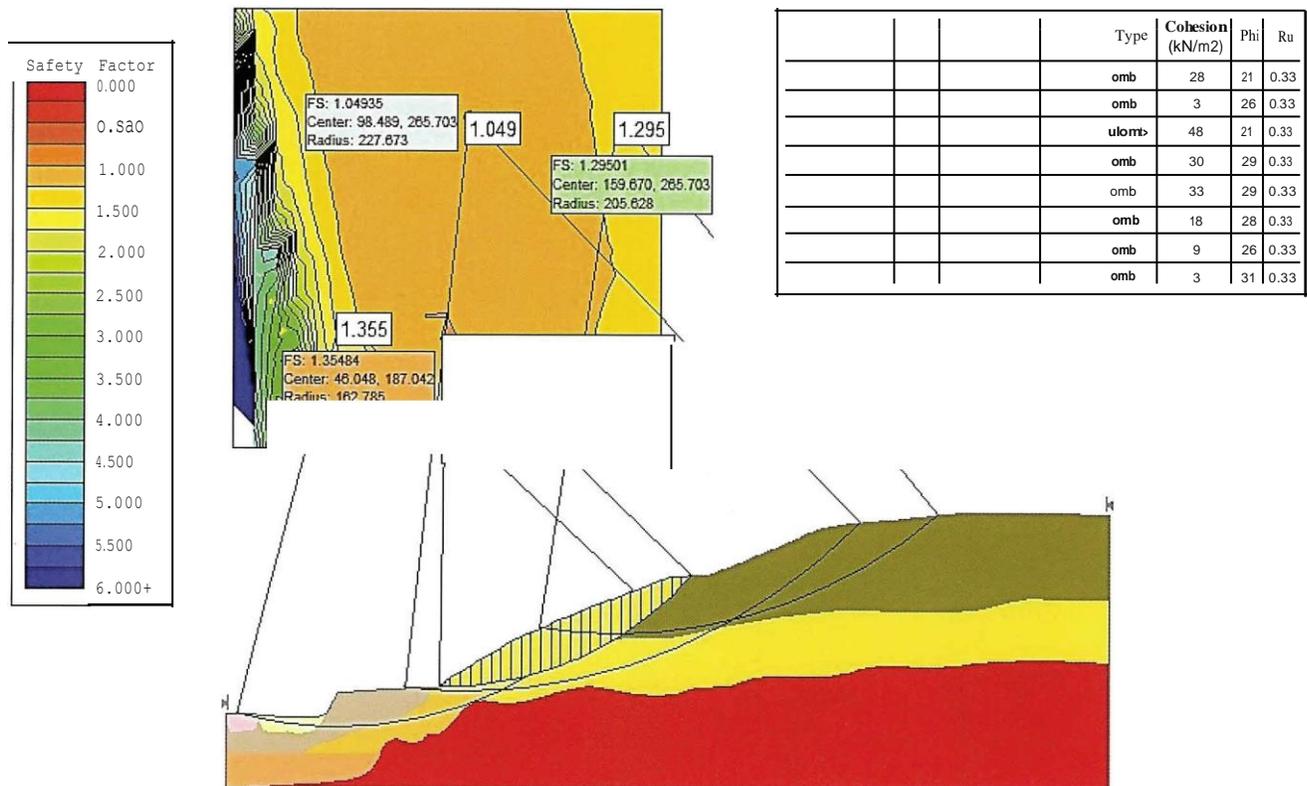
DESCRIPCIÓN	TIPO	SIGLA	VALOR PROMEDIO μ	DESVIACION ESTÁNDAR σ	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
Qtb	Peso unitario	γ {KN/m ³ }	20,8	0,7	22,9	18,7
	Cohesión	c' {KN/m ² }	28	3,4	38	18
	Ángulo de fricción	ϕ^{\prime} (°)	21	2,3	28	14
Qgm	Peso unitario	γ {KN/m ³ }	22,3	0,5	23,8	20,8
	Cohesión	c' {KN/m ² }	3	1,0	6	0
	Ángulo de fricción	ϕ^{\prime} (°)	26	1,2	30	22
Tlp	Peso unitario	γ {KN/m ³ }	21,2	0,7	23,4	19,0
	Cohesión	c' (KN/m ²)	48	20,0	68	28
	Ángulo de fricción	ϕ^{\prime} (°)	21	2,5	29	14
Qd	Peso unitario	γ {KN/m ³ }	20,8	1,2	23,2	18,4
	Cohesión	c' (KN/m ²)	30	8,5	56	5
	Ángulo de fricción	ϕ^{\prime} (°)	29	2,5	36	21
Qr	Peso unitario	γ {KN/m ³ }	20,0	0,5	21,4	18,6
	Cohesión	c' (KN/m ²)	33	22,8	56	11
	Ángulo de fricción	ϕ^{\prime} (°)	29	5,7	35	24
Qrr	Peso unitario	γ {KN/m ³ }	19,8	0,4	21,0	18,6
	Cohesión	c' (KN/m ²)	18	2,7	26	10
	Ángulo de fricción	ϕ^{\prime} (°)	28	5,0	43	12

DESCRIPCIÓN	TIPO	SIGLA	VALOR PROMEDIO μ	DESVIACION ESTÁNDAR σ	LIMITE SUPERIOR	LIMITE INFERIOR
Qrrc	Peso unitario	γ (KN/m ³)	20,2	0,7	22,2	18,2
	Cohesión	c' (KN/m ²)	9	1,9	15	3
	Ángulo de fricción	ϕ' (°)	26	6,0	44	8
Qa	Peso unitario	γ (KN/m ³)	20,9	1,1	23,1	18,7
	Cohesión	c' (KN/m ²)	3	1,0	6	0
	Ángulo de fricción	ϕ' (°)	31	4,5	44	17

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Estos valores fueron introducidos al programa SLIDE para realizar el análisis de probabilidad de falla de los 24 perfiles trazados. En la Figura 15 y en la Tabla 6 se muestran a manera de ejemplo los resultados para el perfil I.

Figura N° 15. Resultado del análisis de probabilidad de falla para el perfil 1



Fuente: Elaboración propia, 2017.

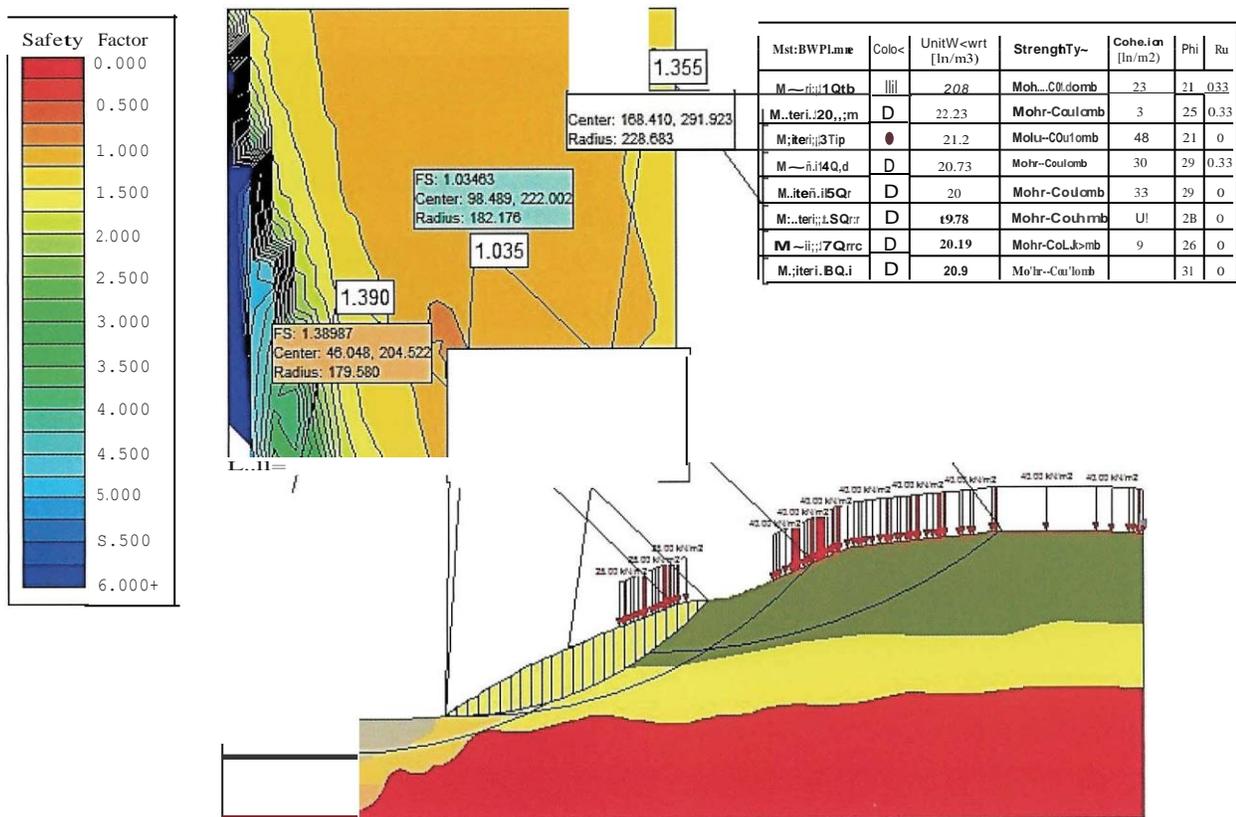
Tabla N06. Resultados del primer análisis de probabilidad para el perfil 1

Características	Distancia (m)			
	46,1	89,75	98,5	150,6
Promedio del FS	1,36	0,98	1,05	1,3
índice de confiabilidad	1,06	-1,38	0,56	3,72
Probabilidad de falla(%)	18,33	70	29,4	0
Desviación estándar	0,34	0,03	0,04	0,1
Mínimo FS	0,68	0,86	0,9	1,03
Máximo FS	2,11	1,06	1,14	1,56
Número de iteraciones	1500	1500	1500	1500

Fuente: Elaboración propia, 2017.

También se realizó un segundo análisis de probabilidad de falla, tomando en cuenta el peso de las construcciones. Los resultados para el perfil 1 se muestran en la Figura 16 y en la Tabla 7.

Figura N° 16. Resultado del análisis de probabilidad de falla con peso de construcciones para el perfil 1



Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla N°7. Resultados del segundo análisis de probabilidad para el perfil 1

	Distancia (m)			
Características	46	89,7	98,5	168,4
Promedio del FS	1,39	0,97	1,04	1,36
Índice de confiabilidad	1,17	-1,45	0,17	3,78
Probabilidad de falla(%)	17,6	85,2	42,13	0
Desviación estándar	0,3	0,04	0,04	0,11
Mínimo FS	0,71	0,83	0,88	1,04
Máximo FS	2,16	1,08	1,18	1,74
Número de iteraciones	1500	1500	1500	1500

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Se realizaron ambos análisis de probabilidad de falla (con y sin peso de construcciones) para los restantes 23 perfiles y con las probabilidades obtenidas se delimitaron las cinco nuevas áreas de amenaza, cuyo rango se pueden ver en la Tabla 8.

Tabla N°8. Rango de probabilidades de falla propuesto

Probabilidad de falla (%)	Amenaza	Símbolo
100 - 70	Muy alta	
	Alta	
		
		

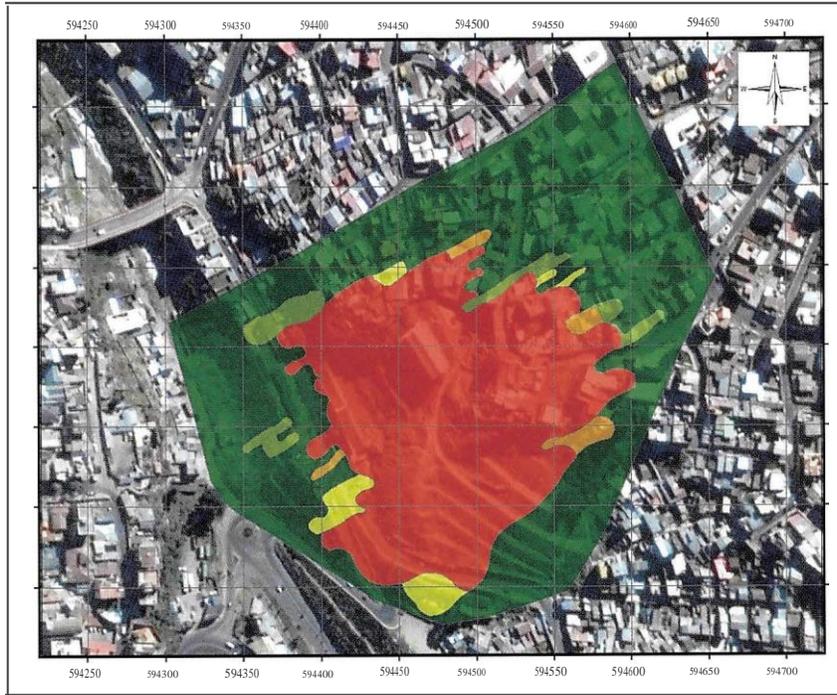
Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la Figura 17 se muestran ambos mapas de probabilidad para realizar una comparación visual del incremento de probabilidades de falla debido al peso de las estructuras y su ubicación.

Figura N° 17. Mapa de probabilidad de falla A) sin peso de construcciones y B) con peso de construcciones

A)

MAPA DE AMENAZA POR PROBABILIDAD DE FALLA
(PRIMER ANÁLISIS: SIN PESO DE CONSTRUCCIONES)



UNIVERSIDAD PRIVADA DEL VALLE
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

UBICACIÓN

Área de estudio
San Antonio Bajo
Macrodistrito San Antonio

PROBABILIDAD DE FALLA

Primer Análisis

- 100%-70%
- 70%-50%
- 50%-35%
- 35%-15%
- 15%-0%

GRADO DE AMENAZA

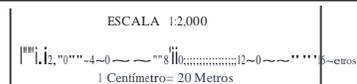
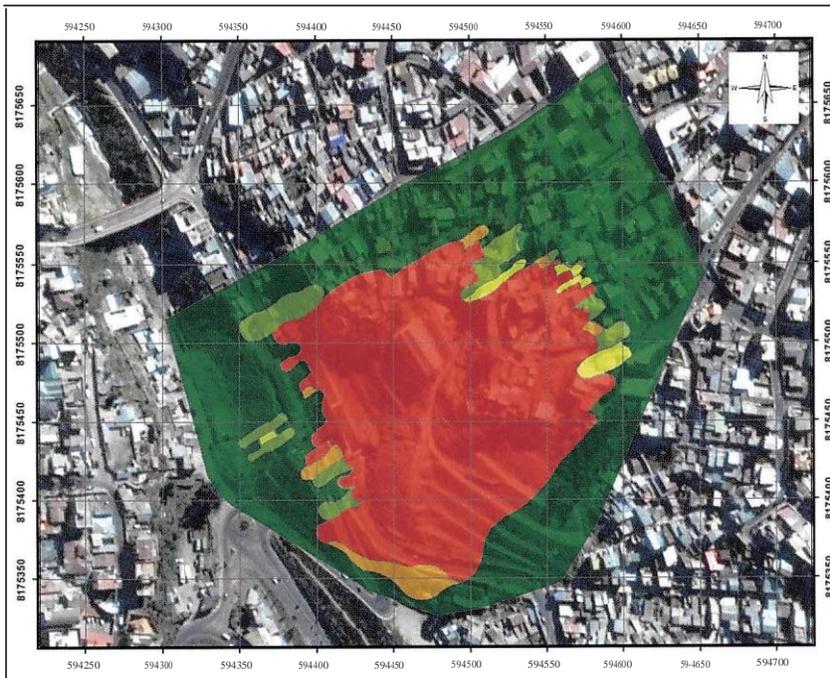
PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

TÍTULO:	Metodología para la elaboración de mapas de microriesgo de deslizamientos con aplicación en la zona de San Antonio Bajo
POSTULANTE:	Maldine Rossid Banús Urbina
TUTOR:	Ing. Waldo Aliaga Aranda

Límina: 7/13

B)

MAPA DE AMENAZA POR PROBABILIDAD DE FALLA
(SEGUNDO ANÁLISIS: CON PESO DE CONSTRUCCIONES)



UNIVERSIDAD PRIVADA DEL VALLE
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

UBICACIÓN

Área de estudio
San Antonio Bajo
Macrodistrito San Antonio

PROBABILIDAD DE FALLA

Segundo análisis

- 100%-70%
- 70%-50%
- 50%-35%
- 35%-15%
- 15%-0%

GRADO DE AMENAZA

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

TÍTULO:	Metodología para la elaboración de mapas de microriesgo de deslizamientos con aplicación en la zona de San Antonio Bajo
POSTULANTE:	Maldine Rossid Banús Urbina
TUTOR:	Ing. Waldo Aliaga Aranda

Límina: 8/131

• Método determinístico

Inicialmente se determinaron los parámetros geotécnicos para cada uno de los 24 perfiles y para los ocho materiales identificados en el sector con la mayor precisión posible. en este caso se realizó la determinación de estos valores mediante un análisis de sensibilidad en el programa Slide considerando el estado de equilibrio o FS=1 del talud, debido a que así lo exige el método. En la Tabla 9 se muestran los valores determinados para el perfil I.

Tabla N°9. Parámetros geotécnicos obtenidos para el perfil 1

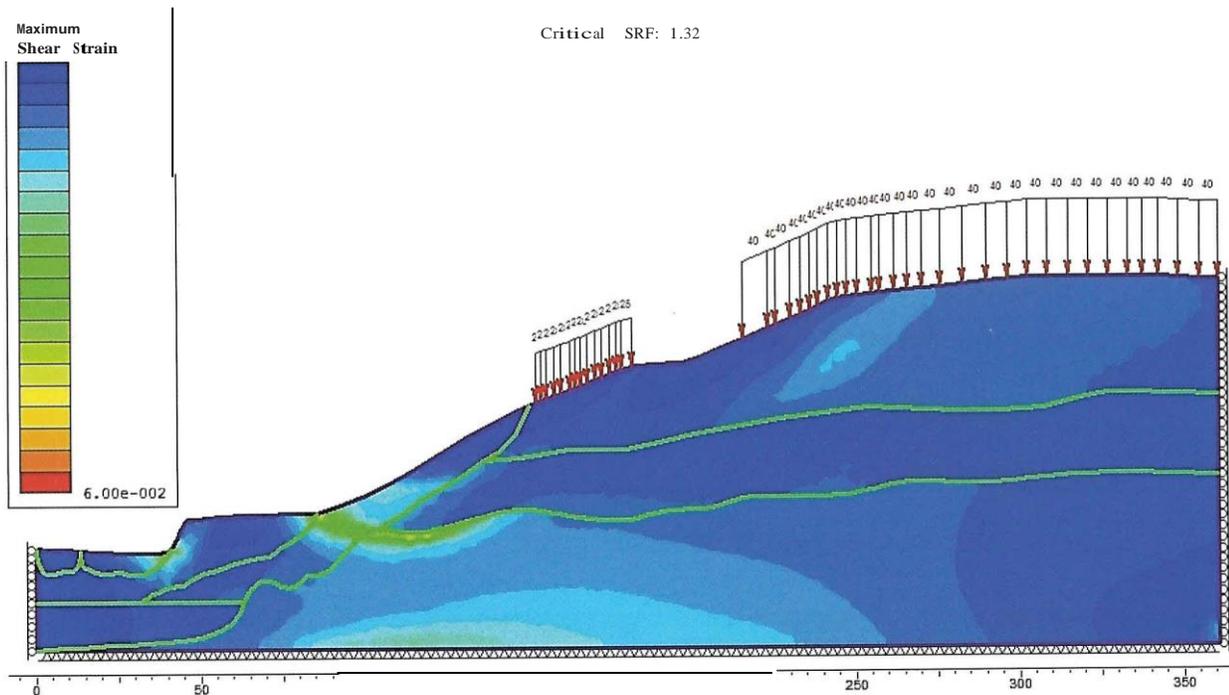
L_Descripción	Tipo	Sigla	Valor
Qtb	Peso unitario	y (KN/m3)	21
	Cohesión	c' (KN/m2)	30
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	21
Qgm	Peso unitario	y (KN/m3)	22,8
	Cohesión	c' (KN/m2)	10
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	30
Tlp	Peso unitario	y (KN/m3)	21,2
	Cohesión	c' (KN/m2)	48
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	21
Qd	Peso unitario	y (KN/m3)	20,1
	Cohesión	c' (KN/m2)	28
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	23
Qr	Peso unitario	y (KN/m3)	20
	Cohesión	c' (KN/m2)	15
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	28
Qrr	Peso unitario	y (KN/m3)	20,1
	Cohesión	c' (KN/m2)	18
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	26
Qrrc	Peso unitario	y (KN/m3)	20,2
	Cohesión	c' (KN/m2)	9
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	26
Qa	Peso unitario	y (KN/m3)	20,9
	Cohesión	c' (KN/m2)	8
	Ángulo de fricción	ϕ^i (°)	32

Fuente: Elaboración propia, 2017.

Además de los parámetros geotécnicos, para el análisis mediante elementos finitos tuvieron que determinarse los valores de las propiedades elásticas de los materiales: módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Ya contando con los datos necesarios, se realizó el análisis de estabilidad mediante elementos finitos en el programa PHASE2. Se modelaron mallas de triángulos de seis nudos, generando alrededor de 1.800 elementos. El análisis obtenido para el perfil 1 se en la Figura 18 y los resultados de los factores de seguridad para todos los perfiles se muestran en la Tabla 10.

Figura N° 18. Resultado del análisis SSR para el perfil 1



Fuente: Elaboración propia, 2017.

Tabla N°10. Valores de los SRF obtenidos de los 24 perfiles

PERFIL	SRF	PERFIL	SRF	PERFIL	SRF
1	1,32	9	1,32	17	2
2	1,28	10	1,31	18	1,3
3	1,27	11	1,34	19	1,31
4	1,31	12	1,43	20	1,5
5	1,33	13	1,45	21	1,5
6	1,31	14	1,43	22	1,41
7	1,36	15	1,51	23	1,42
8	1,39	16	1,7	24	1,53

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En la Tabla 11 presenta la forma en la que se dividieron los rangos de valores de los SRF de los perfiles:

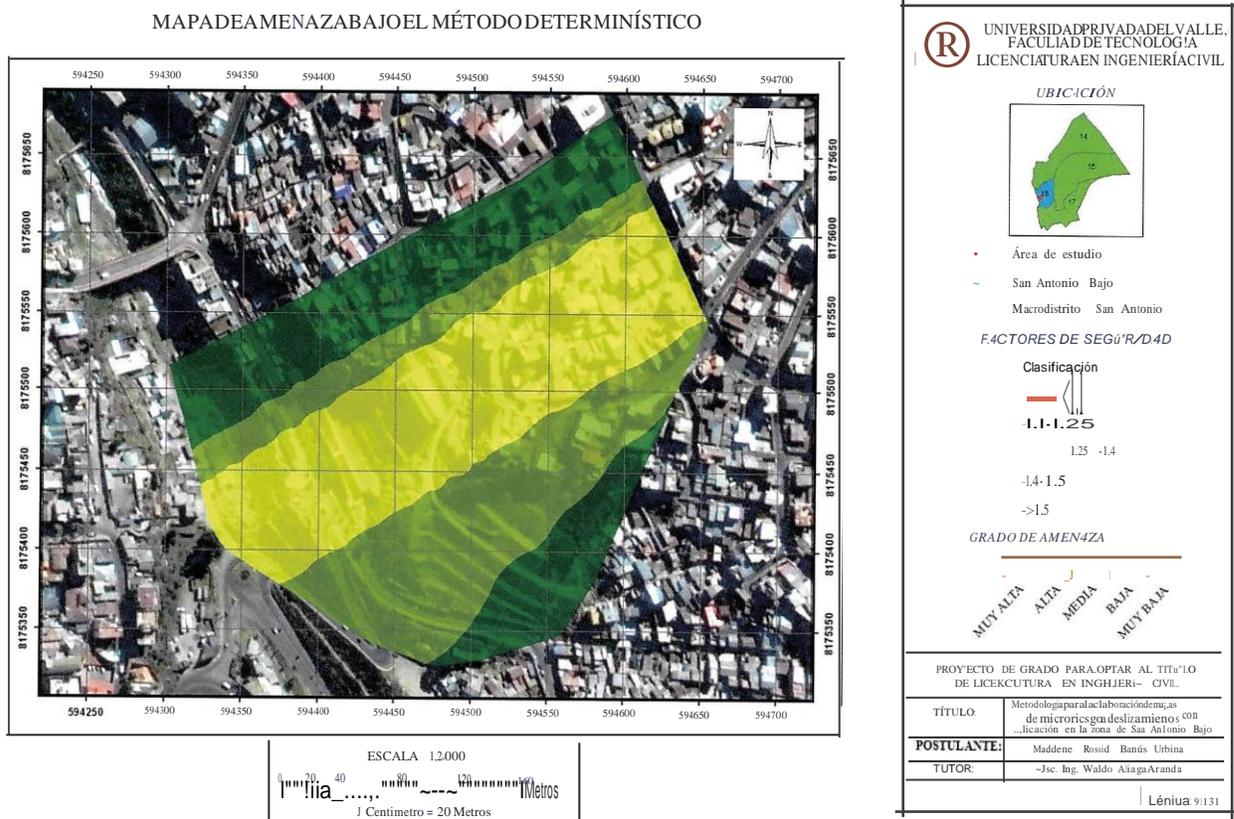
Tabla N°11. Clasificación de los SRF propuesto

F.S. o SRF	Grado de amenaza	Símbolo
> 1,5	Muy baja	
1,4 - 1,5		
		

Fuente: Elaboración propia, 2017.

En base a la clasificación definida, se generó el tercer mapa de amenaza, presentado en la Figura 19.

Figura N° 19. Mapa de amenaza bajo el método determinístico



Fuente: Elaboración propia, 2017.

Análisis y evaluación de la vulnerabilidad

En el área de estudio se identificaron 22 áreas expuestas a deslizamiento (Figura 20), cabe aclarar que, en otros proyectos, es posible que se tenga un número menor, lo importante es que se debe realizar un recorrido por toda la zona para identificar y determinar las áreas con diferentes grados de vulnerabilidad.

Figura N° 20. Identificación de los elementos expuestos



Fuente: Elaboración propia, 2017.

Se realizó el análisis de vulnerabilidad social y física para cada área, presentado en las Tablas 12 y 13.

Tabla N° 12. Valoración de la vulnerabilidad social

Área	Vulnerabilidad social		
	A. abierta	Vehículo	Edificio
1			1
2			1
3			1
4			0,3
5			1
6			0,5
7			1
8			0,5
9			1
10			0,2
11			1
12			0,1
13			1
14			0,1
15			0,2
16	1		
17	1		
18		0,3	
19	0,1		
20	0,1		
21	0,3		
22	0,5		

Fuente: Elaboración propia, 2017.

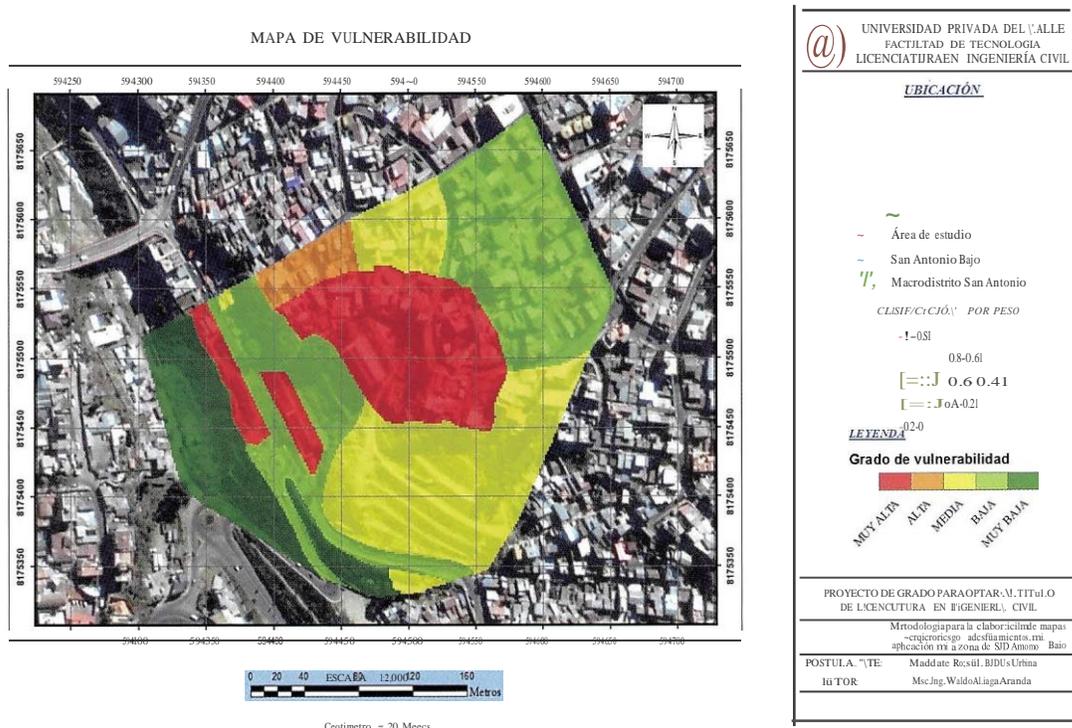
Tabla N°13. Valoración de la vulnerabilidad física

Área	Vulnerabilidad física			
	Tipo (Stip)	Altura (Salt)	Conservación (Scón)	Total (St)
1	0,7	0,6	0,05	0,9
2	1	0,9	0,05	1
3	1	0,9	0,05	1
4	0,7	0,6	0,05	0,9
5	1	0,9	0,05	1
6	0,7	0,6	0,05	0,9
7	0,7	0,6	0,05	0,9
8	1	0,9	0,05	1
9	1	0,9	0,05	1
10	0,7	0,6	0,05	0,9
11	1	0,9	0,05	1
12	0,3	0,6	0,05	0,7
13	0,9	0,9	0,05	1
14	0,7	0,6	0,05	0,9
15	0,7	0,6	0,05	0,9

Fuente: Elaboración propia, 2017

Con ese análisis pudo elaborarse el mapa de vulnerabilidad, clasificando 5 áreas (Figura 21 y Tabla 14).

Figura N° 21. Mapa de vulnerabilidad



Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

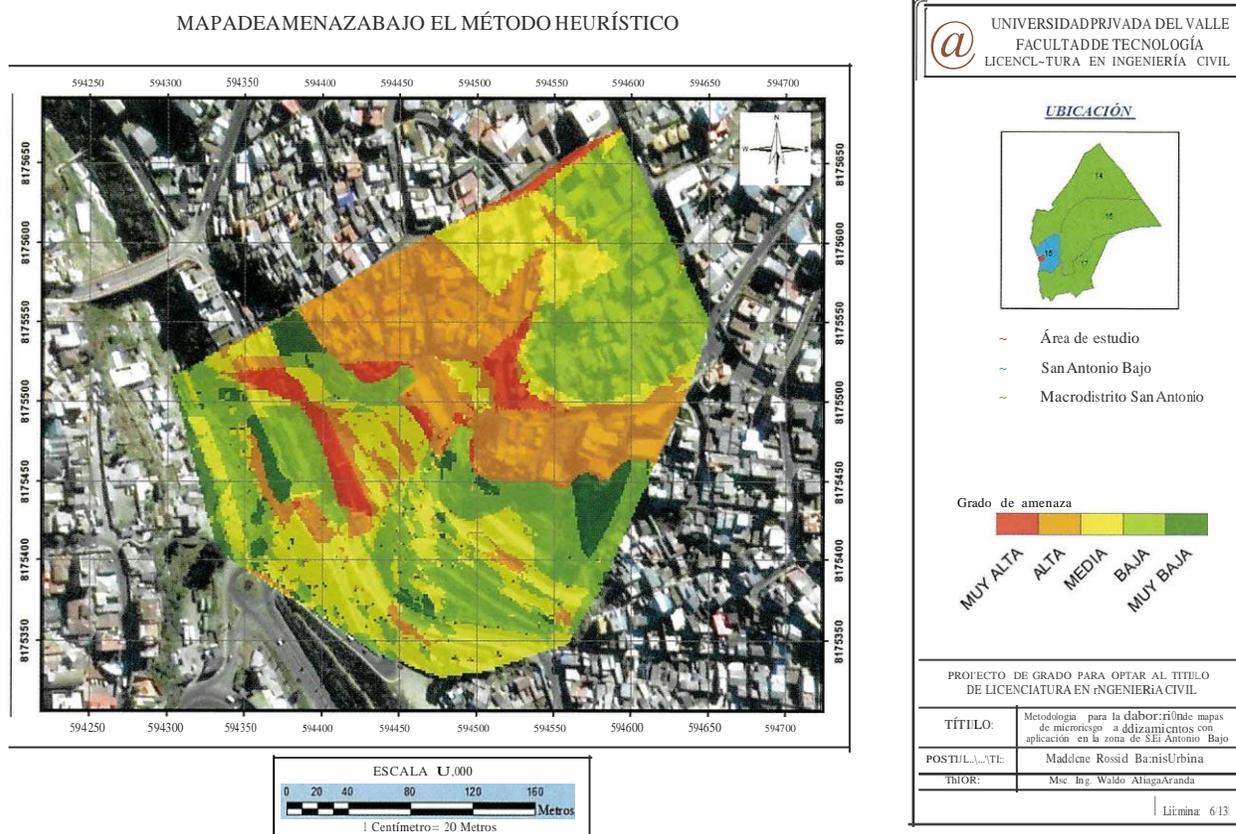
Tabla N°14. Determinación del riesgo

Rango de vulnerabilidad	Grado de Vulnerabilidad	Símbolo
1 - 0,81	Muy alta	
	Alta	

Fuente: Elaboración propia, 2017.

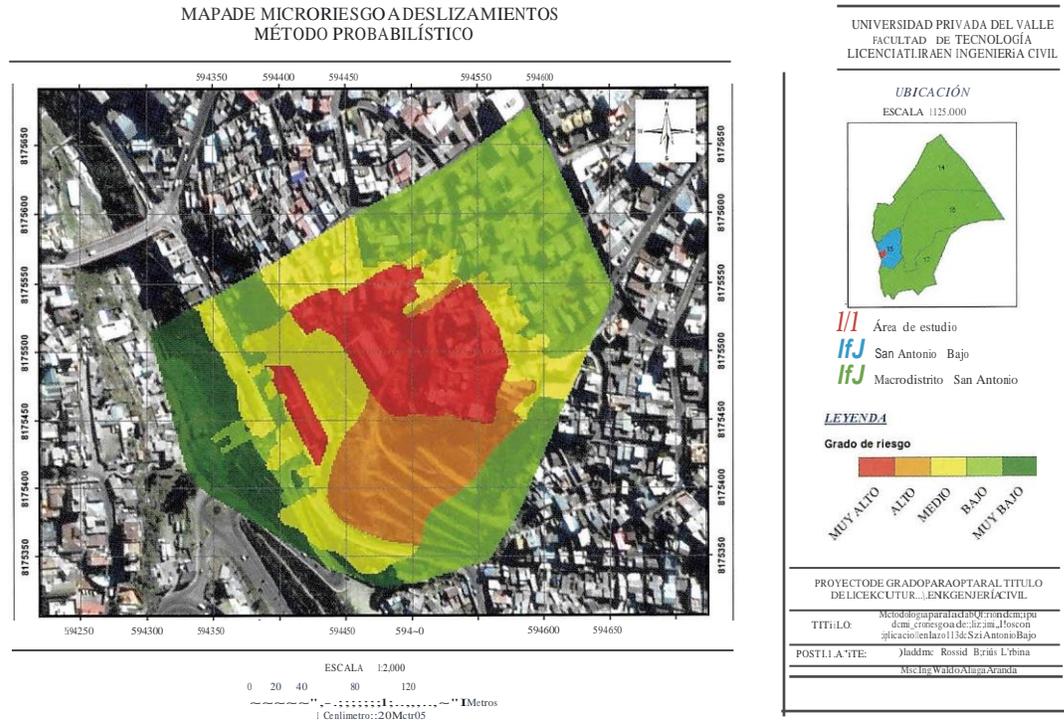
Se obtuvo como resultado final los tres (3) mapas de micro riesgo, para lo cual se combinó los tres mapas de amenaza obtenidos bajo los métodos: heurístico, probabilístico y determinístico con el mapa de vulnerabilidad, llegando a los resultados de mapas de micro riesgos con los diferentes grados, los que se presentan en las Figuras 22, 23 y 24.

Figura N° 22. Mapa de micro riesgo por el método heurístico



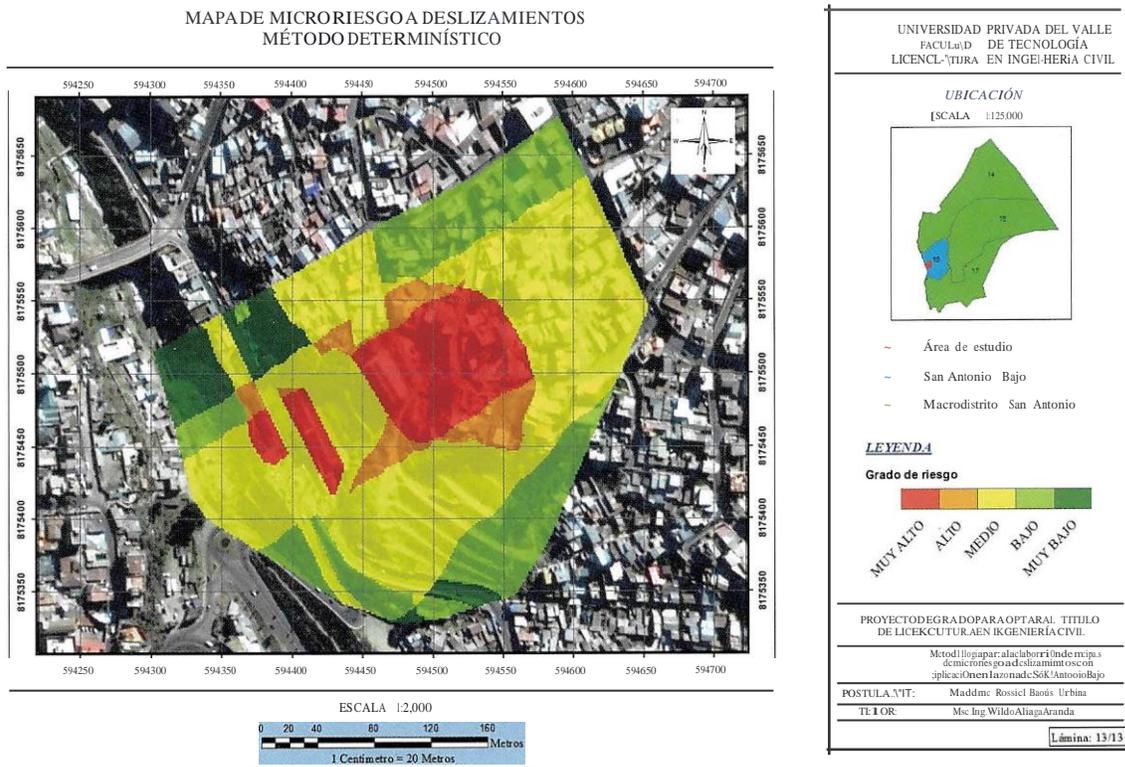
Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

Figura N° 23. Mapa de micro riesgo por el método probabilístico



Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

Figura N° 24. Mapa de micro riesgo por el método determinístico



Fuente: Elaboración propia en ArcMap, 2017.

DISCUSIÓN

La metodología elaborada para el estudio de micro riesgos aplicada al barrio de San Antonio Bajo, se pueden concluir los siguientes aspectos:

1. Se pudo evidenciar el cambio geomorfológico del terreno debido a los asentamientos urbanos, procesos de erosión y deslizamientos que ocurrieron. También se identificó que el escarpe de deslizamiento antiguo es una de las áreas más propensas a deslizarse nuevamente.
2. Se determinaron valores de los parámetros geotécnicos: cohesión y ángulo de fricción de los ocho estratos que conforman el talud, datos indispensables para el estudio, y con el análisis de sensibilidad se pudo determinar que los estratos más influyentes en la estabilidad del talud *son* torrente de barro (Qtb), gravas Miraflores (Qgm) y deslizamiento inactivo (Qd).
3. El efecto antrópico es bastante importante en el análisis de micro riesgos. En los tres métodos, este aspecto fue considerado y se comprobó su consecuencia en los resultados:

En el método heurístico, el área residencial I presenta un peso mayor debido a que representa a las viviendas construidas dentro de una planimetría bastante desordenada y de apariencia clandestina.

- En el método probabilístico, el análisis -considerando el peso de las viviendas- presenta probabilidades de falla más altas, no por el peso de estas, sino por su ubicación.
 - En el método determinístico, se pudo notar un incremento en los esfuerzos de corte y desplazamientos horizontales y verticales en la parte superior del talud debido a las cargas de las viviendas.
4. En base al análisis de vulnerabilidad, se pudieron identificar edificaciones bastante frágiles; este es un reflejo del efecto antrópico, de la irresponsabilidad e inconsciencia de los vecinos, por lo que, si no se reduce la incidencia de este efecto y se construyen más edificaciones de este tipo, se reducirá la estabilidad del sector y se incrementará el riesgo.
 5. No es posible comparar los tres métodos aplicados para la evaluación de la amenaza, se puede observar que los mapas resultantes son bastante diferentes, esto debido a que cada método evalúa la amenaza desde un punto de vista diferente; sin embargo, al combinarlos con el mapa de vulnerabilidad se obtuvieron mapas de micro riesgo bastante similares.
 6. Es necesario crear un reglamento para la elaboración de mapas de riesgo en nuestro país, en el que se establezca la aplicación de una determinada metodología, que permita realizar una prevención y gestión del riesgo más eficiente.
 7. La elaboración de mapas de micro riesgo resulta mucho menos costoso que la reconstrucción y rehabilitación de zonas afectadas (entre 10 a 15 veces menos), lo cual a largo plazo significa una buena inversión del presupuesto que tienen a disposición las instituciones públicas.

Recomendaciones

- Recopilar la mayor cantidad de información posible del sector a estudiar, procurando que los mapas referenciales se presenten máximo en una escala 1:20000.
- Realizar con una programación anticipada, la toma de muestra y ensayos de laboratorio, inspección de aguas subterráneas y visitas de campo en el sector.
- Realizar el análisis de amenazas bajo los tres métodos propuestos: heurístico, probabilístico y determinístico.
- Para aplicar el método determinístico, se recomienda contar con los datos de los parámetros geotécnicos, geometría del talud y nivel freático lo más cercanos y representativos del terreno.

- Implementar en el método determinístico la acción de cargas dinámicas (sismos) para analizar cuánto disminuirían los factores de seguridad.
- Para el área estudiada, el barrio de San Antonio bajo, se recomienda:
- Construir infraestructuras que ayuden a incrementar el factor de seguridad del talud especialmente en el escarpe del deslizamiento antiguo.
Reforzar las construcciones más expuestas y vulnerables
No construir, o construir con bastante precaución, en los sectores identificados como zonas de muy alto riesgo.
- Implementar geosintéticos, como la geomanta de fibra de coco, en los taludes colindantes a la cancha del frontón donde se evidenciaron surcos de erosión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliaga, W., Choque, J. (2003). Una metodología para determinar amenazas a desastres por deslizamientos de suelos. La Paz, Bolivia.
- Braha, M. (2012). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones. (7° Ed.) México DF., México: CENGAGE Learning.
- GMLP. (2006). Atlas del municipio de La Paz, una lectura sociodemográfica desde las organizaciones territoriales de base. La Paz, Bolivia: CODEPO, GMLP, IRD.
- Informe sobre megadeslizamiento en Callapa concluye que se requiere Bs 308 MM para estabilizar zonas afectadas. (2012, 25 de octubre) La Razón, p. 5.
- Mora, S. (2004) La gestión del riesgo, una herramienta para el desarrollo. En: Programa para la gestión del riesgo y prevención de desastres en Bolivia. La Paz, Bolivia.
- Red BIVA-PAD BOLIVIA. {2007}. Conceptos de desastres. Recuperado el 20 de febrero de 2017, www.bivapadbolivia.org.bo
- Servicio Geológico Colombiano, SGC. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga, Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Suárez, J. (2002). Análisis de Estabilidad. Bogotá, Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Varnes, D. {1984}. Landslide hazard zonation a review of principles and practice. París, Francia: UNESCO

Fuentes de financiamiento: Esta investigación fue financiada con fondos de los autores. **Declaración de conflicto de intereses:** Los autores declaran que no tiene ningún conflicto de interés.

Copyright (c) 2019 Madelene ROSSIEL Banús Urbina; Waldo A. Aliaga Aranda



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)