

**Aplicación de métodos Geoestadístico para la evaluación de la estabilidad de un talud en el
Barrio Juan XXIII, zona nororiental del Municipio de Pamplona, Colombia**

Marcelino Maldonado Trigos

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Geotecnia

Director

Wilfredo Del Toro Rodríguez

Magíster en Geotecnia

Codirectores:

Carlos Humberto Flórez Góngora

Magíster En Ingeniería Área Geotecnia

Fidel Antonio Carvajal Suárez

Magíster en Ingeniería Ambiental

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingeniería Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Civil

Maestría en Geotecnia

Bucaramanga

2018

Agradecimientos

A Dios, quien me ha dado la vida, fortaleza y salud para poder realizar este proyecto de grado.

A mi esposa, mis hijas, por el entorno familiar y dedicación al estudio, quienes sin su ayuda y motivación no se hubiesen podido realizar este logro.

A los Ingenieros Carlos Humberto Flórez Góngora y Fidel Antonio Carvajal Suárez, quienes siempre me apoyaron durante la ejecución de todo el proyecto, brindando sus conocimientos, tiempo y apoyo en todo lo que necesitaba.

Al Ing. Eduardo Bolívar, por ser el apoyo fundamental en mis inicios con la geotecnia, un hijo más, a quien se le debe mucho, un gran abrazo.

Al profesor Wilfredo del Toro Rodríguez, quien, con su colaboración y guía, fueron fundamentales para dar por finalizado este proyecto.

A la Universidad de Pamplona, por permitirme cada día más, ahondar en los caminos de la geotecnia.

A los Ingenieros Manuel Contreras, Víctor Verjel, compañeros de trabajo en la Universidad de Pamplona.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo General	20
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2. Marco Teórico.....	21
2.1 Talud	21
2.1.1 Tipos de talud.....	22
2.1.2 Movimientos en masa: Tipos de movimientos en masa	23
2.1.3 Factores y causas de movimientos en masa	24
2.1.4 Estabilidad.....	26
2.1.5 Análisis de estabilidad	31
2.2 Geoestadística	34
2.2.1 Kriging.	35
2.2.2 Montecarlo	38
2.2.3 Interpolaciones estadísticas geográficas	40
3. Descripción del Proyecto	42
3.1 Metodología	42

3.1.1 Clasificación de la información geotécnica	43
3.1.2 Reconocimiento de la zona de estudio.....	43
3.2 Geología.....	48
3.2.1 Evolución Geológica.....	48
3.2.2 Unidades Litoestratigráficas	51
3.2.3 Estructuras geológicas locales	52
3.2.4 Geomorfología	53
3.2.5 Morfometría	53
3.2.6 Sismicidad.....	54
3.3 Exploración Geotécnica	56
3.3.1 Información geotécnica área urbana Pamplona	57
3.4 Aplicación de los métodos geoestadísticos.....	77
3.4.1 Modelo geoestadístico Kriging	77
3.5 Exploración Local Zona de Estudio.....	89
3.5.1 Exploración geofísica.....	89
3.5.2 Perforaciones exploratorias en campo	94
4 Análisis de Estabilidad de Taludes	98
4.1 Análisis Determinístico.....	98
4.2 Análisis Probabilístico	107
4.3 Análisis de Resultados	113
4.3.1 Análisis talud 1	113
4.3.2 Análisis talud 2	114

4.3.3 Análisis talud 3	114
4.3.4 Análisis talud 4	115
5. Conclusiones	115
6. Recomendaciones	117
Referencias Bibliográficas	119

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Metodologías utilizadas en la modelación de taludes</i>	33
Tabla 2. <i>Tipo de pendientes de acuerdo a su inclinación</i>	53
Tabla 3. <i>Coordenadas de los apiques</i>	59
Tabla 4. <i>Resultados de los ensayos de humedad natural, granulometría, límites de Atterberg y clasificación U.S.C.S.</i>	65
Tabla 5. <i>Clasificación de suelos por estratos.</i>	68
Tabla 6. <i>Grado de plasticidad del suelo.</i>	69
Tabla 7. <i>Resultados de los ensayos de corte directo.</i>	72
Tabla 8. <i>Rangos de ángulo de fricción y cohesión.</i>	76
Tabla 9. <i>Resultados estadísticos cohesión</i>	78
Tabla 10. <i>Resultados estadísticos ángulo de fricción</i>	82
Tabla 11. <i>Resultados estadísticos peso específico.</i>	86
Tabla 12. <i>Velocidades de Onda P (Vp)</i>	90
Tabla 13. <i>Caracterización primera línea sísmica</i>	91
Tabla 14. <i>Caracterización segunda línea sísmica.</i>	92
Tabla 15. <i>Caracterización tercera línea sísmica.</i>	93
Tabla 16. <i>Ubicación sondeos exploratorios</i>	94

Tabla 17. *Factores de seguridad* 113

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Mapa de amenaza relativa por fenómeno de remoción en masa en barrios de Pamplona, Norte de Santander.....	17
<i>Figura 2.</i> Diferencias entre resultados de varios métodos.....	32
<i>Figura 3.</i> Fotografías aéreas sector estudio.	45
<i>Figura 4.</i> Modelo digital del terreno 3D sector de estudio.....	46
<i>Figura 5.</i> Modelo digital de superficie 3D sector de estudio.	46
<i>Figura 6.</i> Curvas de Nivel.	47
<i>Figura 7.</i> Zona de estudio.....	48
<i>Figura 8.</i> Esquema tectónico del macizo de Santander.....	49
<i>Figura 9.</i> Esquema geológico para el área de Pamplona.....	52
<i>Figura 10.</i> Mapa de pendientes.	54
<i>Figura 11.</i> Zonas de amenazas sísmicas de Colombia.....	56
<i>Figura 12.</i> Distribución de los apiques en el casco urbano del municipio de Pamplona.	58
<i>Figura 13.</i> Número de estratos por tipo de suelo.....	68
<i>Figura 14.</i> Grado de plasticidad del suelo. A.....	70
<i>Figura 15.</i> Suelos - rangos de plasticidad.....	70
<i>Figura 16.</i> Suelos - rangos de plasticidad.....	71

<i>Figura 17.</i> Histograma de cohesión muestra total	78
<i>Figura 18.</i> Trend Analysis cohesión.....	79
<i>Figura 19.</i> Mapa de cohesión área de estudio	80
<i>Figura 20.</i> Detalle del comportamiento de la cohesión en el barrio Juan XXIII.....	81
<i>Figura 21.</i> Escala cohesión.....	81
<i>Figura 22.</i> Histograma de ángulo de fricción muestra total	82
<i>Figura 23.</i> Trend Analysis ángulo de fricción.....	83
<i>Figura 24.</i> Modelo de ajuste de tendencia en Kriging.....	83
<i>Figura 25.</i> Mapa ángulo de fricción en la zona de estudio.....	84
<i>Figura 26.</i> Detalle comportamiento ángulo de fricción zona de estudio.....	84
<i>Figura 27.</i> Escala ángulo de fricción.....	85
<i>Figura 28.</i> Histograma de peso específico muestra total.....	86
<i>Figura 29.</i> Trend analysis peso específico	87
<i>Figura 30.</i> Mapa peso específico en la zona de estudio	87
<i>Figura 31.</i> Detalle comportamiento peso específico zona de estudio	88
<i>Figura 32.</i> Escala peso específico	88
<i>Figura 33.</i> Sección de tomografía primera línea sísmica.	92
<i>Figura 34.</i> Sección de tomografía segunda línea sísmica.....	93
<i>Figura 35.</i> Sección de tomografía tercera línea sísmica.....	94
<i>Figura 36.</i> Planta ubicación de los sondeos exploratorios..	95
<i>Figura 37.</i> Perfil estratigráfico Talud 1. Método Determinístico.....	99
<i>Figura 38.</i> Método determinístico modelo de estabilidad perfil 1	100
<i>Figura 39.</i> Perfil estratigráfico Talud 2. Método Determinístico.....	101

Figura 40. Método determinístico modelo de estabilidad perfil 2 102

Figura 41. Perfil estratigráfico Talud 3. Método Determinístico 103

Figura 42. Método determinístico modelo de estabilidad perfil 3 104

Figura 43. Perfil estratigráfico Talud 4. Método Determinístico 105

Figura 44. Método determinístico modelo de estabilidad perfil 4 106

Figura 45. Perfil Probabilístico 108

Figura 46. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 1 109

Figura 47. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 2 110

Figura 48. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 3 111

Figura 49. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 4 112

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Archivos en Acad de topografía zona de estudio, y perfiles de análisis de estabilidad

Apéndice B. Ensayos de laboratorio de muestras tomadas en los sondeos exploratorios

Apéndice C Modelos En Slide, de análisis de estabilidad del talud, por métodos determinísticos y probabilísticos

Apéndice D. Perfiles Estratigráficos

Resumen

Título: Aplicación de métodos Geoestadístico para la evaluación de la estabilidad de un talud en el Barrio Juan XXIII, zona nororiental del Municipio de Pamplona, Colombia.**

Autor: Marcelino Maldonado Trigos**

Palabras claves: Geoestadística, Talud, estabilidad, métodos determinísticos, métodos Geoestadísticos, Software ArcGIS, Software Slide.

Descripción

La zona de Pamplona (Norte de Santander) se encuentra expuesta a amenazas constantes por el fenómeno de remoción en masa, principalmente por su topografía montañosa, ser zona de alto riesgo sísmico alto, la ubican con un alto grado de vulnerabilidad, adicionalmente la falta de planificación del suelo.

Ante esta situación y para contribuir a la labor social de la ingeniería civil, se utilizaron referentes científicos para su estudio, el cual permitirá contribuir a la seguridad, bienestar calidad de vida de las personas y del desarrollo sostenible, se recurrió a la utilización de herramientas estadísticas para el análisis de datos y de estudio de fenómenos con correlación espacial, por medio de métodos geoestadísticos, para evaluar los valores de la estabilidad del talud en la zona nororiental del municipio de pamplona (barrio Juan XXIII). El tipo de investigación es aplicada para lo cual se siguieron las siguientes fases: a) Investigación de modelos Geoestadísticos, b.) Reconocimiento de la zona de estudio. c) Descripción geológica Regional y Local d) Implementación del software ArcGIS, aplicando el modelo geoestadístico Kriging e) Modelación del talud aplicando el software Slide.

Como resultado principal, se puede afirmar, que la Geoestadística, es una herramienta de vital importancia en el análisis del suelo, contribuyendo principalmente a disminuir la incertidumbre que presentan los suelos en su análisis. Los métodos geoestadísticos, son una herramienta que debe ser aplicada para el seguimiento y control de las zonas de influencia en la remoción en masa, para la materialización de mapas de riesgos de remoción de masas en zonas urbanas.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas: Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez. Codirectores: Carlos Humberto Flórez Góngora, Fidel Antonio Carvajal Suarez

Abstract

Title: Application of Geostatistical methods for the assessment of the stability of a slope in the Barrio Juan XXIII, northeastern area of the Municipality of Pamplona, Colombia. *

Author: Marcelino Maldonado Trigos**

Keywords: Geostatistics, Slope, stability, deterministic methods, geostatistical methods, Software ArcGIS, Software Slide.

Description

The Pamplona Norte de Santander Zone finds itself exposed to constant threat from the mass removal phenomenon, mainly due to its mountainous topography, since it is a zone of high seismic risk where soil planning has been poor, it has been given the status of "high vulnerability".

In face of this situation and to contribute to Civil Engineering's social labor scientific references were used for the study, this will allow contribution to the safety and wellbeing of the people and sustainable development appealing to the usage of statistic tools for data analysis and spatial correlation studies through geostatistic methods to evaluate the stability of the slope in the northeastern area of the Pamplona municipality (Juan XXIII neighborhood). The type of investigation is applied, the following phases were implemented: a) Investigation of Geostatistic models, b) Study zone reconnaissance, c) Regional geological description, d) ArcGIS Software employment using the Kriging Geostatistic model, e) Slide software application for slope modeling.

Based on the results, the following can be stated: Geostatistics are a tool of paramount importance in the analysis of the soil, contributing mainly to diminish the uncertainty that soils present during analysis. The geostatistical methods are a tool that must be applied to the monitoring and control of the zones of influence in the mass removal, for the materialization of maps of mass removal risks in urban areas.

* Graduation project

** Physical-Mechanical Engineering Faculty: Civil Engineering School. Wilfredo Del Toro Rodríguez. Co-directors: Carlos Humberto Flórez Góngora, Fidel Antonio Carvajal Suarez

Introducción

En la ciudad de Pamplona, donde se desarrollará esta investigación la remoción en masa, es un proceso que se ha vivido en el casco urbano desde hace varios años, evidencia de ellos fue lo reportado el 6 octubre de 2010, en donde una avalancha inundó las calles de la ciudad afectando al Colegio Brighton.

La topografía de Pamplona, en su zona urbana, está planteada en una zona montañosa, con una densidad poblacional alta, incrementada por la alta presencia de estudiantes en la Universidad de Pamplona, oriundos de diversas regiones del país, que crean la necesidad de habitación y por ende se generan las nuevas construcciones en la mayoría de los casos a procesos de construcción no planeadas

Hrrod (Citado por Suárez, 2009), quien retoma el autor en su concepto de deslizamientos de tierras, menciona que es uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades, por valor de decenas de billones de dólares cada año.

Una investigación realizada en la ciudad de Pamplona en el año 2013, menciona que 24% del área urbana posee pendientes superiores a 17° , que aumentan la posibilidad de ocurrencia de algún tipo de remoción en masa (Rodríguez & Quintana, 2013, pág. 119). En el casco urbano de Pamplona por sus características presenta serias amenazas por erosión, alta vulnerabilidad y al estar localizado en una zona de alta riesgo sísmico, riesgo de remoción en masa, la cual es más evidente en la zona Nororiental de Pamplona, representada en la siguiente figura 1.

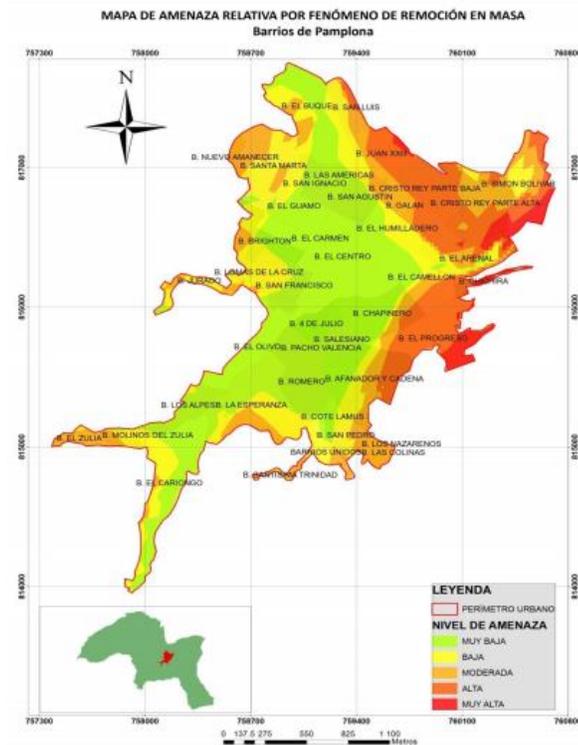


Figura 1. Mapa de amenaza relativa por fenómeno de remoción en masa en barrios de Pamplona, Norte de Santander. Adaptado de Universidad de Pamplona. (2013).

El Plan de ordenamiento territorial actual del municipio de Pamplona, está enmarcada en la ley 388 de 1997, y fue adoptado en el año 2002, fecha en la cual se planteó adoptar el Plan Básico actual de Ordenamiento Territorial del Municipio de Pamplona 2002-2011. Considerando que a partir de la ley 1523 de 2012, “Ley de gestión del riesgo de desastre”, plantea los lineamientos para estudios de riesgo por movimiento en masa a escala detallada o local, que se puede aplicar en la mayoría de las cabeceras municipales y centros poblados pequeños y medianos de Colombia, es decir, dentro de las categorías 5 y 6 y de acuerdo con las leyes 136 de 1994 y 1551 de 2012, se debe incorporar la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial de los municipios, se formalizo mediante decreto 1807 del 19 de septiembre de 2014 y con la resolución 1907 de

2016 “Gestión del riesgo en los planes de ordenación y manejo de cuencas”, hay que actualizar los POT (Planes de Ordenamiento Territorial) (Ministerio de Minas y Servicio Geológico Colombiano., 2015). El municipio de Pamplona no cuenta con un Plan de Ordenamiento actualizado y menos un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa actualizado.

Desde la ingeniería civil, se trata de buscar soluciones a las problemáticas que surgen en las comunidades, por esta razón, y en cumplimiento de la responsabilidad social que atañe a la profesión, se evaluó la estabilidad de un talud, caso de estudio, talud en el barrio Juan XXIII, zona nororiental del municipio de Pamplona, Colombia, que busca generar seguridad en el bienestar de la población para predecir futuros desastres, lo cual es una demanda desde las políticas de gestión del riesgo, actualmente (Ley 1523 de 2012). De igual manera esta investigación servirá de insumo teórico a nuevas investigaciones en otras zonas del municipio de Pamplona, así como modelo referencial para investigaciones en las universidades de la región.

Para evaluar la estabilidad del talud, se recurrió a la realización de esta investigación de tipo aplicada, en la cual se analizaron modelos geoestadísticos, para los cuales se realizó un exhaustivo reconocimiento de la zona de estudio y su descripción geológica, acudiéndose a la utilización de dos softwares ArcGIS, aplicando el modelo geoestadístico Kriging para llegar finalmente en la modelación del talud, aplicando el software Slide (Rocsience).

Como menciona Gerscovich (2015), que debido a las críticas de los últimos años al enfoque determinístico, se sugiere que los estudios de estabilidad, incorporen un tratamiento estadístico, para la representación de las incertidumbres, derivadas de un número limitado de muestras y de la variabilidad de los parámetros geotécnicos, determinados en ensayos de campo o laboratorio.

Para concluir, se encuentra que los modelos geoestadísticos, ayudan a delimitar y obtener una buena predicción del comportamiento de los suelos, eliminando en parte la incertidumbre y permitiendo predecir con mayor certeza su comportamiento final.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la estabilidad de un talud, partiendo de datos obtenidos por métodos determinísticos y probabilísticos, caso de estudio, talud en el barrio Juan XXIII, zona nororiental del municipio de Pamplona, Colombia.

1.2 Objetivos Específicos

- Clasificar la información geotécnica producto de estudios y labores académicas, y estudios realizados por terceros, exploraciones propias; para adelantar proyectos de construcción, en la zona urbana del Municipio de Pamplona.
- Aplicación de los métodos geoestadísticos y probabilísticos, a la información geotécnica recolectada para establecer las condiciones de la zona de estudio, y predecir los comportamientos.
- Realizar exploración en la zona de estudio, para la obtención de los parámetros del suelo.
- Determinar la estabilidad del Talud en la zona de estudio, aplicando métodos de equilibrio límite y probabilísticos, con base en la información obtenida.

2. Marco Teórico

En el siguiente capítulo, se tratarán terminologías fundamentales que apoyan el desarrollo de la investigación denominada, “*Evaluación de la estabilidad de un talud, usando métodos geoestadísticos, en el Barrio Juan XXIII, zona nororiental del Municipio de Pamplona, Colombia*”. Se comenzará con el análisis de los taludes y su comportamiento y seguidamente, se tratará el tema de geoestadística, métodos a utilizar y software de aplicación.

2.1 Talud

Se entiende por talud cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de las tierras De Matteis (2003) “*El talud constituye una estructura compleja de analizar, debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas*” (p.3). Para Suárez (1998):

Un talud o ladera es una masa que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativa. En la literatura técnica se define como ladera, cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente. (p.3)

Juárez (1993) menciona que:

Un talud es cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra, bien sea en forma natural o como consecuencia de la

intervención humana en una obra de ingeniería. Desde este punto de vista los taludes se dividen en naturales (laderas) o artificiales (cortes y terraplenes). (p.255)

En su libro Gerscovich (2015), explica que el *“Talud es una denominación que se da a cualquier superficie inclinada de suelo o de un macizo rocoso. Puede ser natural también llamado ladera, o construido por el hombre, como en los cortes y terraplenes”* (p.1).

2.1.1 Tipos de talud. Suárez (1998). Agrupa los taludes en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención, al igual menciona, que se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas (p.3). Entre tanto, De Matteis (2003), señala que cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según la génesis de su formación en corte, se realiza una excavación en una formación terrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados de los terraplenes.

Gerscovich (2015) Clasifica los taludes de la siguiente forma:

Taludes construidos; son los que resultan de cortes en laderas u otras excavaciones y de la construcción de terraplenes. Los cortes deben ejecutarse con altura de inclinación adecuada, para garantizar la estabilidad de la obra. Taludes naturales o laderas: pueden estar constituidos por suelo residual, coluviones o rocas; los suelos residuales, permanecen en el sitio que fueron formados por meteorización de las rocas, en tanto que los coluviones, son el resultado del transporte de suelos y rocas por acción de la gravedad. (p.3)

Cuando se estudia las roturas de ladera, es necesario identificar y caracterizar los distintos tipos de comportamiento de los taludes y su clasificación, esto con el fin, de hacer la selección apropiada de las medidas de contención y estabilización de los taludes y laderas, que van a depender del conocimiento del tipo de mecanismo actuante, su velocidad y dimensiones. Una errónea valoración del mecanismo de rotura, tal vez pueda tener como consecuencia que los medios adoptados para estabilizarla sean ineficaces y a veces, equivocados.

2.1.2 Movimientos en masa: Tipos de movimientos en masa. Gerscovich (2015) define el movimiento en masa (o de remoción en masa), cualquier deslizamiento de un volumen determinado de suelo. *“Se habla de movimiento en masa, como procesos asociados con problemas de inestabilidad de laderas”* (p.1). Varnes (1978), clasificó a los movimientos de masas como: *“Caído, volcamientos (volteo), deslizamiento, propagación lateral y deslizamiento complejo”* (p.176).

Caído *“Es el desprendimiento y caída de materiales de talud. Los caídos pueden incluir desde suelos y partículas relativamente pequeñas hasta bloques de varios metros cúbicos, Estos desplazamientos se producen principalmente por caída libre, a saltos o rodando”* (Suárez, 1998, pág. 8)

- **Inclinación o Volcamiento:**

Este tipo de movimiento, consiste en una rotación hacia delante de una unidad o unidades de material térreo, con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad. Los volcamientos ocurren en las formaciones rocosas, pero también en suelos cohesivos secos o en

suelos residuales. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes grandes hasta de varios millones de metros cúbicos. (Ibis, 1998, p.11)

- Deslizamiento (“Landslides):

Son movimientos de masas de roca, residuos o tierra, hacia abajo del talud incluye los procesos de erosión como los procesos denudacionales. Los fenómenos de inestabilidad incluyen generalmente, una combinación de procesos erosionales y denudacionales interrelacionados entre si y a menudo mezclados. (Cruden, 1991, p. 14)

- Propagación lateral:

Son los movimientos con componentes, principalmente laterales, en taludes de baja pendiente. Las extensiones laterales ocurren comúnmente en las masas de rocas, sobre suelos plásticos o finos, tales como arcillas y limos sensitivos que pierden gran parte de su resistencia al remodelarse. Los mecanismos de falla pueden incluir elementos de traslación, o de flujo sobre materiales plásticos. (Ibis, p. 17)

- Deslizamiento complejo:

Se definen como deslizamientos complejos, aquellos que incluyen varios tipos de movimientos, el cual adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro, a medida que progresa el fenómeno de desintegración: es así como una inclinación puede terminar en una caída o en un deslizamiento en flujo. (Ibis, p.27)

2.1.3 Factores y causas de movimientos en masa. Los movimientos de masas de terrenos están dados por un conjunto de variables topográficas, geológicas, ambientales y antrópicas. Entre los factores se tiene factores inherentes, que son la estructura geológica de los materiales, el fuljo

del agua; también están los factores externos de tipo natural cambios en la condición de los materiales, la influencia directa o indirecta de la lluvia, la humedad del suelo entre otros y los actores externos de tipo antrópico, que viene a ser intervención del hombre por acciones tales como: la deforestación y el incorrecto manejo del suelo, las recargas, y el impropio manejo de las aguas en vertimientos y drenajes.

Hidalgo (2011, pág. 17) Menciona que:

Los agentes predisponentes a los taludes pueden ser las características, geomorfológicas, topografía, el calor solar, el tipo de vegetación, las condiciones climáticas, la gravedad, la hidrografía Suarez explica que “los taludes que han permanecido estables por años pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de aguas subterránea, a los cambios de resistencia de los suelos, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad” otro factor importantes es la erosión que es una reacción antrópica relacionada a taludes por la pérdida de suelos y sus capas superficiales la erosión se puede dividir de acuerdo al agente disparador como lo es los flujos de agua superficial que forma cárcavas y aguas subterráneas que forma cavernas. (p.4)

En este sentido se tiene que presentar procesos internos y externos para que se produzca la erosión, así lo explica Gerscovich (2015) en la tabla 2 Factores condicionantes en el proceso erosivo.

Entre los factores externos se tiene: Potencial de erosividad de la lluvia, condiciones de infiltración, escorrentía superficial y topografía (pendiente y longitud del talud).

Entre los factores internos se tiene: flujo interno, tipo de suelo, desagregabilidad, erodabilidad, características geológicas y geomorfológicas, presencia de fallas o fracturas de origen tectónico y evolución físico-química y mineralógica del suelo.

En este sentido los movimientos de masa, están gobernados por la ecuación de esfuerzo y resistencia al cortante tangencial, el autor Coulomb (1773) establece que un material falla cuando el esfuerzo cortante en una dirección iguala la resistencia al cortante en la misma dirección, lo cual depende de la cohesión y la fricción interna entre los granos del suelo y está dada por la ecuación de Mohr-Coulomb $\tau = c + \sigma' n \tan \phi$, que significa τ es el esfuerzo cortante o resistencia al cortante tangencial, c es la cohesión aparente del suelo, $\sigma' n$ es el esfuerzo normal sobre un plano crítico, $\tan \phi$ es el coeficiente de fricción y ϕ es el ángulo de fricción interna del suelo.

2.1.4 Estabilidad. De Matteis (2003) “*entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento*” (p, 4). Los problemas que se presentan decisivamente en las condiciones de estabilidad están relacionados con la historia y la génesis de formación de laderas y taludes, la historia de los esfuerzos a que estuvieron sometidas, y las condiciones climática, y ambientales, lo que define los aspectos como configuración de suelos y las rocas, o el flujo de aguas subterráneas a través de los suelos que forman la ladera o talud.

Ahora bien, partiendo de los parámetros estructurales del suelo, permiten determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud, que admitan soportar los esfuerzos de cortante, que tienden a causar la falla o deslizamiento.

Cuando se estudia las roturas de ladera, es necesario identificar caracterizar los distintos tipos de comportamiento y clasificarlos adecuadamente esto con el fin de la selección apropiada de las medidas de contención y estabilización de los taludes y laderas que van a depender del conocimiento del tipo de mecanismo actuante, su velocidad y dimensiones. Una errónea valoración del mecanismo de rotura, tal vez pueda tener como consecuencia que los medios adoptados para estabilizarla sean ineficaces, y a veces, equivocados.

2.1.4.1 Conceptos básicos de estabilidad: Esfuerzos: Gercovich (2015) Cualquier punto en el interior de la masa de suelo está sometido a esfuerzos en razón de su peso propio y a los generados por la acción de fuerzas externas. Esos esfuerzos pueden definirse mediante las resultantes de las fuerzas que actúan en las direcciones normales y tangenciales a partir de las cuales se obtienen los estados de esfuerzos normales (σ) y cortante (τ).

- Equilibrio bidimensional: Según Gercovich (2015);

Muchas obras geotécnicas se pueden tratar en términos bidimensionales como por ejemplo los proyectos de muros de contención se realizan admitiendo que las deformaciones ocurren básicamente en el plano ortogonal a la cara del muro, pues la deformación en la dirección longitudinal del muro es despreciable. (p. 37)

- Deformaciones; Gercovich (2015):

La deformación de un elemento del suelo se origina por variaciones tanto de los esfuerzos normales como de los esfuerzos cortantes. Las deformaciones originadas exclusivamente por esfuerzos normales se definen mediante las relaciones entre los cambios de volúmenes y el volumen inicial. La suma de las deformaciones normales define la deformación volumétrica. (p. 42)

- Comportamientos esfuerzo-deformación. Gercovich (2015):

En los suelos las relaciones esfuerzo-deformación no son lineales. Los módulos de elasticidad o de deformabilidad, o módulo de Young, que caracteriza la inclinación de la curva, varían en función del nivel del esfuerzo y de la trayectoria de estos. (p. 44)

- Esfuerzos en suelos: Gercovich (2015):

El suelo es un sistema trifásico constituido por sólidos, agua y aire; parte de los esfuerzos los transmiten los granos (partículas sólidas del suelo) y parte del agua, según las condiciones de saturación. En suelos secos, todos los esfuerzos los transmiten las partículas sólidas. Para determinar el estado de esfuerzos, es necesario conocer no solo los esfuerzos, sino también el área considerada, en la cual se transmiten esos esfuerzos; dicha área debería pasar por los puntos de contacto entre las partículas sólidas, pero este enfoque se vuelve inviable, ante la variabilidad del tamaño de los granos y de los arreglos estructurales de estos. (p. 49)

- Agua en el suelo Gerscovich (2015):

El agua en el suelo se origina en diversas formas y es uno de los factores con mayor influencia en la estabilidad de los taludes. La presión del agua puede ser positiva o negativa y variar según la existencia o inexistencia del flujo (movimiento del agua a través del suelo). (p. 62)

El estudio de estabilidad de taludes tiene diversas disciplinas como la geotecnia, la geología, y la hidrología y se fundamenta en la combinación de dos tipos de fuerzas estabilizantes o resistentes (resistencia al corte del material) y fuerzas desestabilizantes o movilizantes. La estabilidad de los taludes va a depender si es natural o artificial (esta último elaborado por la mano del hombre). Del mismo modo la gravedad hace que se relacione el peso de los materiales que conforman el talud y la distribución de los mismos; también influyen las fuerzas internas de los materiales que conforman el talud; la cohesión y la fricción van a determinar la resistencia intrínseca de los materiales que componen el talud. Finalmente, el agua tiene efectos devastadores en la estabilidad de los taludes pues va a reducir la resistencia de los terrenos. Provocando los deslizamientos, produciendo entre otros una fuerte erosión, y alteración en los materiales geológicos del terreno.

Los factores que influyen en la estabilidad de los taludes son: condiciones del terreno, procesos geomorfológicos, procesos físicos, procesos humanos, por lo que la estabilización busca dar resistencia a los suelos para soportar las diversas cargas asegurando un tiempo de vida en el tiempo perdurable, su resistencia al corte se debe a la cohesión y la fricción interna, en este sentido Márquez (2005) explica:

Que por fricción interna se entiende, a la porción de la resistencia al corte de un suelo, producida por el frotamiento de sus partículas entre sí, la cohesión es la otra porción de resistencia al corte, originado por la atracción de las partículas entre sí. (p.5)

En este orden de ideas, el factor de seguridad contra la falla de un talud, según Suárez (1998), se asume es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de la falla, por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie de la falla. El termino superficie de la falla, se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o rotura del talud, situación que no ocurre, si el talud es diseñado adecuadamente.

2.1.4.2 Esfuerzos y deformaciones: En este apartado se devela la descripción del comportamiento de depósitos de suelo, depende del grado de fragmentación de la fase sólida del material a la escala del análisis, cuando es sometido a la acción de fuerzas externas, sumado el efecto del agua, por lo que se han definido los límites de consistencia y las relaciones del suelo compuesta por sólidos, agua y aire. Los límites son importantes pues es importante para clasificar suelos, además los cambios de volumen por la variación de humedad en el suelo, frecuentes en taludes conformados por suelos arcillosos afectados por el calor y el viento, acarrear problemas de estabilidad.

En la mecánica de suelos, se utilizan términos bajo la hipótesis de medios continuos alterables. Por lo que, Saenz (2010) expresa, “*En dichas condiciones, las características del comportamiento microscópico pueden ser estimadas a partir de curvas de esfuerzo y deformación obtenidas de ensayos mecánicos*” (p.28).

2.1.4.3 Propiedades mecánicas de los suelos: Estas propiedades permiten al ingeniero fundamentar sus cálculos de la obra, en relación a factores que afectan el terreno, como son la estabilidad, los límites de servicios que trata de los hundimientos y el flujo del agua.

En este sentido, para enfrentar los problemas anteriores, se utilizan parámetros como son permeabilidad, deformabilidad, resistencia y propiedades dinámicas en pruebas de laboratorio.

Se pueden reconocer en los suelos tres tipos básicos de comportamiento mecánico esfuerzo-deformación los cuales son: el comportamiento elástico, el plástico y viscoso.

Según Rivera (2004), existen dos maneras que se deforman los suelos: a) Por compresibilidad hay cambios de volumen sin cambios de forma en la masa del suelo, aplica a suelos finos saturados. b) Por deformabilidad, cuando hay cambios de forma y en menos medida cambios de volumen, se aplica a suelos gruesos.

Al experimentar los fenómenos de inestabilidades de taludes, se debe identificar y describir los tipos de comportamiento y su clasificación. El análisis del tipo de rotura, permite optimizar las medidas de contención y estabilización de taludes y laderas, deben atender al mecanismo actuante, la velocidad y las dimensiones; una inexacta definición del mecanismo de rotura puede provocar soluciones incorrectas o ineficaces, y desacertadas.

2.1.5 Análisis de estabilidad. En la ingeniería es importante la estabilidad de un talud fundamentada en un Factor de seguridad (FS), derivado de un análisis matemático de estabilidad. Lo que deriva en modelos, para los cuales se debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad del terreno el cual permite la toma de decisiones. En el caso de los taludes, su análisis es un problema de la ingeniería mecánica, se fundamenta en los principios del equilibrio límite, es más común estudiar desde el punto de vista económico la estabilidad de los taludes por el método probabilístico, dada la importancia de este factor de análisis. La fuerza desestabilizadora más importante será el peso de la masa deslizante, a la cual se le suman otras fuerzas, como las sobrecargas de estructuras o el empuje del agua en las grietas. La principal fuerza estabilizadora será la resistencia de corte del terreno en la superficie de deslizamiento.

2.1.5.1 Métodos de estabilidad: Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos de cálculo con modelos numéricos o métodos de equilibrio límite. Existen métodos convencionales de análisis de estabilidad de taludes, a continuación, se nombran los más importantes o de mayor uso. Entre los modelos está el factor determinístico como señala Kerguelen (2009) *“los diseños de ingeniería nos dan una idea básica sobre las propiedades físicas y funcionales de un sistema, de tal manera, que cumplan con los comportamientos esperados de nivel de seguridad, servicio y durabilidad”* (p.12).

En la Figura 2, se aprecian las diferentes metodologías para la modelación de los taludes, *“la cantidad de métodos que se utilizan, dan resultados diferentes, y en ocasiones contradictorios, los cuales son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad”*. (Suárez, 1998, pág. 158)

Según, Suárez (1998), los más utilizados por los ingenieros geotécnicos del mundo, son el simplificado de Bishop y los métodos precisos de Morgenstern, y Price y Spencer, Figura 2.

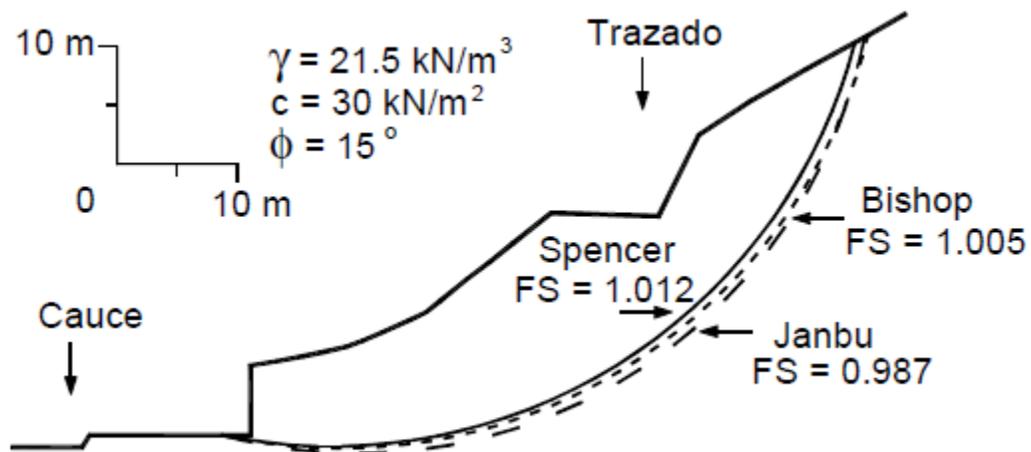


Figura 2. Diferencias entre resultados de varios métodos. Adaptado de Suárez, J. (1998). Deslizamientos estabilidad de taludes en zonas tropicales, Ingeniería de Suelos Ltda. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. p. 157

Según Suárez (1998) los factores de seguridad determinados por el método de Bishop difieren aproximadamente un 5% con respecto a soluciones más precisas.

Tabla 1.

Metodologías utilizadas en la modelación de taludes

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Nota: Adaptado de Suárez, J. (1998). Deslizamientos estabilidad de taludes en zonas tropicales, Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. p. 129

2.2 Geoestadística

“La Geoestadística ha incrementado su uso en el estudio de los taludes, surge una nueva estadística ambientada en estos métodos, la cual es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales”. (Journel & Huijbregts, 1978, p. 17).

Según Journel & Huijbregts (1978), su interés primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos. Es una herramienta de las más usadas. *“Es la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales”* (p.69). Por lo que la cantidad de datos geológicos recolectados sobre los análisis de la estabilidad de los taludes, requiere su sistematización a través de mecanismos de análisis como es la geoestadística.

En este orden de ideas, la aplicación de las probabilidades y la estadística en ingeniería geotécnica, han logrado resolver problemas de incertidumbre y riesgo asociado a determinados tipos de falla, sin embargo, en una simulación estadística es difícil representar todas las variables asociadas.

En este trabajo, se realizará una simulación empleando el método de Kriging, como una herramienta muy útil cuando se desea información en zonas no muestreadas, aspecto que sería imposible efectuar sin una simulación estadística por todas las variables aleatorias que intervienen en un problema de análisis y diseño geotécnico Oliver (1990). Posteriormente, cuando se esté haciendo el análisis de estabilidad, luego de hacer el análisis determinístico, se evalúa por métodos geoestadísticos, aplicando el método de Montecarlo.

Del mismo modo Ledezma (2009) plantea que:

Los métodos de simulación son necesarios, cuando se requiere realizar un análisis probabilístico de una función de estado límite con muchas variables aleatorias implícitas. Para esto, es necesario conocer las propiedades estadísticas de cada una de las variables, sus medidas de tendencia central, así como sus varianzas, y si es posible su tercer y cuarto momento, para determinar a cuál distribución de probabilidad se ajusta. (p. 56)

Igualmente, en la parte de conclusión, manifiesta que el método Kriging es una herramienta muy útil cuando se desea determinar la probabilidad de falla de un sistema geotécnico, aspecto que sería imposible efectuar sin una simulación estadística por todas las variables aleatorias que intervienen en un problema de análisis y diseño geotécnico. Finalmente, los procesos y análisis en geotecnia están altamente cargados de incertidumbre y existen muchas fuentes que la generan.

2.2.1 Kriging. La palabra Kriging, procede del nombre del geólogo sudafricano D.G. Krige, cuyos trabajos de predicción de reservas de oro, en la década del cincuenta, puede considerarse como los pioneros en los métodos de interpolación espacial. Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. (Giraldo, 2014, pág. 32)

Zuvala, Firosova, Marek & Lukas, (2015), mencionan que el método Kriging es una de las interpolaciones geoestadísticas que se utilizan para el modelo espacial. El término incluye una variedad de interpolaciones técnicas, cuyo objetivo es encontrar un lineal óptimo de predicción. Desde el punto de vista estadístico, Kriging ofrece las mejores estimadores insesgados lineales.

Kriging es un método de inferencia espacial, el cual nos permite estimar valores de una variable en lugares no muestreados, utilizando la información proporcionada por la muestra. (Porras, 2017).

Así los métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como Kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos; es una técnica de estadística geográfica que no solo tiene la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporciona alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Del mismo modo, de Ledesma (2009) se plantea que: los métodos de simulación son necesarios cuando se requiere realizar un análisis probabilístico de una función de estado límite con muchas variables aleatorias implícitas. Para esto es necesario conocer información estadística de cada una de las variables, sus medidas de tendencia central, así como sus varianzas, y si es posible su tercer y cuarto momento para determinar a cuál distribución de probabilidad se ajusta. Oliver (1990).

En general y como una primera aproximación, las fuentes de incertidumbre en geotecnia se han clasificado en incertidumbre de los datos y de los modelos. Otros autores como Baecher y Christian, clasifican la incertidumbre en la ingeniería geotecnia en tres grandes categorías: variabilidad natural, incertidumbre epistémica e incertidumbre en los modelos de decisión. (Oliver, Kriging: a method of interpolation for Geographical Information Systems., 1990).

Ahora bien, con este método se pretende crear un mapa de la superficie de predicción en el que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos: es necesario realizar dos tareas: Descubrir las reglas de dependencia, y realizar las predicciones.

$$Z(u) = \sum_{i=1}^{n(u)} \lambda_i Z(u_i)$$

Donde:

Z_{u_i} = el valor es medido en la ubicación i

λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

u = la ubicación de la predicción

n = la cantidad de valores medidos

A fin de completar estas dos tareas, Kriging atraviesa un proceso de dos pasos: 1.- Crea los variogramas y las funciones de covarianza para calcular los valores de dependencia estadística (denominada autocorrelación espacial), que dependen del modelo de autocorrelación (ajustar un modelo). 2.- Prevé los valores desconocidos (hacer una predicción), Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie.

Es por ello que la herramienta Kriging concuerda una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos.

Kriging, abarca una serie de métodos, entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Kriging Simple: asume que las medias locales son relativamente constantes y de valor muy semejante a la media de la población que es conocida. La media de la población es utilizada para

cada estimación local, en conjunto con los puntos vecinos establecidos como necesarios para la estimación.

- **Kriging Ordinario:** las medias locales no son necesariamente próximas de la media de la población, usándose apenas los puntos vecinos para la estimación. Es el método más ampliamente utilizado en los problemas ambientales.
- **Cokriging:** es una extensión de las situaciones anteriores en las que dos o más variables tienen una dependencia espacial y esa variable se estima que no se muestra con la intensidad con la que otros son variables dependientes, con estos valores y sus dependencias para estimar la variable requiere.

En el presente trabajo la herramienta de modelación Kriging, se utilizará por medio del software de ArcGis y la aplicación ArcMap, el cual permite evaluar la información suministrada, de acuerdo a los diversos modelos de Kriging.

2.2.2 Montecarlo. La simulación de Montecarlo, es un procedimiento que analiza la distribución de variables aleatorias, usando simulación de números aleatorios, esta simulación es aplicable dependiendo del tipo de problema ya sea, que su aleatoriedad sea estocástica o determinística.

Cuando se habla de estocástico se entiende por datos probabilísticos, no se conoce el resultado esperado, si no su probabilidad y existe por tanto incertidumbre.

En consecuencia, hablar de datos determinísticos, es cuando se conoce de manera puntual la forma del resultado, no hay incertidumbre en los datos, además los datos para alimentar el modelo son completamente conocidos y determinados.

La simulación de Montecarlo, es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio), con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorio y automatizar los cálculos; cuando se habla de pseudo-aleatorio, se entiende por números generados por un algoritmo completamente determinista.

Rodríguez (2011) *“El método Montecarlo permite resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias”* (p.6). Gonzales (2015) *“la técnica de la Simulación de Montecarlo es una herramienta que sirve para la identificación de la incertidumbre mediante el uso de variables aleatorias”*.

Erick (2016) Las etapas principales del Monte Carlo son las siguientes:

- Programar el proyecto, identificando la variable aleatoria a estudiar
- Generar un número lo más aleatorio posible uniforme entre 0 y 1
- Asociar este número aleatorio uniforme a un valor de los parámetros del modelo (rendimiento), usando las distribuciones acumulativas asociadas a dichos parámetros.
- Iterar un número de veces importante para obtener una distribución confiable de los resultados.

La principal ventaja del método, no es un valor único, sino, una distribución de probabilidades de los resultados para cada nivel de confianza requerido, la principal desventaja del método es la cantidad y calidad de los datos necesarios para correr el modelo. Se necesita una gran cantidad de registros para realizar una simulación aceptable y muchas veces estos datos no existen, o no se tiene acceso a ellos. Generalmente en obras, se controlan otras variables que las que se procesan en los estudios.

Illana (2013), “*más técnicamente, un Monte Carlo es un proceso estocástico numérico, es decir, una secuencia de estados cuya evolución viene determinada por sucesos aleatorios*”.

En el presente trabajo la simulación de Montecarlo, se aplicará apoyado en el programa de modelación de taludes Slide, el cual considera entre sus análisis el análisis de estabilidad de un talud, además de los diferentes métodos determinísticos, el análisis por métodos estadísticos.

Para hacer el análisis por método de Montecarlo en Slide, se debe definir una variación probabilística de los parámetros estructurales del suelo, se debe conocer la desviación estándar que presenta cada uno de éstos. Estas, serán proporcionadas por la proyección de comportamiento que la herramienta Kriging, realiza.

Como resultado final, el talud será evaluado por métodos determinísticos y probabilísticos, como una herramienta que ayude en la incertidumbre del suelo.

2.2.3 Interpolaciones estadísticas geográficas. En el presente trabajo se va a utilizar la herramienta ArcGis, programa que presenta una amplia posibilidad con el análisis espacial de datos, en especial el módulo Geostatistical Analyst, herramienta que permite realización de análisis geoestadístico, partiendo del análisis exploratorio de los datos hasta su presentación espacial.

La geoestadística, es una clase de estadística utilizada para analizar y predecir los valores asociados con fenómenos espaciales o espaciotemporales, incorpora las coordenadas espaciales (y en algunos casos temporales) de los datos dentro de los análisis.

Muchas herramientas geoestadísticas se desarrollaron originalmente como un medio práctico para describir patrones espaciales e interpolar valores para ubicaciones donde no se tomaron muestras. Esas herramientas y métodos han evolucionado desde entonces no solo para proporcionar valores interpolados, sino también medidas de incertidumbre para esos valores.

La medición de la incertidumbre, es crítica para la toma de decisiones informada, ya que proporciona información sobre los posibles valores (resultados) para cada ubicación en lugar de solo un valor interpolado.

El análisis geoestadístico también ha evolucionado de uní a multivariable y ofrece mecanismos para incorporar conjuntos de datos secundarios, que complementan una variable primaria (posiblemente dispersa) de interés, lo que permite la construcción de modelos más precisos de interpolación e incertidumbre.

La interpolación de la información, se hace generando una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con valores “z”. A partir de estos datos genera una investigación interactiva, del comportamiento espacial del fenómeno, representado por los valores “z”, antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida.

La interpolación predice valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Puede utilizarse para prever valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas y niveles de ruido.

La presentación de los resultados, es determinado por la tendencia, la cual utiliza funciones polinómicas, que se ajusta a los puntos de la muestra de entrada, a partir de ahí, se genera la interpolación de los datos en las zonas no muestreadas.

En el presente trabajo, se obtendrá la predicción geoestadística, con base en las exploraciones geotécnicas realizadas en diferentes sitios del área urbana de Pamplona. Esta información de predicción y que se presentará en los planos de comportamiento, servirá para alimentar las desviaciones estándar requeridas en el proceso de modelación del talud y servirán de referente para evaluar el factor de estabilidad.

3. Descripción del Proyecto

El presente proyecto, plantea la evaluación de la estabilidad de un talud, en el barrio Juan XXIII, de la ciudad de Pamplona por métodos estocásticos y determinísticos.

Para tener una mayor certeza de aplicación de los métodos estocásticos, en la modelación del talud, se partirá de una base de datos de los laboratorios realizados principalmente en la Universidad de Pamplona, producto de tesis de grado e investigaciones, que servirán de base para implementar un modelo geoestadístico.

Como apoyo de este trabajo, se realizó parte de la exploración en el sitio, mediante la dirección de la tesis de aplicación, (Jiménez & Amézquita, 2017, pág. 2), y codirector (Albarracín, 2018, pág. 2), se realiza una recopilación de todas las exploraciones geotécnicas realizadas en la zona urbana del municipio de Pamplona. Se compila esta información y luego de aplicar métodos estadísticos, predecir comportamientos en diferentes zonas, y parámetros estadísticos de comportamiento de los diferentes parámetros estructurales del suelo; partiendo de estos estudios, se hace una evaluación del talud en mención, aplicando métodos ya mencionados.

3.1 Metodología

Se inicia la investigación de modelos geoestadísticos para evaluar la información geotécnica del municipio de Pamplona en la cual se hacen una recopilación bibliográfica, reconocimiento de la zona de estudio, descripción de la zona geológica, implementación del software ArcGIS y en la

aplicación del modelo geoestadístico Kriging, con el fin de procesar características geomecánicas del suelo, procesarlas y proyectarlas en especial en áreas no dateadas o en sitios de interés.

3.1.1 Clasificación de la información geotécnica. En primer lugar, se llevó a cabo una recopilación de información de la zona de estudio, como lo fueron informes previos de la investigación geológica, geomorfológica y problemas geotécnicos con el fin de orientar las etapas de estudio.

La recopilación de la información geotécnica se realizó mediante la búsqueda y análisis de la documentación disponible acerca de modelos geoestadístico como lo es el Kriging, Montecarlo y demás temas de geoestadística. También se recurrió a publicaciones sobre modelos geoestadísticos en yacimientos de oro, tesis de grado e investigación de modelos geoestadístico en diferentes áreas de la ingeniería. Aquí se resalta, que se recolectó documentación disponible y ejecutada por el instituto Agustín Codazzi (IGAC), entidades como la alcaldía municipal de Pamplona de la cual se tomó como base la cartografía a escala 1:7000 del plan de ordenamiento territorial del municipio, ejecutado por (Corponor), al igual que se observó y analizó imágenes satelitales de Google Earth del área de estudio.

3.1.2 Reconocimiento de la zona de estudio. Se inició con la exploración de campo para hacer una idea de las condiciones existentes, esto permitió conocer los factores más importantes que se adoptan a la hora de hacer una caracterización y zonificación, entre los cuales se pueden apreciar la extensión de área, cantidad de población, características topográficas y facilidades logísticas como vías de acceso y clima.

Los levantamientos topográficos del talud específico, para evaluación, se realizaron dentro del proyecto de grado, dirigido (Jiménez & Amézquita, 2017), en un área estimada de 212.598 metros cuadrados, comprendiendo la franja correspondiente a los barrios Juan XXIII y San Luis, sobre la cual se sitúa la zona de estudio. La medición fue realizada a través del instrumento DRONE de referencia DJI Phantom 3 Profesional, elevándose a una altura de 100 metros, y la implantación de un software especial para fotogrametría Pix4D con licencia por 15 días gratuita, con el fin de obtener capturas fotográficas de la zona de estudio. Se obtuvo como resultado una ortofotografía de alta resolución geo-referenciada, la cual permitió obtener el modelo 3D del área de estudio, hacer mediciones y hacer cálculos volumétricos. Para las curvas de nivel, se dio una separación de 1 metro y fue dada por el programa AutoCAD. La metodología usada para elaborar la topografía del área de estudio fue la siguiente.

- Toma de fotografías aéreas desde una altura de 100 metros con un DRONE de referencia DJI Phantom 3 Profesional.



Figura 3. Fotografías aéreas sector estudio. Adaptado de Jiménez, J. & Amezcuita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona

- Obtención del modelo digital de terreno y superficie luego de los procesos de alinear fotos y densidad de puntos en software PIX4D.

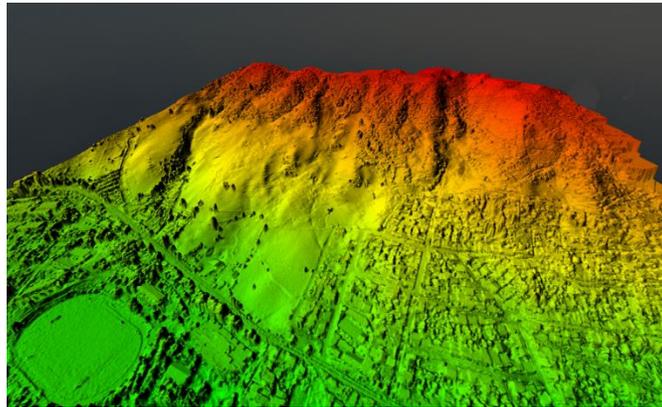


Figura 4. Modelo digital del terreno 3D sector de estudio. Adaptado de Jiménez, J. & Amezquita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona

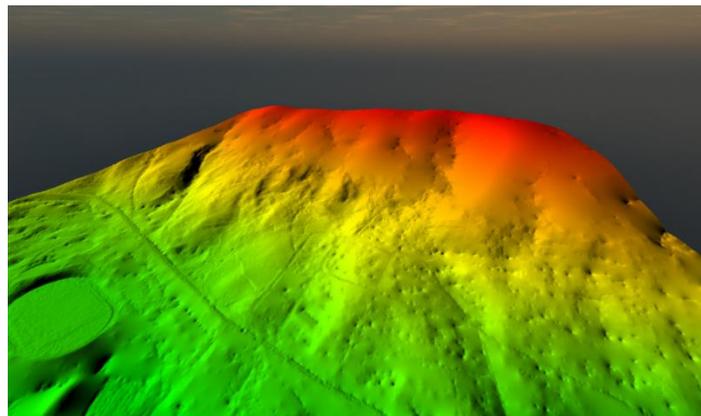


Figura 5. Modelo digital de superficie 3D sector de estudio. Adaptado de Jiménez, J. & Amezquita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona

- Elaboración de curvas de nivel en el software AUTOCAD Civil 3D 2017 con 1 metro de separación. En el Apéndice A se adjuntan los archivos electrónicos en Acad, donde se pueden detallar con claridad las curvas de nivel, de la zona de estudio.



Figura 6. Curvas de Nivel. Adaptado de Jiménez, J. & Amezquita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona

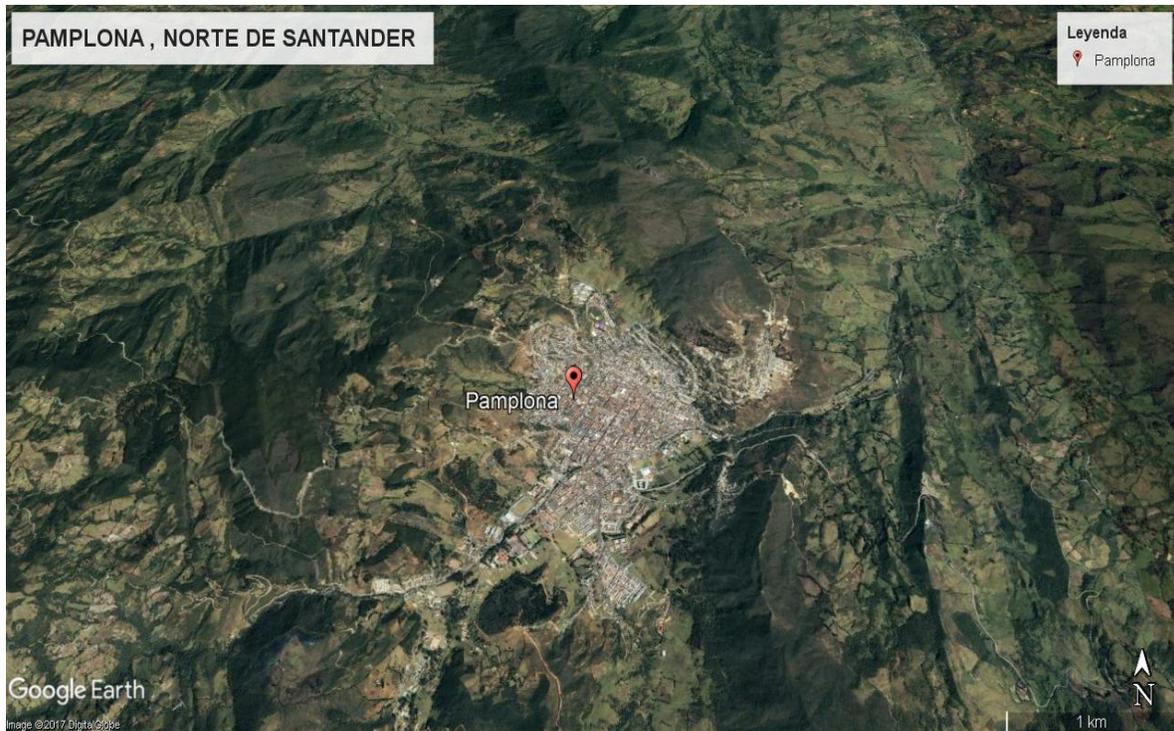


Figura 7. Zona de estudio. Adaptado de Google Earth. (2017). Ubicación de Pamplona.

3.2 Geología

La interpretación geológica, de la zona norte del municipio de Pamplona, se apoya en el trabajo de investigación realizado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017) dedicado a las características geográficas del Norte de Santander, el cual en su segundo capítulo, geografía física, analiza las condiciones naturales del territorio, particularmente, condiciones geológicas, geomorfológicas, clima, hidrografía entre otras.

3.2.1 Evolución Geológica. En referencia a lo anterior, se evaluará las condiciones de la zona de Pamplona y en especial la zona norte del área urbana, cabe decir, que nuestro país está ubicado en el extremo noroccidental de Suramérica, expuesto a la convergencia o choque de las placas

tectónicas Suramericana, Nazca y Caribe, en tal sentido, bajo la dinámica tectónica compleja de los últimos millones de años, reflejada en la conformación de la cordillera de Los Andes, y por ende la cordillera oriental Colombiana, que en su parte terminal, cubre el departamento Norte de Santander.

En la evolución geológica del departamento, se identifican varios sucesos. Hacia la era precámbrica (<550 m.a.), se desarrolla sobre el escudo Guayanés una cuenca marina que favoreció los depósitos de sedimentos elásticos y calcáreos, con importantes aportes volcánicos; a finales de dicho periodo, el escudo y la secuencia de sedimentos quedaron sometidos a los procesos de metamorfismo de alto grado, dando origen a las rocas metamórficas correspondientes a al Macizo de Santander (Neis de Bucaramanga y Ortoneis). (Clavijo, 1994)

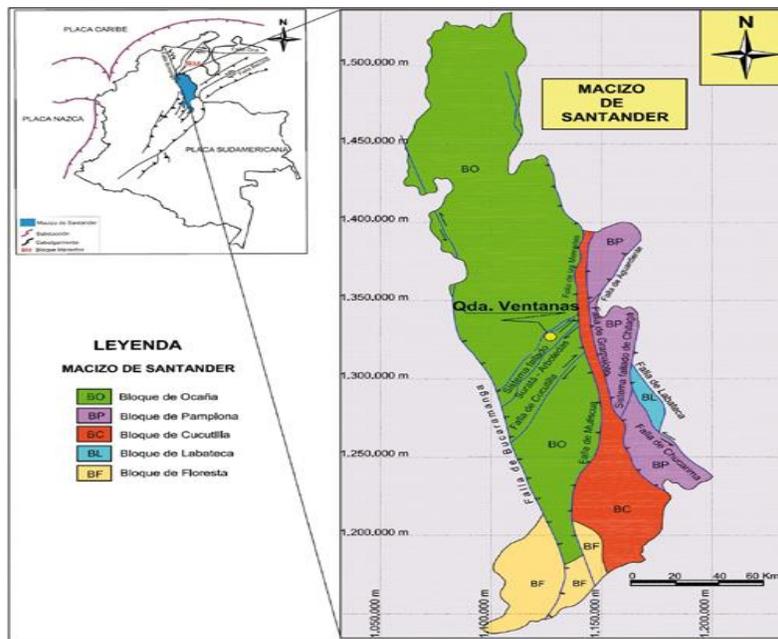


Figura 8. Esquema tectónico del macizo de Santander. Adaptado de Clavijo, J. (1994). Mapa geológico generalizado del Departamento Norte de Santander. Bucaramanga: Instituto Nacional de Minas

Posteriormente, durante el Paleozoico (550-240 m.a.), hay una importante fase de depósitos marinos, afectados en parte por un metamorfismo diferencial presente en las formaciones Silgará y Floresta; el fallamiento y las secuencias de transgresión y regresión al mar favorecieron la depositación posterior de calizas biogénicas y areniscas rojas presentes en la formación Diamante. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017, págs. 57-58)

En el Mesozoico (250-65 m.a.), tras la ruptura del continente Pangea se generan zonas de erosión, que generan grandes zonas de sedimentación en piedemontes e inmersiones del relieve en bloques escalonados, en las formaciones La Luna, Colon-Mitojuan y Catatumbo, se da una nueva y potente secuencia fluvial (grupo Girón), con la acumulación de arcillas y arenas con intercalaciones de mantos de carbón en ambientes muy húmedos.

Para el Cenozoico (< 65 m.a.), ocurre un proceso orogénico definido, levantamiento, plegamiento y fallamiento generalizado, dando origen a la formación de la cordillera Oriental Colombiana, en Norte de Santander, se presentan grandes bloques levantados hacia el occidente y la depresión baja oriental con procesos dominantes de agradación continental presente en las formaciones Barco, Los Cuervos, Mirador, León y Necesidad y a finales del Neógeno (7-5 m.a.) se inicia el levantamiento más intenso de la cordillera oriental, con depósitos pertenecientes principalmente a la formaciones Mirador, Carbonera, Colorado, León, Guayabo y Necesidad.

En el Periodo Cuaternario (< 2 m.a.), las glaciaciones sobre las estructuras más elevadas, la acumulación aluvial y lacustre, dieron paso a la formación de depósitos sedimentarios recientes, es decir, aparece la apariencia actual del relieve departamental. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017, págs. 58-59)

3.2.2 Unidades Litoestratigráficas. En el territorio nortesantandereano, las rocas presentes son de diversos tipos, metamórficas, ígneas y sedimentarias; en los sitios de mayor altitud se presentan las dos primeras, ubicados en la franja occidental del departamento, en el área conocida como macizo de Santander, las sedimentarias se encuentran hacia el oriente de la cordillera Oriental. Las principales unidades litoestratigráficas presentes en la zona de estudio son:

- Complejo Bucaramanga (pCm). Se conoce como Gneis de Bucaramanga compuestas por rocas metamórficas del precámbrico, de origen sedimentario, se localiza en el sector occidental, aflorando principalmente en los trayectos de las vías Pamplona-Toledo-Chitagá.
- Formación Silgará (Pzm). Presenta rocas metamórficas del Paleozoico inferior, de origen sedimentario, localmente presentando mármoles y metaliditas, principalmente en el trayecto Pamplona-Bucaramanga-Mutiscua.
- Formación Diamante (CP). Corresponde a las unidades del río Nevado y el Bloque de Cucutilla: Se compone de secuencias sedimentarias predominantemente arenosas, con intercalaciones de calizas fosilíferas, lodolitas y algunos conglomerados, presente en el Cañón del Chitagá y el llamado corredor de Cucutilla.
- Grupo Girón (J2). De rocas sedimentarias jurásicas, con arenitas, lodolitas y conglomerados, presentes en el páramo de Cáchira y alrededores del río Chitagá, Silos y Río Margua.
- Formación Capacho (Kc). Formación sedimentaria del Cretácico, compuesta por lodolitas, calizas fosilíferas y areniscas que afloran en Pamplonita, Pamplona, Labateca y Toledo. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017, págs. 63-64)

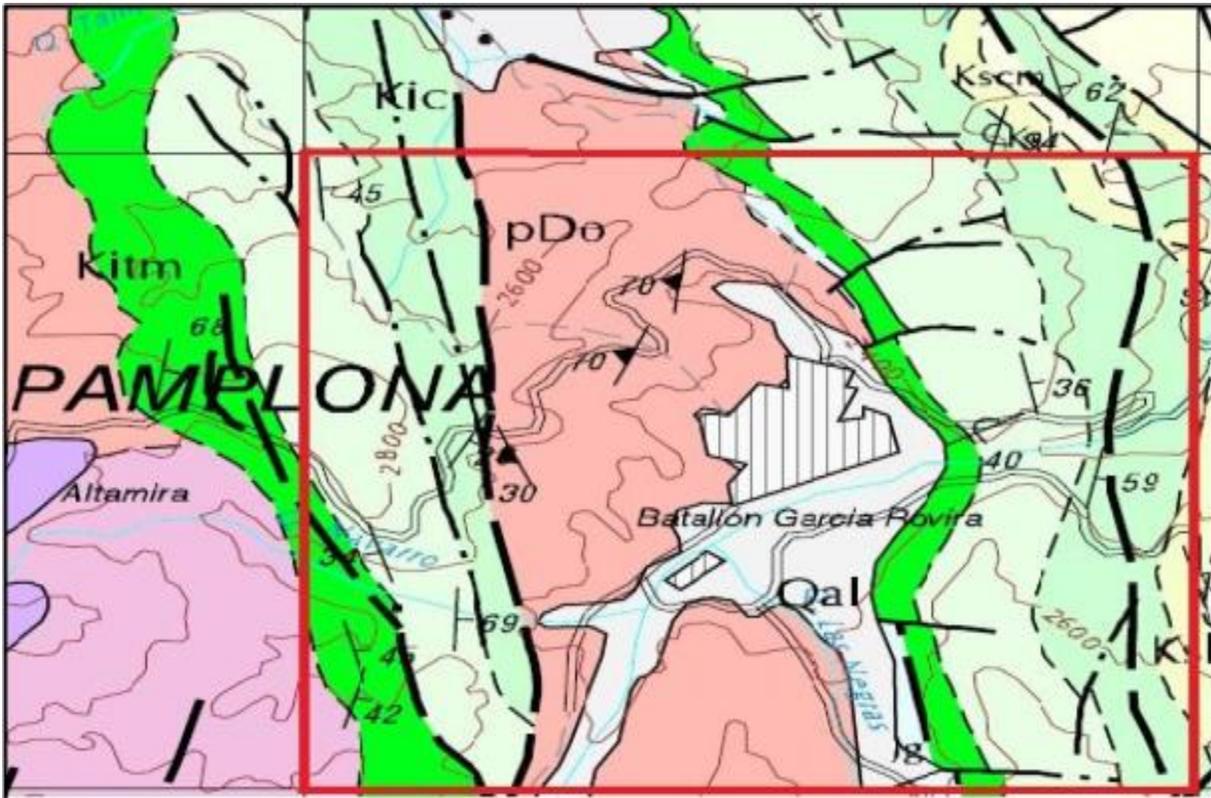


Figura 9. Esquema geológico para el área de Pamplona. Adaptado de Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). Norte de Santander características geográficas. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia

3.2.3 Estructuras geológicas locales. Norte de Santander, está localizado en una zona de transición de placas, haciéndolo un territorio tectónicamente dinámico. Estructuralmente se divide en cinco grandes provincias estructurales, con diferentes características, las cuales son: Gran Bloque del Macizo de Santander, que se subdivide en los bloques de Ocaña, Cucutilla, Pamplona; Bloque de Labateca, y adicionalmente se encuentran los bloques de Mérida, cuenca del Magdalena Medio, Catatumbo-Zulia y Chinácota-Margua.

El Bloque de Pamplona, que es levantado, compuesto por rocas metamórficas precámbricas y sedimentarias del Paleozoico, sobresalen algunos rasgos estructurales como la falla de Chucarima

de orientación SE-NW y las fallas de Pamplona y Aguardiente con orientaciones SW-NE. Instituto Geografico Agustin Codazzi (2017)

3.2.4 Geomorfología. El modelado de la superficie terrestre es el resultado de la dinámica de factores endógenos y exógenos que conllevan a la diferenciación de los paisajes, asociados a los fuertes movimientos tectónicos ocurridos en la Cordillera Oriental que dieron origen al acomodamiento del relieve cuya disposición general y variación altitudinal apreciable explican en buena parte las diferencias climáticas y la variación de la vegetación presente en todo el Municipio.

3.2.5 Morfometría. En el municipio la topografía varía, con pendientes bajas, suaves, moderadas, altas y abruptas como se muestra en el mapa de pendientes, Figura 10, que dan origen a las distintas geoformas presentes en el municipio. Para la elaboración del mapa pendientes, se utilizó una base topográfica a escala 1:25.000 del IGAC y el programa ArcGIS 10.1 en cual se establecieron 5 intervalos de pendientes.

Tabla 2.

Tipo de pendientes de acuerdo a su inclinación

Tipo	Grados
Muy baja	0-10°
Baja	10-20°
Media	20-30°
Alta	30-45°
Muy alta	>45°

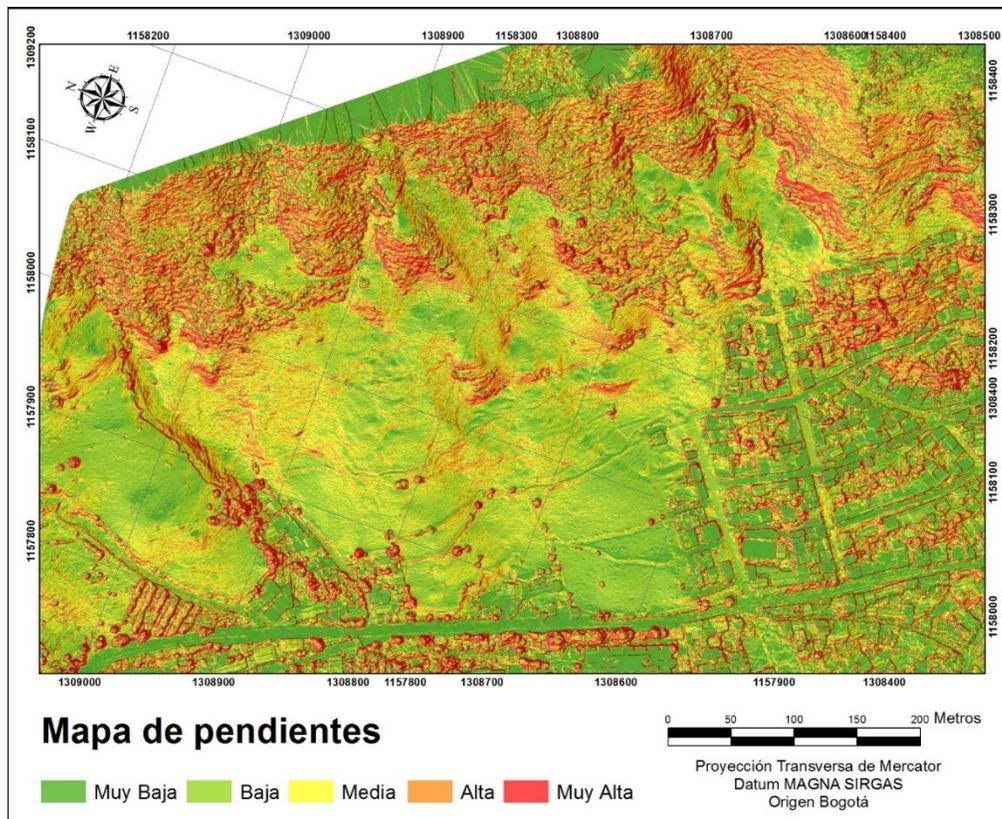


Figura 10. Mapa de pendientes. Adaptado de Jiménez, J. & Amezcuita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona

3.2.6 Sismicidad. El departamento de norte de Santander se localiza en una área de alta sismicidad según autores como Ramírez (1975); Gómez (1980); García et al (1995); Sarria, (1989); París & Sarria (1988); Clavijo (1994); en la que se encuentra Cúcuta, ciudad que prácticamente sufrió la consecuencia de una gran destrucción debida a la actividad de un terremoto registrado en 1875 y también ha estado expuesta a los efectos de 13 sismos más, que representan el 68% de la totalidad de los ocurridos entre 1920 y 1991 (Castro & Bernal, 1992).

La sismicidad de esta zona y la zona oriental de norte de Santander, están muy relacionadas a la gran actividad tectónica desarrollada y asociada a un sistema de fallas de Boconó en los territorios occidentales de Venezuela y las fallas de Chucarima, Pamplona y Aguardiente.

La norma NSR-10 en el Título A, tiene como objetivo principal exigir el cumplimiento de principios y normas de diseño de construcción segura que permitan reducir el riesgo de pérdida de vidas humanas y defender en lo posible el patrimonio del estado y los ciudadanos a la hora de presentarse un evento sísmico.

No está demás decir, que el propósito de todo ingeniero civil con sus construcciones es preservar la vida, por tal motivo deben tener presente todas las recomendaciones necesarias para el diseño y construcción de las edificaciones, teniendo en cuenta las actividades sísmicas de cada ciudad del país.



Figura 11. Zonas de amenas sísmicas de Colombia. Adaptado del Servicio Geológico Colombiano

La Figura 11, muestra las aceleraciones pico efectivas (Aa) de las diferentes regiones de Colombia donde se puede indicar que los valores para el municipio de pamplona por pertenecer a la región 5 es de 0,30.

3.3 Exploración Geotécnica

La geotecnia es la rama de la ingeniería que permite conocer el suelo de un terreno ya sea directamente como material de construcción o como soporte de una determinada estructura.

3.3.1 Información geotécnica área urbana Pamplona. La exploración geotécnica se realizó con base en una labor de investigación, que se adelantó en un proyecto de pregrado Albarracín (2018). En este trabajo se evaluó la exploración geotécnica realizada por los diferentes estudios realizados principalmente en proyectos de grado de la Universidad de Pamplona. Se hizo una revisión y se descartaron los que no presentaban datos coherentes, consecuencia de esto se tiene la información de 105 apiques ejecutados dentro del casco urbano del municipio de Pamplona, información recolectada de proyectos de pregrado, que implicaban evaluación geotécnica, en los que se realizaron contenido de humedades naturales, análisis granulométricos y límites de Atterberg, los cuales sirvieron como base para la clasificación según el sistema unificado (U.S.C.S.). En la figura 14 se muestra la distribución de las exploraciones realizadas en la zona urbana del Municipio de Pamplona.

DISTRIBUCIÓN DE APIQUES

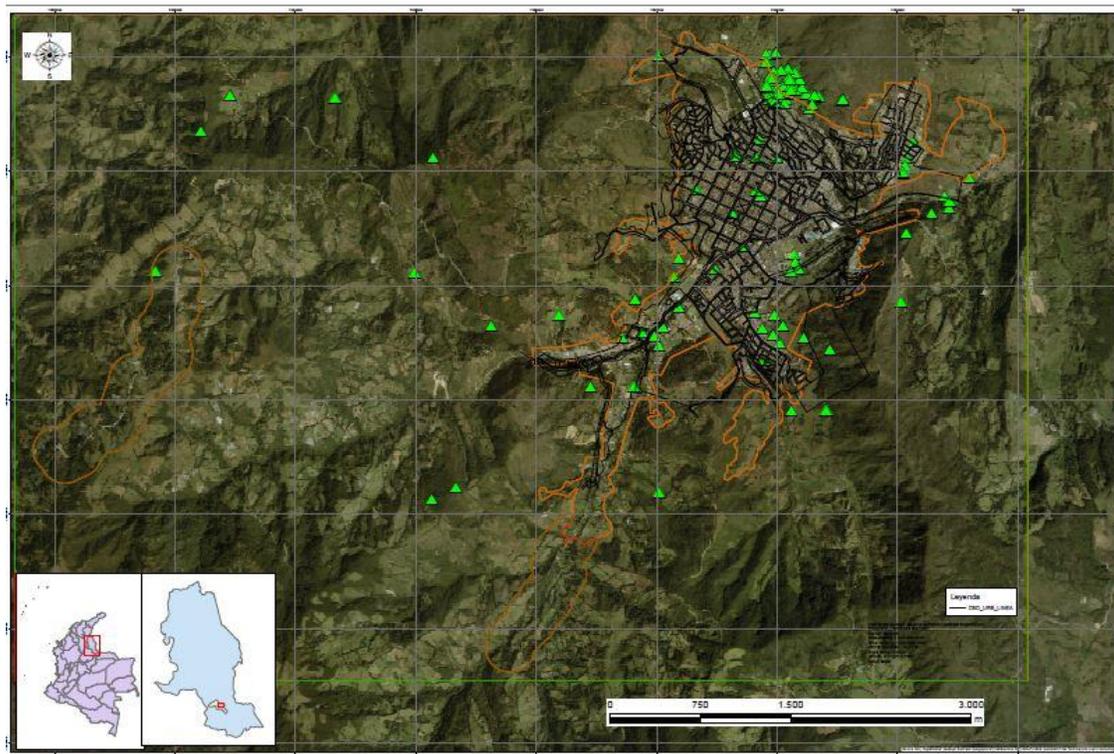


Figura 12. Distribución de los apiques en el casco urbano del municipio de Pamplona. Adaptado Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona. p. 47

En la tabla 3 se muestra las coordenadas en donde se encuentra ubicados los apiques:

Tabla 3.

Coordenadas de los apiques

Nombre	Barrio	Estrato	Profundidad	Latitud	Longitud
Apique 1	Juan XXIII	1	4	1308548	1158268
Apique 1	Juan XXIII	2	6	1308548	1158268
Apique 1	Juan XXIII	3	7	1308548	1158268
Apique 2	Juan XXIII	1	4	1308658	1158311
Apique 3	Juan XXIII	1	5	1308734	1158204
Apique 4	Juan XXIII	1	5	1308798	1158186
Apique 5	Juan XXIII	1	4	1308865	1158149
Apique 5	Juan XXIII	2	6	1308865	1158149
Apique 6	Juan XXIII	1	5	1308894	1158091
Apique 7	Juan XXIII	1	5	1308882	1158032
Apique 8	Juan XXIII	1	4	1308658	1153456
Apique 8	Juan XXIII	2	6	1308658	1153456
Apique 9	Juan XXIII	1	5	1308353	1153213
Apique 9	Juan XXIII	2	6	1308353	1153213
Apique 10	Juan XXIII	1	5	1307129	1152836
Apique 11	Juan XXIII	1	5	1306352	1157901
Apique 12	Juan XXIII	1	5	1305128	1155129
Apique 13	Juan XXIII	1	3	1308121	1155142
Apique 14	Juan XXIII	1	6	1308643	1154327
Apique 15	Juan XXIII	1	5	1307116	1154987
Apique 16	Juan XXIII	1	7	1306541	1156712
Apique 17	Juan XXIII	1	5	1305238	1155331
Apique 18	Juan XXIII	1	5	1308656	1158345

Tabla 3. *Continuación*

Nombre	Barrio	Estrato	Profundidad	Latitud	Longitud
Apique 19	Juan XXIII	1	4	1308678	1158243
Apique 20	Juan XXIII	1	3	1308623	1158545
Apique 21	Juan XXIII	1	4	1308621	1158534
Apique 22	Juan XXIII	1	4	1308618	1158530
Apique 23	Juan XXIII	1	3	1308613	1158532
Apique 24	Juan XXIII	1	4	1308618	1158543
Apique 25	Juan XXIII	1	6	1308623	1158545
Apique 26	Juan XXIII	1	3	1308548	1158268
Apique 26	Juan XXIII	2	6	1308548	1158268
Apique 27	Juan XXIII	1	4	1308658	1158311
Apique 27	Juan XXIII	2	6	1308658	1158311
Apique 28	Juan XXIII	1	6	1308734	1158204
Apique 29	Juan XXIII	1	4	1308798	1158186
Apique 29	Juan XXIII	2	6	1308798	1158186
Apique 30	Juan XXIII	1	3	1308865	1158149
Apique 30	Juan XXIII	2	5	1308865	1158149
Apique 31	Juan XXIII	1	4	1308894	1158091
Apique 32	Juan XXIII	1	5	1308882	1158032
Apique 33	Juan XXIII	1	6	1309031	1157989
Apique 34	Juan XXIII	1	5	1309019	1157935
Apique 35	Juan XXIII	1	5	1308956	1157910
Apique 36	Juan XXIII	1	4	1308866	1157971
Apique 37	Juan XXIII	1	5	1308825	1157939
Apique 38	Juan XXIII	1	5	1308766	1157997

Tabla 3. *Continuación*

Nombre	Barrio	Estrato	Profundidad	Latitud	Longitud
Apique 39	Juan XXIII	1	4	1308692	1158046
Apique 40	San Luis	1	3	1309031	1157989
Apique 40	San Luis	2	6	1309031	1157989
Apique 41	San Luis	1	5	1308956	1157910
Apique 42	San Luis	1	4	1308123	1157823
Apique 42	San Luis	2	6	1308123	1157823
Apique 43	San Luis	1	4	1307845	1157323
Apique 44	San Luis	1	5	1306745	1156189
Apique 45	San Luis	1	5	1306645	1155623
Apique 46	San Luis	1	6	1308766	1157997
Apique 47	San Luis	1	5	1308825	1187939
Apique 48	San Luis	1	6	1308866	1157971
Apique 49	San Luis	1	5	1308956	1157910
Apique 50	San Luis	1	3	1309015	1157023
Apique 50	San Luis	2	5	1309015	1157023
Apique 51	San Luis	1	5	1308882	1158032
Apique 52	San Luis	1	6	1309019	1157910
Apique 53	San Luis	1	5	1308956	1157910
Apique 54	San Luis	1	5	1308866	1157971
Apique 55	San Luis	1	6	1308825	1157939
Apique 56	San Luis	1	5	1308766	1157997
Apique 57	San Luis	1	6	1308692	1158046
Apique 58	Simón Bolívar	1	5	1308263	1159133
Apique 59	Simón Bolívar	1	6	1308114	1159082

Tabla 3. *Continuación*

Nombre	Barrio	Estrato	Profundidad	Latitud	Longitud
Apique 60	Simón Bolívar	1	4	1308048	1159062
Apique 61	Simón Bolívar	1	6	1307981	1159040
Apique 62	Simón Bolívar	1	5	1307459	1159072
Apique 63	Batallón	1	6	1306470	1157016
Apique 63	Batallón	2	5	1306553	1156983
Apique 64	Batallón	1	5	1306808	1157183
Apique 65	Batallón	1	5	1306635	1157053
Apique 66	San Pedro	1	5	1306494	1158020
Apique 67	San Pedro	1	6	1306544	1158221
Apique 68	El Zulia	1	5	1306593	1156878
Apique 69	El Zulia	1	5	1306593	1156878
Apique 70	Urb Los Alpes	1	4	1306880	1156821
Apique 71	Urb Los Alpes	1	6	1306880	1156821
Apique 72	Seminario	1	6	1306644	1158046
Apique 73	Seminario	1	5	1306624	1157876
Apique 74	Seminario	1	6	1306740	1157977
Apique 75	Seminario	1	5	1306763	1157814
Apique 76	Iser	1	6	1307273	1158138
Apique 77	Iser	1	5	1307202	1158151
Apique 78	Iser	1	4	1307143	1158178
Apique 79	Iser	1	6	1307126	1158113
Apique 80	Simón Bolívar	1	5	1307781	1159392
Apique 81	Simón Bolívar	1	4	1307678	1159428
Apique 82	Simón Bolívar	1	5	1307631	1159281

Tabla 3. *Continuación*

Nombre	Barrio	Estrato	Profundidad	Latitud	Longitud
Apique 83	Simón Bolívar	1	6	1307741	1159434
Apique 84	Romero	1	4	1306564	1157967
Apique 84	Romero	2	6	1306564	1157967
Apique 85	Cristo Rey	1	4	1307996	1159044
Apique 86	Villa Cristina	1	4	1307943	1159593
Apique 87	El Progreso	1	5	1306861	1159029
Apique 88	Barrios Unidos	1	6	1305911	1158119
Apique 89	Afanador	1	5	1306437	1158438
Apique 90	Afanador	1	4	1306117	1156452
Apique 91	Zulia	1	5	1306121	1156810
Apique 92	Zulia	1	6	1305194	1157017
Apique 93	Jurado	1	4	1307081	1157139
Apique 94	Jurado	1	5	1307146	1157484
Apique 95	Jurado	1	6	1307242	1157184
Apique 96	Jurado	1	3	1307346	1157724
Apique 96	Jurado	2	4	1307346	1157724
Apique 97	Las Colinas	1	3	1305913	1158408
Apique 97	Las Colinas	2	4	1305913	1158408
Apique 97	Las Colinas	3	5	1305913	1158408
Apique 98	Santa Marta	1	5	1308281	1157857
Apique 99	Santa Marta	1	4	1308149	1157649
Apique 99	Santa Marta	2	5	1308149	1157649
Apique 100	Santa Marta	1	6	1308132	1157671
Apique 101	El Guamo	1	4	1307786	1157864
Apique 102	Santa Marta	1	5	1307824	1157825
Apique 103	Santa Marta	1	5	1308114	1157995
Apique 104	Brighton	1	4	1307630	1157626

Tabla 3. *Continuación*

Nombre	Barrio	Estrato	Profundidad	Latitud	Longitud
Apique 104	Brighton	2	6	1307630	1157626
Apique 105	San Luis	1	4	1308579	1158290

Nota: Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona p. 48-51

3.3.1.1 Clasificación de los suelos: En el método del sistema unificado de clasificación de suelos (USCS), requiere obtener la información pertinente sobre las características del suelo a estudiar para obtener esta información se realizan con ensayos de laboratorios normalizados por la ASTM. Al efectuar los ensayos indicados anteriormente, fue de gran importancia que las muestras obtenidas en campo fueran representativas para poder realizar la clasificación del suelo.

En la Tabla 4 se muestra la clasificación de los suelos en los 105 apiques según la U.S.C.S.

Tabla 4.

Resultados de los ensayos de humedad natural, granulometría, límites de Atterberg y clasificación U.S.C.S.

BARRIO	APIQUE	ESTRATO	PROF. (m)	% grava	% arena	% finos	% de w	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CLASIF. (U.S.C.S.)
S. BOLIVAR	1	único	1,3 - 2	0,8	94,57	4,62	38,82	NP	NP	NP	SP
S. BOLIVAR	1	único	2-mar	2,91	94,63	2,46	4,65	NP	NP	NP	SP
S. BOLIVAR	2	1	0,4 - 1,8	0,3	95,8	3,91	8,13	NP	NP	NP	SP
S. BOLIVAR	2	2	1,8 - 2,3	0	97,95	2,05	4,24	NP	NP	NP	SP
S. BOLIVAR	2	3	2,3 - 3,0	0,15	96,38	3,46	17,27	NP	NP	NP	SP
ROMERO	3	1	0,5 - 1,9	6,43	85,33	8,23	7,29	25,6	17,58	8,02	SP SC
ROMERO	3	2	1,9 - 2,5	1,11	88,85	10,05	19,74	28,46	15,87	12,59	SP SC
ROMERO	3	3	2,5 - 3,00	0,4	90,26	9,33	11,39	26,17	15,88	10,29	SP SC
CRISTO REY	4	único	0,45 - 3	0,81	94,54	4,64	5,14	NP	NP	NP	SP
V. CRISTINA	5	único	0,1 - 3	0	96,38	3,62	3,21	NP	NP	NP	SP
PROGRESO	6	único	1,40 - 2,95	2,92	87,71	9,37	28,57	25,67	23,98	1,69	SP SM
B. UNIDOS	7	único	0,15 - 3,00	0,7	87,71	15,24	23,06	58,67	28,97	29,7	SC
ZULIA	9	único	0,5 - 2,8	54,13	40,65	5,22	11,53	NP	NP	NP	GP GM
AFANADOR	8	1	0,6 - 1,50	0	84,9	15,11	15,79	35,12	28,9	6,22	SM
M. DEL ZULIA	11	único	0,75 - 2,85	0,4	89,25	10,35	13,59	26,32	22,64	3,68	SP SM
M. DEL ZULIA	12	único	0,8 - 2,80	0	93,44	6,56	16,25	54,24	21,51	32,72	SP SC
JURADO	13	único	0,10 - 2,90	19,18	72,9	7,93	0,657	25,17	21,71	3,46	SP SM
JURADO	14	1	0,90 - 2,30	6,82	74,71	18,46	27,07	28,06	24,5	3,56	SM
JURADO	14	2	2,30 - 3,00	13,84	78,35	7,82	30,9	25,7	23,2	2,5	SP SM
JURADO	15	1	0,15 - 1,35	9,03	75,33	15,65	15,65	41,02	21,84	19,19	SC
JURADO	15	2	1,35 - 2,95	0,2	81,57	18,25	20,3	34,23	26,69	7,54	SM
LAS COLINAS	16	1	0,46 - 1,13	0	99,21	0,8	10,47	NP	NP	NP	SP
LAS COLINAS	16	2	1,13 - 2,25	0	90,94	9,06	21,61	25,43	13,85	11,58	SP SC
LAS COLINAS	16	3	2,25 - 3,00	0,1	95,79	4,1	7,03	NP	NP	NP	SP
STA MARTA	17	único	0,70 - 2,90	2,21	97,3	0,5	14,4	NP	NP	NP	SP
STA MARTA	18	1	0,38 - 1,82	1,71	84,68	13,6	9,38	25,92	21,91	4	SM
STA MARTA	18	2	1,82 - 2,90	0,61	86,26	13,13	11,81	27,87	23,53	4,33	SM
STA MARTA	19	único	0,20 - 2,90	3,33	89,9	7,77	12,57	28,12	24,74	3,38	SP SM
STA MARTA	20	único	0,48 - 2,90	1,1	92,69	6,21	21,41	42,79	35,84	6,95	SP SM
STA MARTA	22	único	0,5 - 2,60	1,71	83,22	15,08	22,67	29,66	24,02	5,64	SM
BRIGHTON	23	1	0,45 - 1,70	1,2	82,47	16,33	17,69	34,67	21,21	13,46	SC
BRIGHTON	23	2	1,70 - 2,64	1,3	85,66	13,04	26,82	29,76	25,14	4,62	SM
BRIGHTON	23	3	2,64 - 3,00	18,65	68,6	14,54	17,19	31	27,14	3,86	SM
SAN LUIS	24	1	0,20 - 1,70	0,7	89,14	10,17	18,39	34,06	8,22	25,84	SP SC
SAN LUIS	24	2	1,70 - 2,10	4,43	83,76	11,81	19,91	35,76	27,87	7,89	SP SM
SAN LUIS	24	3	2,10 - 2,90	16,85	68,6	14,54	22,02	31,41	25,18	6,23	SM
JUAN XXIII	25	1	0,35 - 1,95	0,4	78,01	21,59	16,71	30,86	27,35	3,71	SM
JUAN XXIII	25	2	1,95 - 2,80	3,51	88,96	7,53	21,68	26,32	18,61	7,71	SP SC
JUAN XXIII	26	1	0,20 - 1,10	0,2	83,43	16,36	13,53	28,32	20,92	7,4	SC
JUAN XXIII	26	2	1,10 - 2,60	5,43	80,38	14,19	20,28	28,22	25,79	2,44	SM
JUAN XXIII	26	3	2,60 - 2,90	0,1	80,22	19,68	16,71	25,57	18,75	6,82	SC
N. AMANECER	27	1	0,25 - 1,25	5,33	80,58	14,08	8,54	32,65	27,41	5,24	SM
N. AMANECER	27	2	1,25 - 2,80	16,99	64,91	18,09	14,88	33,71	29,51	4,2	SM
EL BUQUE	28	1	0,10 - 1,0	4,25	79,58	16,18	28,6	50,88	40,5	10,38	SM
EL BUQUE	28	2	1,0 - 1,90	2,1	90,5	7,41	29,17	31,77	27,35	4,43	SP SM
EL BUQUE	28	3	1,90 - 2,70	1,1	82,75	16,15	22,59	27,45	24,38	3,07	SM
EL OLIVO	29	único	0,75 - 2,85	1,41	83,94	14,65	19,3	48,86	47,27	1,59	SM

Tabla 4. Continuación

BARRIO	APIQUE	ESTRATO	PROF. (m)	% grava	% arena	% finos	% de w	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CLASIF. (U.S.C.S.)
CHICHIRA	30	único	0,25 - 2,80	2,3	93,16	4,52	12,05	NP	NP	NP	SP
EL CAMELLON	31	único	0,30 - 2,80	1,9	90,58	7,52	16,67	28,8	27,1	7,1	SP SC
EL CAMELLON	32	1	0,15 - 1,45	0	83,4	15,84	9,15	27,1	22,8	4,4	SM
EL CAMELLON	32	2	1,45 - 1,95	4,9	86,2	8,9	10,05	39	24,8	14,1	SP SC
EL CAMELLON	32	3	1,95 - 2,80	0	89,72	10,29	16,36	30,9	25,1	5,8	SM
LA ESPERANZA	33	1	0,60 - 1,20	1,5	86,65	11,84	11,97	28,5	24,9	3,6	SM
LA ESPERANZA	33	2	1,20 - 1,80	1,11	81,43	17,46	30,17	35,2	25,7	9,6	SP SC
LA ESPERANZA	33	3	1,80 - 2,90	3,91	84,37	11,72	32,7	29,7	22,2	7,5	SM
EL ARENAL	34	1	0,80 - 1,5	0,1	87,87	12,12	16,78	26,2	20,2	6	SC SM
EL ARENAL	34	2	1,5 - 2,0	0,1	80,32	19,6	20,79	38,3	29,4	8,9	SM
EL ARENAL	34	3	2,0 - 3,0	0,1	74,36	25,56	15,35	27,4	24,7	2,7	SM
LAS AMERICAS	35	1	0,52 - 1,78	0	96,98	3,02	16,63	NP	NP	NP	SP
LAS AMERICAS	35	2	1,78 - 2,90	5,41	79,92	14,66	17,38	30,3	23	7,3	SC
S. TRINIDAD	36	único	0,10 - 2,90	0,3	86,34	13,35	16,98	32,4	27,4	5	SM
COTE LAMUS	37	1	0,80 - 1,0	1,4	83,87	14,73	9,99	25	19,6	5,4	SM SC
COTE LAMUS	37	2	1,0 - 2,35	0,5	88,44	11,04	40,75	30,8	29,4	1,4	SP SM
COTE LAMUS	37	3	2,35 - 2,80	0,9	95,08	4,01	13,79	NP	NP	NP	SP
SALESIANOS	38	1	0,17 - 1,97	0,1	86,85	13,04	11,97	32,5	10,5	22	SC
SALESIANOS	38	2	0,97 - 1,27	0	95,35	4,64	11,08	NP	NP	NP	SP
SALESIANOS	38	3	1,27 - 2,47	2,02	81,95	16,04	32,78	27,7	25,5	2,2	SM
SALESIANOS	38	4	2,47 - 2,80	0,1	82,68	17,22	27,17	35,5	13,2	22,4	SC
LOS NAZARENOS	39	1	0,30 - 1,90	0	80,2	19,8	25,19	38,4	23,4	14,9	SC
LOS NAZARENOS	39	2	1,90 - 2,80	1,71	85,89	12,38	19,47	32,3	24,2	8,2	SM
SAN PEDRO	40	único	1,20 - 3,0	0,4	82,6	16,98	10,67	30,1	22,1	8	SC
LOS ALPES	41	único	0,30 - 2,70	0,1	81,25	18,65	10,26	30,7	25	5,6	SM
SAN AGUSTIN	42	único	0,35 - 2,90	3,01	92,37	4,61	23,35	NP	NP	NP	SP
SAN IGNACIO	43	1	0,05 - 1,70	0,2	76,77	23	23,05	32,7	23,9	8,9	SM
SAN IGNACIO	43	2	1,70 - 2,90	0	75,99	24,02	24,78	30,4	17,6	12,8	SC
SAN FRANCISCO	44	único	0 - 2,80	0,41	81,13	18,48	19,63	26,5	25,3	1,2	SM
EL CENTRO	46	1	0,40 - 0,80	0,3	73,69	26	33,97	37,4	33,8	3,6	SM
EL CENTRO	46	2	0,80 - 2,60	8,92	74,74	16,33	32,99	41	34,3	6,7	SM
EL CENTRO	46	3	2,60 - 3,0	0	90,97	9,03	63,19	51,1	36,7	14,5	SP SM
EL CAMELLON	47	único	1,20 - 2,80	1,01	82,34	16,67	21,49	26,1	20,3	5,8	SM SC
EL CENTRO	48	1	0,60 - 1,80	10,93	77,43	11,63	16,98	36,4	29	7,4	SP SM
EL CENTRO	48	2	1,80 - 2,70	0,1	79,82	19,58	31,77	34,9	32,3	2,7	SM
HUMILLADERO	49	1	0,25 - 1,75	0,7	77,05	22,26	27,43	28	21,4	6,6	SC
HUMILLADERO	49	2	1,75 - 2,95	0	73,02	26,97	38,16	32,5	15,2	17,3	SC
EL CENTRO	50	único	0,90 - 2,90	0,5	79,43	20,06	40,63	30,6	27	3,6	SM
CHAPINERO	51	1	0,50 - 1,9	0,1	90,96	8,93	12,08	28,5	23,3	5,2	SP SM
CHAPINERO	51	2	1,9 - 2,70	0,4	83	16,58	11,18	34	29,7	4,3	SM
4 DE JULIO	52	1	0,60 - 1,80	2,01	91,67	6,32	9,27	33,2	27,1	6,1	SP SM
4 DE JULIO	52	2	1,80 - 2,40	0,1	71,17	28,71	10,44	32,5	30,5	2	SM
4 DE JULIO	52	3	2,40 - 3,00	39,72	58,38	1,91	2,85	NP	NP	NP	SP
LA ESPERANZA	53	1	0,40 - 1,80	0,2	84,38	15,42	19,64	25,8	22,2	3,6	SM
LA ESPERANZA	53	2	1,80 - 2,60	0,2	86,57	13,23	27,65	36,3	27,5	8,9	SM
CRISTO REY	54	único	0,70 - 2,90	0,2	95,09	4,72	18,45	NP	NP	NP	SP
CRISTO REY	55	1	0,50 - 1,90	0,2	93,7	6,02	18,07	29,6	24,4	5,3	SP SM
CRISTO REY	55	2	1,90 - 2,75	58,87	37,95	3,2	8,98	NP	NP	NP	SP
JUANXXII	56	1	0,9 - 1,9	5	40,3	54,7	24,4	30,27	22,01	8,26	CL
JUANXXII	56	2	1,9 - 2,5	21,9	34,5	43,6	24,49	28,9	21,43	7,56	SC

Tabla 4. Continuación

BARRIO	APIQUE	ESTRATO	PROF. (m)	% grava	% arena	% finos	% de w	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CLASIF. (U.S.C.S.)
JUANXXII	56	3	2.5 - 3.0	23.1	36.2	40.7	20.3	29.89	21.36	8.48	SC
JUANXXII	57	único	1.2 - 2.89	0.5	91	8.4	18.64	NP	NP	NP	SP-SM
JUANXXII	58	único	0.8 - 2.9	0.4	92.1	7.4	17.52	NP	NP	NP	SP-SM
JUANXXII	59	único	0.5 - 3	2.97	52.73	44.3	30.07	34.97	32.26	2.7	SC
JUANXXII	60	único	0.6 - 2.98	5.37	28.68	65.95	32.08	36.4	28.95	7.44	ML
JUANXXII	61	único	0.8 - 2.9	0.12	42.13	57.75	28.56	27.37	20.27	7.1	CL
JUANXXII	62	único	0.5 - 3	13.22	65.87	20.91	33.03	52.9	36.67	16.22	SC
JUANXXII	63	único	0.4 - 2.9	0	37.43	62.57	35.18	41.93	34.3	7.63	ML
JUANXXII	64	único	0.7 - 3	3.55	95.08	1.37	23.4	33.76	33.06	7	SP
JUANXXII	65	único	0.5 - 2.9	1.58	88.96	9.46	28.56	28.22	25.25	2.97	SP-SC
JUANXXII	66	único	0.4 - 3	12	64	24	8.5	32.11	17.59	14.52	SP-SM
JUANXXII	67	único	0.8 - 2.87	20	67	13	31	32.93	23.89	9.04	SP
JUANXXII	68	único	0.8 - 2.89	23	58	19	32.8	35.98	27.46	8.53	SM
JUANXXII	69	único	0.6 - 2.98	4.29	83.93	11.77	8.51	41.52	29.67	11.85	SP-SC
JUANXXII	70	único	0.8 - 2.9	1.83	81.52	16.65	6.77	31.73	25.13	6.6	SM
JUANXXII	71	único	0.7 - 2.9	3.53	92.38	4.1	34.5	32.11	17.59	1.52	SP
JUANXXII	72	único	0.5 - 3.0	0.78	76.73	22.49	28.73	35.99	32.99	3	SM-SC
JUANXXII	73	único	0.4 - 2.9	2.97	52.73	44.3	30.07	33.97	19.92	14.05	SC
JUANXXII	74	único	0.7 - 3	0.38	34.92	64.7	35.18	38.12	37	1.12	ML
ISER	75	único	0.5 - 2.9	13.27	46.38	40.35	17.39	27	18.49	8.51	SC
ISER	76	único	0.4 - 3	31.37	47.66	20.97	18.35	27	17.31	9.69	SC
ISER	77	único	0.7 - 2.7	38.44	27.31	34.26	17.72	29	18.6	10.4	SC
ISER	78	único	0.4 - 2.9	0.85	52.64	46.5	15.61	27	19.48	7.52	SC
SIMON BOLIVAR	79	único	0.4 - 3	1.58	88.96	9.46	28.56	28.22	25.25	2.97	SP-SC
SIMON BOLIVAR	80	único	0.3 - 2.98	0.8	94.57	4.62	38.82	NP	NP	NP	SP
SIMON BOLIVAR	81	único	0.7 - 2.87	2.91	94.63	2.46	8.13	NP	NP	NP	SP
SIMON BOLIVAR	82	único	0.8 - 3	0.3	95.8	3.91	4.65	NP	NP	NP	SP
ROMERO	83	1	0.6 - 1.87	1.11	88.85	10.05	19.74	28.46	15.87	12.59	SP-SC
ROMERO	84	2	1.87 - 3	1.11	88.85	10.05	19.74	28.46	15.87	12.59	SP-SC
CRISTO REY	85	único	0.4 - 2.89	0.81	94.54	4.64	5.14	NP	NP	NP	SP
VILLA CRISTINA	86	único	0.9 - 2.9	0	96.39	3.62	3.21	NP	NP	NP	SP
EL POGRESO	87	único	0.7 - 3	2.92	87.71	9.38	28.57	25.7	24	1.7	SP
BARRIOS UNIDOS	88	único	0.4 - 2.9	0.4	87.71	15.24	23.06	58.67	28.97	29.7	SC
AFANADOR	89	único	0.6 - 1.7	1.51	88.64	9.86	14.2	36.79	14.42	22.37	SP-SC
AFANADOR	89	único	1.7 - 3	35.12	28.9	6.22	15.79	0	84.9	15.11	SM
ZULIA	90	único	0.8 - 1.90	54.13	49.65	5.22	11.53	NP	NP	NP	GP-GM
ZULIA	90	único	1.90 - 3	0.2	84.58	15.22	33.39	NP	NP	NP	SM
JURADO	91	único	0.4 - 2.90	19.18	72.9	7.93	0.66	25.17	21.71	3.46	SP-SM
JURADO	92	único	0.6 - 3.00	6.82	74.71	18.46	27.07	28.06	24.5	3.56	SM
JURADO	93	único	0.7 - 3.00	13.84	78.35	7.82	30.9	25.7	23.2	2.5	SP-SM
JURADO	94	1	0.9 - 1.30	19.18	72.9	7.93	15.65	41.02	21.84	19.19	SC
JURADO	94	2	1.30 - 2.90	0.2	81.57	18.25	20.3	34.23	26.69	7.54	SM
LAS COLINAS	95	1	0.3 - 1.35	0	99.21	0.8	10.47	NP	NP	NP	SP
LAS COLINAS	95	2	1.35 - 1.80	0.2	81.57	18.25	21.61	25.43	13.85	11.58	SP-SC
LAS COLINAS	95	3	1.80 - 3	0.1	95.79	4.1	7.03	NP	NP	NP	SP
SANTA MARTA	96	único	0.4 - 2.8	2.21	97.3	0.5	14.4	NP	NP	NP	SP
SANTA MARTA	97	1	0.4 - 1.79	1.71	84.68	13.6	9.38	25.92	21.91	4	SM
SANTA MARTA	97	2	1.79 - 3	0.61	86.26	13.13	11.81	27.87	23.53	4.33	SM

Nota. Adaptado de Albarraín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

La tabla 5, muestra las estadísticas de los resultados de la clasificación de los suelos dentro del sector urbano del municipio de Pamplona.

Tabla 5.

Clasificación de suelos por estratos.

CLASIFICACIÓN (U.S.C.S)	DEFINICION	ESTRATOS	(%)
SC	arenas arcillosas	26	20,97
SM	arenas limosas	23	18,55
SP	arenas mal gradadas	18	14,52
CL	arcillas de baja plasticidad	10	8,06
ML	limos de baja plasticidad	10	8,06
SP-SM	arenas mal gradada limosa	10	8,06
SP-SC	arenas mal gradada arcillosa	10	8,06
SM-SC	arenas limo arcillosa	6	4,84
GW	gravas bien graduada	3	2,42
GC	gravas arcillosa	2	1,61
SW-SC	arenas bien graduada arcillosa	2	1,61
SC-SM	arenas arcillosa limosa	2	1,61
GP-GM	grava mal graduada con limo y arena	1	0,81
ML-CL	limo arcilloso inorgánico de baja plasticidad	1	0,81

Nota. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geostatísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

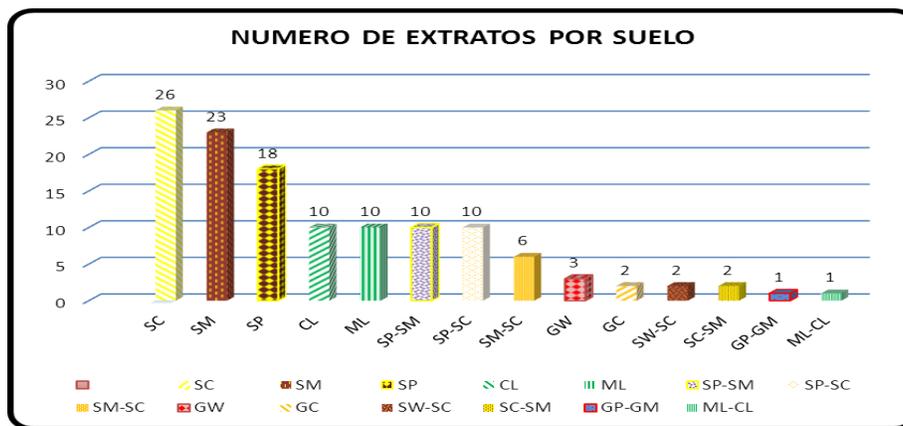


Figura 13. Número de estratos por tipo de suelo. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geostatísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

La tabla nos da a conocer los suelos predominantes del caso urbano del municipio de Pamplona en donde podemos ver que las arenas arcillosas (SC) ocupan el mayor porcentaje seguido de las arenas limosas (SM), arenas mal gradadas (SP) con lo cual nos muestra que las arenas son las dominantes y representan un porcentaje del 59,67 % las arcillas de baja plasticidad (CL), limos de baja plasticidad (ML), arenas mal gradadas limosas (SP-SM), arenas mal gradada arcillosa (SP-SC), y las arenas mal gradadas con presencia de limos y arcillas representan el 31,25 %, las gravas con presencia de arenas y limos son del 9,08%, se puede decir que los suelo más representativos en el casco urbano del municipio de Pamplona son las arenas con contenidos de limos y arcillas.

3.3.1.2 Límites de Atterberg: Los límites de Atterberg no solo indican el tipo de fino contenido en una muestra de suelo cualquiera, sino también la clasifican según su grado de plasticidad en no plástico, ligeramente plástico, baja plasticidad, mediana plasticidad, alta plasticidad y muy alta plasticidad (Villalaz, 2004), tabla 6, de acuerdo a los siguientes rangos:

Tabla 6.

Grado de plasticidad del suelo.

Índice De Plasticidad	Descripción	N	%
0	no plástico	19	15,32
1-5	ligeramente plástico	31	25,00
5-10	baja plasticidad	39	31,45
10-20	mediana plasticidad	29	23,39
20-40	alta plasticidad	6	4,84
> 40	muy alta plasticidad	0	0,00

Nota. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

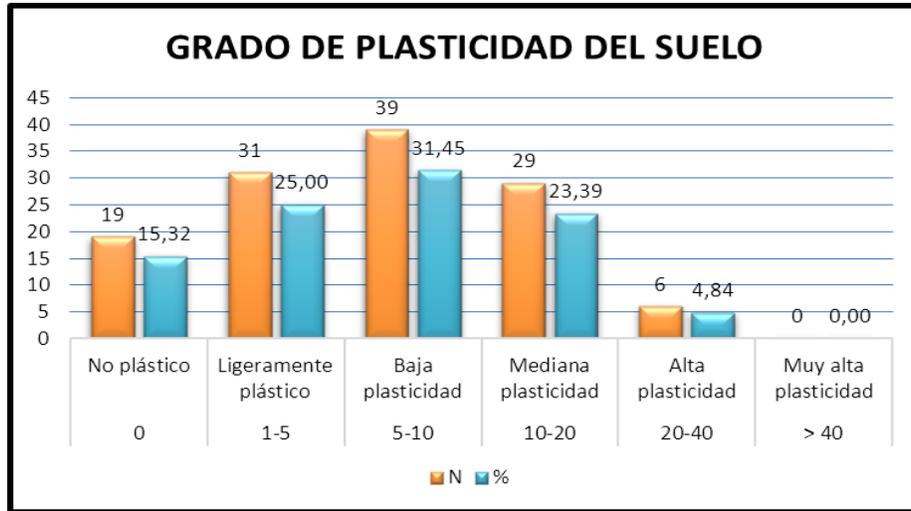


Figura 14. Grado de plasticidad del suelo. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

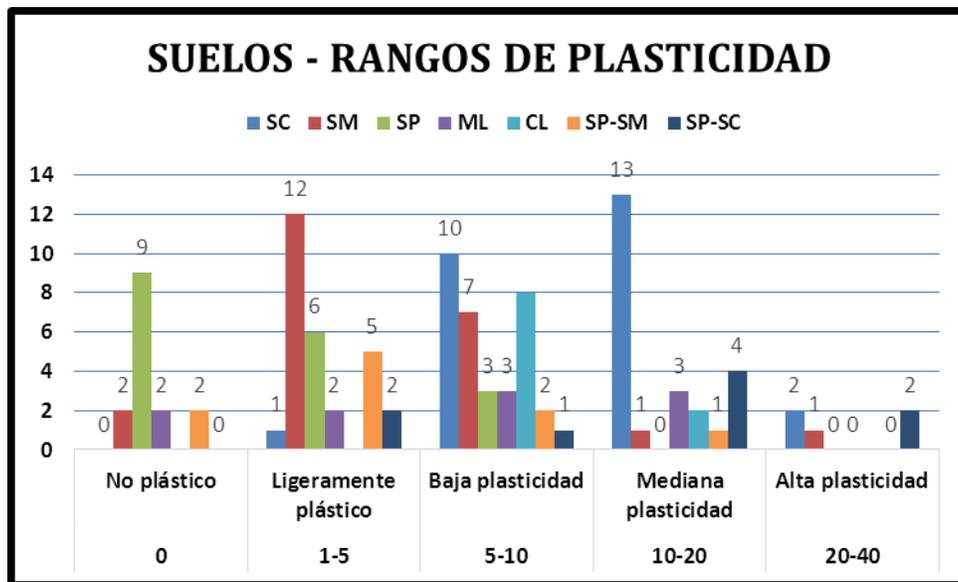


Figura 15. Suelos - rangos de plasticidad. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

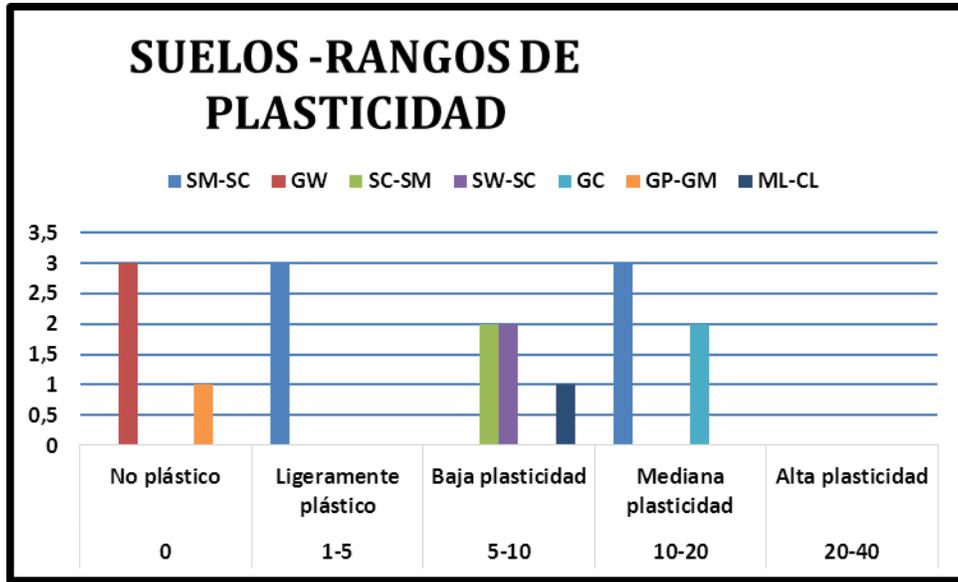


Figura 16. Suelos - rangos de plasticidad. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

3.3.1.3 Ensayo de corte directo: La tabla 7, indica los resultados obtenidos del análisis del ensayo de corte directo y los parámetros arrojados por éste.

Tabla 7.

Resultados de los ensayos de corte directo.

Barrio	Estrato	Profundidad	U.C.S.C	Angulo de Friccion	Co h e s i ó n (kN /m ²)
Juan XXIII	1	4	CL	22,4	19,47
Juan XXIII	2	6	SC	21,3	23,76
Juan XXIII	3	7	SC	22,4	24,78
Juan XXIII	1	4	S P-S M	15,1	15,98
Juan XXIII	1	5	S P-S M	14,8	17,12
Juan XXIII	1	5	SC	21,4	22,58
Juan XXIII	1	4	ML	29,8	27,64
Juan XXIII	2	6	CL	22,4	19,47
Juan XXIII	1	5	SC	17,3	20,45
Juan XXIII	1	5	ML	29,2	27,63
Juan XXIII	1	4	SP	23,6	31,47
Juan XXIII	2	6	S P-S C	21,4	17,34
Juan XXIII	1	5	S P-S M	16,7	14,8
Juan XXIII	2	6	SP	27,5	39,4
Juan XXIII	1	5	SM	30	32,9
Juan XXIII	1	5	SM	29,7	31,3
Juan XXIII	1	5	SP	27	36,32
Juan XXIII	1	3	SM	31,5	33,56
Juan XXIII	1	6	S P-S M	22,1	17,43
Juan XXIII	1	5	S P-S C	19,4	16,78
Juan XXIII	1	7	SM	27,5	31,43
Juan XXIII	1	5	SP	25,4	33,23
Juan XXIII	1	6	S M-S C	31,1	20,15
Juan XXIII	1	6	SC	21,4	21,52
Juan XXIII	1	6	ML	27,4	25,87
Juan XXIII	1	6	SM	28,7	32,47
Juan XXIII	1	6	SP	26,3	36,32
Juan XXIII	1	6	ML	26,4	24,87
Juan XXIII	1	6	ML	29,8	26,87
Juan XXIII	1	6	S W-S C	29,8	19,93
Juan XXIII	1	3	S M-S C	28,3	19,46
Juan XXIII	2	6	S W-S C	29,8	19,93
Juan XXIII	1	4	SC	21,4	21,52
Juan XXIII	2	6	ML	26,4	24,87
Juan XXIII	1	6	ML	29,8	26,87
Juan XXIII	1	4	CL	20,7	18,45
Juan XXIII	2	6	ML	27,4	25,87
Juan XXIII	1	3	SC	16,2	19,71

Tabla 7. Continuación

Barrio	Estrato	Profundidad	U.C.S.C	Angulo de Friccion	Co h e s i ó n (kN /m ²)
Juan XXIII	2	5	SM	19,5	32,5
Juan XXIII	1	4	ML	27,6	27,31
Juan XXIII	1	5	ML	26,1	21,63
Juan XXIII	1	6	SP	20,8	15,05
Juan XXIII	1	5	SP-SC	23,2	16,55
Juan XXIII	1	5	SP-SC	17,8	14,55
Juan XXIII	1	4	SM	28,7	32,47
Juan XXIII	1	5	SP	26,3	36,32
Juan XXIII	1	5	SM-SC	31,1	20,15
Juan XXIII	1	4	SC	25,6	32,46
San Luis	1	3	ML-CL	19,64	32,35
San Luis	2	6	SC	22,88	33,22
San Luis	1	5	SC	21,5	29,98
San Luis	1	4	GC	19,46	21
San Luis	2	6	SC	21,77	31,22
San Luis	1	4	SC	30	35
San Luis	1	5	SM-SC	30	33
San Luis	1	5	SC-SM	24,76	33,12
San Luis	1	6	SC	22,32	20,1
San Luis	1	5	SC	21,34	30,1
San Luis	1	6	SC	22,13	30,02
San Luis	1	5	SM	21	5
San Luis	1	3	SC-SM	31,2	32,12
San Luis	2	5	GC	20,65	20
San Luis	1	5	SC	21,42	30,3
San Luis	1	6	CL	18,59	22,76
San Luis	1	5	SC	21,67	29,87
San Luis	1	5	CL	22,65	19,43
San Luis	1	6	CL	21	21,99
San Luis	1	5	SC	20,43	30,11
San Luis	1	6	CL	17,89	20,07
Simon Bolivar	1	5	SM	31	14,2
Simon Bolivar	1	6	GW	34	0
Simon Bolivar	1	4	GW	33	0
Simon Bolivar	1	6	GW	31	0
Simon Bolivar	1	5	SM	28	30,09
Batallon	1	6	SP	27,5	39,4
Batallon	2	5	SM	30	32,9
Batallon	1	5	SM	29,7	31,3
Batallon	1	5	SP	27	36,32

Tabla 7. Continuación

Barrio	Estrato	Profundidad	U.C.S.C	Angulo de Friccion	Co h e s i ó n (kN /m ²)
Juan XXIII	2	5	SM	19,5	32,5
Juan XXIII	1	4	ML	27,6	27,31
Juan XXIII	1	5	ML	26,1	21,63
Juan XXIII	1	6	SP	20,8	15,05
Juan XXIII	1	5	SP-SC	23,2	16,55
Juan XXIII	1	5	SP-SC	17,8	14,55
Juan XXIII	1	4	SM	28,7	32,47
Juan XXIII	1	5	SP	26,3	36,32
Juan XXIII	1	5	SM-SC	31,1	20,15
Juan XXIII	1	4	SC	25,6	32,46
San Luis	1	3	ML-CL	19,64	32,35
San Luis	2	6	SC	22,88	33,22
San Luis	1	5	SC	21,5	29,98
San Luis	1	4	GC	19,46	21
San Luis	2	6	SC	21,77	31,22
San Luis	1	4	SC	30	35
San Luis	1	5	SM-SC	30	33
San Luis	1	5	SC-SM	24,76	33,12
San Luis	1	6	SC	22,32	20,1
San Luis	1	5	SC	21,34	30,1
San Luis	1	6	SC	22,13	30,02
San Luis	1	5	SM	21	5
San Luis	1	3	SC-SM	31,2	32,12
San Luis	2	5	GC	20,65	20
San Luis	1	5	SC	21,42	30,3
San Luis	1	6	CL	18,59	22,76
San Luis	1	5	SC	21,67	29,87
San Luis	1	5	CL	22,65	19,43
San Luis	1	6	CL	21	21,99
San Luis	1	5	SC	20,43	30,11
San Luis	1	6	CL	17,89	20,07
Simon Bolivar	1	5	SM	31	14,2
Simon Bolivar	1	6	GW	34	0
Simon Bolivar	1	4	GW	33	0
Simon Bolivar	1	6	GW	31	0
Simon Bolivar	1	5	SM	28	30,09
Batallon	1	6	SP	27,5	39,4
Batallon	2	5	SM	30	32,9
Batallon	1	5	SM	29,7	31,3
Batallon	1	5	SP	27	36,32

Tabla 7. Continuación

Barrio	Estrato	Profundidad	U.C.S.C	Angulo de Friccion	Co h e s i ó n (kN /m ²)
San Pedro	1	5	SP-SM	17,8	16,8
San Pedro	1	6	SM-SC	30	24,7
El Zulia	1	5	SM	30	32,9
El Zulia	1	5	SM	29,7	31,3
Urb los Alpes	1	4	SP-SM	17,8	16,8
Urb los Alpes	1	6	SM-SC	30	24,7
Seminario	1	6	CL	19,45	19,43
Seminario	1	5	SC	21,65	27,4
Seminario	1	6	CL	18,98	21,05
Seminario	1	5	CL	19,64	22
Iser	1	6	SC	22,88	32,43
Iser	1	5	SC	22	30,4
Iser	1	4	SC	21,56	29,88
Iser	1	6	SC	22	33,54
Simon Bolivar	1	5	SP-SC	21,4	17,34
Simon Bolivar	1	4	SP	26	34,12
Simon Bolivar	1	5	SP	24,56	33,54
Simon Bolivar	1	6	SP	25,81	30,53
Romero	1	4	SP-SC	23,12	22,4
Romero	2	6	SP-SC	17,87	21
Cristo Rey	1	4	SP	26,82	33,56
Villa Cristina	1	4	SP	27,02	34,67
El Progreso	1	5	SP	26,87	31,52
Barrios Unidos	1	6	SC	21,63	33
Afanador	1	5	SP-SC	23,01	23,74
Afanador	1	4	SM	28,71	31,09
El Zulia	1	5	GP-GM	33,76	0
El Zulia	1	6	SM	26,51	32,51
Jurado	1	4	SP-SM	18,9	17,34
Jurado	1	5	SM	27,54	33,21
Jurado	1	6	SP-SM	19,08	18,75
Jurado	1	3	SC	21,42	31,87
Jurado	2	4	SM	27,78	30,06
Las Colinas	1	3	SP	27,06	32,68
Las Colinas	2	4	SP-SC	23,01	22,09
Las Colinas	3	5	SP	26,98	33,98
Santa Marta	1	5	SP	27,92	30,09
Santa Marta	1	4	SM	26,78	33,87
Santa Marta	2	5	SM	27,98	31,45
Santa Marta	1	6	SP-SM	19	16,83
El Guamo	1	4	SP-SM	17,65	17,43
Santa Marta	1	5	SM	26	33,98
Santa Marta	1	5	SM	26,97	31,78
Brighton	1	4	SC	19,99	32,51
Brighton	2	6	SM	27,09	33,41
San Luis	1	4	SP-SC	23	22,98

Nota. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

El ensayo de corte directo indica que los suelos analizados, para esta finalidad, son suelos con características arenosas como lo indica la clasificación, los cuales en términos ingenieriles pueden ser utilizados para fundación, terraplenes, y para edificaciones de vivienda residencial y de tipo comercial.

El ángulo de fricción es uno de los parámetros determinantes de la resistencia del suelo en conjunto con la cohesión.

La tabla 8, indica los rangos de dichos parámetros estructurales obtenidos en el ensayo de corte directo y se expresan la siguiente manera:

Tabla 8.

Rangos de ángulo de fricción y cohesión.

Clasificación (U.S.C.S)	Angulo de Fricción	Cohesión (kN/m2)
SM	19.50-31.50	14.20-32.90
CL	17.89-22.60	18.45-22.76
ML	26.10-29.80	21.63-27.64
SC	16.20-30.00	19.71-35.00
SP	20.80-27.92	30.90-39.40
SP-SM	14.80-22.10	14.80-17.43
SP-SC	17.80-23.20	14.55-17.34
SM-SC	28.30-31.10	19.46-33.00
SW-SC	29.80	19.33

Nota. Adaptado de Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona

3.4 Aplicación de los métodos geoestadísticos

3.4.1 Modelo geoestadístico Kriging. El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) y de la geoestadística, han sido un nuevo método de análisis y distribución en datos de variables espaciales, para dar utilidad e interpretación de la información recopilada durante años en el casco urbano del municipio de Pamplona.

Con esta técnica geoestadística, ha sido posible construir un mapa de zonificación geotécnica del suelo en el municipio de Pamplona, estudio que se realizó como parte de un proyecto de pregrado, con la codirección del autor (Albarracín, 2018, págs. 1-2), en donde se tuvo en cuenta las variables de capacidad portante a diferentes profundidades, ángulos de fricción, cohesión índice de plasticidad, contenido de humedad, porcentaje de gravas, limos y arcillas

El Kriging y sus variantes constituyen un método ideal para representar con mayor confiabilidad estadística que otras técnicas. A continuación, se describe en detalle la metodología utilizada:

- Como se necesita evaluar el comportamiento de los parámetros estructurales del suelo (cohesión, ángulo de fricción y peso específico del suelo), en el software ArcGis, luego de haber digitado la base de datos de la información geotécnica de todas las exploraciones, se entra en el módulo de geoestadística y se comienza a evaluar la información, teniendo en cuenta las correlaciones que presentan para predecir su comportamiento y establecer el tipo de evaluación Geoestadística a realizar.

- Se van a presentar las tres evaluaciones que se realizaron, y con base en estos resultados, se establecerán las desviaciones estándar que tendrán cada una de las variables, en el punto de interés, que se le quiera realizar una evaluación Geoestadística.

3.4.1.1 Evaluación cohesión. En primer lugar, se obtuvo el histograma

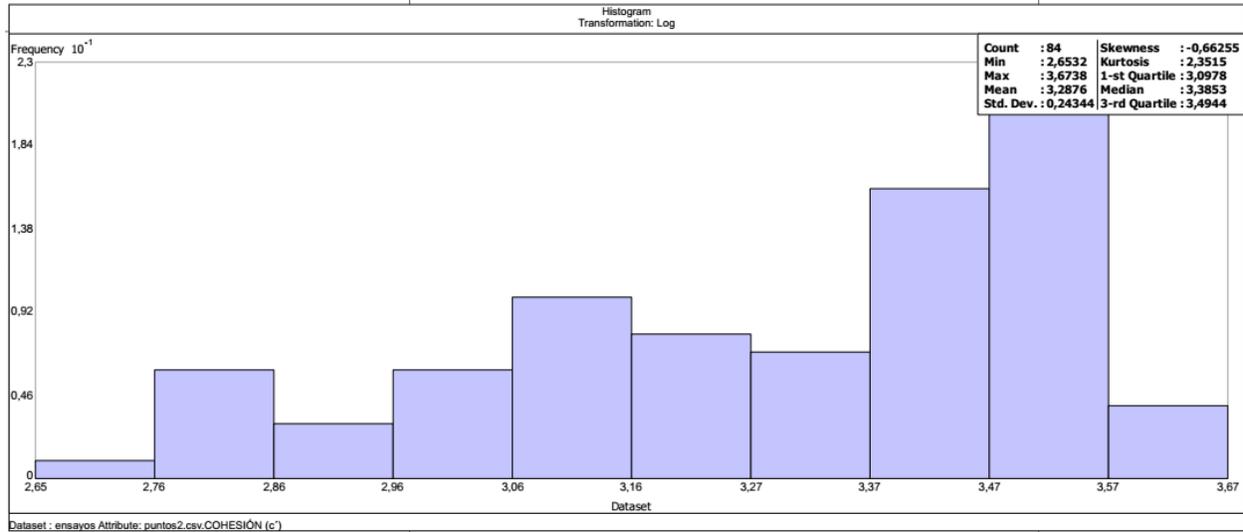


Figura 17. Histograma de cohesión muestra total

Histograma de distribución de frecuencias de los datos de cohesión, con ajuste logarítmico, se presenta una distribución normal, con asimetría negativa (Skewness -0.66), indica sesgo a la derecha. La media y la mediana, presentan valores similares, demostrando una buena correlación de los datos.

Tabla 9.

Resultados estadísticos cohesión

N	84		SKEWNESS	-.0,66255	
MIN	2,6534	14,20224428	KURTOSIS	2,3515	10,5013099
MAX	3,6738	39,40134686	1-ST QUARTILE	3,0978	22,1491695
MEAN (x̄)	3,2876	26,77851803	MEDIA	3,3853	29,5268494
STD. DEV.	0,24344	1,275629778	1-ST QUARTILE	3,4944	32,9305237

La primera columna de estos datos de cohesión, corresponden a valores logarítmicos, a estos valores se convierten a valores normales y se encuentra, por ejemplo, valor mínimo logarítmico 2.6534 y valor real 14.2022. Del mismo modo se calculó la estadística de los otros parámetros.

El análisis de los datos de la cohesión muestra que no tienen una gran dispersión respecto a la media, puesto que la media, la mediana y el primer cuartil y el tercer cuartil son muy similares. Además, se tiene una variación estándar baja. De la misma manera, se calcula el coeficiente de variación = $0,24344/3,2876=0,0740$ obteniéndose un valor de 7,4% de variación con respecto a la media. Se observa una gráfica de histograma de frecuencias de tipo platycúrtica o achatada, puesto que la curtosis es menor a 3 y su distribución asimétrica negativa de sesgo a la derecha.

Por cada propiedad del suelo se analizó la distribución de los datos mediante un histograma para determinar el método Kriging de óptimo ajuste. En este caso, se recurre a un ajuste transformación logarítmica en las cuales se observa que presentaban una buena distribución en los datos, evidenciado con medias similares; para dar inicio al Geostatistical Analyst se realizó un trend Análisis.

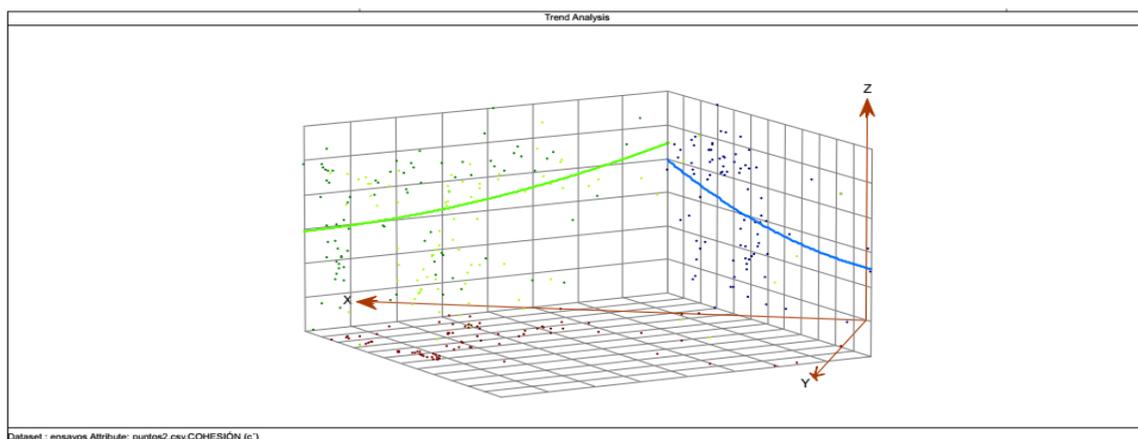


Figura 18. Trend Analysis cohesión

El análisis de tendencia (TREND ANÁLISIS) muestra el comportamiento de los datos de la cohesión, en los planos X Z y YZ, con una leve tendencia a generar una función de parábola vertical hacia arriba.

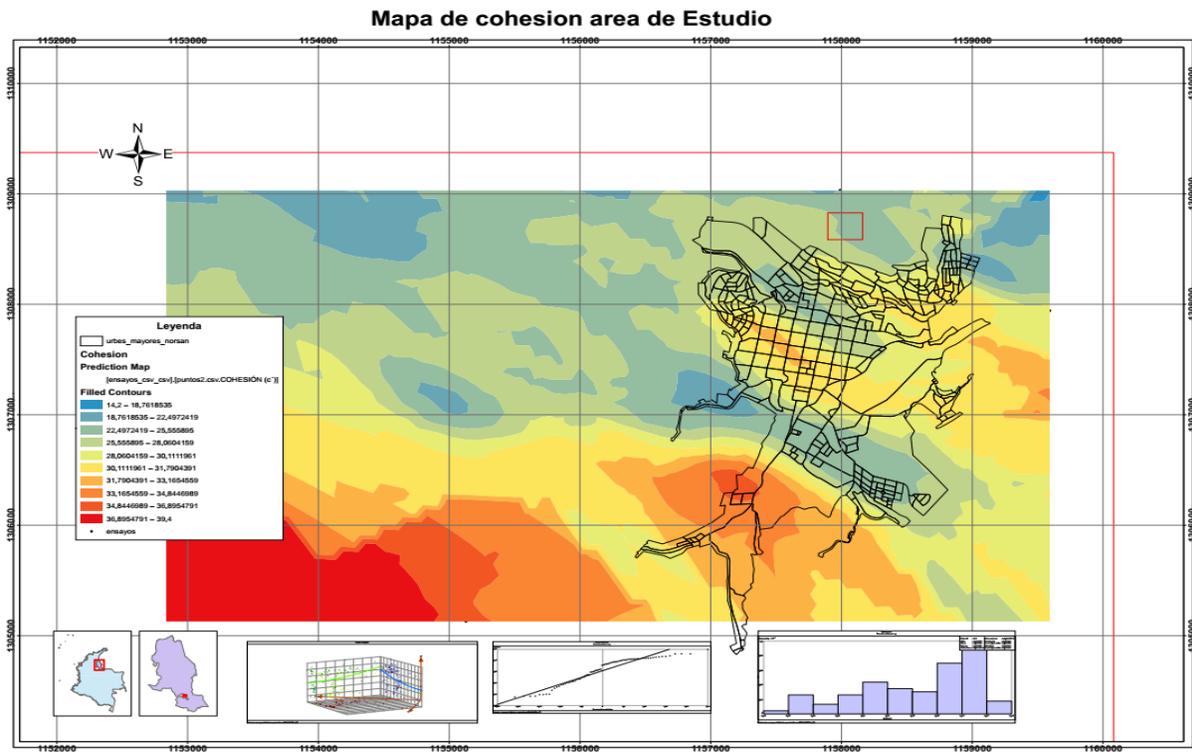


Figura 19. Mapa de cohesión área de estudio

Se puede apreciar el comportamiento de la cohesión en la zona de estudio, en él se detalla el talud del Barrio Juan XXIII.



Figura 20. Detalle del comportamiento de la cohesión en el barrio Juan XXIII

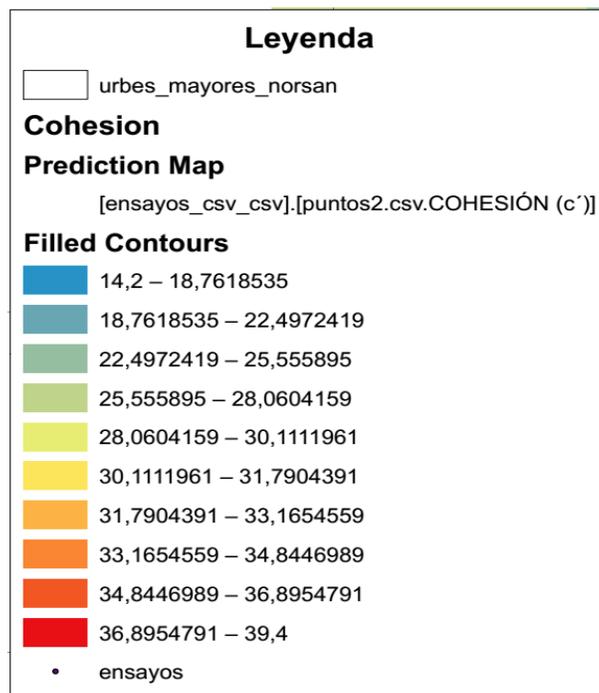


Figura 21. Escala cohesión

Predicción de la cohesión, la cual según la modelación de Kriging, debería estar entre 18.76 KN/m² y 28.06KN/m²

3.4.1.2 *Evaluación ángulo de fricción:* Se muestra en la siguiente Figura:

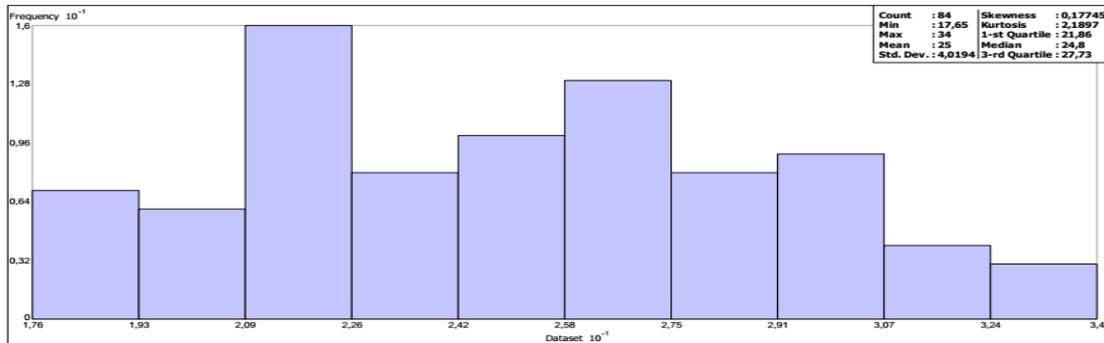


Figura 22. Histograma de ángulo de fricción muestra total

Tabla 10.

Resultados estadísticos ángulo de fricción

Count	: 84	Skewness	: 0,17745
Min	: 17,65	Kurtosis	: 2,1897
Max	: 34	1-st Quartile	: 21,86
Mean	: 25	Median	: 24,8
Std. Dev.	: 4,0194	3-rd Quartile	: 27,73

El análisis de los datos del ángulo de fricción muestra que no tienen una gran dispersión respecto a la media, puesto que la media, la mediana, y el primer cuartil y el tercer cuartil son muy similares. Además, se tiene una variación estándar baja. De la misma manera se calcula el coeficiente de variación = $4,0194/25=0,1607$ obteniéndose un valor de 16,07% de variación con respecto a la media. Se observa una gráfica de tipo platicúrtica o achatada puesto que la curtosis es menor a 3 su distribución asimétrica positiva sesgo a la izquierda (Skewness)

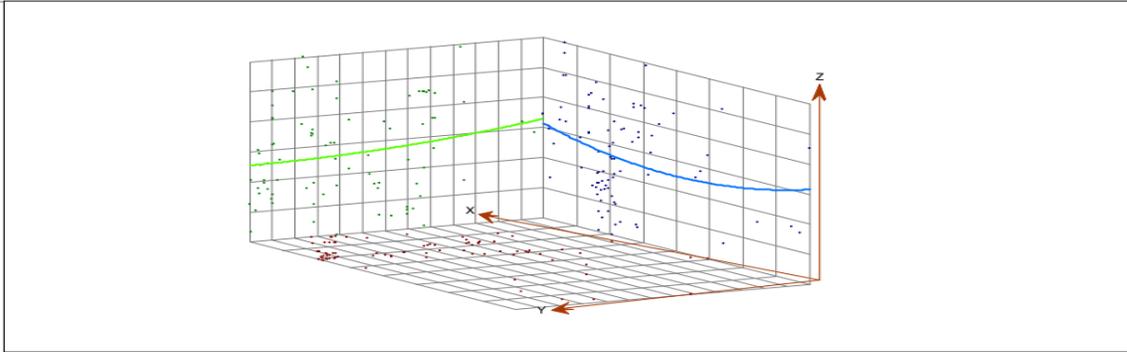


Figura 23. Trend Analysis ángulo de fricción

El análisis de tendencia (TREND ANALISIS) muestra el comportamiento de los datos del ángulo de fricción, en los planos X Z y YZ, mostrando una leve tendencia a generar una función de parábola vertical hacia arriba.

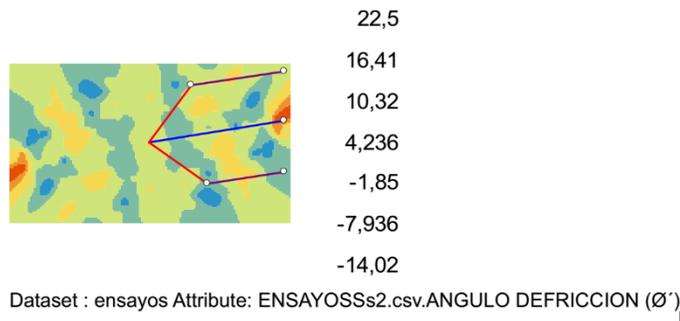


Figura 24. Modelo de ajuste de tendencia en Kriging

En la Figura anterior, muestra la herramienta con lo cual se realizó el ajuste al modelo de Kriging corrigiendo dicha tendencia con la dirección, que se ajuste al volumen de datos al modelo parabólico que se presenta.

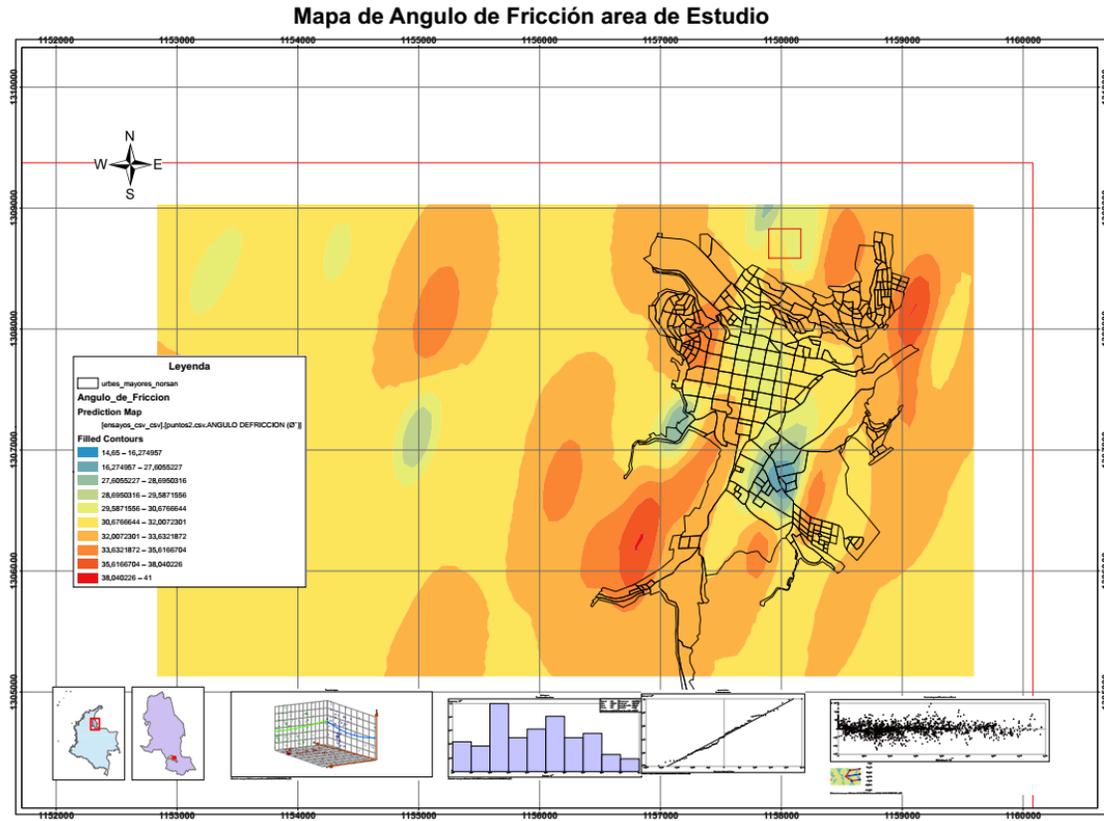


Figura 25. Mapa ángulo de fricción en la zona de estudio

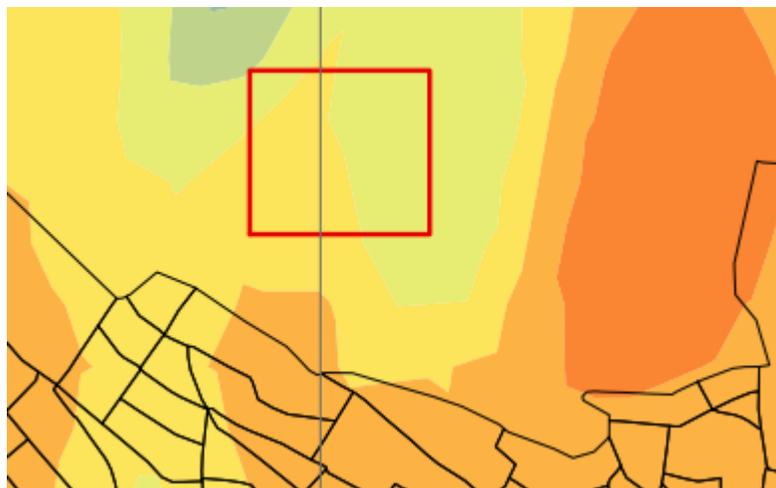


Figura 26. Detalle comportamiento ángulo de fricción zona de estudio



Figura 27. Escala ángulo de fricción

De acuerdo a la escala el comportamiento del ángulo de fricción, está entre 29.58 y 32.00, en el área de estudio.

3.4.1.3 Evaluación peso específico: Se muestra en la siguiente Figura.

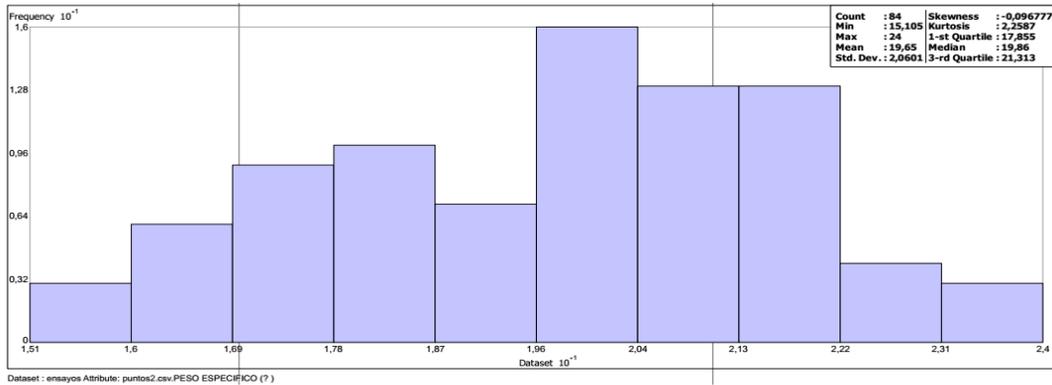


Figura 28. Histograma de peso específico muestra total

Tabla 11.

Resultados estadísticos peso específico.

Count	: 84	Skewness	: -0,096777
Min	: 15,105	Kurtosis	: 2,2587
Max	: 24	1-st Quartile	: 17,855
Mean	: 19,65	Median	: 19,86
Std. Dev.	: 2,0601	3-rd Quartile	: 21,313

El análisis de los datos de peso específico muestra que no tienen una gran dispersión respecto a la media, puesto que la media, la mediana, y el primer cuartil y el tercer cuartil son muy similares. Además, se tiene una variación estándar baja. De la misma manera se calcula el coeficiente de variación = $2,0601/19,65=0,1048$, obteniéndose un valor de 10,48% de variación con respecto a la media. Se observa una gráfica de tipo platocúrtica de distribución normal o achatada puesto que la curtosis es menor a 3 su distribución asimétrica negativa de sesgo a la derecha.

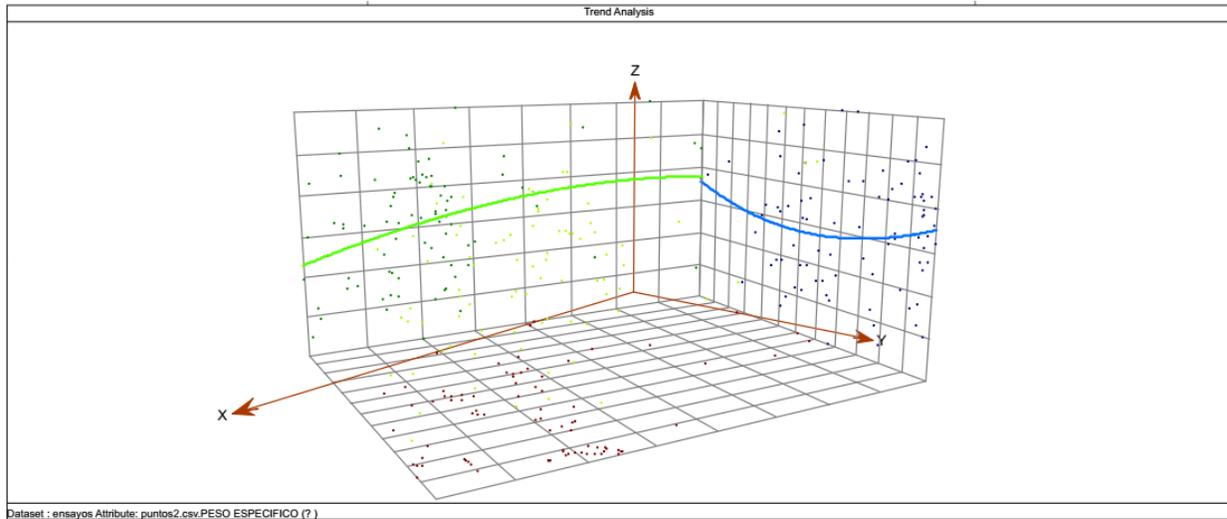


Figura 29. Trend analysis peso específico

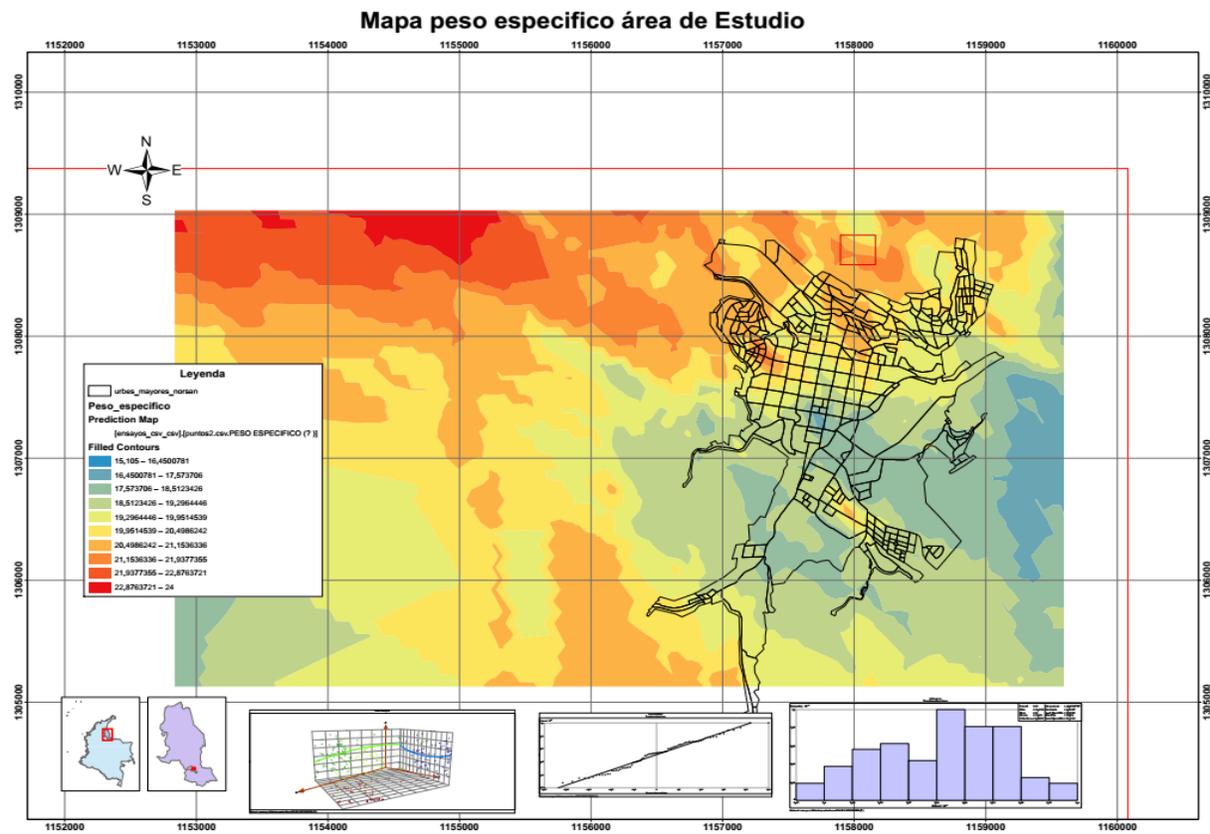


Figura 30. Mapa peso específico en la zona de estudio

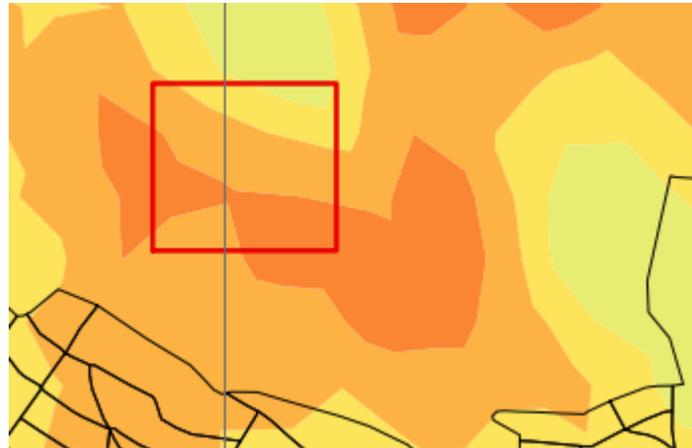


Figura 31. Detalle comportamiento peso específico zona de estudio



Figura 32. Escala peso específico

El comportamiento del peso específico, es más amplio, el cual se encuentra en los rangos de 19.29 kN/m³ hasta 21.93 kN/m³.

3.5 Exploración Local Zona de Estudio

Se inició con la adquisición de datos sísmicos empleando el método de refracción sísmica (Jiménez & Amézquita, 2017). Una vez realizada la exploración sísmica, se evaluaron las exploraciones realizadas en el talud de estudio y que fueron referenciadas en la tabla 7, adicionalmente se cuenta con información de exploraciones realizadas por parte de Interobras de Santander, y por tener información similar, se opta por esta última para hacer le evaluación. Se tienen 13 exploraciones en el talud objeto de estudio, recolectándose las muestras respectivas, utilizando equipos de SPT por percusión, y los respectivos ensayos de laboratorios, adjuntos al presente trabajo. y con la aplicación de métodos no invasivos se identificaron los espesores de cada estrato de suelo hasta altas profundidades, contando con estos parámetros definidos se procedió a elaborar el modelo geológico-geotécnico de las secciones estudiadas.

3.5.1 Exploración geofísica. En total se realizaron dos líneas sísmicas; la primera ubicada en la parte derecha de la ladera y la segunda en la parte izquierda. El ensayo consistió en la aplicación de una línea sísmica de 120 metros de longitud y a ella se adhirieron 24 sensores (geófonos), separados 5 metros uno del otro. La fuente utilizada fue un mazo de 16 libras y la toma de datos se realizó utilizando un sismógrafo Geode. El procesamiento de datos, se realizó con la ayuda del módulo Pickwin (Pick Firts Breacks or Dispersión Curves), donde se observaron los datos iniciales, y se crearon los picados y el módulo de plotrefra (Refraction Analysis).

El análisis se realizó basándose en los resultados obtenidos por el software y la clasificación de los materiales se hizo de acuerdo a los rangos de velocidades obtenidos. La clasificación de los materiales se obtuvo de la tabla 6.

Tabla 12.

Velocidades de Onda P (Vp)

Materiales 	Velocidades
Suelos y rocas naturales	m/s
Material superficial meteorizado	240-610
Grava o arena seca	460-915
Arena (saturada)	1220-1830
Arcilla (saturada)	915-2750
Agua	1430-1665
Agua de mar	1460-1525
Arenisca	1830-3960
Esquisto	2750-4270
Tiza	1830-3960
Caliza	2134-6100
Granito	4575-5800
Roca metamórfica	3050-7000

Nota: Adaptado de Gutierrez, K & Biutrago, L. (2016). Caracterización geofísica del subsuelo mediante las técnicas de refracción sísmica, reflexión sísmica, masw y remi en depósitos superficiales y zonas críticas de la universidad de pamplona. Pamplona.

En el presente proyecto, la información es producto de los ensayos de refracción sísmica realizados en (Jiménez & Amézquita, 2017), en él se realizaron tres líneas de refracción sísmica.

3.5.1.1 Primera línea de refracción sísmica: La primera línea para aplicar el ensayo sísmica de refracción tuvo lugar en la zona de la ladera que colinda con el barrio Juan XXIII, esta zona se caracteriza por contar con la presencia del nivel freático en la superficie, debido a los afloramientos de agua ubicados en la parte media-alta de la ladera. A partir de los resultados obtenidos en este ensayo, y calculado los espesores de cada capa de suelo según los rangos de velocidades obtenidos, y la zonificación de los diferentes tipos de suelos encontrados, se realizaron los modelos conceptuales de cada perfil, de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 13.

Caracterización primera línea sísmica

Capa	Vp	Material	Espesor (m)
1	300-600	Arena arcillosa	3-8m
2	750-900	Grava o arena seca	16-26m
5	2700-2999	Arenisca	Indeterminado

Nota: Adaptado de Jiménez, J. & Amezcuita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.

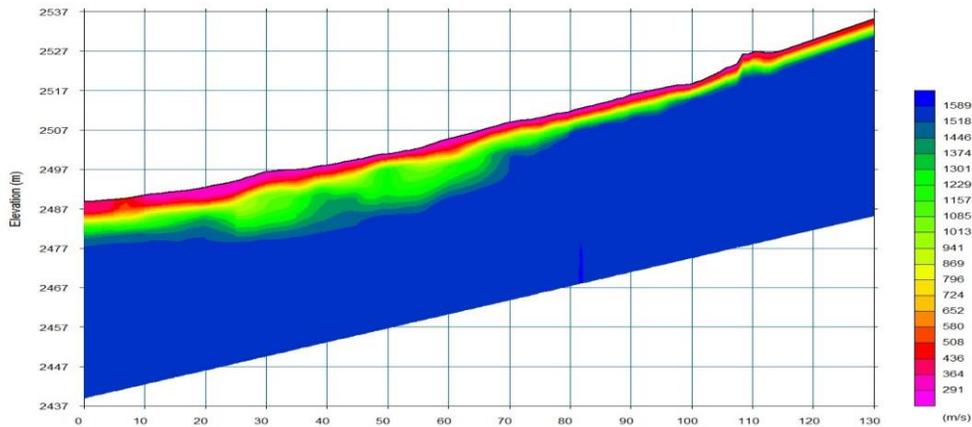


Figura 33. Sección de tomografía primera línea sísmica. Adaptado de Jimenez, J. & Amezquita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.

3.5.1.2 Segunda línea de refracción sísmica: Los datos de la segunda línea del ensayo sísmica de refracción se adquirieron del informe (MONTES, y otros, 2016), el cual tuvo lugar en la zona central de la ladera que colinda con el Barrio Juan XXIII y con la vía Pamplona-Bucaramanga. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en este ensayo.

Tabla 14.

Caracterización segunda línea sísmica.

Capa	Vp	Material	Espesor (m)
1	300-600	Arena arcillosa	3-8m
2	750-900	Grava o arena seca	16-26m
3	1112-1373	Arcilla saturada	9-33m
4	2700-2999	Arenisca	Indeterminado

Nota. Adaptado de Jiménez, J. & Amezquita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.

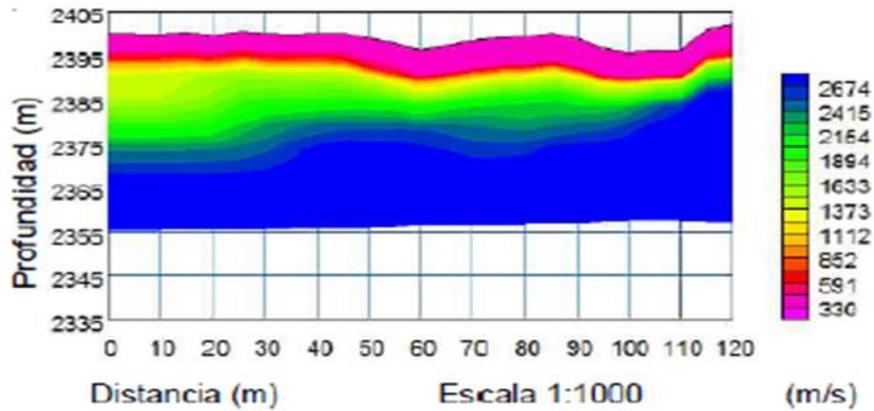


Figura 34. Sección de tomografía segunda línea sísmica. Adaptado de Jiménez, J. & Amezcuita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.

3.5.1.3 Tercera línea de refracción sísmica: La tercera línea para aplicar el ensayo sísmica de refracción tuvo lugar en la zona de la ladera que colinda con el Barrio San Luis, esta zona se caracteriza por contar con la presencia de coluviones y de escarpes de gran magnitud, en la parte alta de la ladera. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en este ensayo.

Tabla 15.

Caracterización tercera línea sísmica.

Capa	Vp	Material	Espesor (m)
1	364-391	Arena arcillosa	3-8m
2	652-941	Grava o arena seca	16-26m
3	2700-2999	Arenisca	Indeterminado

Nota. Adaptado de Jiménez, J. & Amezcuita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.

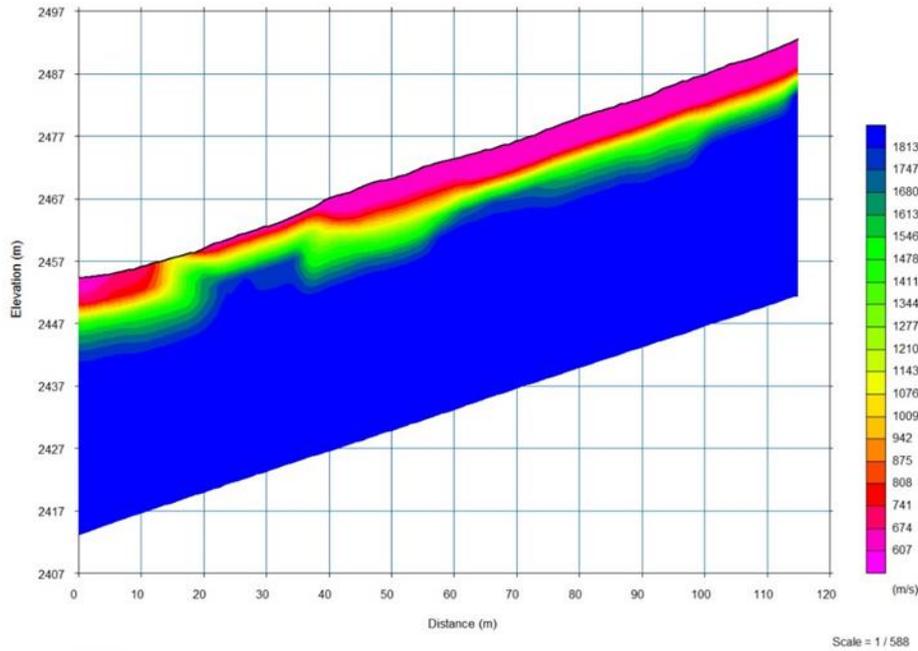


Figura 35. Sección de tomografía tercera línea sísmica. Adaptado de Jiménez, J. & Amezquita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.

3.5.2 Perforaciones exploratorias en campo. Se realizaron, 13 exploraciones en el talud, por parte de la firma Interobras Santander, la ubicación se detalla en la siguiente tabla: en el anexo XX, se adjunta el reporte fotográfico, suministrado por la firma que realizó las exploraciones.

Tabla 16.

Ubicación sondeos exploratorios

Sondeo	Latitud	Longitud	Norte	Este	Cota
Sondeo 1	7°23'16.57"	72°38'50.66"	1308565.37	1158606.82	2421m
Sondeo 2	7°23'13.07"	72°38'49.15"	1308565.37	1158606.82	2419m

Tabla 16. *Continuación*

Sondeo	Latitud	Longitud	Norte	Este	Cota
Sondeo 3	7°23' 9.81"	72°38'47.70"	1308464.44	1158375.53	2413m
Sondeo 4	7°23' 6.56"	72°38'46.33"	1308364.71	1158417.88	2395m
Sondeo 5	7°23' 16.03"	72°38'52.54"	1308655.10	1158226.43	2404m
Sondeo 6	7°23' 12.34"	72°38'50.90"	1308541.87	1158277.11	2397m
Sondeo 7	7°23' 9.09"	72°38'49.59"	1308442.13	1158317.62	2389m
Sondeo 8	7°23' 5.77"	72°38'48.15"	1308340.25	1158362.12	2380m
Sondeo 9	7°23' 15.70"	72°38'53.81"	1308644.84	1158187.51	2398m
Sondeo 10	7°23' 12.16"	72°38'51.45"	1308536.29	1158260.26	2391m
Sondeo 11	7°23' 8.38"	72°38'51.36"	1308420.14	1158263.39	2373m
Sondeo 12	7°23' 4.97"	72°38'50.57"	1308315.43	1158287.96	2364m
Sondeo 13	7°23' 10.08"	72°38'51.11"	1308472.71	1158270.89	2383m



Figura 36. Planta ubicación de los sondeos exploratorios. Adaptado de Google Earth, (2018).

Las exploraciones se hicieron utilizando equipo de spt, con percusión y recuperación de muestra. En laboratorio se realizaron los ensayos correspondientes a: de clasificación, corte, consolidación entre otros, los cuales se adjuntan en el Apéndice B. Del presente documento.

Para cada sondeo se utilizó la herramienta computacional, Novo SPT, de los cuales se presentan para cada exploración, los comportamientos de la cohesión y la fricción. Para el cálculo de estas variables, el programa, utiliza correlaciones adicionales a las comúnmente utilizadas, el ángulo de fricción lo correlaciona principalmente con el valor de N, correspondiente al número de golpes. Para los valores de cohesión, no se encuentran fórmulas que correlacionen con el número de golpes, éstas se calculan con base en el límite líquido, índice de plasticidad, índice de liquidez y esfuerzo efectivo.

Se presentan las siguientes correlaciones para el ángulo de fricción

Dunhan, 1954

$$\Phi_{d=(12N)^{0.5}+25}$$

Partículas de suelo bien granuladas y angulares.

$$\Phi_{d=(12N)^{0.5}+20}$$

Partículas de suelo redondas y bien granuladas o angulosas de grano uniforme.

$$\Phi_{d=(12N)^{0.5}+15}$$

Partículas de suelo redondas y de grano uniforme.

Peck et al, 1953:

$$\phi_{d=(0.3N)^{0.5}+27}$$

Meyerhof 1956:

$$\phi = 28 + 15 \frac{D_r}{100}$$

Kulhaway & Mayne 1990(para suelos de grano fino):

$$\phi = \sin^{-1}(0.8 - 0.094 \ln(IP))$$

Para la cohesión principalmente se presentan las siguientes correlaciones.

Bjerrum & Simons, 1960 (para PI>50%):

$$s_u = 0.45 \sigma'_v \sqrt{\frac{IP}{100}}$$

Karlsson & Viberg, 1967(para LL>20%):

$$\mathcal{S}_u = 0.5 \frac{LL}{100} \sigma'_{vr}$$

Skemton & Henkel, 1953:

$$\mathcal{S}_u = \sigma'_{vr}(0.11 + 0.0037IP)$$

4 Análisis de Estabilidad de Taludes

4.1 Análisis Determinístico

Para este cálculo de factores de seguridad por el método determinístico. Se usó la plataforma computacional Slide (Rocscience) donde se plantearon los modelos de la estratigrafía encontrada con los sondeos realizados en el sector en mención. Los modelos presentados en los anexos contemplan y presentan las condiciones básicas y dinámicas dispuestas para el cálculo tales como, ángulo de fricción, cohesión, peso específico, y parámetros sísmicos.

Se adjuntan en el Apéndice C, modelos en la plataforma en mención SLIDE (Rocscience).

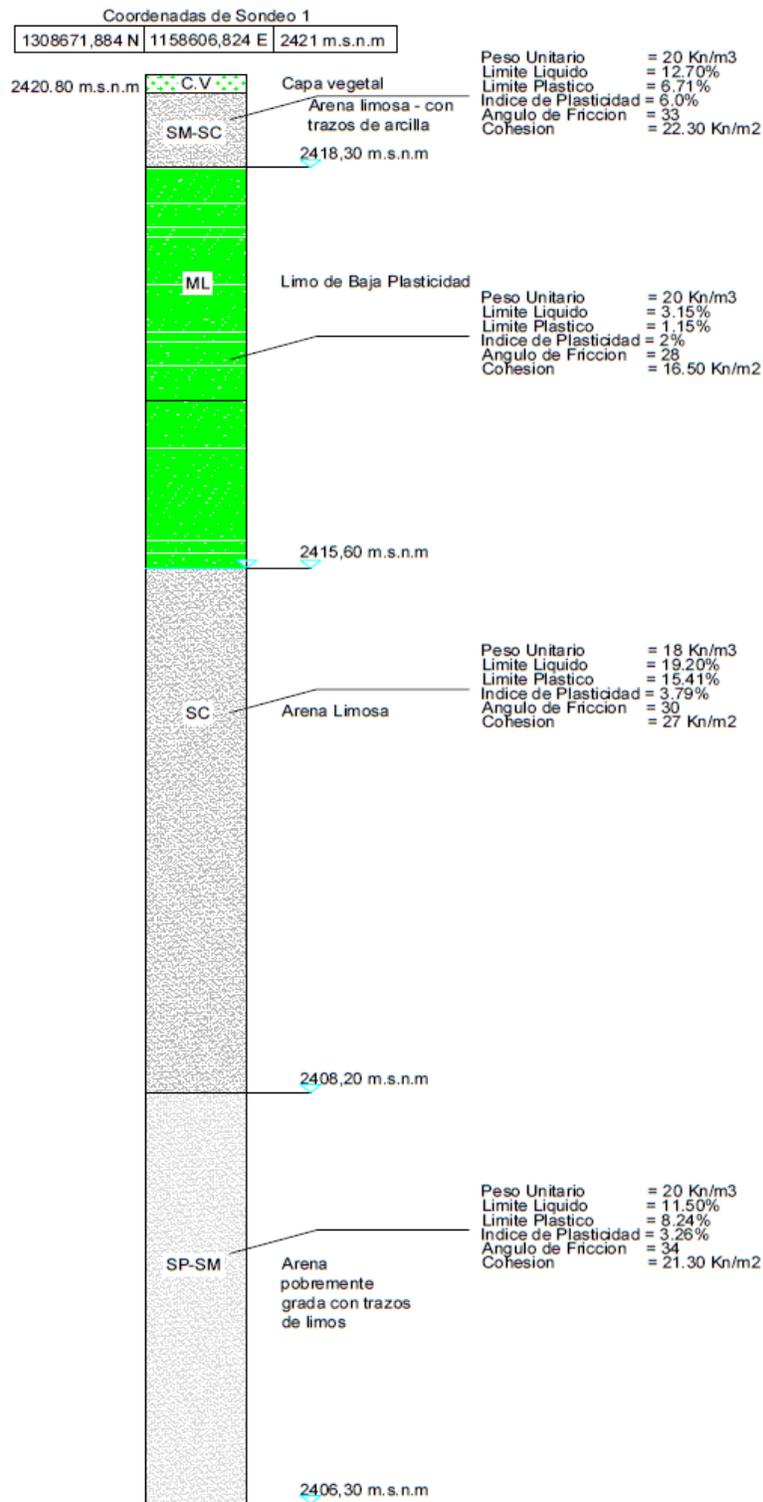


Figura 37. Perfil estratigráfico Talud 1. Método Determinístico

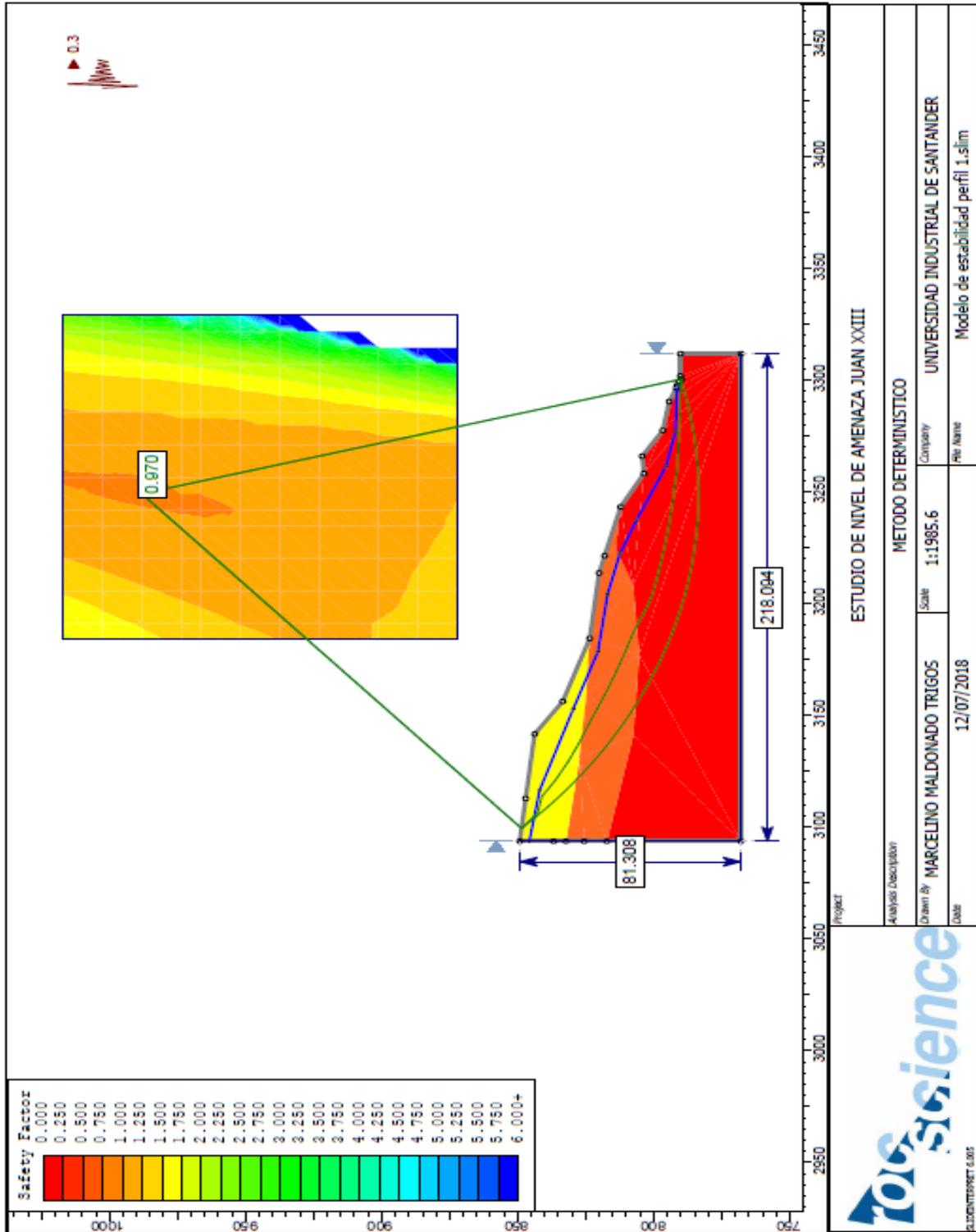


Figura 38. Método determinístico modelo de estabilidad perfil 1

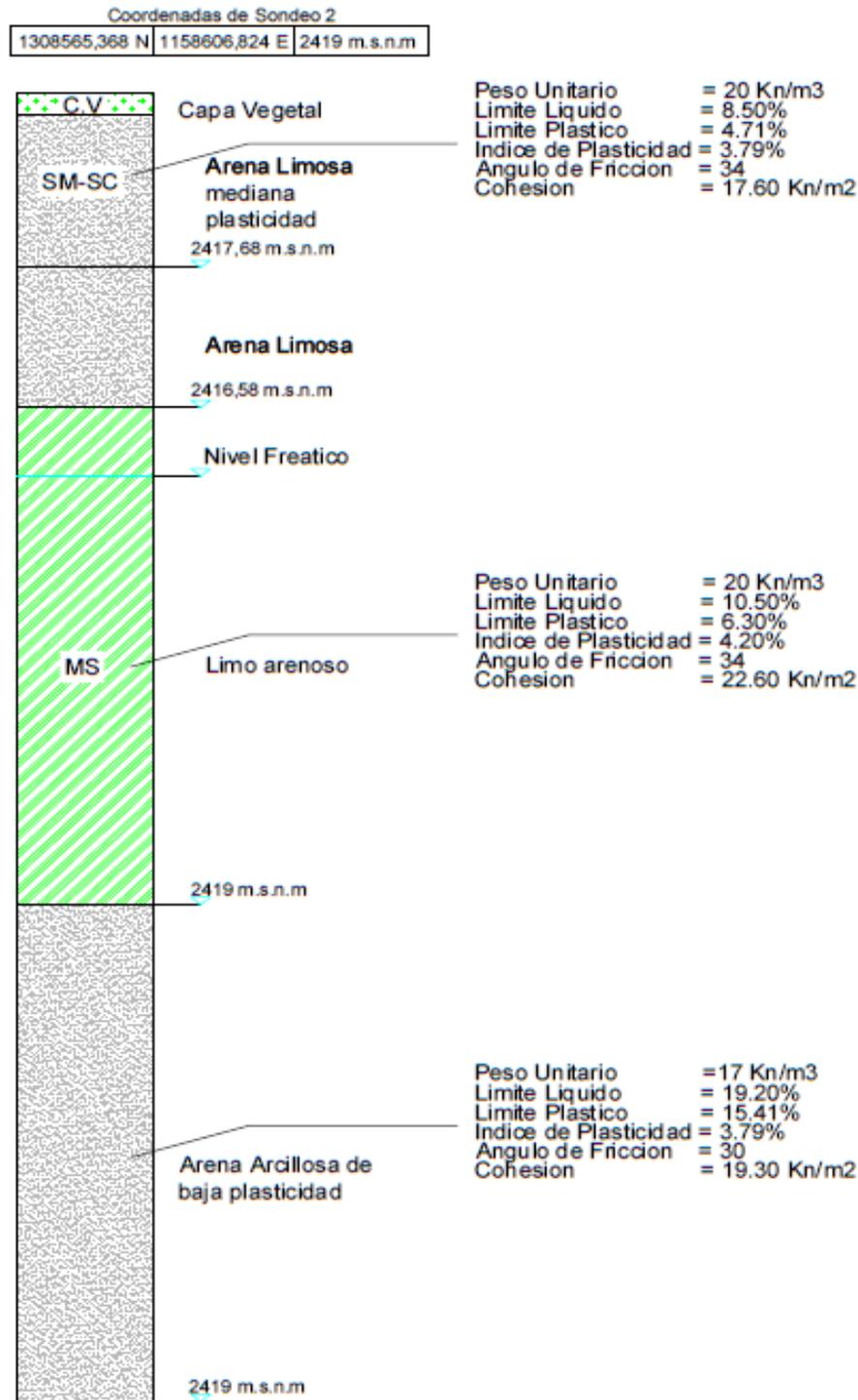


Figura 39. Perfil estratigráfico Talud 2. Método Determinístico

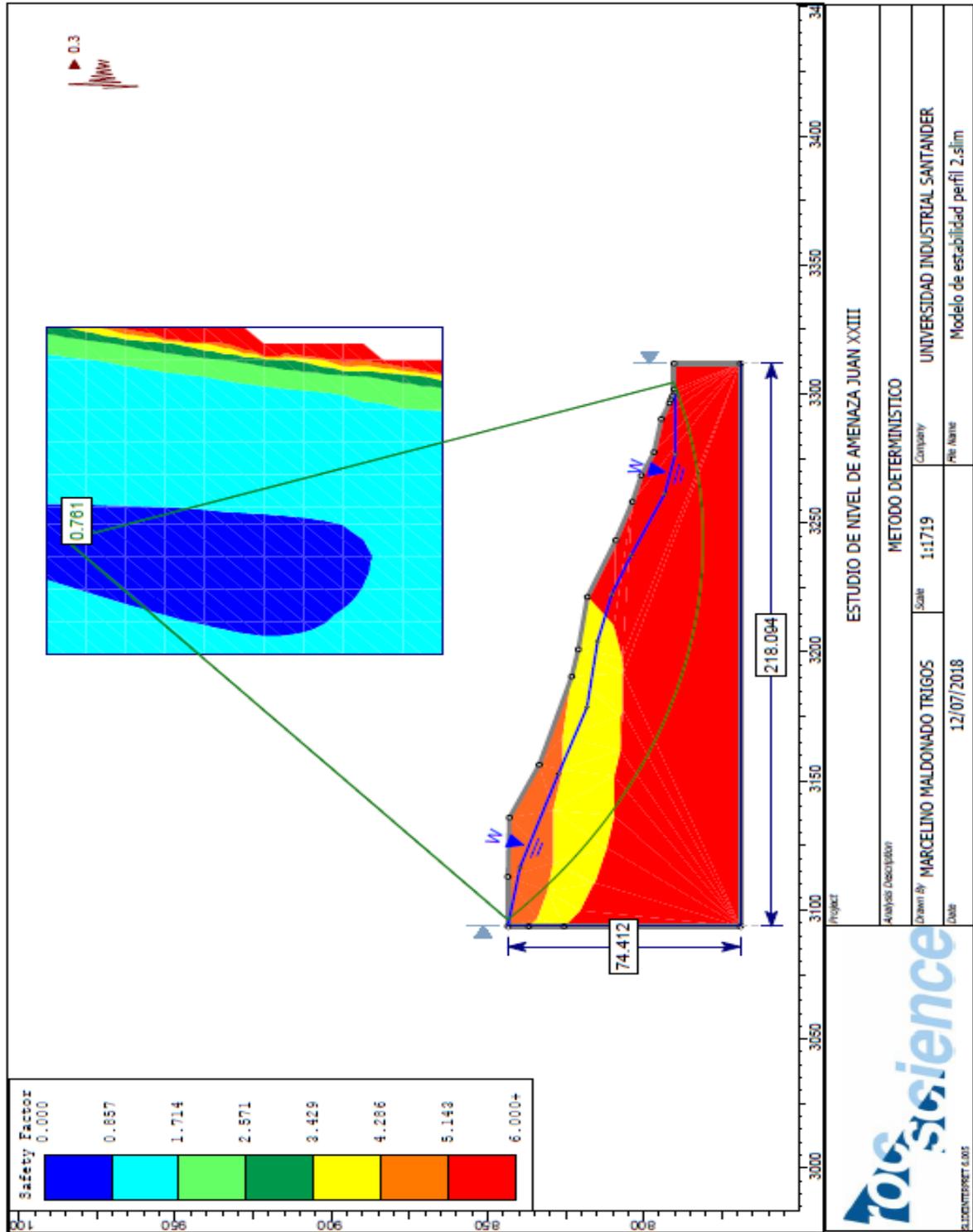


Figura 40. Método determinístico modelo de estabilidad perfil 2

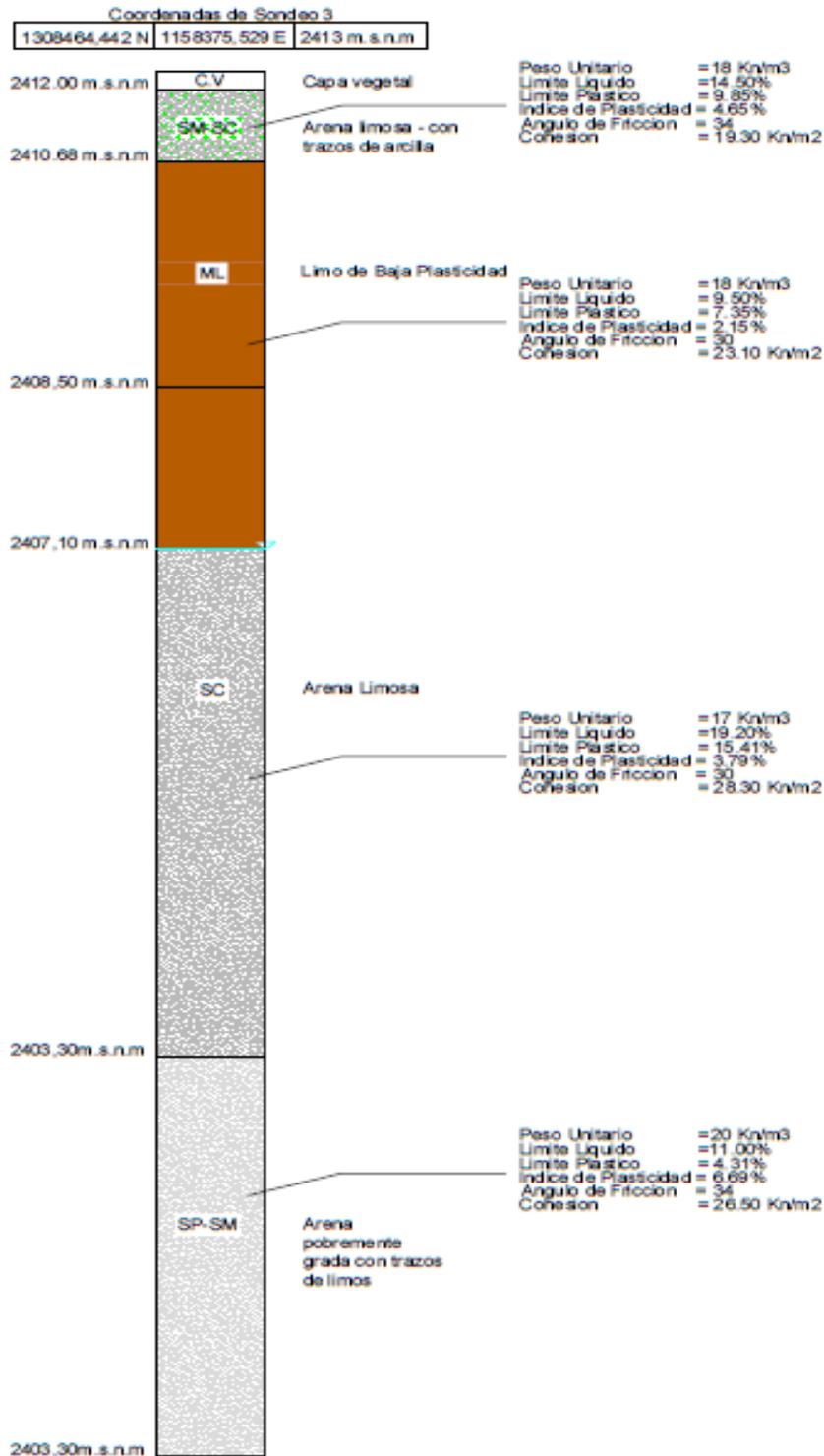


Figura 41. Perfil estratigráfico Talud 3. Método Determinístico

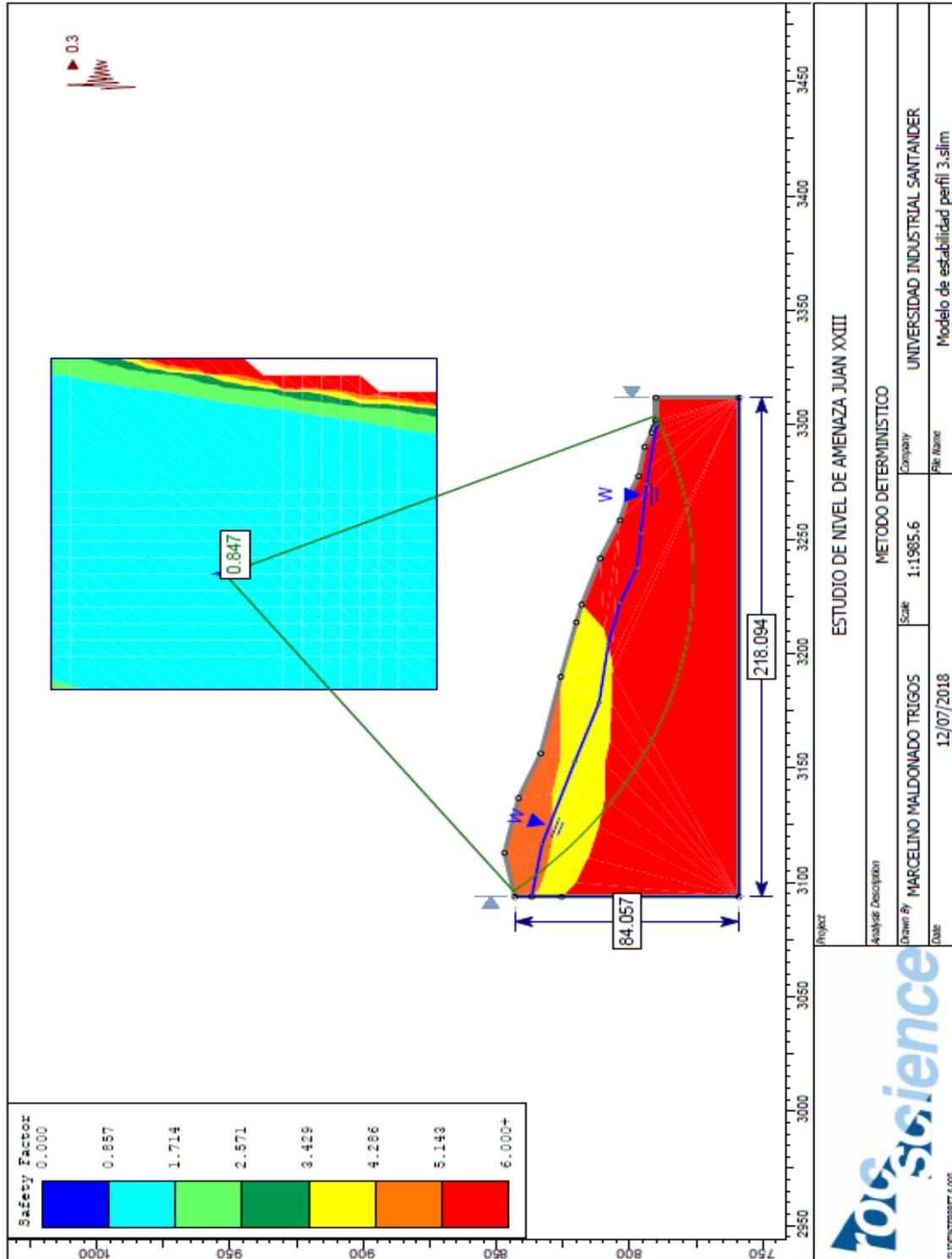


Figura 42. Método determinístico modelo de estabilidad perfil 3

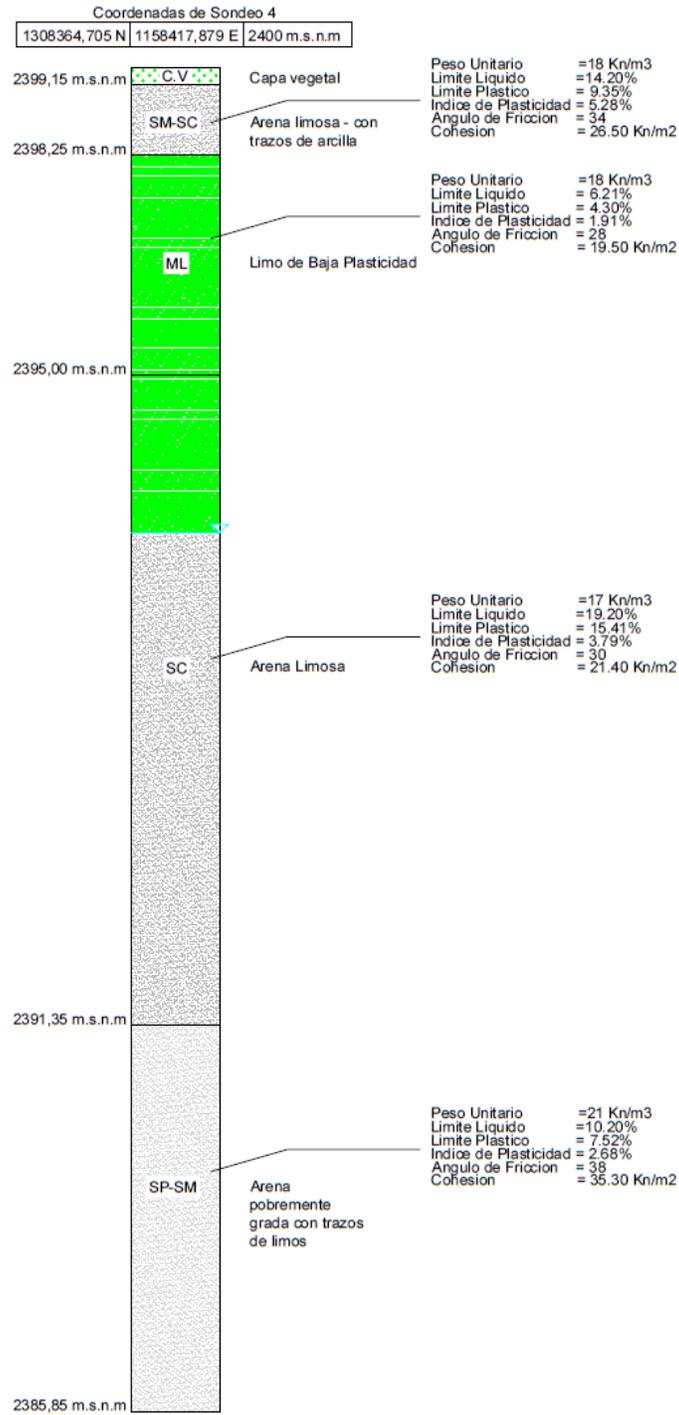


Figura 43. Perfil estratigráfico Talud 4. Método Determinístico

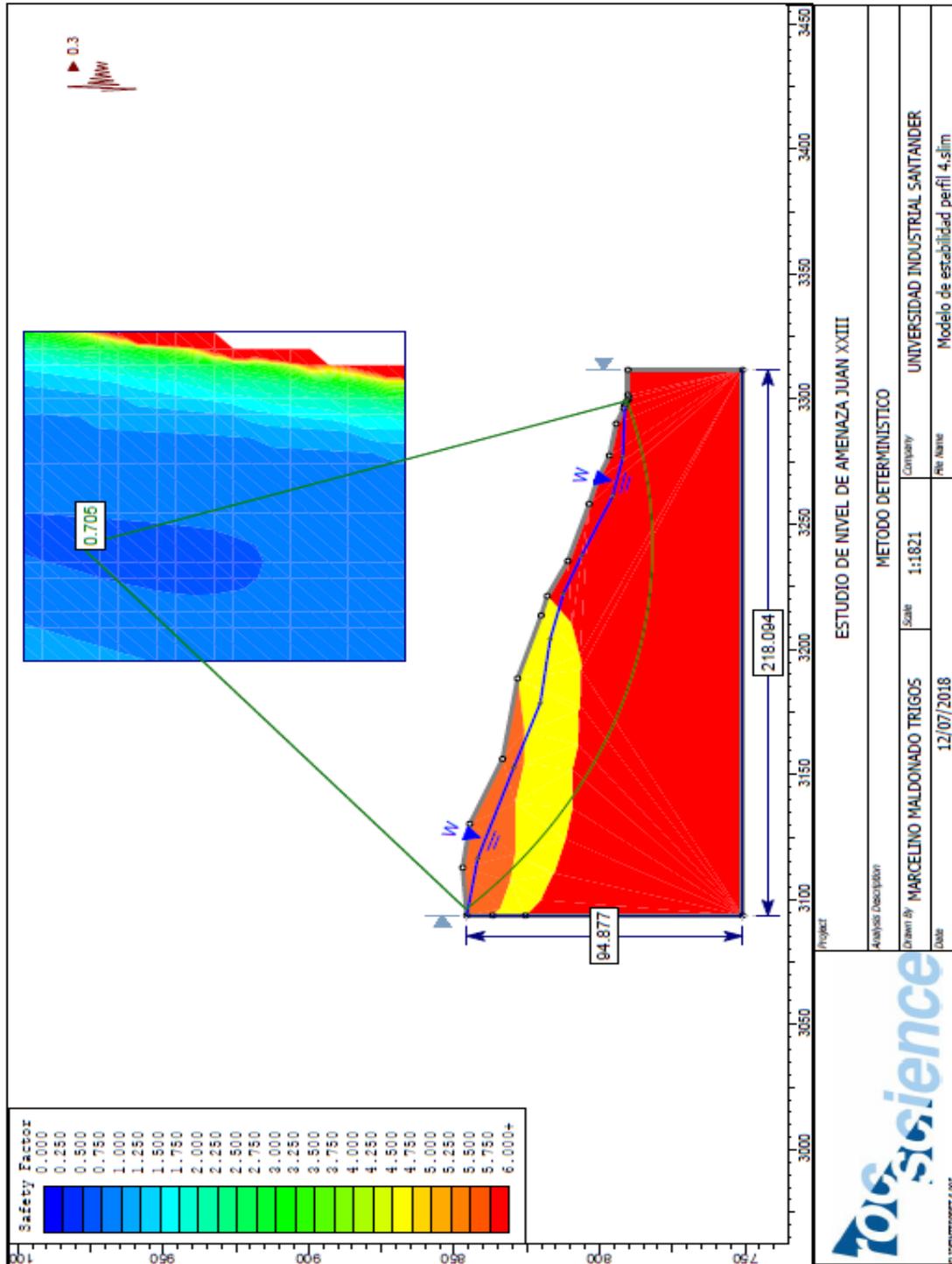


Figura 44. Método determinístico modelo de estabilidad perfil 4

Las estratigrafías que sirvieron de base para el análisis determinístico, se presentan en el apéndice D, una por cada exploración.

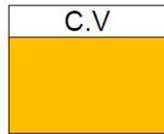
4.2 Análisis Probabilístico

Para el cálculo estadístico y probabilístico se relacionaron y correlacionaron exploraciones próximas y cercanas en el Municipio de Pamplona, el cálculo de los parámetros de desviación estándar, media, máximos y mínimos de los factores básicos de la exploración tales como ángulo de fricción, cohesión, peso específico, se obtuvieron usando la plataforma ArcGis 10.5.0 por los métodos de Kriging. Posteriormente se aplicaron en la plataforma Slide (Rocscience) para el cálculo de los factores de seguridad por el método de Monte Carlo.

Para este análisis probabilístico, se utilizará los datos estadísticos que proyecta el Kriging, para la cohesión, ángulo de fricción y peso unitario, se contemplará para este caso, una muestra uniforme, de la cual se espera marque una tendencia más conservadora del comportamiento del talud, es decir con menores factores de seguridad.

Este es un ejercicio, que nos permitirá demostrar la importancia del análisis estadístico, en este caso en la estabilidad de un talud, se entiende que, en la medida de contar con abundante información, los beneficios serán mayores.

Perfil Probabilístico



Capa vegetal

#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	PROBABILISTICO	Cohesion	Normal	26,78	1,28	14,2	39,4
2	PROBABILISTICO	Phi	Normal	25	4,02	17,65	34
3	PROBABILISTICO	Unit Weight	Normal	19,65	2,06	15,11	24

Figura 45. Perfil Probabilístico

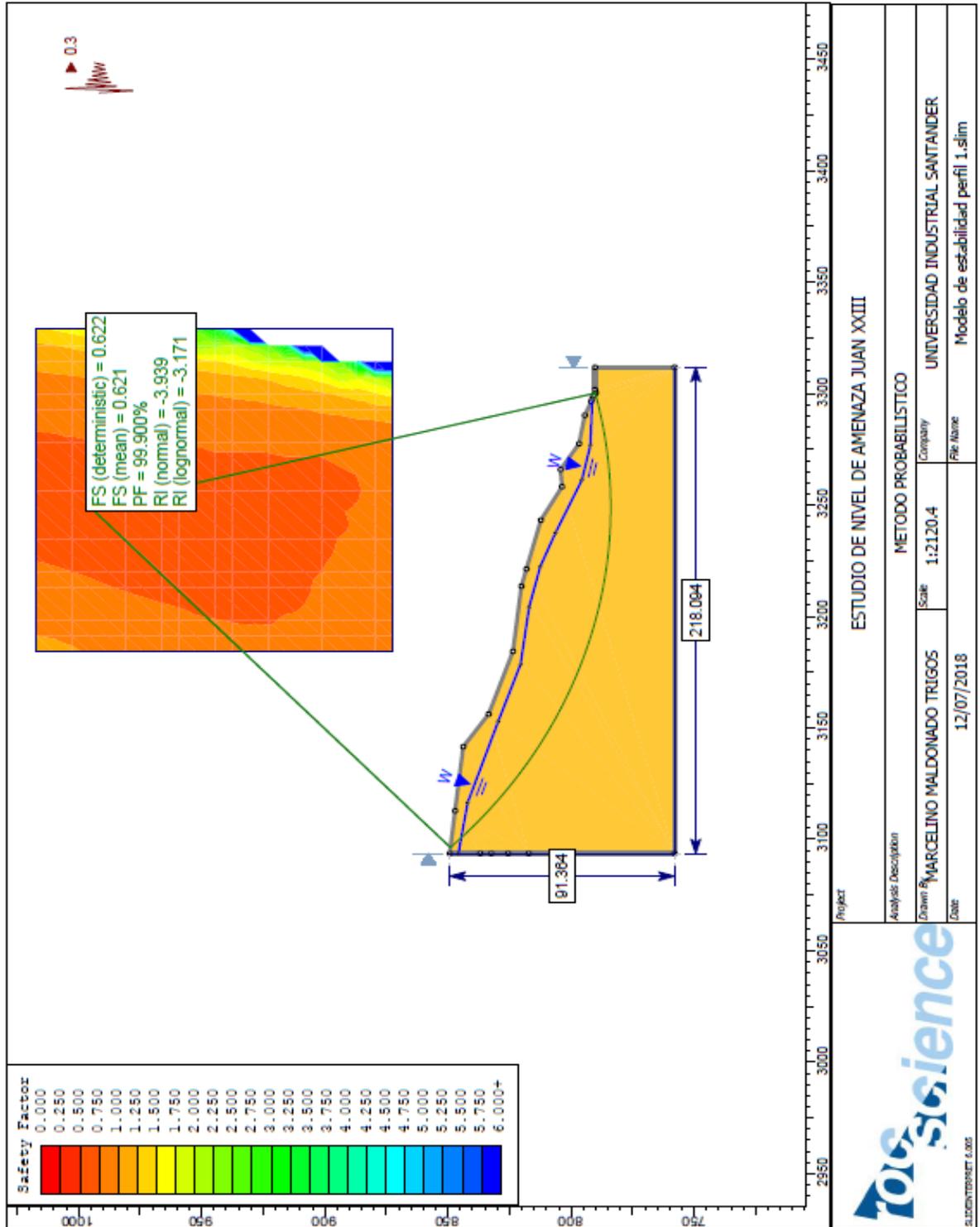


Figura 46. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 1

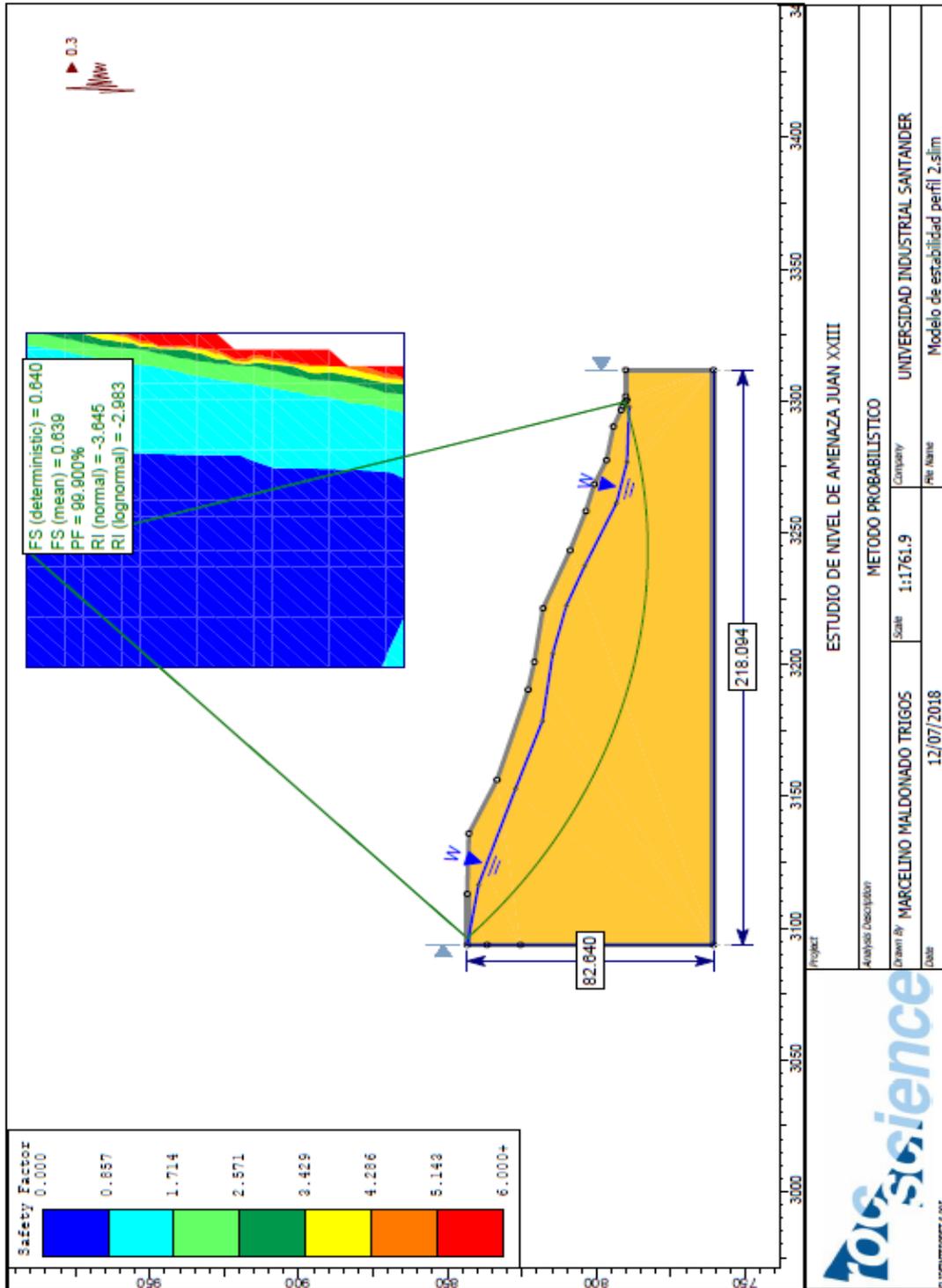


Figura 47. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 2

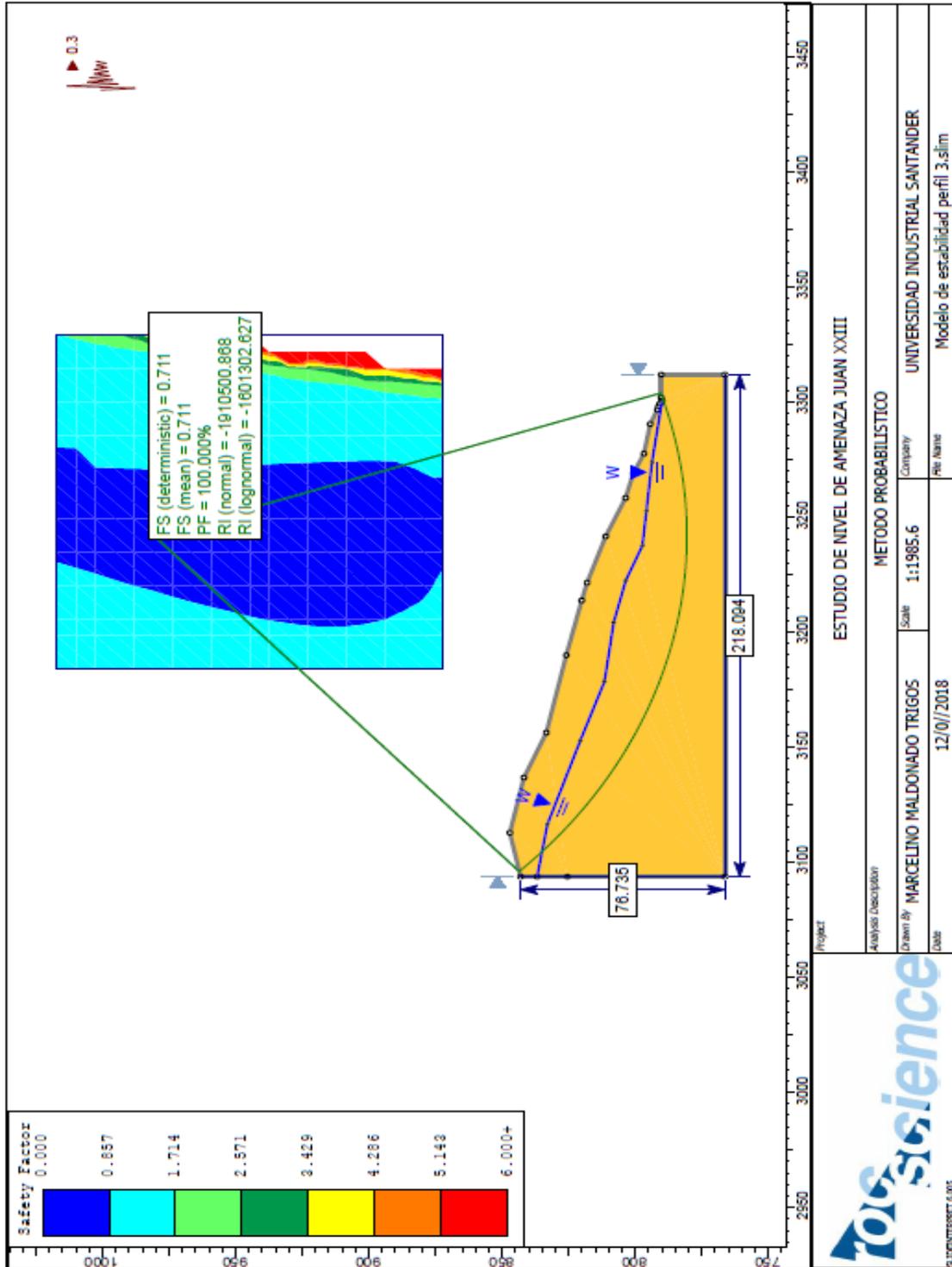


Figura 48. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 3

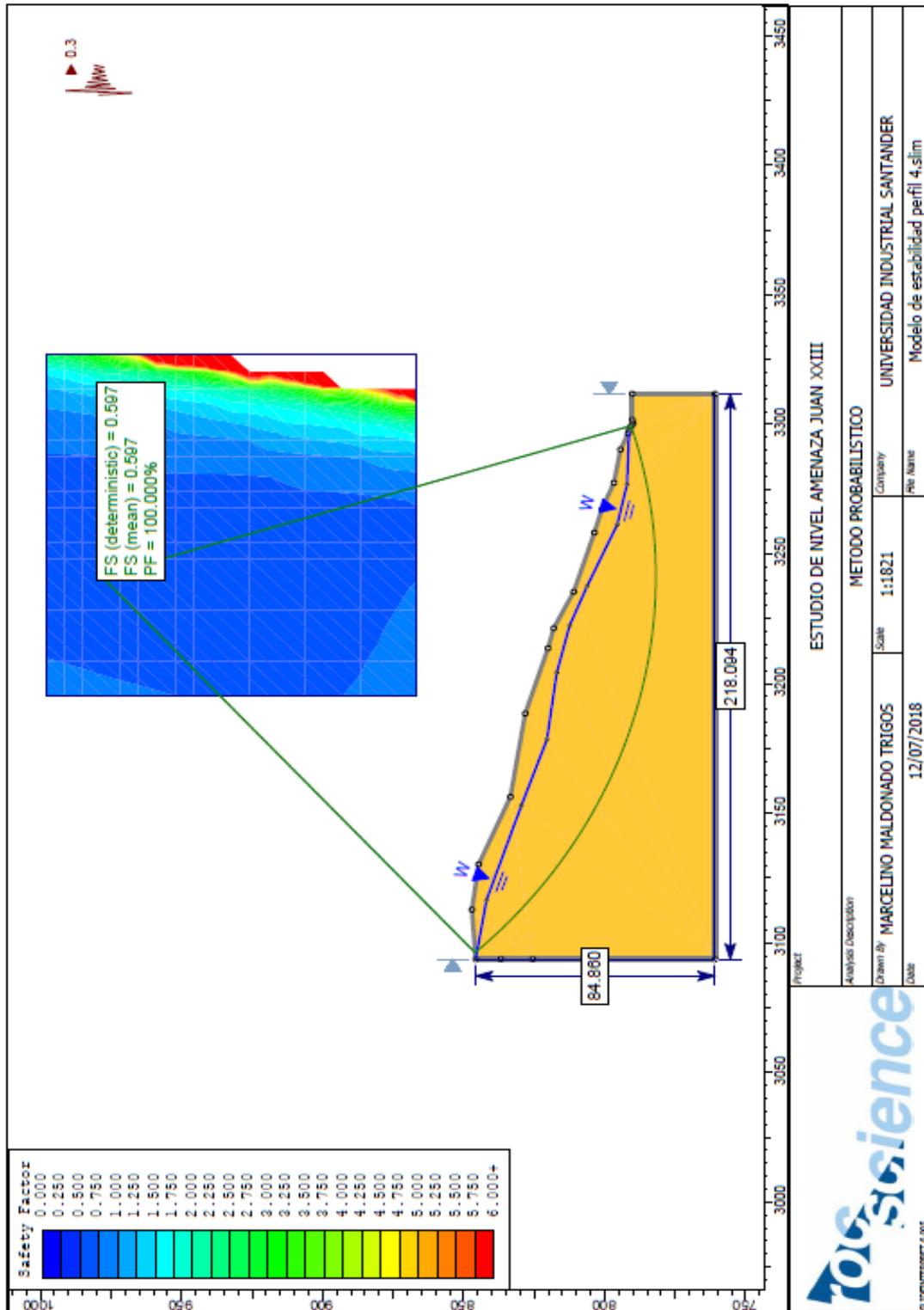


Figura 49. Método probabilístico modelo de estabilidad perfil 4

4.3 Análisis de Resultados

Para el método determinístico y probabilístico se aplicó en la plataforma Slide (Rocscience) para el cálculo de los factores de seguridad, de cada uno de las líneas que se proyectaron. Los resultados de los factores de seguridad calculados, se relacionan en la tabla 17. Los cuales en detalle se analizaran los resultados de cada una de las líneas.

Tabla 17.

Factores de seguridad

Factores de seguridad		
Línea	Método determinístico	Método probabilístico
Talud 1	0.970	0.621
Talud 2	0.761	0.639
Talud 3	0.847	0.711
Talud 4	0.705	0.579

4.3.1 Análisis talud 1. Se tiene como resultado del factor de seguridad de estabilidad del talud, para el método determinístico de 0.970 y del probabilístico de 0.621, resultados de estabilidad muy desfavorables, en este caso y debido a las 2000 iteraciones que se utilizaron en el método de Montecarlo, nos permite predecir que en la condición de mayor sollicitación Pico efectiva horizontal Aa, el talud presentara movimientos de masa llegando a la estructura vial el cual se encuentra delimitando parte del talud.

Como dato adicional de resultados se encuentra que la probabilidad de falla es de 99.9%, resultado evidente en razón a que se presentó un factor de seguridad menor a 1. Presenta un índice

de confiabilidad normal de 3.939, y un índice de confiabilidad logarítmico de 3.171, mayor de lo esperado.

Los parámetros sísmicos fueron aplicados a dos premisas

- Se asignó el valor máximo de aceleración pico efectivo horizontal de acuerdo con los lineamientos del Título H Literal H.5.5 Código de construcción colombiano NSR-2010 de acuerdo al municipio.
- La inexistencia de microzonificación o de acelerogramas los últimos 50 años limitan el cálculo de la banda probabilística de los valores de aceleración horizontal.

4.3.2 Análisis talud 2. Se obtiene un factor de seguridad determinístico de 0.761 y un factor de seguridad probabilístico de 0.639. En este resultado se presenta un factor no satisfactorio, por lo cual el presente estudio debe ser parte integral de orden preliminar en la cartilla de evaluación del riesgo y amenazas para el municipio de Pamplona teniendo en cuenta que la profundización de dichos estudios, se realizaran en otra etapa de actualización del POBT del municipio de Pamplona.

Se obtiene una probabilidad de falla de 99.9%, resultado muy alto, un índice de confiabilidad normal de 3.645 y un índice de confiabilidad logarítmico de 2.983, estos resultados en especial el análisis de distribución normal, presenta un valor un poco inferior a 3 lo que amerita prestarle más atención.

4.3.3 Análisis talud 3. Se obtiene un factor de seguridad determinístico de 0.847 y un factor de seguridad probabilístico de 0.711. Es un resultado desfavorable por lo cual se recomienda que de acuerdo con la ley 1523 de 2012 se realicen estudios básicos en el sector en mención para

determinar la amenaza el riesgo y la vulnerabilidad en el sector Juan XXIII municipio de Pamplona ajustándose al decreto 1807 de 2014.

Se obtiene una probabilidad de falla de 100 %, resultado muy alto, estos resultados en especial el análisis de distribución normal, presenta un valor muy inferior a 3 lo que amerita realizar más estudios e investigaciones en un futuro, partiendo como base de estos datos.

4.3.4 Análisis talud 4. Se obtiene un factor de seguridad determinístico de 0.705 y un factor de seguridad probabilístico de 0.579. De acuerdo con lo anterior el sector en mención presenta condiciones de inestabilidad y de alto riesgo en su periodo de sismicidad.

Se obtiene una probabilidad de falla de 99.90%, resultado muy alto, un índice de confiabilidad normal de 3.939 y un índice de confiabilidad logarítmico de 3.171, estos resultados en especial el análisis de distribución normal, presenta un valor un poco superior a 3 lo que amerita prestarle más atención.

5. Conclusiones

Como conclusión principal y atendiendo lo expresado por (Gercovich, 2015), es necesario en los estudios de estabilidad de taludes, incorporar el tratamiento estadístico, ya que este, disminuye la incertidumbre producto de un número limitado de muestras y la variabilidad de los parámetros geotécnicos producto de los ensayos de campo y laboratorio.

Para evaluar la información de todas las exploraciones geotécnicas realizadas, en la zona urbana del municipio de Pamplona, se realizó un trabajo preliminar de investigación (Albarracín, 2018), y se depuro la información de más de 200 sondeos, llegando a trabajar con una base de datos de 124 sondeos, que contaban con datos coherentes. De esta información, el Kriging, selecciono 84 datos que correlacionaban, con el cual se calcularon los diferentes comportamientos.

En otras palabras, al realizar un análisis estadístico, permite utilizar las herramientas adicionales de modelación estadística, que tiene el programa de modelación Slide (Rocsience), con mejor criterio, como quiera que en este software, se deben establecer unas variables estadísticas, como la media, la desviación estándar, entre otras, y el método Kriging, de predicción, que puede determinar estos parámetros en especial en zonas no dateadas, disminuye la incertidumbre, que se tiene al suministrar información de comportamientos sin un criterio definido.

Se correlacionaron, las propiedades de cohesión, ángulo de fricción y peso específico, generando variaciones con respecto a la media del orden de 7.4%, 16.07% y 10.48%, respectivamente, variaciones menores al 33%, demostrándose buena correlación de la información.

Desde la academia, se debe complementar en los cursos de pregrado y postgrado el análisis de estabilidad de taludes por los métodos determinísticos y geoestadísticos como parte básica en los análisis del comportamiento de estabilidad de laderas o taludes, donde los profesionales en el campo de la consultoría, puedan ejercer las exploraciones de los terrenos ejecutando los análisis e interpretaciones de los fenómenos de remoción, y así establecer mapas de comportamiento de amenazas y zonas de influencia en zonas urbanas.

Como resultado del ejercicio de la evaluación del sector en mención, caso barrio Juan XXIII Municipio de Pamplona, se realizaron cuatro perfiles de exploración y análisis, para el cálculo de

los factores de seguridad por métodos determinísticos y probabilísticos, el primero generando factores de seguridad, inferiores a 1, indicando que esta ladera no es estable de acuerdo a la tabla H.2.4-1 del título H (NSR, 2010) confrontando dichos valores con los análisis obtenidos por el método probabilístico, no se encuentran mayor diferencia, siendo los factores probabilísticos más conservadores.

El análisis de los resultados de los factores de seguridad, presento resultados coherentes, las iteraciones que se realizaron generaron resultados confiables, el talud objeto de análisis, no es estable y se estudió en razón a la cercanía con la universidad de Pamplona y la facilidad de realizar prácticas sobre ese terreno.

Como conclusión final, los métodos geoestadísticos, son una herramienta que debe ser aplicada para el seguimiento y control de las zonas de influencia en la remoción en masa, para la materialización de mapas de riesgos de remoción de masas en zonas urbanas.

6. Recomendaciones

Para la aplicación de los métodos geoestadísticos se necesitan una base de exploraciones geotécnicas de amplio espectro con el cual entre mayor número de exploraciones y a mayor profundidad de exploración la banda y la correlación de la geoestadística generaría un apoyo grande en los análisis a futuro de los estudios de comportamiento de taludes.

Las entidades departamentales y de orden nacional deberían solicitar metodologías alternas en los planes de ordenamiento territorial para el comportamiento de los taludes, permitiendo un

control en las zonas de construcción a futuro y una base cartográfica de las zonas de amenaza y riesgo de las entidades nacionales.

Desde las universidades con el apoyo de los grupos de investigación participar en la elaboración de modelos numéricos y computacionales con las diferentes plataformas con participación de docentes y estudiantes, de manuales de prevención y detección de amenazas tempranas en taludes, para su posible intervención.

Profundizar en los métodos de estadística para la exploración geotécnica de las zonas del municipio de Pamplona generando mallas de correlación geoestadística más detallada en las diferentes comunas de Pamplona.

Referencias Bibliográficas

- Albarracín, R. (2018). Aplicación Del Modelo Geoestadísticos Kriging Para Evaluar La Información Geotécnica Del Casco Urbano Del Municipio De Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- ArcGis. (2017). ArcGIS Resources.
- Armstrong , M & Caringnan, H. (1997). Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier. Paris: École de Mines de Paris.
- Badillo, J. (1993). Mecánica de suelos. Balderas, México,: Limusa.
- Biggar, J. & Nielsen, D. (1976). Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil.
- Bterzaghl, T. (1950). Geotecnia clases, cátedra.
- Castaño, A & Elorza, F. (2004). Simulación Geoestadística Aplicada al Modelamiento de Yacimiento de Petróleos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Chilès, J. (1999). Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty. New York: Jhon Wiley & Sons Inc.
- Clavijo, J. (1994). Mapa geológico generalizado del Departamento Norte de Santander. Bucaramanga: Instituto Nacional de Minas.
- Coulomb, C. (1773). Recherches sur les moyens d'exécuter sous l'eau toutes sortes de travaux hydraulique, sans employer aucun épuisement.
- Das, B. (2015). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (Septima ed.). Mexico D.F: Cengage Learning.
- David, M. (1977). Geostatistical Ore Reserve Estimation, Amsterdam, Holanda: Elsevier.

- De Matteis, A. (2003). Geología y geotecnia: estabilidad de talud., Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Rosario, Argentina: Universidad Nacional de Rosario
- Delgado, J. (2011). Informe geológico ambiental preliminar para el área de Pamplona. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Desktop.Com. (s.f). Crear y compartir mapas, análisis y datos.
- Díaz, E. (1993). Introducción a Conceptos Básicos de Geoestadística. Guanajuato, México: CIMAT.
- Erick, N. (2016). Aplicación del Método Monte Carlo para programación de túneles de roca. Ingeniería Civil, Santiago de Chile: Universidad de Chile,
- Gercovich, D. (2015). Estabilidad de taludes. Río de Janeiro, Brasil: Lemoine.
- Giraldo, R. (2014). Introducción a la Geoestadística teoría y aplicación. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional De Colombia.
- González, R. (2015). Introducción del Factor Humano al Análisis de Riesgo. Centro de estudios de Riesgo Tecnológico, Departamento de Ingeniería Química .
- Google Earth. (2017). Ubicación de Pamplona.
- Gutiérrez, K & Biutrago, L. (2016). Caracterización geofísica del subsuelo mediante las técnicas de refracción sísmica, reflexión sísmica, masw y remi en depósitos superficiales y zonas críticas de la Universidad de Pamplona. Pamplona.
- Henoa, R. (s.f). Introducción a la Geoestadística, Departamento de Estadística Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Hidalgo, M. (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: La Teoría. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 10(18), p. 17.
- Hunt, R. (1984). Geotechnical engineering investigation manual.. USA: McGraw-Hill.

- Illana, J. (2013). Métodos Monte Carlo. Universidad de Granada, Departamento de Física Teórica y del Cosmo.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2017). Norte de Santander características geográficas. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Revista de la Facultad de Ciencias., 1(1), p.73-87.
- Jiménez, J. & Amezquita, B. (2017). Evaluación de estabilidad de un talud en la zona norte del municipio de Pamplona entre los barrios Juan XXIII y San Luis, aplicando métodos determinísticos para diagnosticar posibles fenómenos de remoción en masa (Tesis de grado) Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.
- Journel, A. (1978). Mining Geostatistics. New York: Academic Press.
- Jurado, C. (2013). Puentes (II). Evolución-Tipología-Cálculo-Construcción. Primera edición.
- Kerguelen, A. (2009). Análisis probabilístico de estabilidad de taludes, Ingeniería Civil Y Ambiental , Bogotá: Universidad de los Andes.
- Konoplev, A. (1990). Migration of certain radioactive products in the soil and surface run off in the Chernobyl NPP zone. Meteorol. Hidrol. 117(6), p 1041- 1047.
- Kriging, D. (1951). A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation. South Africa: Journal of the Chemical, Metallurgical and.
- Larson, M. (2005). Bridge decks going jointless. C & T Research Record.
- Ledezma, F. (2009). Simulación de Montecarlo en ingeniería geotécnica y su aplicación en el análisis de riesgos.
- Loche, G. (2005). Multivariate Geostatistics. Paris: Centre de Géostatistique –
- Loqueestasbuscando. (2010). Avalancha en Pamplona- la fuerza de la naturaleza.

- Marquez, S. (2005). Estabilización de suelos. Facultad de Ingeniería Cátedra vías de comunicación
Rivadavia, Argentina: Universidad Nacional de Patagonia San Juan Bosco.
- Martínez, A & Ramírez, J. (2005). Desarrollo actual de la geoestadística en el mundo. Minería y
geología.
- Ministerio de Minas y Servicio Geológico Colombiano. (2015). Guía metodológica para estudios
de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa. Bogotá: Imprenta Nacional de
Colombia.
- Montes, Y.; Unda, J.; Casas, K.; Torres, J. & Gutiérrez, D. et, al. (2016). Aplicación de refracción
sísmica y tomografía de resistividad eléctrica para la caracterización geofísica en una ladera de
Juan XXIII en la ciudad de Pamplona (Norte de Santander) artículo en construcción. Pamplona,
Colombia: Universidad de Pamplona.
- Myers, D. (1991). Interpolation and Estimation with Spatially. Elsevier Science Publishers B.V.
- Nielsen, J. (1973). D/D translocations in patients with mental illness.
- Olea, R. (1988). Geostatistical Semantic. *Geostatistics*, 2(2), p. 159.
- Olea, R. (1999). *Geostatistics for engineers and earth scientists*. Boston: Kluwer Academic
Publishers.
- Oliver, M. (1990). Kriging:a method of interpolation for Geographical Information Systems.
International Journal of Geographic Information Systems (4), 313-332.
- Olmo, M. (1987). Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales.
Granada: Univ. Granada.
- Ortiz, G. (2013). Interpretación geológico estructural de la zona norte del Municipio de Pamplona
(Tesis de grado). Pamplona, Colombia: Universidad de Pamplona.

- Porras, A. (s.f). Método Kriging de inferencia espacial. Centro de investigación en Geografía y Geomática. Ing .Jorge L.Tamayo. A.C.
- Portilla,C.; Baque, R.; Álvarez, A.; Vera, O.; Malavé, C. et, al. (2017). Simulación de facies mediante un modelo geoestadístico integrado para el desarrollo de un campo petrolero ecuatoriano. Revista Científica y Tecnológica UPSE, 4(1), p. 146-156.
- Raagowski, H. (1972). Diseño y construcción de bobinas de Rogowski modificadas de bajo costo y alto desempeño.
- Rivera, O.; Vargas, T. & Libardo, C. (2007). Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrología del bajo antioqueño. Red de revistas científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, 25(2), p. 156.
- Rivera, Z. (2004). Notas sobre los fundamentos mecánicos de suelos. México: UNAM.
- Rodríguez, A. (2011). Simulación Método Montecarlo. Licesio J Rodríguez Aragón, Área de Estadística e Investigación Operativa .
- Rodríguez, L. (2011). Introducción a los Métodos Cuantitativos y a la Investigación Operativa.
- Rodríguez, S & Quintana, C. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en zonas urbanas. Revista ambiental agua, aire, suelo, 4(1) p119.
- Saenz, E. (2010). Fundamento de geotecnia (tesis de grado). Ingeniería estructural y geotecnia: Pontificia Universidad Católica.
- Sampieri, R.; Baptista, C. & Pilar, M. (2014). Metodología de la Investigación 6º Edición (pág. 6). México D.F: Mcgraw-Hill.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos estabilidad de taludes en zonas tropicales, Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Torres, J. (2012). Diseño de obras de estabilización urbana Valle de Espíritu Santo. Pamplona.

Universidad de Pamplona. (2013). Revista ambiental Agua, aire y suelo.

Varnes, D. (1978). Landslides, analysis and control.

Viera, M. (2002). Geoestadística Aplicada. Facultad de Ciencias e Instituto de Matemática (tesis de grado). México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Villalaz, C. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones (Quinta ed.). México: Limusa.

Zuvala, R.; Firosova, E. & Lukas, M. (2015). Mathematical aspects of the Kring applied on landslide in Halenkovice, Czech Republic: Open Geosci.