

APLICACIÓN PARA ANDROID PARA EL CÁLCULO DE LA AMENAZA
RELATIVA FRENTE A FLUJOS PIROCLÁSTICOS

DIANA ALEJANDRA GUERRERO LÓPEZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS
2016

APLICACIÓN PARA ANDROID PARA EL CÁLCULO DE LA AMENAZA
RELATIVA FRENTE A FLUJOS PIROCLÁSTICOS

DIANA ALEJANDRA GUERRERO LÓPEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniera de Sistemas

Dirigida por: PhD. Gustavo Córdoba Guerrero
M.Sc. Juan Carlos Castillo

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS
2016

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1 del acuerdo No 324 de octubre de 1966, emanado por el honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

"La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre los derechos de autor."

Acuerdo de 1966 y el artículo 13, acuerdo No. 05 del 26 de enero de 2010 emanado por el honorable Consejo Académico de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, junio de 2016

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres, quienes me guiaron y ayudaron durante todo este tiempo.

A mi hermano, por ser mi ejemplo a seguir y por sus consejos.

A mis profesores, por sus enseñanzas.

A mi asesor, por su dedicación y su apoyo.

Y a Dios, por estar siempre a mi lado.

A Dios, mis padres y a todas las personas que de una u otra forma me apoyaron en mi investigación.

RESUMEN

ARHAT (Android Relative Hazard Assessment Tool o Herramienta Android para la Evaluación de la Amenaza Relativa) es un aplicativo para dispositivos móviles, que a través de una conexión a internet, permite realizar la consulta de los datos de modelado computacional de flujos piroclásticos en el software TITAN 2D luego de ser analizados. La app presenta al usuario el porcentaje de aumento o disminución de la amenaza relativa de una localización respecto a otra, haciendo uso del sistema operativo ANDROID para la implementación del proyecto en teléfonos móviles con este sistema.

El proyecto ARHAT fue desarrollado para dos volcanes, los cuales ya contaban con un estudio de modelamiento de escenarios realizados con la herramienta TITAN 2D. El primer caso es el del volcán San Cristóbal ubicado al suroeste del país de Nicaragua, cuenta con un total de 700 modelamientos de flujos piroclásticos alrededor del cráter. El segundo caso de estudio es del volcán Galeras ubicado en el sur occidente del territorio Colombiano, el volcán cuenta 5600 simulaciones de flujos piroclásticos. A diferencia del cráter del volcán San Cristóbal cuyo diámetro es relativamente pequeño comparado con el de Galeras, éste último cuenta con 8 fuentes de inicio de flujos ubicadas alrededor del cráter con el fin de cubrir los flancos del volcán.

Haciendo uso de la teoría de la probabilidad se aplicaron dos corrientes principales. La metodología frecuencial y el análisis bayesiano.

Finalmente, a través del modelo de desarrollo de software conocido como Extreme Programming ó Programación Extrema, se diseñó una herramienta software para el acceso a la información probabilística obtenida. Para lo cual fue necesario implementar una arquitectura cliente servidor donde el aplicativo Android es el cliente y por medio de un Servlet se configuró el manejo y la consulta de la información del Servidor.

Palabras clave: Titan2D, flujos piroclásticos, Latin Hypercube Sampling, ARHAT, análisis bayesiano.

ABSTRACT

ARHAT (Android Relative Hazard Assessment Tool) is an application for mobile devices that through an internet connection, allows data query of computational modeling of pyroclastic flows using TITAN 2D software after analyzing data. The app presents the user with the increase or decrease percentage of the relative hazard from one localization over another, using the operative system ANDROID for implementing the project on mobile phones with that system.

The ARHAT project was developed for two volcanoes, which already had the study of scene modeling and it was made with TITAN 2D tool. The first case is San Cristobal volcano located at southwest of Nicaragua country, it has a total of 700 models of pyroclastic flows around the crater. The second case of study is Galeras volcano located at southwest of Colombia, the volcano has 5600 simulations of pyroclastic flows. Unlike the crater of San Cristobal volcano whose diameter is relatively small compared with Galeras crater, this latter counts with 8 flow start sources placed around the crater in order to cover the volcanoes flanks.

Two principal currents were applied making use of the probability theory. The frequency methodology and the Bayesian analysis. The above in order to know which of the two streams fits better in each case of study.

Finally, through the model of software development known as Extreme Programming, it was designed a software tool to access to the results of probabilistic information. Because of that, it was necessary to implement a client server architecture where the Android applicative is the client, the management and the consult of the server information was configured through a Servlet. All this due to the complexity of the calculations and the large size of the data.

Keywords: Titan2D, pyroclastic flows, Latin Hypercube Sampling, ARHAT, Bayes analysis.

TABLA DE CONTENIDO

1.	MARCO REFERENCIAL	23
1.1.	ANTECEDENTES	23
1.2.	MARCO TEÓRICO	26
1.2.1	Volcanes	26
1.2.1.1	Amenazas volcánicas	27
1.2.2	Análisis pbobabilístico.....	32
1.2.2.1	Teorema bayesiano	32
1.2.3	Ingeniería del software.....	34
1.2.3.1	Programación extrema.....	35
1.2.4	Interpolación bilineal	36
1.3	MARCO CONTEXTUAL.....	39
1.3.1	Volcán Galeras	39
1.3.1.1	Actividad	41
1.3.2	Volcán San Cristóbal	42
1.3	MARCO LEGAL	45
1.3.1	Gestión delRiesgo	45
1.3.1.1	Colombia frente a las políticas de gestión del riesgo	45
1.3.1.2	Nicaragua y la gestión del riesgo	47
2.	DESARROLLO DE LA PROPUESTA	49
2.1	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE ENTRADA .	49
2.1.1.	Análisis de los datos de entrada	49
2.1.2	Información de entrada del sistema	49
2.1.3	Procesamiento estadístico de la información.....	51
2.1.3.1	Probabilidad frecuencial.....	52
2.1.3.2	Análisis bayesiano	55
2.2	DESARROLLO DEL SOFTWARE	58
2.2.1.	Definición de los actores del software.....	59
2.2.2.	Casos de uso del software.....	59
2.2.3.	Arquitectura del software	60
2.2.4.	Historias de usuario	61

2.2.5.	Definición del plan de trabajo.....	64
2.2.5.1	Primera iteración.....	64
2.2.5.2	Segunda iteración.....	65
2.2.5.3	Tercera iteración.....	65
2.2.5.4	Cuarta iteración.....	66
2.2.6.	Herramientas de trabajo.....	66
2.2.7.	Descripción de los módulos software.....	67
2.2.7.1	Cálculo de amenaza.....	67
2.2.7.2	Servlet.....	68
2.2.7.3	Consulta en mapa.....	70
2.2.7.4	Consulta manual.....	71
2.2.7.5	Ayuda.....	72
2.2.8.	Diagramas de clase.....	73
2.2.10.	Pruebas al software.....	81
2.2.10.1	Pruebas de unidad.....	81
2.3.	EJEMPLO DE DESPLIEGUE DEL SISTEMA.....	84
	CONCLUSIONES.....	90
	RECOMENDACIONES.....	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información de volumen de depósitos de productos de erupciones datadas en el volcán Galeras	42
Tabla 2. Historia de usuario número 1	62
Tabla 3. Historia de usuario número 2	62
Tabla 4. Historia de usuario número 3	63
Tabla 5. Historia de usuario número 4	63
Tabla 6. Historia de usuario número 5	64
Tabla 7. Planificación de la primera iteración.....	65
Tabla 8. Planificación de la segunda iteración	65
Tabla 9. Planificación de la tercera iteración.....	66
Tabla 10. Planificación de la cuarta iteración.....	66
Tabla 11. Prueba de unidad número 1.....	81
Tabla 12. Prueba de unidad número 2.....	82
Tabla 13. Prueba de unidad número 3.....	83
Tabla 14. Prueba de unidad número 4.....	83
Tabla 15. Prueba de unidad número 5.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de un flujo de lava. Kalapana/Royal Gardens, Hawaii.	28
Figura 2. Autos cubiertos con tefra y ceniza.	28
Figura 3. Lahar descendiendo por el volcán Merapi, Indonesia.	29
Figura 4. Lago Nyos, propagación de gas volcánico.	30
Figura 5. Flujo piroclástico formado en erupción del monte Pinatubo, 1991.	31
Figura 6. Interpolación bilineal en un dominio de dos dimensiones.	37
Figura 7. Panorámica del volcán Galeras.	39
Figura 8. Mapa de amenazas del volcán Galeras.	40
Figura 9. Panorámica del volcán San Cristóbal.	42
Figura 10. Mapa de amenazas del volcán San Cristóbal.	44
Figura 11. Caso hipotético de distribución de flujos.	51
Figura 12. Probabilidad frecuencial. Distribución de la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán Galeras.	53
Figura 13. Probabilidad frecuencial. Distribución de la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán San Cristóbal.	54
Figura 14. Ejemplo de distribución de susceptibilidad por llegada de flujos piroclásticos utilizando el software Titán 2D.	55
Figura 15. Probabilidad bayesiana. Distribución de la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán Galeras.	58
Figura 16. Diagrama de casos de uso del sistema.	60
Figura 17. Diagrama de arquitectura del software.	61
Figura 18. Definición de zona de alta probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán Galeras.	69
Figura 19. Consulta en mapa.	70
Figura 20. Conversión de sistema de coordenadas geográficas decimales a coordenadas proyectadas UTM.	71
Figura 21. Ingreso manual de coordenadas.	72
Figura 22. Interfaz gráfica de la sección de ayuda.	73
Figura 23. Diagrama de clases del aplicativo ANDROID.	74
Figura 24. Diagrama de clases del servlet.	79
Figura 25. Ingreso al sistema.	85
Figura 26. Relocalización del punto 1.	86
Figura 27. Relocalización del punto 2.	87
Figura 28. Resultados de la consulta.	88
Figura 29. Logotipo ARHAT.	93
Figura 30. Error por valores inválidos.	95

Figura 31. Error de conexión.....95
Figura 32. Error de ubicación de marcadores de posición.....96
Figura 33. Uso del aplicativo.....97

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. MANUAL DE USUARIO.....	93
---------------------------------	----

GLOSARIO

Amenaza: Nivel de probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino en un sitio determinado.

Android: sistema operativo para teléfonos móviles y tabletas desarrollado por la compañía Android Inc. y basado en la arquitectura de Linux.

APP o Aplicativo: hace referencia a un programa informático funcional desarrollado para el sistema operativo ANDROID.

Escenario: conjunto de valores necesarios para la simulación y que describen las características de un flujo que se modela.

Estratigrafía: ciencia de la geología que estudia los estratos o superposición de capas encontradas en un terreno.

Flujo granular: flujo compuesto por partículas sólidas y donde en su dinámica domina la fricción.

Flujos piroclásticos: es un producto volcánico que consiste en la acumulación de gases y partículas, puede viajar a velocidades desde los 10 m/s hasta 300 m/s y alcanzar temperaturas mayores a los 1000 grados Celsius.

GNU-Linux: hace referencia a los sistemas operativos con núcleo de Linux y entorno de usuario GNU. Este sistema operativo está enfocado a computadoras de escritorio y personales.

Historia de usuario: cuadros que contienen las necesidades y funcionalidades del software las cuales han sido pactadas conjuntamente por el desarrollador y el cliente.

Incertidumbre: desconocimiento de la probabilidad de que suceda un evento específico.

Iteración: espacio de tiempo donde se planifica el desarrollo parcial del software que arrojará resultados visibles al sistema.

Metodología: técnicas estructuradas o métodos que definen el camino para desarrollar un trabajo.

Modelado o modelamiento: simulación física, matemática o computacional de un fenómeno natural.

Modelo de elevación digital (DEM): es una presentación numérica de las alturas respecto al nivel medio del mar que permite representar la topografía de un espacio demarcado.

Muestreo: consiste en la generación aleatoria de número que se encuentran ubicadas dentro de uno o varios rangos establecidos.

Muestra: conjunto de valores que representan un escenario de simulación.

Paradigma: modelo de un objeto o procedimiento.

Probabilidad: medida de la posibilidad de la ocurrencia de un evento al azar.

Programación extrema: metodología ágil para el desarrollo de software.

Prueba de aceptación: evaluación específica que se realiza al software para comprobar su funcionalidad.

Rango: conjunto de valores representativos que se encuentran delimitados por un valor mínimo y uno máximo.

Riesgo: nivel esperado de pérdidas en caso de la ocurrencia de un evento catastrófico.

Servidor: administrador de aplicaciones web. Recibe las peticiones de los clientes y les da una respuesta.

Servlet: objetos codificados en Java que se utilizan en un servidor.

Sistema: conjunto de elementos que se interrelacionan para lograr un objetivo común.

Sistema operativo: parte lógica de los dispositivos electrónicos que actúa como interfaz entre el lenguaje de máquina y los diferentes programas que utiliza el usuario.

Software: soporte lógico de un sistema computacional.

Susceptibilidad: predisposición a que ocurra un evento en un lugar determinado.

TITAN2D: software que tiene como fin la simulación del comportamiento de fluidos granulares, principalmente flujos de masa geológica tales como los producidos por avalanchas o deslizamientos, sobre un Modelo Digital de Elevación.

Topografía: configuración del terreno.

UTM: (Universal Transversal Mercator) sistema de georreferenciación a partir de coordenadas planas.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado muestra el proceso de desarrollo de un aplicativo para ANDROID llamado ARHAT, el cual fue diseñado para la consulta y comparación del nivel de amenaza volcánica al cual se encuentran expuestos dos sitios de interés con respecto a la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos.

El software utiliza como insumo la información de modelamientos de flujos piroclásticos realizados a través de herramientas computacionales como TITAN2D, un código diseñado por la Universidad de Buffalo (Estados Unidos) que tiene como objetivo la simulación del comportamiento de avalanchas granulares secas sobre un modelo digital del terreno. Los flujos piroclásticos suponen una de las mayores amenazas a la cual se encuentran expuestos los seres humanos que habitan una zona con actividad volcánica. Estos flujos se producen cuando erupciones volcánicas explosivas de gran magnitud generan nubes de gases tóxicos acompañados de fragmentos de roca que pueden viajar a velocidades de cientos de metros por segundo y alcanzar temperaturas que van desde 100°C hasta 700°C

Debido a la disponibilidad de la información de resultados de modelamientos realizados con TITAN2D, ARHAT fue implementado para dos casos de estudio: el volcán nicaragüense San Cristóbal que cuenta con un total de 700 modelamientos alrededor del cráter y el volcán Galeras, ubicado al suroccidente del territorio colombiano, que tiene un estudio que comprende un total de 5600 simulaciones de flujos piroclásticos alrededor del cráter del mismo.

Además, dada la complejidad de la distribución espacial de los resultados en las áreas de estudio fue necesario aplicar dos técnicas estadísticas para el procesamiento de la información: la primera corresponde a la teoría frecuencial la cual es muy objetiva y la segunda se denomina análisis bayesiano, la cual parte de una serie de hipótesis que son propuestas por el autor y que posteriormente deben ser comprobadas.

Finalmente, utilizando una metodología ágil para el desarrollo de software fueron documentadas las diferentes etapas de la construcción del aplicativo ARHAT.

TÍTULO

Aplicativo para ANDROID para el cálculo de la amenaza relativa frente a flujos piroclásticos.

TEMA

Herramienta computacional para realizar el análisis estadístico y la consulta de la información resultante del modelado de escenarios de flujos piroclásticos utilizando el software TITAN2D.

OBJETIVOS

Objetivo General.

- Desarrollar una herramienta para la interpretación de los resultados arrojados por el programa TITAN 2D en el proceso de modelado de flujos piroclásticos, a través de un aplicativo para dispositivos móviles diseñado bajo la plataforma ANDROID.

Objetivos Específicos.

- Desarrollar un proceso para encontrar la probabilidad frecuencial a partir de los datos resultantes obtenidos en un proceso de simulación de flujos piroclásticos.
- Definir un procedimiento para encontrar el nivel de amenaza para dos o más sitios por medio de la teoría bayesiana.
- Desarrollar el aplicativo para ANDROID para la consulta de la información de amenaza por flujos piroclásticos.
- Implementar el sistema desarrollado para los volcanes Galeras, Colombia y San Cristóbal, Nicaragua.
- Realizar la documentación pertinente al proceso de desarrollo del software y su respectivo manual de usuario.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El avance tecnológico que se observa hoy en día, no solo ha sido puesto al servicio del mejoramiento de la calidad de vida de las personas sino también para su protección ante las distintas amenazas a las que se ven expuestas. Sin embargo, existen sucesos incontrolables dentro de la naturaleza que ponen en riesgo vidas humanas; entre los que se encuentra la actividad volcánica. Esta actividad puede presentar varios tipos de amenaza, por ejemplo: caída de ceniza,

caída de rocas balísticas, onda de choque, flujos de lava, flujos de lodo y flujos piroclásticos¹. Estos últimos, consisten en una mezcla de material sólido, gas y líquido a muy altas temperaturas, que descienden por las laderas de los volcanes, destruyendo todo a su paso².

Aunque sucesos como éste son incontrolables, recientemente se han utilizado programas computacionales especializados con el fin de predecir su comportamiento, un ejemplo de ello es el programa TITAN2D, desarrollado por el grupo Geophysical Mass Flow de la Universidad de Bufalo (Estados Unidos), que tiene como fin la simulación del comportamiento de fluidos granulares, principalmente flujos de masa geológica tales como los producidos por avalanchas o deslizamientos, sobre un Modelo Digital de Elevación -DEM por sus siglas en inglés-^{3 4}. TITAN2D ha sido ampliamente utilizado para realizar simulaciones numéricas de flujos piroclásticos en distintos volcanes alrededor del mundo, como por ejemplo el estudio realizado para el volcán Merapi en Indonesia⁵, otro caso es el del Cerro Machín en Colombia⁶. Éste software se ha aplicado incluso en predicción del comportamiento de flujos de lodo como se realizó en el Monte Ruapehu⁷. Los flujos piroclásticos, debido a sus características, caben dentro de la categoría de flujos granulares, principalmente porque en su dinámica domina la fricción, por lo tanto puede utilizarse el software TITAN2D para el modelado de su comportamiento.

¹ Sigurdsson, H. Encyclopedia of Volcanoes. Academy Press, 2000.

² H. Schmincke. Volcanism. Springer, 2004.

³ Geophysical Mass Flow Group. Guía del usuario TITAN2D, 1 ed^{ón}, 2010.

⁴ Bauer, A. C., Nichita, C. C., Pitman, E. B., Sheridan, M. F., Bursik, M., Renschler, C. S., y otros. (2005). Parallel adaptive numerical simulation of dry avalanches over natural terrain. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1 -21.

⁵ Procter, J., Cronin, S., Fuller, I., Sheridan, M., & Neall, V. Lahar hazard assessment using titan2d for an alluvial fan with rapidly changing geomorphology: Whangaehu river, mt. ruapehu. Geomorphology, 162-174. 2010.

⁶ Murcia, H., Sheridan, M., & Macías, J. Titan2d simulations of pyroclastic flows at Cerro Machín volcano, Colombia: Hazard implications. Journal of South American Earth Sciences, 161- 170. 2010.

⁷ Charbonnier, S. Numerical simulations of block-and-ash flows using the titan2d flow model: examples from the 2006 eruption of Merapi volcano, Java, Indonesia. *Bulletin of Volcanology*, 953–959. 2009.

Dada la naturaleza del modelamiento de este fenómeno, el programa TITAN2D posee un cierto margen de error debido a las múltiples incertidumbres inherentes a éste tipo de fenómenos naturales⁸.

A fin de cubrir la mayor parte de éstas incertidumbres se suele modelar un número finito de escenarios teniendo en cuenta rangos preestablecidos para la generación de distintas combinaciones de condiciones iniciales que representan un flujo con sus características. Para realizar éste proceso se puede recurrir a métodos clásicos de muestreo, donde se generan las condiciones iniciales posibles de manera aleatoria. Sin embargo, muchos de estos métodos necesitan que se generen cientos incluso miles de muestras para considerarse representativas⁹.

El proceso de simulación en TITAN2D da como resultado la distribución espacial del espesor máximo del flujo durante su recorrido. Esta información se encuentra configurada en una malla de datos que se extiende a lo largo del terreno sobre el cual se ha modelado. Uno de los inconvenientes desde el punto de vista de la administración de los sistemas de información es la gran cantidad de datos que se generan y que deben ser procesados, ya que el número de mallas obtenidas es igual al número de flujos simulados y en ciertas ocasiones este valor corresponde a varios miles de modelamientos.

Para un tomador de decisiones, estos miles de resultados necesitan de un pos proceso que facilite su trabajo. Sería de mucha utilidad encontrar la probabilidad de que en un lugar sea alcanzado por un flujo piroclástico, y quizá de mayor utilidad poder comparar las amenazas entre dos o más lugares, para que así, el tomador de decisiones pueda conocer cuánto gana o pierde en seguridad al permitir una inversión en un lugar o en otro, o para elegir lugares de relocalización se sitios actualmente amenazados. Sin embargo, en problemas como el estudiado, aplicar metodologías estadísticas como la frecuencial suele no ser suficiente para obtener resultados que den una idea acertada del fenómeno que se está simulando.

Formulación del Problema.

¿Cómo se puede procesar los datos de modelado de flujos piroclásticos en TITAN2D de manera que la información sea representativa y de fácil acceso para los tomadores de decisiones haciendo uso de las nuevas tecnologías?

⁸ Bursik M., Cordoba G., Dalbey K., Jones M. D., Patra A. K., Sheridan M. F. y Stefanescu, E. R. Digital elevation model uncertainty and hazard analysis using a geophysical flow model. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 468(2142):1543–1563, 2012.

⁹ Maibaum ,G., Teoría de probabilidades y estadística matemática. Pueblo y Educación, 1988.

La solución al problema planteado consiste en diseñar un aplicativo para teléfonos móviles que aproveche el avance de las nuevas tecnologías, para que el usuario o tomador de decisiones pueda realizar una mejor interpretación de los resultados de los modelamientos de flujos piroclásticos realizados a través del software TITAN2D.

METODOLOGÍA

Para el estudio se tomaron los datos obtenidos de simulaciones de flujos piroclásticos realizados en las localidades de San Cristóbal (Nicaragua) donde se realizaron 700 modelamientos de flujos piroclásticos y Galeras (Colombia) donde realizaron un total de 5600 simulaciones teniendo en cuenta 8 posibles lugares de inicio de flujos que se distribuyen alrededor de los flancos del volcán Galeras.

La información que arroja TITAN2D contiene el espesor máximo registrado del fluido en cada modelamiento y se encuentra distribuido en puntos dentro de una malla computacional trazada en la zona de estudio.

Para el presente proyecto se decidió realizar dos tipos de análisis: un análisis frecuencial y el análisis bayesiano de la amenaza dada la configuración y la distribución de los datos de entrada.

Se procede finalmente a diseñar el aplicativo, el cual a través de conexión a Internet y bajo el paradigma cliente servidor accede a los cálculos de las probabilidades que se encuentran en el servidor. La consulta se realiza de manera remota y no directamente en el dispositivo móvil debido a la gran extensión de datos y lo arduo de los cálculos que se realizan teniendo en cuenta el consumo de memoria y de espacio de almacenamiento para un smarthphone. El aplicativo es una especie de puente que permite al usuario a través de un mapa ubicar la zona que la persona desee evaluar para que el servidor realice los cálculos que son visualizados por el usuario en el aplicativo.

Es necesario recalcar que el proyecto no pretende realizar la fase de modelamiento de los flujos por medio de TITAN2D, debido a que esta tarea ya fue abarcada por otros proyectos de investigación. Se utilizan los resultados de otros estudios como fuente de información para el aplicativo a desarrollar.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. ANTECEDENTES

El punto de partida para la elaboración de mapas de amenaza volcánica ha sido el reconocimiento y distribución de los productos asociados a la actividad pasada de cada volcán. Adicionalmente, se tiene en cuenta la estratigrafía, la composición de los productos emitidos y en general, la morfología volcánica. De igual manera se realiza trabajos geomorfológicos, en caso de que la configuración del terreno sea un factor clave en la distribución espacial de los fenómenos naturales¹⁰.

Los flujos piroclásticos suponen una de las mayores amenazas a la cual se encuentran expuestos los seres humanos que habitan una zona de actividad volcánica. Estos se producen cuando erupciones volcánicas de gran magnitud generan nubes de gases tóxicos acompañados de fragmentos de roca que pueden viajar a velocidades de cientos de metros por segundo y alcanzar temperaturas que superan 500 grados Celsius. Con el fin de predecir su posible comportamiento típicamente se realizan trabajos de campo basados en el alcance de los flujos piroclásticos depositados en la ladera de los volcanes. Para realizar el mapa de amenaza se tienen como modelos, flujos de diversos tipos y mayor magnitud que han ocurrido en el volcán bajo estudio, por lo que es de esperarse que se puedan encontrar muy pocos depósitos (por ejemplo depósitos de oleadas piroclásticas son difíciles de encontrar) que sean tomados en cuenta y por lo tanto, la serie de datos obtenidos no suponen una muestra representativa desde el punto de vista estadístico debido a la escasa existencia de los mismos. Existe otra limitante con este método debido a que cada erupción ocurrida en el pasado ha transformado la topografía sobre el cual se espera que se circulen los posibles nuevos flujos, lo cual puede afectar el alcance final y la trayectoria de los flujos. Además, generalmente cuando una persona se refiere a un mapa de amenazas se encuentra información cualitativa demarcada en el área de estudio por medio de zonas donde se halla distintos niveles de amenaza: alta, media y baja; cada una con vaga información sobre las probabilidades de ocurrencia de los eventos, por ejemplo a cada zona le corresponde un rango de probabilidades sin especificar como se puede ver en Artunduaga y Jiménez¹¹. Sin embargo, para la evaluación de riesgo se necesita discriminar estos valores con exactitud. Adicionalmente, se han utilizado modelos matemáticos, físicos y computacionales con el fin de

¹⁰ Monsalve, R., y Méndez, L. Presentación de la metodología utilizada para la elaboración de mapas de amenaza volcánica en Colombia, 1 ed., 1995.

¹¹ Artunduaga, G. y Jiménez, A. Third version of the hazard map of galeras volcano, colombia. Journal of Volcanology and Geothermal research, 77(1):89–100, 1997.

modelar el comportamiento esperado de los productos volcánicos que pudieran ocurrir sobre el terreno actual. Como resultado se obtiene la probabilidad de llegada de los productos en los sitios aledaños. En este caso la incertidumbre está representada por la probabilidad de que sucedan eventos de este tipo¹². Para el tomador de decisiones saber la magnitud con la que la probabilidad aumenta o disminuye entre dos lugares es bastante útil, ya que así se hace posible encontrar sitios de evacuación o de posible relocalización.

A fin de brindar un conocimiento complementario al método que se utiliza actualmente, se ha desarrollado software como herramienta de soporte para el estudio de estos fenómenos haciendo uso de modelamiento mediante sistemas computacionales. TITAN 2D es un ejemplo de ello, este código desarrollado por el grupo Geophysical Mass Flow de la Universidad de Buffalo, Estados Unidos, tiene como fin la simulación del comportamiento de fluidos granulares, principalmente flujos de masa geológica, tales como los producidos por avalanchas o deslizamientos, sobre un Modelo Digital de Elevación¹³. Los flujos granulares se caracterizan porque en su dinámica domina la fricción, es por ello que TITAN2D hace uso de las ecuaciones de masa y momentum de Morh Coulomb para el modelado del comportamiento de los flujos^{14 15}. Para hacer uso del programa TITAN2D es necesario especificar condiciones iniciales como: las dimensiones de la pila de material granular que se va a modelar, la fricción interna y basal del flujo¹⁶, la velocidad inicial, el lugar de inicio de la simulación.

Es necesario tener en cuenta que TITAN2D, permite realizar una sola modelación bajo parámetros específicos. Aquí surge el inconveniente de cómo evaluar la amenaza por flujos piroclásticos cuando se desconocen sus condiciones iniciales como el punto de arranque, volumen inicial, condiciones mecánicas, entre otros. Aunque cada uno de los parámetros que determinan el comportamiento del flujo se ignoran es posible trazar límites máximos y mínimos esperados para cada uno de estos factores resultando en rangos para cada uno de los parámetros a través

¹² Patra, A. K., Dalbey, K., Hubbard, B. y Sheridan, M. F. Probabilistic digital hazard maps for avalanches and massive pyroclastic flows using titan2d. Geological Society of America Special Papers, 464:281–291, 2010.

¹³ Geophysical Mass Flow Group. Guía del usuario TITAN2D, 1 edón., 2010.

¹⁴ Stinton, A. J., Patra, A., Pitman, B., Bauer, A., Nichita, C. y Sheridan, M. F. Evaluating titan2d mass-flow model using the 1963 little tahoma peak avalanches, Mount rainier, Washington. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139:89–102, 2005.

¹⁵ Nichita, C. C., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M., Bursik, M. y Pitman, E. B. Computing granular avalanches and landslides. Physics of Fluids, 15:3638–3646, 2003.

¹⁶ Hsiau, S. S., Wang, Y., Hutter, K. y Pudasaini, S. P. Velocity measurements in dry granular avalanches using particle image velocimetry technique and comparison with theoretical predictions. Physics of Fluids, 17:093301, 2005.

de estudios geológicos previos. Entonces, para poder evaluar la amenaza se debe simular diversos flujos en donde sus parámetros varíen de acuerdo con los rangos establecidos, de tal manera que las condiciones iniciales de los flujos a simular se distribuyan de forma equitativa a lo largo de cada rango. El ideal de este proceso es abarcar todos los casos posibles, para que así cualquier escenario esperado estuviese cubierto. Sin embargo debido al costo computacional que requiere TITAN2D resultaría imposible simular todos los casos posibles, ya que la incertidumbre generada por el desconocimiento simultáneo de diversos parámetros resultaría en una infinita cantidad de flujos a modelar.

Para solucionar este problema se recurre a la generación aleatoria de números que representan los valores asignados posteriormente a las condiciones iniciales del flujo (por ejemplo el volumen del flujo). Existen muchos procedimientos que permiten generar valores aleatorios, sin embargo, es necesario tener en cuenta que se debe obtener una muestra representativa y estadísticamente válida. El Muestreo Hipercúbico Latino (o LHS por sus siglas en inglés) es una técnica de muestreo que consiste en la generación de números pseudo aleatorios que se organizan en una distribución proporcional a los elementos de cada muestra en estratos preestablecidos. De este proceso se obtiene una distribución de diferentes conjuntos de valores para las condiciones iniciales a los cuales se les conoce como muestras^{17 18}. Este método reduce el costo computacional de Monte Carlo hasta en un 90 %¹⁹.

Finalmente, una vez obtenidas las muestras se procede a hacer uso de TITAN 2D. El software arroja un número de archivos de resultados igual al número de muestras generadas por LHS. Los archivos obtenidos contienen un compilado del comportamiento de espesor de cada flujo simulado a lo largo del tiempo de modelamiento. Sin embargo, debido a la extensión de información conseguida es necesario realizar un procesamiento posterior para visualizar los resultados de una manera comprensible. Generalmente, se recurre a la estadística con el fin de procesar todos los datos y dar información clara sobre el posible alcance de los flujos. En el caso de los flujos piroclásticos, se toma como parámetro base el espesor del flujo, en caso de que este sea mayor a 20 centímetros, debido a que dada la naturaleza de la temperatura y la presión dinámica del fenómeno, aun

¹⁷ Pardal, J. M., Morano, A. R., Martins, L. F. y Ferreira, L. R. Comparación de la estimación de la productividad del proceso de soldadura eléctrica por los métodos de simulación de Monte Carlo e hipercubo latino. *Información tecnológica*, 23:21–32, 2012.

¹⁸ Cheng, J. y Druzdzel, M. Latin hypercube sampling in bayesian networks. En *International Florida Artificial Intelligence Research Symposium Conference*, American Association for Artificial Intelligence.

¹⁹ Keramat, M. y Kielbasa, R. Latin hypercube sampling and monte carlo estimation of average quality index for integrated circuits. *Analog Integrated Circuits And Signal Processing*, 14:131–142, 1997.

cuando su parte basal tuviese un espesor muy bajo, supondría una amenaza letal²⁰.

Con el objetivo de que la información cuantitativa obtenida se encuentre al alcance de los tomadores de decisiones se propone un aplicativo para la plataforma ANDROID como herramienta para el cálculo de la probabilidad relativa de llegada de flujos piroclásticos, entre dos localizaciones dentro del área de estudio, de manera rápida y portable. El usuario puede elegir entre ubicar dos localizaciones en un mapa satelital o ingresar las coordenadas correspondientes a latitud y longitud de dos lugares específicos y obtendrá los valores correspondientes a la probabilidad en cada una de las localizaciones así como la diferencia, positiva o negativa de probabilidad entre los dos puntos a través de una conexión a internet.

1.2. MARCO TEÓRICO

1.2.1 Volcanes

Un volcán es un sistema natural que transporta energía desde interior hasta el exterior de la Tierra, por medio de la transferencia de magma a la superficie. La creación de dicho magma ocurre en profundidad, por fusión de rocas que luego se mueven hacia la superficie hasta, eventualmente, erupcionar material rocoso, formar un edificio volcánico e inyectar materiales (rocas y gases) en la atmósfera²¹.

Generalmente, los volcanes se forman en lugares donde se encuentran los límites en la tectónica de placas, por medio del proceso de subducción o por dorsales oceánicas. Sin embargo, existen los denominados hotspot²² o punto caliente donde se producen cámaras magmática en lugares en los cuales no existe contacto entre placas.

El proceso de subducción ocurre entre los límites entre una placa oceánica y una continental. Debido a la diferencia de densidades entre ambas, la placa oceánica

²⁰ Aspinall, W. P., Darroux ,B., Harford , C. L., Loughlin, S. C., Baxter, P. J. y Miller , A. D. 1997 Pyroclastic flows and surges at soufrière hills volcano, Montserrat, and implications for disaster mitigation. Geological Society, London, 21:211–230, 2002.

²¹ Andrade, D. y Van Wyk, B. Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica. CREA, 1 ed., 2008. ISBN 978-84-96742-37-6.

²² Geological Survey USGS. Characteristics of Hawaiian Volcanoes. Geological Survey, 1 edón., 2015. ISBN 978-141-13-3872-2.

que es la que posee mayor densidad de las dos, se sumerge bajo la placa continental, el rozamiento produce calor lo que conlleva a la fusión de la corteza²³. La formación de las dorsales oceánicas se genera cuando existen un límite entre dos placas continentales resultante de fisuras en el fondo oceánico, las placas tienden a divergir dando lugar al ascenso de magma, el cual se solidifica por acción del agua²⁴.

1.2.1.1 Amenazas volcánicas. Alrededor del mundo de 50 a 60 volcanes hacen erupción cada año²⁵. Algunas erupciones se presentan en zonas escasamente pobladas causando muy pocas pérdidas de vida o económicas. Sin embargo, cuando una erupción ocurre cerca de un área poblada los efectos pueden ser catastróficos. Aproximadamente 500 millones de personas viven cerca de volcanes y conforme la población aumenta, más y más personas habitan en los flancos de volcanes activos o potencialmente activos²⁶.

Las amenazas volcánicas incluyen efectos primarios de la actividad volcánica, los cuales son resultados directos de una erupción (flujos de lava, flujos piroclásticos, caída de ceniza y tefra, entre otros) y efectos secundarios que pueden ser causados por los primeros efectos (flujos de lodo, avalanchas de escombros, deslizamientos, entre otros)²⁷.

Flujos de Lava: los flujos de lava son los productos mayormente asociados con la actividad volcánica. Los flujos de lava pueden ser fluidos y moverse rápido o pueden ser viscosos y tener una menor velocidad. Los flujos de lava difícilmente suponen una amenaza para la vida humana debido a su baja velocidad, lo que hace que sea posible escapar. Sin embargo, debido a su temperatura, momentum y avance generan grandes pérdidas económicas y ambientales^{28 29}. En la Figura 1, se observa el recorrido de un flujo de lava en Kalapana/Royal Gardens, Hawaii.

²³ Stern, R. J. Subduction initiation: spontaneous and induced. *Earth and Planetary Science Letters*, 226:275-292, 2004.

²⁴ Pasotti, P. *Placas Tectónicas Primera Parte*, 1 ed., 1977.

²⁵ De la Cruz, S. *VOLCANES. Peligro y Riesgo Volcánico en México*. Centro Nacional de prevención de Desastres, 1 ed., 2008. ISBN 970-628-734-5.

²⁶ Organización Panamericana de la Salud. *Los Volcanes y la Protección de la Salud*. Organización Panamericana de la Salud, 1 ed., 2002. ISBN 92-75-32396-8.

²⁷ Blodgett, E. H. y Keller, E. A. *Natural Hazards. Earth processes as Hazards, Disasters and Catastrophes*. Prentice Hall, 2 ed., 2008. ISBN 978-0-13-231864-8.

²⁸ Keller, E. A. *Introduction to Environmental Geology*. Prentice Hall, 4 ed., 2007. ISBN 978-0-13-225150-1.

²⁹ Coch, N. K. *Geohazards: natural and human*. Prentice Hall, 1 edón., 1995. ISBN 0-02-322992-6.

Figura 1. Ejemplo de un flujo de lava. Kalapana/Royal Gardens, Hawaii.



Fuente: www.omnia.com.mx

Tefra y ceniza: la tefra y la ceniza se componen principalmente por pequeñas partículas de escombros y vidrio volcánico, el cual puede ser muy abrasivo. Entre las principales consecuencias que puede tener la tefra se encuentran los daños estructurales como colapso de techos debido al alto peso de la tefra; igualmente pueden provocar fallas mecánicas en autos y aviones y problemas de respiración³⁰³¹. La Figura 2 muestra la caída de tefra y ceniza sobre autos durante la erupción del monte Pinatubo, Filipinas en el año de 1991.

Figura 2. Autos cubiertos con tefra y ceniza.



Fuente: volcanoes.usgs.gov

³⁰ Ibid., pág. 26.

³¹ Blodgett y Keller, Opt. cit., pág. 25.

Lahares: conocidos también como flujos de lodo de origen volcánico consisten en una mezcla de agua y productos volcánicos. Los lahares que son provocados directamente en erupciones en donde los materiales expulsados se mezclan con agua proveniente de sistemas hídricos o por deshielo de los glaciares del edificio volcánico se denominan flujos de lodo de origen primario. Sin embargo, en ciertas ocasiones los escombros volcánicos depositados en erupciones previas se mezclan con agua de lluvia o de otras fuentes y producen lahares conocidos como flujos de lodo de origen secundario^{32 33}. En la Figura 3, se observa un lahar descendiendo por la ladera del volcán Merapi en Indonesia en el año de 2010.

Figura 3. Lahar descendiendo por el volcán Merapi, Indonesia.



Fuente: www.monserratvolcano.org

Gases tóxicos: a pesar de que el mayor componente de los gases volcánicos es el vapor de agua, estos también contienen dióxido de carbono (CO_2), dióxido de sulfuro (SO_2), monóxido de carbono (CO), sulfuro de hidrógeno (H_2S), ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido clorhídrico (HCl) y ácido fluorhídrico (HF). Estos gases pueden representar amenazas bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, las continuas erupciones en la zona del volcán Kilauea en Hawaii emitieron gases tóxicos que se extendieron sobre la agricultura y las áreas urbanas de la isla^{34 35}. Un ejemplo de ello es la propagación de gases en Camerún en el Lago Nyos en agosto de 1986 y que causó muchas pérdidas, como se observa en la Figura 4.

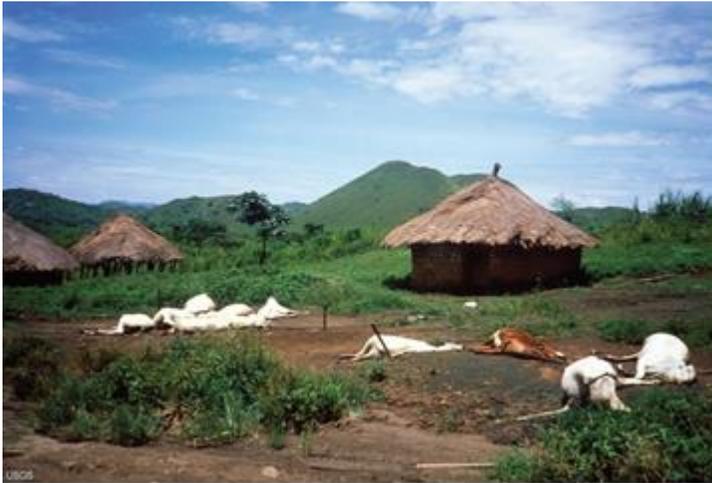
³² Ortiz, A. J. Distribución espacial y análisis del riesgo relacionado a flujos piroclásticos y lahares provenientes de la actividad eruptiva del volcán de Colima. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2012.

³³ Coch, N. K. Opt. cit., pág. 26.

³⁴ Coch, N. K. Opt. cit., pág. 26.

³⁵ Keller, E. A. Opt. cit., pág. 26.

Figura 4. Lago Nyos, propagación de gas volcánico.



Fuente: www.geology.com

Flujos Piroclásticos: una de las mayores amenazas de las erupciones volcánicas son los flujos piroclásticos, denominada por algunos geólogos como nube ardiente, este fenómeno consiste en una mezcla de gases y escombros volcánicos de diferentes tamaños, como se observa en la Figura 5 y viaja a velocidades de cientos de kilómetros por hora y posee temperaturas que pueden llegar a los cientos de grados centígrados³⁶.

Los flujos piroclásticos se catalogan como una clase de flujo gravitacional de sedimentos, que posee propiedades únicas tal como la posibilidad de presentar variaciones en su viscosidad y su densidad a medida que el flujo se desplaza, mientras que fluidos como el agua apenas y varían su densidad o viscosidad a lo largo de su trayecto. El movimiento del sedimento arrastra consigo gases y líquidos mezclados con finas partículas y juntos constituyen la masa del fluido. Las partículas más pequeñas se acoplan con la fase gaseosa debido a la fuerza de arrastre, aumentando la capacidad de carga de la corriente. Esta aglomeración de partículas en fase gaseosa arrastra partículas más grandes que se ubican posteriormente en la base del flujo aumentando así su concentración y causando el cambio aparente en su viscosidad y densidad³⁷.

³⁶ Valentine, G. A. Environmental hazards of pyroclastic flows determined by numerical models. *Geology*, 17:641–644, 1989.

³⁷ Fisher, R. V. Pyroclastic flows. 1997. URL <http://volcanology.geol.ucsb.edu/pfs.htm>.

Figura 5. Flujo piroclástico formado en erupción del monte Pinatubo, 1991.



Fuente: www.pinterest.com

Sin embargo, no todas las erupciones producen este tipo de fenómeno. En general, esto depende del tipo de erupción que se presente, lo cual está directamente relacionado con la configuración y tipo de volcán. Este tipo de fenómenos están relacionados con erupciones violentas de volcanes andesíticos³⁸.

³⁸ Coch, N. K. Opt. cit., pág. 26.

1.2.2 Análisis probabilístico. Con el fin de obtener una distribución espacial de la probabilidad amenaza frente a flujos piroclásticos en el presente proyecto, se hace necesario aplicar técnicas estadísticas.

Dentro de la probabilidad y estadística existen diferentes caminos para la solución de un problema en el que se busca encontrar la posibilidad del suceso de un evento³⁹.

- La probabilidad clásica supone que un experimento aleatorio produce resultados igualmente posibles y propone la probabilidad de un evento como el cociente entre casos favorables sobre el total de casos posibles.
- La probabilidad frecuentista se define como la probabilidad de la frecuencia de la ocurrencia de un determinado fenómeno esperado sobre el número de veces que se realizó el experimento. Por ejemplo, se supone un experimento aleatorio que puede repetirse un número finito de veces n . La probabilidad frecuencial está dada por el número de veces que ocurrió el evento de interés i en función de la cantidad de experimentos realizados n ⁴⁰.
- La probabilidad subjetiva es la medida de incertidumbre de la probabilidad de un evento asignada por el observador. Dentro de este tipo de probabilidad se encuentra la teoría bayesiana, donde al admitir un manejo subjetivo de la probabilidad el observador estará en la capacidad de emitir una hipótesis respecto a su conocimiento sobre el problema. Esta hipótesis es conocida como probabilidad a priori y la comprobación (que puede referirse a una aprobación o negación) de la hipótesis se conoce como probabilidad a posteriori⁴¹.

1.2.2.1 Teorema bayesiano. En la teoría de la probabilidad existen dos corrientes principales: la teoría clásica la cual se aplica generalmente en problemas en donde todos los casos posibles poseen la misma probabilidad de ocurrir y la teoría subjetiva que puede ser aplicada en casos de muchos eventos donde la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos es incierta⁴².

³⁹ Paz, J. M. Estadística bayesiana. 2013. URL <http://www.seqc.es/>

⁴⁰ Eshky, A. Bayesian methods of parameter estimation. University of Edinburgh. School of Informatics.

⁴¹ Gutierrez, H. A. Análisis bayesiano para la diferencia de dos proporciones usando R. Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa., 8:50–70, 2009.

⁴² Ferson, S. Bayesian methods in risk assessment. Inf. téc., Report for Service Environnement y Procédés, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France, 2005.

Los métodos clásicos o frecuenciales, los cuales suelen usar distribuciones de muestreo, son útiles en problemas idealizados que son bastante simples. Sin embargo en muchos casos se tiene problemas más complejos que deben ser resueltos desde la perspectiva subjetiva, como por ejemplo la teoría bayesiana⁴³.

La fórmula básica del Teorema de Bayes está dada por:

$$P(A|B) = \frac{P(A|B) * P(A)}{P(B)}$$

Dónde:

- $P(A|B)$: es la probabilidad condicional de que ocurra el evento A dado que ha sucedido el evento B.
- $P(A)$: es la probabilidad de que ocurra el evento A.
- $P(B)$: es la probabilidad de que ocurra el evento B.
- $P(B|A)$: es la probabilidad condicional de que ocurra el evento B dado que ha sucedido el evento A.

Por ejemplo, supóngase que se tiene dos paquetes de galletas 40 de las cuales 10 son saladas y 30 son dulces. Las galletas se colocan dos contenedores: 25 en uno azul y 15 en otro amarillo. La probabilidad de sacar una galleta salada del contenedor amarillo es de 30 % y de sacar una galleta dulce del contenedor azul es de 50 %. Se saca una galleta salada ¿Cuál es la probabilidad de que esta estuviera en el contenedor amarillo?

$P(A)$ corresponde a la probabilidad de que una galleta esté en el contenedor amarillo.

Dado de 15 de las 40 galletas están en dicho contenedor se tiene que:

$$P(A) = \frac{15}{40} = 0.375$$

En este caso $P(B)$ es la probabilidad de que la galleta sea salada. Como 10 de las 40 galletas son saladas esto corresponde a:

$$P(B) = \frac{10}{40} = 0.25$$

⁴³Jaynes, E. T. Probability Theory: The Logic of Science. Cambridge University Press, 1 ed., 2002. ISBN 978-0-52-159271-0.

Y finalmente la probabilidad de que suceda B, es decir que la galleta sea salada, dado que haya sido sacada del contenedor amarillo o A es de 30 %, es decir

$$P(B|A) = 0.3$$

La probabilidad P (A|B) de que una galleta salada (A) elegida al azar haya pertenecido al contenedor amarillo (B) se calcula aplicando la ecuación de bayes, por lo tanto:

$$P(A|B) = \frac{0.3 * 0.375}{0.25} = 0.45$$

Una explicación más detallada junto con la aplicación del análisis bayesiano en este trabajo se explica en mejor detalle en la sección **2.1.3.2 Análisis bayesiano**.

1.2.3 Ingeniería del software. La ingeniería del software es la aplicación de un enfoque sistemático, disciplinado y cuantificable al desarrollo, operación y mantenimiento del software⁴⁴. Para el desarrollo de un proyecto software existen muchas metodologías y técnicas que funcionan como guías y se adaptan a cada necesidad del sistema, al conjunto de todo esto se le conoce como modelos prescriptivos del software.

Los modelos prescriptivos de proceso definen un conjunto distinto de actividades, acciones, tareas, fundamentos y productos de trabajo que se requieren para desarrollar software de alta calidad. Estos modelos de proceso no son perfectos pero proporcionan una guía útil para el trabajo de ingeniería del software⁴⁵.

Existen distintas metodologías que se ajustan a cada proyecto según sus requerimientos. Entre los modelos más conocidos están: el modelo en cascada, modelo incremental, modelo de desarrollo rápido de aplicaciones, el modelo en espiral, el modelo RUP y las metodologías ágiles.

Los modelos lineales como el modelo en cascada proponen una metodología que sigue el ciclo de vida clásico de un software, es decir una vez se desarrolla una etapa del proyecto ésta se da por terminada. Sin embargo la anterior visión supone ciertas desventajas, debido a que se debe esperar hasta las últimas etapas para ver el software en funcionamiento y a menudo el software difícilmente se adapta a este tipo de modelos⁴⁶.

⁴⁴ IEEE Computer Society. IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology. 2002. ISBN 978-0-7381-0391-4.

⁴⁵ Pressman, R. Ingeniería del Software. Un enfoque práctico. McGraw Hill, 6 ed., 2005. ISBN 970-10-5473-3.

⁴⁶ Laboratorio Nacional de Calidad del Software (INTECO). Ingeniería del software: Metodologías y ciclos de vida. Inf. téc., Instituto Nacional de Tecnologías de la Comunicación, 2009.

Como solución a los problemas de los modelos lineales, se proponen los modelos incrementales donde el producto software se construye a partir de iteraciones, es decir para comenzar y luego de realizar todas las etapas del ciclo básico del software el equipo de trabajo construye un modelo funcional que el usuario puede probar, la diferencia es que este modelo no posee todas las funcionalidades del sistema final, estas serán construidas por medio de repeticiones que irán adicionando elementos al proyecto final⁴⁷.

Otra alternativa la proponen los modelos de construcción de prototipos. Los prototipos se refieren a diseños rápidos de los requisitos del software que en un principio propuso el cliente. A diferencia de los diseños construidos en los modelos incrementales, los prototipos están más enfocados al diseño y al despliegue del software con el fin de que el cliente apruebe o desaprobe los conceptos plasmados aquí y de esta manera hacer un refinamiento de los requisitos del software y a partir de allí construir el producto.

Las anteriores metodologías se conocen como metodologías pesadas debido a que se debe seguir estrictamente el plan inicial que se ha trazado, además en la mayoría de ocasiones requiere un alto costo en recursos humanos, económicos y tiempo. Es por ello que para la década de los 90s se plantearon las denominadas metodologías ágiles, donde una de las consignas es simplificar los procesos de manera que el cliente pueda ver software funcional en el menor tiempo posible. Uno de los requerimientos más importantes en estas metodologías es la continua comunicación con el cliente, en ocasiones incluso se habla del cliente como parte del equipo de trabajo, para la definición de requerimientos y los ajustes de los mismos. Entre las metodologías ágiles más conocidas se tienen: Scrum, Desarrollo de Software Adaptativo (ASD), Crystal, y Extreme Programming (XP)⁴⁸
^{49 50}

1.2.3.1 Programación extrema. XP es una metodología ágil centrada en potenciar las relaciones interpersonales como clave para el éxito en desarrollo de software. XP se basa en realimentación continua entre el cliente y el equipo de desarrollo, comunicación fluida entre todos los participantes, simplicidad en las

⁴⁷ Weitzenfeld, A. y Guardati, S. Introducción a la Computación, cap. Capítulo 12 Ingeniería de software: el proceso para el desarrollo de software, págs. 355–397. Cengage Learning, 2008.

⁴⁸ Rojas, M. y Orjuela, A. Las Metodologías de Desarrollo Ágil como una Oportunidad para la Ingeniería del Software Educativo. Revista de Avances en Sistemas e Informática, págs. 159 –171. 2008.

⁴⁹ Micah M. y Robert M. Agile Principles, Patterns, and Practices in C. Prentice Hall, 1 ed., 2006. ISBN 978-0-13-185725-4.

⁵⁰ Cabrera A., Figueroa R. y Solís C. Metodologías tradicionales vs. metodologías ágiles. Universidad Técnica Particular de Loja. Escuela de ciencias en computación.

soluciones implementadas y se define como especialmente adecuada para proyectos con requisitos imprecisos y muy cambiantes, y donde existe un alto riesgo técnico⁵¹.

Según Newkirk y Martín⁵² un proyecto que sigue la metodología XP comienza con la etapa de exploración, en la cual su finalidad es identificar, priorizar y estimar los requisitos. Aquí tanto cliente como desarrollador discuten y definen las necesidades del software deshaciéndose de ambigüedades. Toda la información se consigna en cuadros a los cuales se les conoce como historias de usuario⁵³. Las historias deben escribirse de tal manera que cada una pueda ser probada por el cliente para posteriormente ser reajustada o aceptada.

Luego de esta etapa se continúa con la planificación de la iteración, donde se definen que historias serán desarrolladas en un periodo de tiempo establecido. El cliente debe comprometerse a no añadir nada hasta que la iteración termine.

Finalmente se encuentra la etapa de desarrollo donde se procede a la producción del código fuente teniendo en cuenta las historias de usuario que el cliente ha planteado. Las pruebas son igualmente importantes en esta fase del proyecto, cada historia debe ser probada y aceptada tanto antes como después de ser integrada al sistema.

1.2.4 Interpolación bilineal. Debido a que la información de insumo del software corresponde a los resultados de cientos o miles de modelamientos realizados con el software TITAN2D que se encuentran en forma de grilla, es posible que existan muchas ubicaciones con valores de espesor nulo, por lo cual se hace necesario realizar un proceso de interpolación.

Los métodos de interpolación permiten el cálculo de nuevos datos a partir de un conjunto discreto de valores conocidos⁵⁴. Usualmente se utilizan sistemas de interpolación en una sola dimensión, por ejemplo se tiene conocido un conjunto de puntos $a = \{(x, y) \in R\}$, es decir, cada punto del conjunto posee valores en X y Y . El objetivo de la interpolación es encontrar una función $F(x)=y$ que sea capaz de satisfacer los puntos conocidos y encontrar en valor de la función en cualquier

⁵¹ Letelier P., Penadés C. y Canós J. Metodologías ágiles en el desarrollo de software. DSIC -Universidad Politécnica de Valencia Camino de Vera s/n, 46022 Valencia.

⁵² Newkirk J. y Martin R. La programación extrema en la práctica. Pearson Education, 2002. ISBN 84-7829-057-5.

⁵³ Cohn M. User Stories Applied for Agile Software Development. Addison-Wesley, 2009. ISBN 0-321-20568-5.

⁵⁴ Valenzuela J. V. Interpolación de Formas en Imágenes Usando Morfología Matemática. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2008.

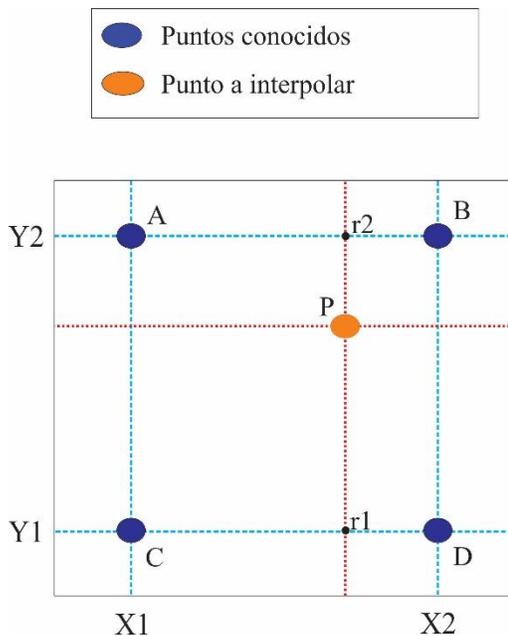
número $n = a$. Sin embargo cuando se trata de encontrar el valor de una función de la forma $F(x, y) = z$ se debe recurrir a métodos de interpolación en dos dimensiones.

Los esquemas de interpolación se pueden clasificar en dos tipos. El primero utiliza dos veces la interpolación en una dimensión y se le conoce como doble interpolación. El segundo emplea polinomios de interpolación por partes en dos dimensiones. El primer tipo es adecuado para interpolar una tabla de valores de funciones en puntos con igual separación. El segundo se utiliza en los métodos de elementos finitos⁵⁵.

Conforme a la información obtenida por medio del software TITAN2D se aplica el primer método de interpolación en dos dimensiones.

Supóngase que se tiene una grilla regular de datos y se desea encontrar el valor de la función en el punto P con coordenadas (x, y) . El punto queda ubicado en la grilla de tal manera que el valor se encuentra entre los puntos A, B, C, D que forman un rectángulo definido $x_1 < x < x_2$ y $y_1 < y < y_2$ como se observa en la Figura 6.

Figura 6. Interpolación bilineal en un dominio de dos dimensiones



Se desea obtener $F(P) = F(x, y)$ para lo cual se realiza:

⁵⁵ Nakamura S. Métodos Numericos Aplicados con Software. Prentice Hall, 1 ed. 1992. ISBN 968-880-263-8.

$$F(r_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} * F(C) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} * F(D); \quad r_1(x, y_1)$$

$$F(r_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} * F(A) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} * F(B); \quad r_2(x, y_2)$$

La función del punto $P(x, y)$ está dada por:

$$F(P) \cong \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} * F(r_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} * F(r_2)$$

Reemplazando las dos primeras ecuaciones en la anterior ecuación se obtiene que:

$$\begin{aligned} F(P) &= F(x, y) \\ &\cong \frac{1}{(x_2 - x_1) * (y_2 - y_1)} \\ &\quad * \{ [F(C) * (x_2 - x) * (y_2 - y)] + [F(D) * (x - x_2) * (y_2 - y)] \\ &\quad + [F(A) * (x_2 - x) * (y - y_1)] + [F(B) * (x - x_1) * (y - y_1)] \} \end{aligned}$$

Aplicando esta ecuación es posible obtener el valor del espesor o de la probabilidad en cualquier ubicación dentro del área de estudio, lo cual soluciona el problema de la presencia de valores nulos en un sitio ubicado dentro de las grillas correspondientes a los resultados de modelamientos.

1.3 MARCO CONTEXTUAL

1.3.1 Volcán Galeras. El volcán Galeras es un estratovolcán de naturaleza andesítica ubicado al sur-occidente de la República de Colombia⁵⁶. Galeras ha sido reconocido por ser uno de los volcanes más activos del mundo, ya que sus periodos de reposo son relativamente cortos comparados con los intervalos en los que éste se encuentra activo⁵⁷.

El volcán Galeras se localiza en el Departamento de Nariño, Colombia, aproximadamente a 9 km al occidente de la Ciudad de San Juan de Pasto, capital de este Departamento, en las coordenadas 1 grados 13'43,8"de Latitud N y 77 grados 21'33"de longitud W⁵⁸.

La Figura 7 muestra una panorámica del volcán visto desde la ciudad de San Juan de Pasto.

Figura 7. Panorámica del volcán Galeras.



Fuente: <http://noticiasunolaredindependiente.com/>

⁵⁶ Calvache M. Geology and volcanology of the recent evolution of Galeras volcano, Colombia. 1990.

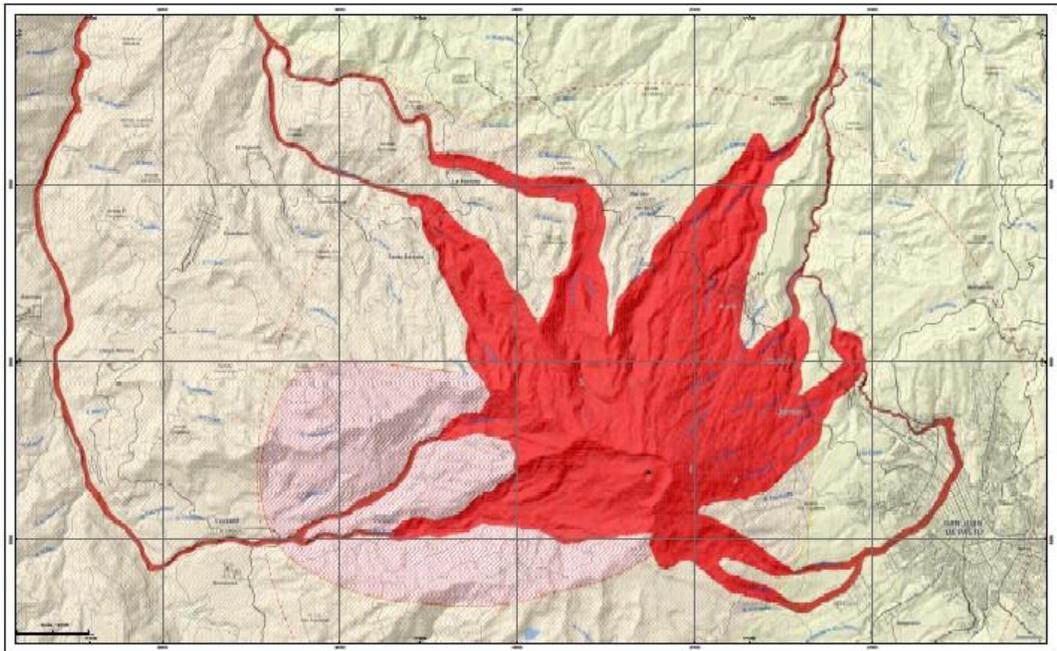
⁵⁷ Artunduaga, G. y Jiménez, A. Opt. pág 21.

⁵⁸ Servicio Geológico Colombiano. Volcán Galeras. Generalidades. 2008. URL <http://www2.sgc.gov.co/Pasto/Volcanes/Volcan-Galeras/Generalidades.aspx>.

Galeras corresponde al centro eruptivo más joven en una serie de volcanes que conforman el Complejo Volcánico Galeras (CVG)⁵⁹. El CVG se ha formado sobre una de las fallas del Sistema Romeral, que separa un basamento formado por basaltos y metasedimentos cretáceos al occidente y metamorfitas paleozoicas al oriente⁶⁰.

El volcán actualmente cuenta con un mapa de amenazas, como puede observarse en la Figura 8, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), el cual fue actualizado en el año de 2015 por medio de la sentencia T269 de la Corte Constitucional de la República de Colombia.

Figura 8. Mapa de amenazas del volcán Galeras



Fuente: Servicio Geológico Colombiano – Pasto

La zona de amenaza alta se delimita por lugares que pudieran resultar potencialmente afectados por eventos que el Servicio Geológico Colombiano considera no mitigables, especialmente flujos piroclásticos, lahares, onda de choque, caída de piroclastos, entre otros. La zona de amenaza media fue trazada teniendo en cuenta el sector donde existe una alta probabilidad de caída de

⁵⁹ Calvache M. The geological evolution of Galeras volcanic complex. Tesis Doctoral, Arizona State University, 1995.

⁶⁰ Servicio Geológico Colombiano, Opt. pág 37.

piroclastos de 10 cm, ceniza y lapilli. La zona de amenaza baja corresponde a los lugares con probabilidad de caída de ceniza y lapilli.

Se ha estimado que alrededor del área de influencia del volcán habitan más 500.000 personas, de las cuales al menos el 10.000 se ubican en la zona de amenaza alta⁶¹.

1.3.1.1 Actividad. El actual cono activo tiene una edad estimada de aproximadamente de 4500 años⁶². La actividad histórica se ha caracterizado principalmente por la presencia de volúmenes relativamente pequeños producto de erupciones moderadas⁶³ [1].

Los eventos eruptivos importantes del presente edificio que poseen registro geológico corresponden a las fechas estimadas de 4500, 4000, 2900, 2300, 1100 antes del presente y la reciente erupción de 1866 según el trabajo realizado por Calvache en 1990⁶⁴. En estos casos los flujos piroclásticos poseen la tendencia a dirigirse hacia la zona norte y este del volcán en vez del sector oeste. El volumen total de los depósitos generados en estos eventos es de aproximadamente 8,7 km³⁶⁵. En la Tabla 1 se encuentra un estimado de volumen por cada evento.

⁶¹ Fondo Nacional de Calamidades Corporación OSSO. Estudio de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos en el área de influencia del volcán galeras. Inf. téc., Ministerio del Interior y de Justicia, Republica de Colombia, 2009.

⁶² Calvache M. Opt. pág 38.

⁶³ Cortés G. P., Laverde C. A., García, A. M. y Murcia, H. F. Simulación de flujos piroclásticos en el volcán Galeras con el código titan2d. Geología Colombiana, 36:27. 2011.

⁶⁴ Calvache M. Opt. pág 38.

⁶⁵ Ibid. pág 39.

Tabla 1. Información de volumen de depósitos de productos de erupciones datadas en el volcán Galeras

Evento	Lavas (millón de m3)	Flujos Piroclásticos (millón m3)	Volumen total (millón de m3)
1866	11.1	2.9	14
1100	163	1.2	164.2
2300	163	2.1	165.1
2900	163	1.3	164.3
4000	163	1.2	164.2
Volumen total de depósitos		8.7	671.8

1.3.2 Volcán San Cristóbal. San Cristóbal, el cual se observa en la Figura 9, es un volcán que se ubica en las coordenadas 12 grados 70' de latitud Norte y 87 grados 57' de longitud Oeste en la República de Nicaragua. Éste volcán se encuentra a una distancia de 20 kilómetros de la población de Chinandega, posee una altitud de 1780 m.s.n.m. y una altura de 1550 metros con respecto a la base⁶⁶. San Cristóbal es el estratovolcán más joven que forma parte del complejo volcánico San Cristóbal que consta de otros cuatro edificios volcánicos: el Chonco, Cerro Moyotepe, Casita y la Pelona⁶⁷.

Figura 9. Panorámica del volcán San Cristóbal.



Fuente: www.nicaraguahoy.info

⁶⁶ Paniagua. Síntesis de algunos volcanes activos y peligrosos en América Central, prevención, preparación y mitigación. 1999.

⁶⁷ Fundación Nicaragüense para el Desarrollo Sostenible. Evaluación y redefinición del sistema de áreas protegidas de las regiones pacífico y centro norte de Nicaragua.

La actividad se caracteriza por ser principalmente de tipo estromboliano. Desde el tiempo de la conquista se han registrado 9 erupciones que van desde el tipo estromboliano a subpliniano, como se describe a continuación⁶⁸:

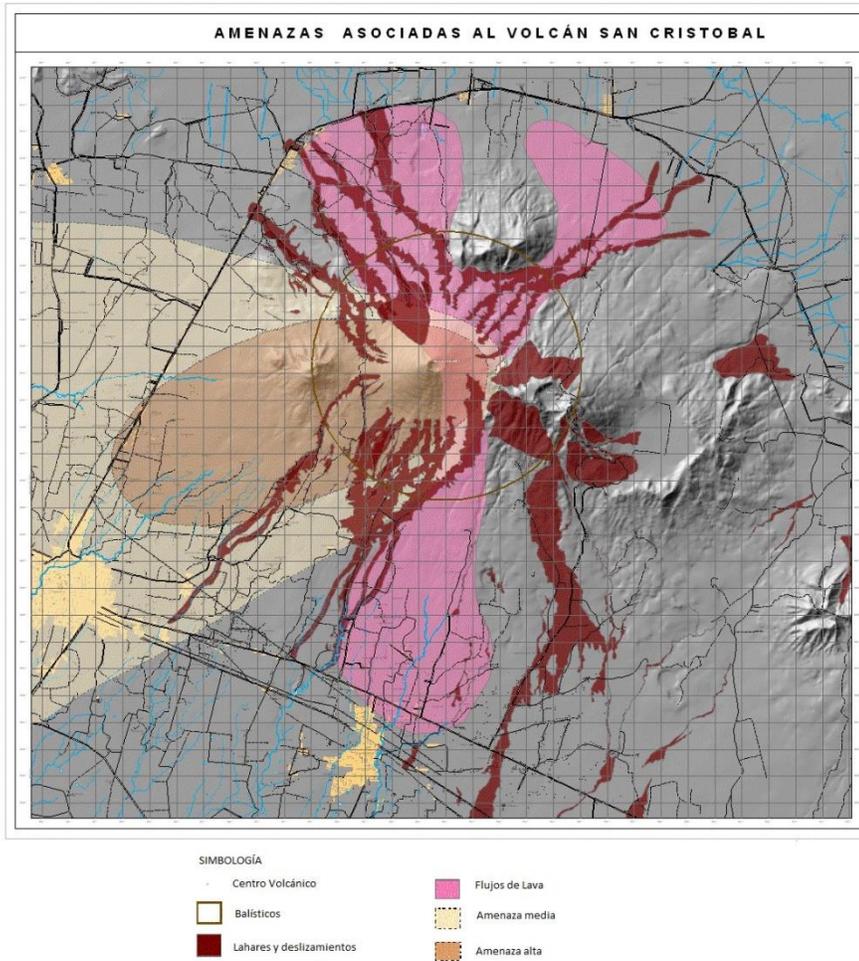
- 1520: Erupción con llamas visibles.
- 1684 1685: Serie de erupciones estrombolianas.
- 1971: Actividad intensa solfatárica. Explosiones freáticas y emisiones de gas.
- 1972: Cede una parte del fondo del cráter.
- 1976: Después de dos breves erupciones estrombolianas, un colapso forma el intracráter que posteriormente alcanza 90m de profundidad.
- 1980: Enjambre Sísmico.
- 1981: Plumas fumarólicas alcanzan varios centenares de toneladas diariamente. Además se da la progresiva subsidencia del fondo del cráter hasta alcanzar casi todo el fondo del cráter anterior a 1971.
- 1994: Una larga pluma de gases fue observada sobre el San Cristóbal en la primera semana de septiembre.

Dentro de los límites del área de influencia del volcán no hay poblaciones desarrolladas, no obstante viven moradores que cuidan las fincas cafetaleras de San Rafael, La Suiza, Las Rojas, Las Banderas y Miramar principalmente. Esta población aumenta durante los periodos del corte de café⁶⁹. La Figura 10, corresponde al mapa de amenazas del volcán San Cristóbal, desarrollado por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

⁶⁸ Paniagua. Opt. pág 40.

⁶⁹ Fundación Nicaragüense para el Desarrollo Sostenible. Opt. pág 40.

Figura 10. Mapa de amenazas del volcán San Cristóbal.



Fuente: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. INETER

1.3 MARCO LEGAL

1.3.1 Gestión del riesgo. Alrededor del mundo anualmente se registra una gran cantidad de pérdidas económicas, humanas y ambientales debido a los efectos causados por las amenazas naturales. Sucesos como sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, deslizamientos, entre otros. pueden llegar a representar centenares o miles de víctimas. Por esta razón, los gobiernos de cada país y región en el planeta han designado entes para la gestión de riesgo, cuyo propósito es estudiar, y desarrollar políticas y dar a conocer los factores de riesgo que puedan afectar a una población dada.

La gestión del riesgo es la acción integral para el abordaje de una situación de desastre. Permite determinar los riesgos, intervenir para modificarlos, disminuirlos, eliminarlos o lograr la preparación pertinente para responder ante los daños que, sin duda, causará un determinado desastre⁷⁰.

Uno de los aspectos más importantes en el estudio de la gestión del riesgo es conocer la diferencia entre riesgo y amenaza, las cuales típicamente se definen como⁷¹:

- Amenaza: es el nivel de probabilidad de ocurrencia de un evento que pueda causar daños o destrucción total en un determinado sitio, por ejemplo la probabilidad de ocurrencia de una inundación durante la época de lluvias en una zona.
- Vulnerabilidad, por su parte representa a la pérdida de un grupo de elementos (económicos, sociales, vidas humanas, estructuras) que se encuentran bajo la probabilidad de ocurrencia de un evento desastroso.
- Finalmente, el riesgo hace referencia al valor esperado de las pérdidas en caso de ocurrencia de un acontecimiento catastrófico; el riesgo se expresa en función de la vulnerabilidad y la amenaza de una misma locación.

1.3.1.1 Colombia frente a las políticas de gestión del riesgo. En el año de 1988 con la Ley 46 del 2 de noviembre es cuando se gesta la primera organización formal para para la gestión de riesgos en Colombia. El Sistema Nacional para la

⁷⁰ Ministerio de Salud. Presidencia de la Nación. Argentina. Conceptos básicos de la gestión de riesgos. URL. <http://www.msal.gob.ar/salud-y-desastres/index.php/informacion-para-comunicadores/conceptos-basicos-de-la-gestion-de-riesgos>

⁷¹ Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia. Plan nacional de gestión del riesgo de desastres de Colombia. Inf. téc., República de Colombia, 2013.

Prevención y Atención de desastres fue uno de los primeros en la región en desarrollar planeación integral para el tratamiento de los desastres enfocado tanto en las respuestas ante una situación de peligro como en la prevención y mitigación de las amenazas.

Colombia actualmente cuenta con el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo (SNGR), es un documento por medio del cual se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de desastres.

En el año de 2012, se promulga la Ley 1523 que reglamenta la gestión del riesgo en el país. El artículo 1 de la Ley 1523 de 2012 decretada por el Congreso de la República dicta que:

La gestión del riesgo de desastres, en adelante la gestión del riesgo, es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible⁷².

La gestión del riesgo comprende cuatro tareas o etapas que deben ser desarrolladas para la elaboración de estudios detallados de riesgo: análisis detallado de amenaza, evaluación de vulnerabilidad, evaluación del riesgo y determinación de medidas de mitigación. El análisis de la amenaza comprende principalmente estudios de amenaza por movimientos de masa y por inundación. La evaluación de la vulnerabilidad identifica el daño esperado de los elementos expuestos a los fenómenos naturales. A partir del proceso de evaluación del riesgo se establecen zonas de amenaza baja, media y alta según el nivel de afectación esperada. Dentro de las zonas de amenaza alta se determinan dos tipos de riesgo: existen lugares donde es posible la amenaza y/o vulnerabilidad a través de alternativas de intervención física, a esto se le conoce como riesgo mitigable, en caso contrario se establece como riesgo no mitigable. Finalmente, por medio los resultados obtenidos en las etapas anteriores se definen y ejecutan las políticas y proyectos por desarrollar, a lo que se le conoce como determinación de medidas de mitigación.

Uno de los principios que rige al SNGR es el principio participativo del artículo 3 del Decreto-Ley 4702 de 2010, el cual declara que:

Es deber de las autoridades y entidades del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, reconocer, facilitar y promover la organización y

⁷² Sistema Nacional de Gestión del Riesgo. República de Colombia. Ley Sistema Nacional de Gestión del Riesgo, 2012.

participación de comunidades étnicas, asociaciones cívicas, comunitarias, vecinales, benéficas, de voluntariado y de utilidad común. Es deber de todas las personas hacer parte del proceso de gestión del riesgo en su comunidad.

En este sentido, es también deber de la comunidad apoyar al SNGR en el proceso de la gestión del riesgo.

Para el caso de riesgos no mitigables el decreto 1807 de septiembre de 2014 se refiere a que los suelos de protección, entendiéndose por suelos de protección las zonas y áreas de terrenos que por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras para la provisión de servicios públicos domiciliarios o las áreas de amenazas y riesgo no mitigable tienen restringida la posibilidad de urbanizarse.

Por su parte, para el manejo de este tipo de suelos, el artículo 24 del Decreto 1807 de septiembre de 2014 dicta que:

Cuando las zonas de alto riesgo se definan como no mitigables, se establecen las medidas para su manejo y para evitar la ocupación de estas áreas, de acuerdo con el régimen aplicable al suelo de protección.

1.3.1.2 Nicaragua y la gestión del riesgo. Nicaragua emprendió esfuerzos encaminados a la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) a partir de 1998, tras el desastre ocasionado por el Huracán y la Tormenta Tropical Mitch de ese mismo año. Desde entonces, el país inició un proceso de construcción del marco normativo y de reglamentación de la GRD. Una acción emblemática fue la aprobación de la Ley 337 en el 2000, que creó el Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres (SINAPRED). Esta ley es el principal instrumento normativo en materia de GRD de éste país. La Ley crea el Comité Nacional coordinado, ejecutado y facilitado por la Secretaría Ejecutiva del Sistema (SE-SINAPRED), que fue establecido en 2001, como la estructura de más alto nivel del Estado para estos temas⁷³.

Los decretos y leyes creadas abarcan temas que van desde las políticas de ordenamiento territorial hasta los entes encargados del monitoreo de los factores naturales que podrían significar una amenaza.

El Decreto Ejecutivo 78-2002, el cual establece normas, pautas y criterios para el ordenamiento territorial, es uno de los instrumentos mayormente utilizados para la

⁷³ Terán A., Collich G., Alvarez J., Llaguno J., Chamorro A., Jimenez P., Castillo A., Mondragon O. y Durante, J. Préstamo contingente para emergencias de desastres naturales. Inf. téc., Banco Interamericano de Desarrollo. Nicaragua, 2009.

zonificación territorial y urbana en función de las amenazas. Uno de sus artículos hace especial referencia a las decisiones que se deben tomar en las zonas que pueden ser afectadas por la actividad volcánica.

Artículo 32. No son tierras aptas para el establecimiento y expansión de asentamientos humanos las que tienen las siguientes características:

- Las ubicadas en las laderas inestables de macizos montañosos con pendientes mayores de quince por ciento; las tierras ubicadas en las laderas de volcanes activos, bordes y áreas internas de calderas tectónicamente activas, las que se ubican en las zonas donde incide la caída de cenizas y gases emanados por actividad volcánica y aquellas tierras cercanas a los cauces de las zonas volcánicas por donde fluyen corrientes de lodo.

Por otro lado, la principal Institución del país que promueve la identificación del riesgo es el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER)⁷⁴ creado en el año 1981 por medio del Decreto Ejecutivo No. 830 publicado en La Gaceta, Diario Oficial, No. 224 del 5 de Octubre de 1981. INETER es el organismo gubernamental encargado de realizar los estudios de amenazas en las diferentes regiones del país. Entre los estudios se encuentran mapas de amenaza sísmica, volcánica, inundaciones, deslizamientos, huracanes, tsunamis y mapas de riesgo a nivel local.

Más adelante, se desarrolla la Ley 311 del año 1999 que tiene por objeto organizar y redefinir las funciones, atribuciones y ámbito de competencia de INETER.

⁷⁴ Préstamo Contingente para Emergencias por Desastres Naturales.

2. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

2.1 ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE ENTRADA

2.1.1. Análisis de los datos de entrada. En el caso del volcán Galeras los modelamientos de flujos piroclásticos fueron realizados por Ramona Stefanescu y Gustavo Córdoba en la Universidad de Búfalo. Realizaron un total de 5600 simulaciones de flujos con diferentes condiciones iniciales, las cuales se basaron en el estudio de Calvache y están directamente influenciadas por la configuración del terreno. Para Galeras los autores, teniendo en cuenta las dimensiones del cráter principal del volcán (320 metros de diámetro), decidieron trazar ocho posibles lugares de inicios de flujos alrededor del volcán, donde cada una corresponde a un punto central que sirve como referencia para aplicar el método de muestreo LHS para la localización de las pilas de material granular. Los ángulos de fricción basal e interna fueron trabajados bajo los valores de 21 y 35 grados respectivamente. Los volúmenes máximos y mínimos tomados en cuenta para los estudios fueron de $1,9 \times 10^5 \text{ m}^3$ hasta $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ⁷⁵.

En el caso del volcán San Cristóbal 700 simulaciones alrededor del cráter del volcán fueron realizadas en el Grupo de Investigación en Riesgos, Amenazas y Medio Ambiente de la Universidad de Nariño en Colombia, teniendo en cuenta una sola posible fuente de inicio. En este estudio al igual que en el anterior los ángulos de fricción basal e interna se definieron como 21 y 35 grados, respectivamente. El rango de volúmenes modelados en volcán nicaragüense se encuentra entre $0,5 \times 10^9 \text{ m}^3$ y $1,5 \times 10^9 \text{ m}^3$.

2.1.2 Información de entrada del sistema. Una vez se ha realizado el modelado de flujos piroclásticos utilizando una técnica de muestreo⁷⁶ se obtiene una cantidad de archivos de resultados igual al número de muestras. A estos archivos se les llama pileheightrecord.XXXX, donde las equis (X) representan el número consecutivo de cada simulación en el orden que fue asignado por LHS. La simulación de cada fluido se produce sobre un archivo que representa el terreno real donde ocurre el transporte de los flujos piroclásticos y se conoce como DEM o Modelo de Elevación Digital. Este modelo de elevación se encuentra en formato raster.

⁷⁵ Bursik M., Córdoba G., Dalbey K., Jones M. D., Patra A. K., Sheridan M. F. y Stefanescu, E. R. Opt. pág 18.

⁷⁶ Patra, A. K., Dalbey, K., Hubbard, B. y Sheridan, M. F. Opt. pág 22.

Un mapa raster es una capa de datos consistente de un arreglo matricial de celdas. Este tiene una cierta cantidad de filas y columnas, con un dato puntual (o un indicador de valor nulo) en cada celda. Estos pueden existir como una rejilla en 2D o como un cubo en 3D.

Las fronteras geográficas de un mapa raster son descritas por los campos: norte, sur, este y oeste. Estos valores describen las líneas que acotan el mapa en sus esquinas. Estas líneas no pasan a través del centro de la rejilla de celdas en la esquina del mapa, sino afuera del mapa⁷⁷.

Estos mapas raster deben trabajar bajo el Sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator), debido a que el software TITAN2D lo requiere.

Cada archivo pileheightrecord obtenido en las simulaciones contiene la información histórica del flujo durante todo el recorrido correspondiente a la simulación. El archivo contiene cuatro valores de referencia en su encabezado:

- Nx: Corresponde al número de divisiones equidistantes trazadas de oeste a este dentro del terreno en el cual se ha modelado.
- Ny: Corresponde al número de divisiones equidistantes trazadas de sur a norte dentro del terreno en el cual se ha modelado.
- X {543211,11 548191,89}: corresponde a las coordenadas UTM de los límites oeste y este, respectivamente, del área de estudio (DEM) de TITAN2D.
- X {543211,11 548191,89}: corresponde a las coordenadas UTM de los límites sur y norte, respectivamente, del área de estudio (DEM) de TITAN2D.

Los datos que contenidos en el archivo están en forma de grilla, es decir, si se divide el mapa en Nx partes iguales de este a oeste y Ny partes iguales de norte a sur, cada intersección entre las líneas divisorias Nx y Ny se representan por un número. En el archivo después del encabezado se encuentra un conjunto de valores, cada número representa la altura del flujo expresada en metros en las intersecciones entre Nx y Ny.

Dependiendo del tiempo de simulación y los intervalos de tiempo en los que se decidió guardar la información en el programa TITAN2D, el archivo puede contener varias grillas, y en cada una de ellas se encuentra la información del flujo en un intervalo de tiempo.

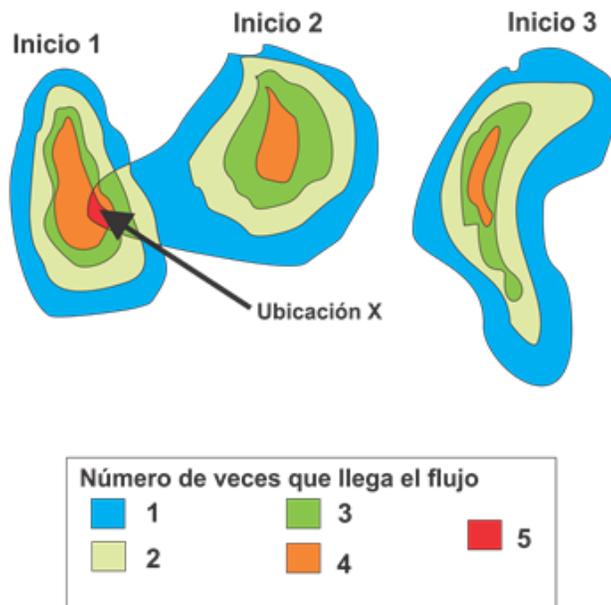
⁷⁷ Arce A. Aprendiendo GRASS - Datos Raster. 2014. URL <http://aprendiendo-grass.readthedocs.org>

2.1.3 Procesamiento estadístico de la información. Uno de los principales objetos del presente estudio es el de unificar y procesar la información que se ha obtenido como resultado de las simulaciones de flujos piroclásticos realizados a través del software TITAN2D, de tal manera que pueda traducirse los datos en información que pueda ser comprendida por los tomadores de decisiones y por el público en general. Existen diversas metodologías que permiten abarcar el problema teniendo en cuenta la configuración del mismo. Una de las opciones utilizadas en el cálculo de mapas de amenaza volcánica es el de probabilidad frecuencial y el segundo es el análisis bayesiano.

Supóngase un caso hipotético donde se han modelado 12 flujos piroclásticos distribuidos equitativamente en tres sitios de inicio, como se muestra en la Figura 11.

La susceptibilidad del evento se observa en la distribución de colores obtenidos. En el caso de la ubicación X se presenta una convergencia dos lugares de inicio y por lo tanto la probabilidad es bastante alta. Sin embargo, la presencia de la fuente de inicio 3 afecta la probabilidad de la ubicación X a pesar de que ésta fuente no llega en ningún momento al lugar mencionado. La probabilidad de amenaza por flujos piroclásticos en la ubicación X o $P(X)$ está dada por la probabilidad de suceso del evento $P(E)$ y por la probabilidad de llegada del fenómeno a la ubicación nombrada $P(L)$, como se muestra en la ecuación.

Figura 11. Caso hipotético de distribución de flujos.



$$P(X) = P(E) * P(L)$$

Dado que se habla de probabilidad relativa, es decir en caso de que ocurra, se asume que el evento ha sucedido. Por lo tanto $P(E) = 1$. Reemplazando en la ecuación se obtiene que:

$$P(X) = 1 * P(L)$$

$$P(X) = P(L)$$

Por lo tanto la probabilidad de amenaza por flujos piroclásticos en la ubicación X es igual a la probabilidad de llegada de los flujos al lugar mencionado.

2.1.3.1 Probabilidad Frecuencial. La probabilidad frecuencial se define como la relación entre el número de veces que ocurrió un evento de interés y el número de veces que se realizó el experimento. En el caso de los flujos piroclásticos se tiene en cuenta el número de veces que el flujo llegó a un punto dado con una altura mayor a 20 centímetros⁷⁸, debido a que un flujo de este tipo por su condición de velocidad y temperatura representa un peligro para la vida humana aunque su espesor sea relativamente bajo.

$$P(L) = \frac{S}{Nm}$$

Donde,

- P (L): es la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos
- S: es la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos es el número de veces que llega el flujo con espesor mayor a 20 cm.
- Nm: corresponde al número total de simulaciones realizadas.

Este modelo se ajusta muy bien a situaciones donde el cráter volcánico es relativamente pequeño, como es el caso del volcán San Cristóbal que se observa en la Figura 13, por lo tanto, no es necesario trazar diferentes lugares de posible inicio del flujo como para el volcán Galeras (Figura 12). Tomando en cuenta la probabilidad frecuencial, en el caso de Galeras se observa que las probabilidades obtenidas son bastante bajas, de un orden menor a 30 por ciento de probabilidad, ya que al presentarse distintos posibles puntos de arranque de flujos, un lugar puede ser afectado por simulaciones que bajo ninguna circunstancia llegarían a esta zona, pero que se tienen en cuenta en el cómputo de las probabilidades.

⁷⁸ Patra, A. K., Dalbey , K., Hubbard, B. y Sheridan, M. F. Opt. pág 22.

Figura 12. Probabilidad Frecuencial. Distribución de la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán Galeras.

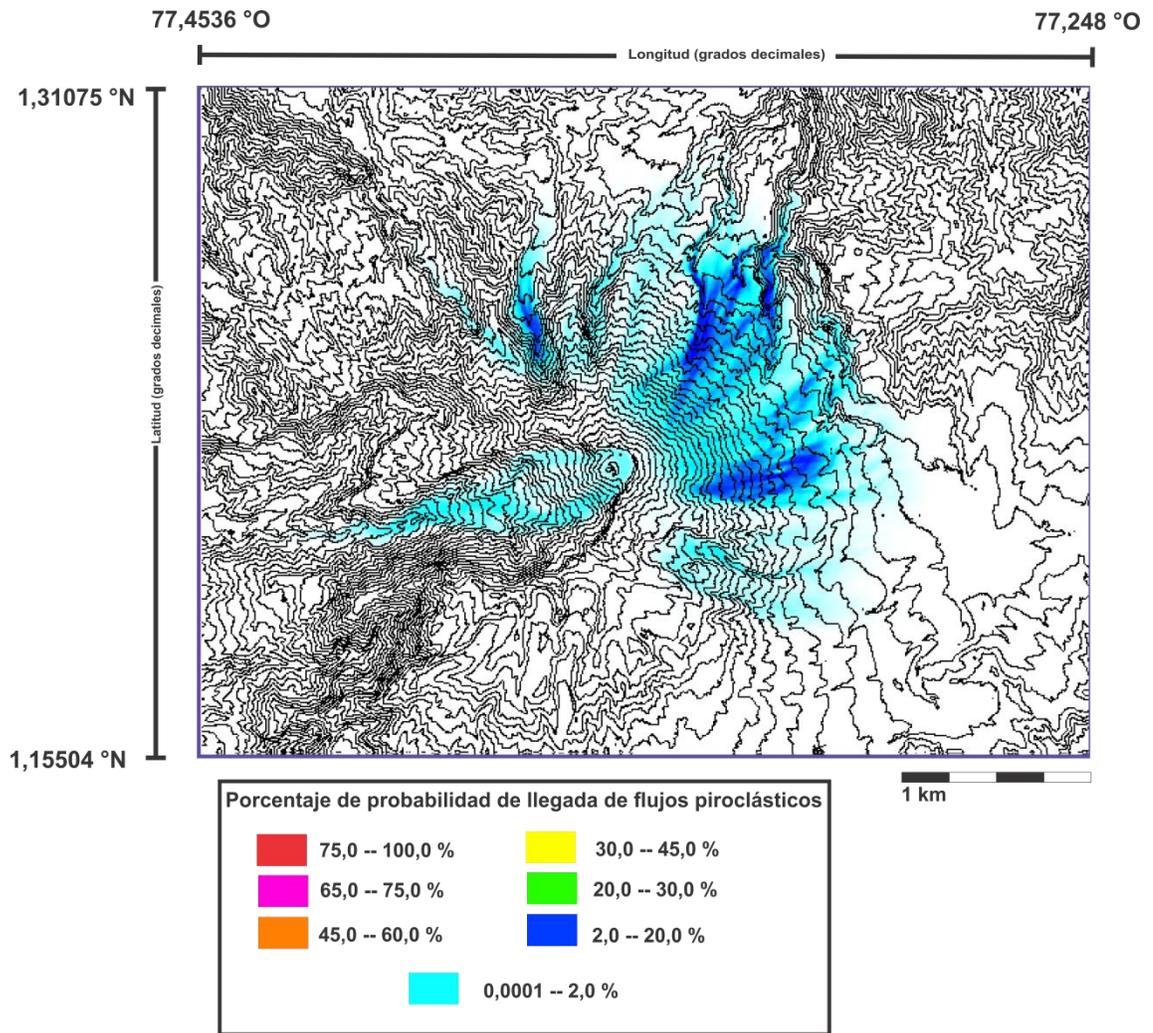
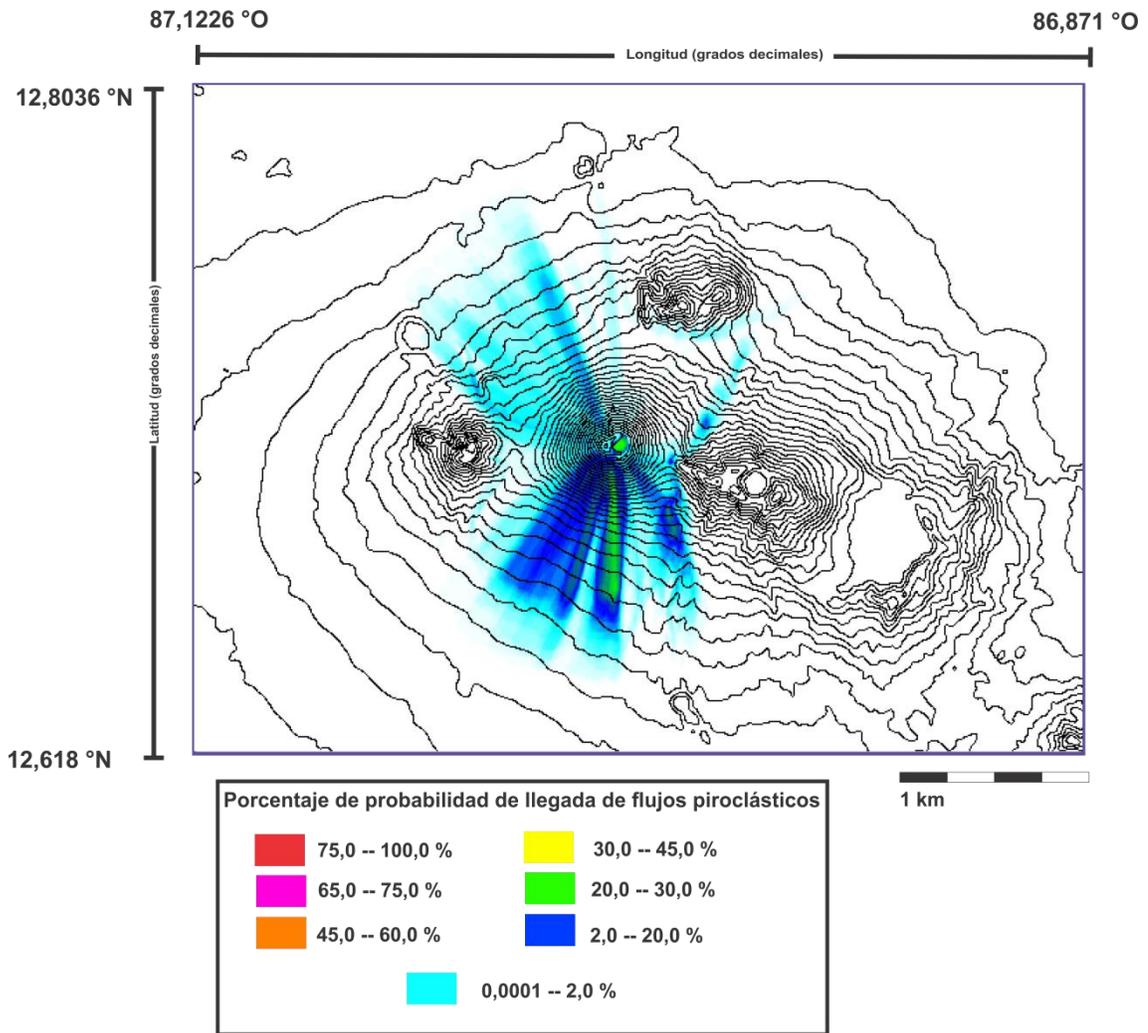


Figura 13. Probabilidad Frecuencial. Distribución de la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán San Cristóbal.

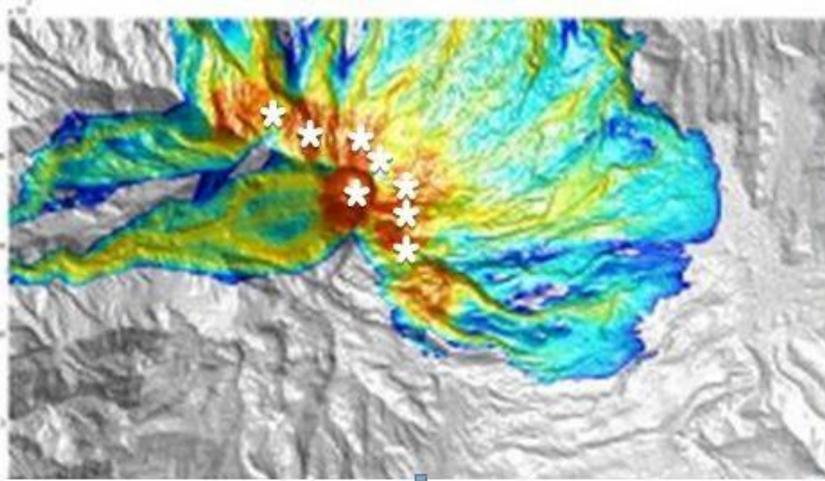


Las anteriores imágenes se obtuvieron a través del sistema de información geográfico GRASS, donde se observa: un mapa de tipo vectorial del terreno o curvas de nivel trazadas con una diferencia de altura de 20 metros y un mapa de tipo raster que corresponde a la malla de probabilidades de llegada de flujos piroclásticos, la cual ha sido interpolada utilizando la herramienta de llenado de celdas nulas que hace parte de GRASS.

2.1.3.2 Análisis bayesiano. En contraste a las dificultades de la metodología frecuencial surgen otras propuestas para el tratamiento de los datos. El análisis bayesiano es un tipo de inferencia estadística, la cual se adapta a la distribución de los datos para el procesamiento de la información en el presente estudio⁷⁹.

Para realizar una distribución de probabilidades de alcance de flujos piroclásticos, es necesario conocer la configuración del modelamiento realizado. Uno de los aspectos más importantes es el número de lugares de inicio de flujos, debido a que en muchas ocasiones los flujos piroclásticos son generados a partir del colapso de una columna eruptiva, lo cual genera incertidumbre en el lugar de inicio de los flujos. Por lo tanto, en zonas donde el cráter abarca una gran área se decide trazar varias posibles fuentes de inicio, que corresponden a los lugares donde se espera que colapse la columna. En la Figura 14, se observa la distribución de susceptibilidad por llegada de flujos piroclásticos para Volcán Galeras, Colombia⁸⁰. Los asteriscos corresponden a la localización de las posibles fuentes de inicio, en este caso ocho.

Figura 14. Ejemplo de distribución de susceptibilidad por llegada de flujos piroclásticos utilizando el software Titán 2D.



Modificada de Bursik y otros, 2010.

Ahora, según el ejemplo expuesto en la Figura 11, se tiene un lugar dentro del área de estudio al cual lo afectan dos de las tres fuentes que se han modelado. Si

⁷⁹ Berger J. The case for objective bayesian analysis. Bayesian analysis, 1(3):385– 402, 2006.

⁸⁰ Bursik M., Cordoba G., Dalbey K., Jones M. D., Patra A. K., Sheridan M. F. y Stefanescu, E. R. Opt. pág 18.

se aplica probabilidad frecuencial, la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en una localización correspondería al número de veces en las cuales llegaron flujos piroclásticos dividido entre el número total de modelamientos realizados. Según el ejemplo planteado uno de los tres puntos de inicio trazados no tiene incidencia en la Ubicación X, sin embargo al momento de calcular la probabilidad el punto de inicio afecta la probabilidad en la localización, disminuyéndola en este caso. A través del análisis Bayesiano se obtiene una probabilidad en cada localización teniendo en cuenta únicamente las fuentes que afectan al lugar de interés.

Para ello se parte de la fórmula básica de la Teoría Bayesiana:

$$P(F_i|L) = \frac{P(F_i) * P(L|F_i)}{P(L)}$$

Dónde:

- P (Fi |L): Probabilidad de que un flujo que ha llegado al punto L provenga de la fuente Fi.
- P (L |Fi): Probabilidad de que un originado en la fuente Fi llegue al punto L.
- P (Fi): Probabilidad de que una simulación de flujos piroclásticos elegida al azar sea originada en la fuente Fi.
- P (L): Probabilidad de que un flujo piroclástico llegue al punto de interés denominado como L.

Como el objetivo del proyecto es el de calcular la amenaza probabilística a la cual se encuentra expuesta una zona de influencia volcánica, se desea obtener sería P (L) o la probabilidad de que un flujo piroclástico llegue al punto L independientemente de donde provenga. Teniendo en cuenta la bibliografía consultada se encontró que la probabilidad P (L) está dada por⁸¹:

$$P(L) = \sum_{j=1}^n P(F_j) * P(L|F_j)$$

Debido a que en cada fuente se realiza la misma cantidad de simulaciones en un principio se podría asumir que todas las fuentes tienen la misma probabilidad de afectar al punto L, lo que se conoce en la teoría bayesiana como probabilidad apriori, o sea probabilidad sin evidencia. Es decir que:

$$P(F_i) = \frac{1}{n}$$

⁸¹ Link, W. A., and Barker, R. J. Bayesian inference: with ecological applications. Academic Press. 2009.

Donde n es el número de fuentes posibles de origen de flujos.

La anterior ecuación corresponde a una hipótesis, donde se supone que todos los las fuentes afectan de igual manera al punto L . Sin embargo, es necesario obtener la probabilidad a posteriori teniendo en cuenta la evidencia, es decir los datos que muestran si los flujos llegan o no a una localizan a partir de las simulaciones, que se tiene acerca del fenómeno $P(F_i | L)$. Esto significa que para realizar este análisis se parte de la probabilidad $P(F_i)$ o probabilidad a priori para llegar a la probabilidad $P(F_i | L)$ o probabilidad a posteriori. Para ello debe hacerse la comprobación de la hipótesis⁸²:

$$P(F_i|L) = \frac{P(F_i) * P(L|F_i)}{P(L)}$$

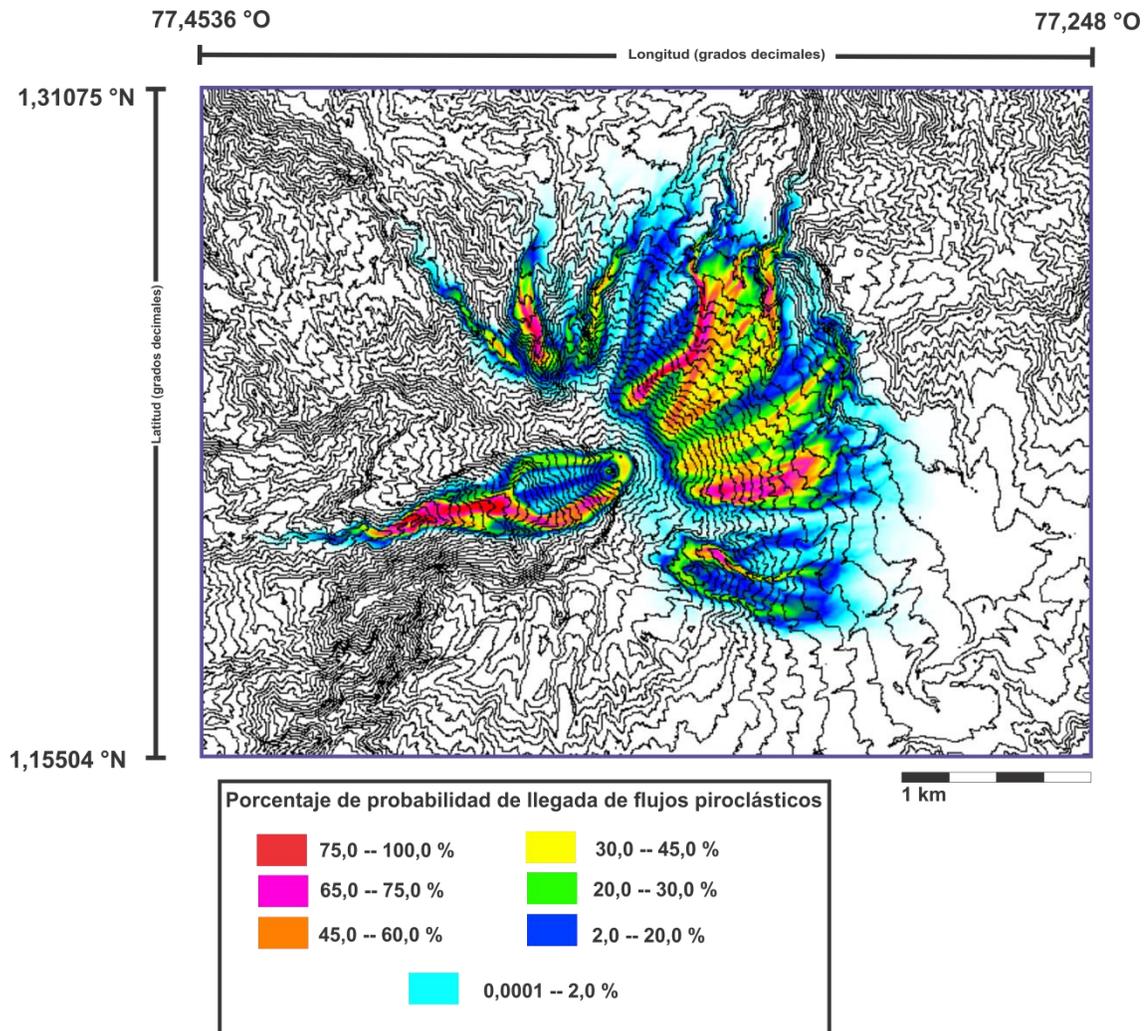
Una vez obtenido el peso de cada punto de inicio o probabilidad a posteriori $P(F_i|L)$ se aplica nuevamente la ecuación de $P(L)$ donde en lugar de los valores a priori se utilizaran los valores obtenidos anteriormente en la fórmula anterior, es decir:

$$P(L) = \sum_{i=1}^n P(F_i|L) * P(L|F_i)$$

Es necesario aclarar que la distribución de probabilidad de llegada de flujos piroclásticos a través del análisis bayesiano corresponde a la probabilidad condicional, es decir en caso de que ocurra el evento. Para obtener el valor de probabilidad absoluta es necesario conocer la posibilidad de que suceda el colapso de columna en cada uno de los puntos de inicio y la probabilidad de ocurrencia de un flujo piroclástico en el volcán. La aplicación del análisis bayesiano en el caso del volcán Galeras se observa en la Figura 15.

⁸² Girón F. y Moreno E. The frequentist and bayesian approaches to hypothesis testing. Department of Statistics and O.R. University of Granada and University of Málaga, 30(1):3 28, 2006.

Figura 15. Probabilidad Bayesiana. Distribución de la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán Galeras.



2.2 DESARROLLO DEL SOFTWARE

Una vez obtenida la información a través de los métodos estadísticos expuestos anteriormente, se procede a desarrollar la herramienta para la consulta de los datos a través de un aplicativo que trabaje sobre el Sistema Operativo ANDROID para teléfonos móviles. Al tratarse de un software que parte de un ejercicio académico se debe tener en cuenta que se poseen ciertas limitantes, por ejemplo el equipo de trabajo se reduce a dos personas, los requerimientos pueden cambiarse a medida que se va desarrollando el programa, el tiempo de desarrollo es corto, entre otros. Es por ello que se ha decidido trabajar con base al paradigma ágil de programación XP conocido como Extreme Programming o

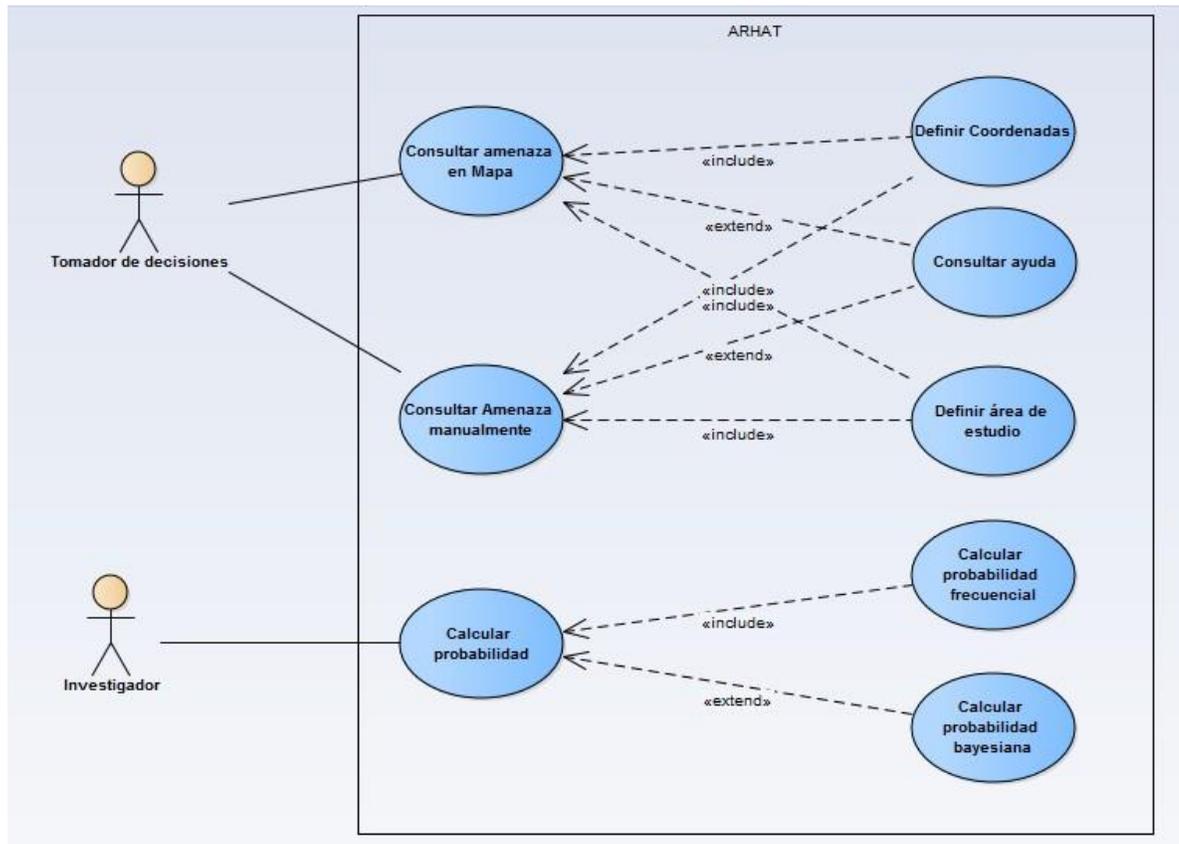
Programación Extrema, para el cual se definen los actores que van a interactuar con el software y las historias de usuario, las cuales consisten en cuadros que definen las funcionalidades del programa. A partir de esta información se definen las iteraciones y el plan de trabajo. Finalmente el software debe ser evaluado para verificar y corregir errores. En la sección **2.2.7. Descripción de los módulos software** se describe los módulos y las funcionalidades del software ARHAT.

2.2.1. Definición de los actores del software. Para el aplicativo se han definido dos actores que interactúan con el software:

- **Investigador:** Se refiere a la persona que realiza las simulaciones, esta persona accede al módulo del cálculo de probabilidades frecuencial y bayesiana. Esto se debe a que este actor cuenta con la información y la experiencia suficiente para realizar este procedimiento.
- **Tomador de decisiones:** Se refiere a la persona que va a hacer uso del aplicativo para realizar una consulta. El nombre se debe a que el aplicativo pretende ser una herramienta que ayude en el proceso de toma de decisiones.

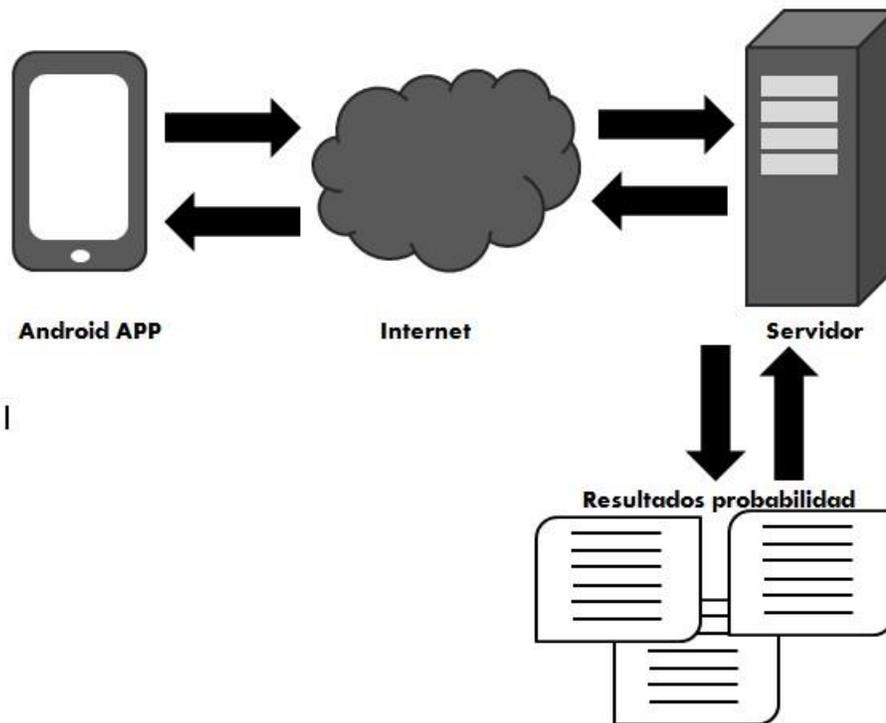
2.2.2. Casos de uso del software. De acuerdo con los requisitos funcionales del software que se desarrolla se definen varias funcionalidades principales o casos de uso. El diagrama de casos de uso de la Figura 16, muestra las principales funcionalidades de ARHAT a la cual tienen acceso los actores del software y cuáles son sus relaciones.

Figura 16. Diagrama de casos de uso del sistema.



2.2.3. Arquitectura del software. El modelo de la arquitectura del software es un sencillo diagrama de la estructura del software, en donde se hacen visibles sus elementos principales y la relación que existe entre ellos. La Figura 17, muestra los principales elementos que conforman a ARHAT.

Figura 17. Diagrama de arquitectura del software.



2.2.4. Historias de usuario. Las historias de usuario definen las funcionalidades que el cliente desea que realice el software⁸³. Se organiza la información especificando la prioridad y los usuarios que harán uso de esta funcionalidad, a través de esto es posible definir cuál es el plan de trabajo que se debe seguir.

La Tabla 2, la Tabla 3, la Tabla 4, la Tabla 5 y la Tabla 6, que se muestran a continuación, contienen la información correspondiente a las historias de usuario de los módulos del aplicativo ARHAT.

⁸³ Breitman K y Leite J. Managing user stories. En International Workshop on Time- Constrained Requirements Engineering, pág. 168. 2002.

Tabla 2. Historia de Usuario número 1.

Número: 1	Usuario: Investigador
Nombre de la historia: Cálculo de Probabilidades	
Prioridad: Alta	Riesgo: Alto
Estado: Implementada	Iteración: 1
Descripción:	
La información de las simulaciones llega en formato de archivos planos conocidos como pileheightrecord. Los datos son procesados aplicando estadística frecuencial y/o bayesiana en caso de que la configuración de los modelamientos lo requiera.	
Observaciones:	
Los datos de entrada se encuentran organizados en mallas computacionales que contienen la historia del máximo espesor registrado en cada vértice durante el recorrido del flujo	

Tabla 3. Historia de Usuario número 2.

Número: 2	Usuario: Tomador de decisiones
Nombre de la historia: Consulta manual de amenaza relativa	
Prioridad: Media	Riesgo: Medio
Estado: Implementada	Iteración: 3
Descripción:	
El tomador de decisiones ingresa la posición de dos puntos dentro del área de estudio utilizando para ello únicamente coordenadas geográficas. Las coordenadas ingresadas deben convertirse a formato de georreferenciación UTM y se envían al servidor con el fin de que se realice la consulta y mostrar los resultados.	
Observaciones:	
La información de las coordenadas debe estar completa; en caso contrario se mostrará un mensaje de error. De igual manera de deben tener en cuenta posibles problemas de conexión con el servidor	

Tabla 4. Historia de Usuario número 3.

Número: 3	Usuario: Tomador de decisiones
Nombre de la historia: Consulta de amenaza relativa en mapa	
Prioridad: Alta	Riesgo: Alto
Estado: Implementada	Iteración: 2
Descripción:	
Al ingresar al software, se despliega un mapa en el cual el usuario elige dos localizaciones dentro del área de estudio a través de punteros. Las ubicaciones corresponden a los sitios de interés de los se desea comparar la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos para que se realice la consulta y mostrar los resultados. Finalmente la información de la consulta se envía al servidor y se muestran los datos obtenidos.	
Observaciones:	
La información de las ubicaciones elegidas por el usuario debe ser enviada al servidor en formato UTM. El sistema debe estar preparado para enviar un mensaje de error en caso de problemas de conexión con el servidor	

Tabla 5. Historia de Usuario número 4

Número: 4	Usuario: Tomador de decisiones
Nombre de la historia: Consulta y cálculo de amenaza en servidor	
Prioridad: Media	Riesgo: Alto
Estado: Implementada	Iteración: 2
Descripción:	
La información de las dos localizaciones consultadas se obtiene a través del envío de datos desde el aplicativo ANDROID como coordenadas en formato UTM. Se debe consultar la probabilidad de llegada de flujos en cada punto consultado y se calcula el porcentaje de pérdida o ganancia en la amenaza de la primera localización con respecto a la segunda.	
Observaciones:	
Debido a que la distribución de probabilidad de llegada de flujos piroclásticos se encuentra ordenada en mallas computacionales se hace necesario implementar un método de interpolación. Se debe tener en cuenta problemas en el cálculo del porcentaje de diferencia. De igual manera si las coordenadas enviadas se encuentran fuera del área de estudio se envía un mensaje.	

Tabla 6. Historia de Usuario número 5.

Número: 5	Usuario: Tomador de decisiones
Nombre de la historia: Ayuda y manual de usuario	
Prioridad: Baja	Riesgo: Bajo
Estado: Implementada	Iteración: 4
Descripción:	
Debido a la complejidad de la información que se procesa en el sistema, se debe desarrollar un módulo de ayuda e información donde se muestre tanto las instrucciones de uso básico del software como el significado de los resultados y la configuración de las simulaciones.	
Observaciones:	
Ninguna.	

2.2.5. Definición del plan de trabajo. Una vez se han escrito las historias de usuario se pueden definir las distintas iteraciones. El cliente debe definir cuales iteraciones se desarrollarán completamente en cada iteración y debe comprometerse a no cambiar ni añadir nada hasta que la iteración finalice.

2.2.5.1 Primera iteración. En la primera iteración se desarrolla una sola historia de usuario denominada Cálculo de Probabilidades. La finalidad de esta iteración es aplicar los conocimientos de probabilidad frecuencial y bayesiana adquiridos durante el desarrollo del presente estudio a las simulaciones realizadas con el fin de trazar mallas computacionales con la distribución de las probabilidades de llegada de flujos piroclásticos con una altura mayor a 20 centímetros. Los tiempos estimados y reales correspondientes a las tareas de esta iteración se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Planificación de la primera iteración

Actividad	Tiempo(Semanas)
Lectura de los datos de entrada	1
Calculo de probabilidad	1
Calculo de probabilidad de Bayes	2
Tiempo Proyectado	4
Tiempo Real	5

2.2.5.2 Segunda iteración. Para la segunda iteración se planificaron dos historias de usuario denominadas: Consulta de amenaza relativa en mapa y Consulta y cálculo de amenaza en servidor cuyo propósito es implementar el aplicativo en la tecnología Android que fuese capaz de tomar datos de georreferenciación a través de un mapa como se muestra en la Tabla 8. Debe ser capaz de recibir datos y mostrarlos en el aplicativo. De igual manera se decidió realizar el desarrollo del entorno servidor para el manejo de información, ya que al tratarse de una cantidad bastante grande de datos, fue necesario la creación de un servidor para el procesamiento de los mismos. En esta iteración se tiene en cuenta la comunicación entre el entorno cliente (Aplicación Android) y el servidor que permite tomar los datos de georreferenciación, interpolarlos y enviar la información resultante al usuario.

Tabla 8. Planificación de la segunda iteración.

Actividad	Tiempo(Semanas)
Desarrollo de interfaz de usuario	2
Conversión de coordenadas	1
Toma y envío de datos	1
Implementación del servidor	2
Interpolación	1
Tiempo Proyectado	7
Tiempo Real	10

2.2.5.3 Tercera iteración. En la tercera iteración se planificó una sola iteración que consiste en la Consulta manual de la amenaza relativa donde el usuario ingresa el valor de las coordenadas que van a ser consultadas. Este módulo debe recibir la información y convertirla al formato correcto para ser enviada. De igual forma, debe recibir la información y mostrarla al usuario. Las principales actividades de esta iteración se observan en la Tabla 9.

Tabla 9. Planificación de la tercera iteración.

Actividad	Tiempo(Semanas)
Desarrollo de interfaz de usuario	1
Conversión de coordenadas	1
Toma y envío de datos	1
Ajustes para la recepción de datos	2
Tiempo Proyectado	5
Tiempo Real	5

2.2.5.4 Cuarta iteración. En la cuarta iteración se planificó una sola iteración que consiste en el desarrollo Ayuda y Manual se usuario para que el usuario que hace uso del aplicativo pueda conocer la información básica del software como se ve en la

Tabla 10.

Tabla 10. Planificación de la cuarta iteración.

Actividad	Tiempo(Semanas)
Desarrollo de interfaz de usuario	1
Conversión de coordenadas	1
Toma y envío de datos	1
Ajustes para la recepción de datos	2
Tiempo Proyectado	5
Tiempo Real	5

2.2.6. Herramientas de trabajo. Para el desarrollo del software se utilizaron distintas herramientas que serán descritas a continuación:

- **JAVA:** es un lenguaje de programación flexible y completo, creado con el propósito de desarrollar la programación orientada a objetos. Este lenguaje fue utilizado debido a que permite el desarrollo de aplicaciones para teléfonos móviles y el desarrollo de un entorno cliente servidor^{84 85}.

⁸⁴ Dietel P. Java how to program. PHI, 2009.

⁸⁵ Goncalves A. Beginning Java EE 6 with GlassFish 3. Apress, 2010.

- NETBEANS: es un entorno de desarrollo integrado de JAVA desarrollado escrito completamente en JAVA y que contiene módulos disponibles como compilador, editor de formularios, explorador de objetos, entre otros⁸⁶.
- ANDROID STUDIO: es un entorno de desarrollo integrado que fue creado por la compañía Google para el desarrollo de aplicaciones Android⁸⁷.
- OCTAVE: es un lenguaje de alto nivel interpretado, destinado principalmente para los cálculos numéricos. Proporciona capacidades para la solución numérica de problemas lineales y no lineales, y para realizar otros experimentos numéricos⁸⁸.
- GLASSFISH: Es un servidor de aplicaciones desarrollado por la compañía Oracle Corporation. Glassfish trabaja como un contenedor de servlets, cuyo principal objetivo es convertir las peticiones de servicio Web, redireccionarlas y convertirlas a un objeto Java⁸⁹.

2.2.7. Descripción de los módulos software. Para el desarrollo del sistema fue necesario dividirlo en pequeños módulos que puedan ser trabajados independientemente y que luego sean incorporados al software en su versión final. Todo esto con el fin que tanto la fase de codificación como la de prueba puedan realizarse de una manera más sencilla. En total se definieron cinco módulos básicos en el sistema: el módulo para el cálculo de la distribución total de la amenaza denominado Cálculo de amenaza, el módulo para la administración de los datos llamado Servlet, el módulo para la toma de datos y consulta de la amenaza en un mapa denominado Consulta Manual y finalmente el módulo de apoyo al usuario nombrado Ayuda.

2.2.7.1 Cálculo de amenaza. En este módulo el principal objetivo es acceder a los datos de las mallas computacionales calculadas en el procesamiento estadístico, el cual se explica en la sección 2.1.3 *Procesamiento estadístico de la información*, y que contiene la información de la distribución de los niveles de amenaza representados en la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos obtenidas a través de la estadística frecuencial y el análisis bayesiano. Es importante resaltar que los resultados obtenidos no contradicen ni pretenden ser tomados como información oficial, sino que constituyen una herramienta de apoyo para los

⁸⁶ Glick J., Greene S., Spurlin V., Boudreau, T. y Woehr J. J. NetBeans: the definitive guide. .O'Reilly Media, Inc.", 2002.

⁸⁷ Android Developers. Android studio. developer. android. com, 2015.

⁸⁸ Bateman D., Eaton, J. W. y S. Hauberg. Gnu octave. Network theory London, 1997.

⁸⁹ Goncalves A. Opt. pág. 65.

usuarios que deseen hacer uso de ella. De igual manera se debe tener en cuenta que los resultados son producto de cientos o quizás miles de simulaciones en computadora y que se encuentran directamente influenciadas por las condiciones iniciales con las que se realizaron.

Las imágenes de la distribución de probabilidad frecuencial para el volcán San Cristóbal se observa en la Figura 13 y las figuras correspondientes a la distribución de probabilidad frecuencial y bayesiana para el volcán Galeras se corresponden a la Figura 12 y Figura 15, respectivamente.

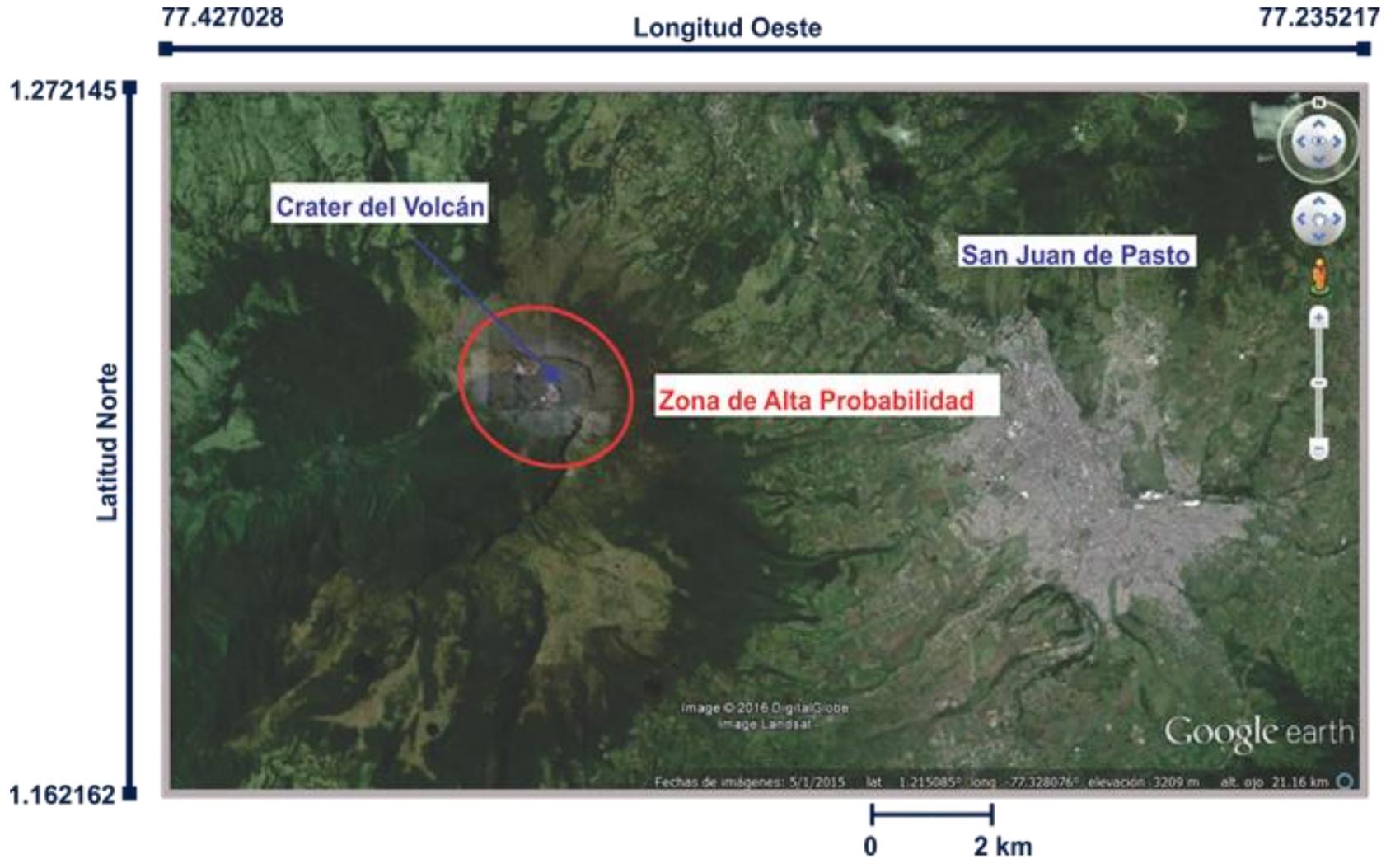
2.2.7.2 Servlet. Los resultados se encuentran distribuidos en una malla computacional (ver sección **2.1.2 Información de entrada del sistema**) es decir existen celdas o píxeles donde no existen datos de la amenaza. En virtud de que es posible que el usuario consulte un sitio donde no existe información se realiza el proceso de interpolación bilineal, lo cual permite conocer el valor esperado de la amenaza teniendo en cuenta los valores más cercanos, como se explica en la sección **1.2.4 Interpolación bilineal**.

Este módulo es el encargado de realizar la interpolación de los datos. Debido a que las mallas computacionales que contienen la información de la amenaza son muy extensas se decidió hacer el uso de un servlet con el fin de que el aplicativo sea ligero y de fácil acceso a través de una conexión a internet. Es decir que en esta parte del trabajo se debe manejar de igual manera la configuración de las conexiones de manera que se asegure en la medida de lo posible el éxito de las consultas.

La información de las consultas está designada por las coordenadas UTM (Latitud y Longitud) de dos ubicaciones que son enviadas por el aplicativo Android. Una vez se han recibido los datos, el módulo debe leer las coordenadas y buscar los cuatro puntos más cercanos a la ubicación consultada dentro de la malla de distribución de la amenaza para así aplicar el método de la interpolación bilineal, el cual se explica en el capítulo anterior. Finalmente, los datos son consultados y enviados al aplicativo. En caso de que una de las ubicaciones o ambas se encuentren fuera del área de estudio se notifica al usuario de la situación.

Debido a la configuración de la información se realizó una verificación para el caso de Galeras para los sitios de inicio de colapso de columna, en los cuales debido a que en la información resultante de TITAN2D y que fue suministrada no se encontraba datos de flujos piroclásticos, se determinó una zona alrededor del cráter como Zona de Alta Probabilidad como se observa en la Figura 18, a la cual se le asignó una probabilidad mayor al 90 por ciento.

Figura 18. Definición de zona de alta probabilidad de llegada de flujos piroclásticos en el volcán Galeras.



2.2.7.3 Consulta en mapa. El módulo de consulta en Mapa que se observa en la Figura 19, es el encargado de tomar los datos de entrada ingresados por el usuario para ser enviados al módulo Servlet para su posterior consulta. El proceso de toma de datos se realiza a través de la API de GoogleMaps. Aquí el usuario deberá elegir dos ubicaciones por medio de punteros o marcadores de posición, que se encuentran situados en el aplicativo. Para mover los marcadores de su lugar, el usuario debe presionar el apuntador que desea reubicar y luego arrastrarlo a la localización deseada.

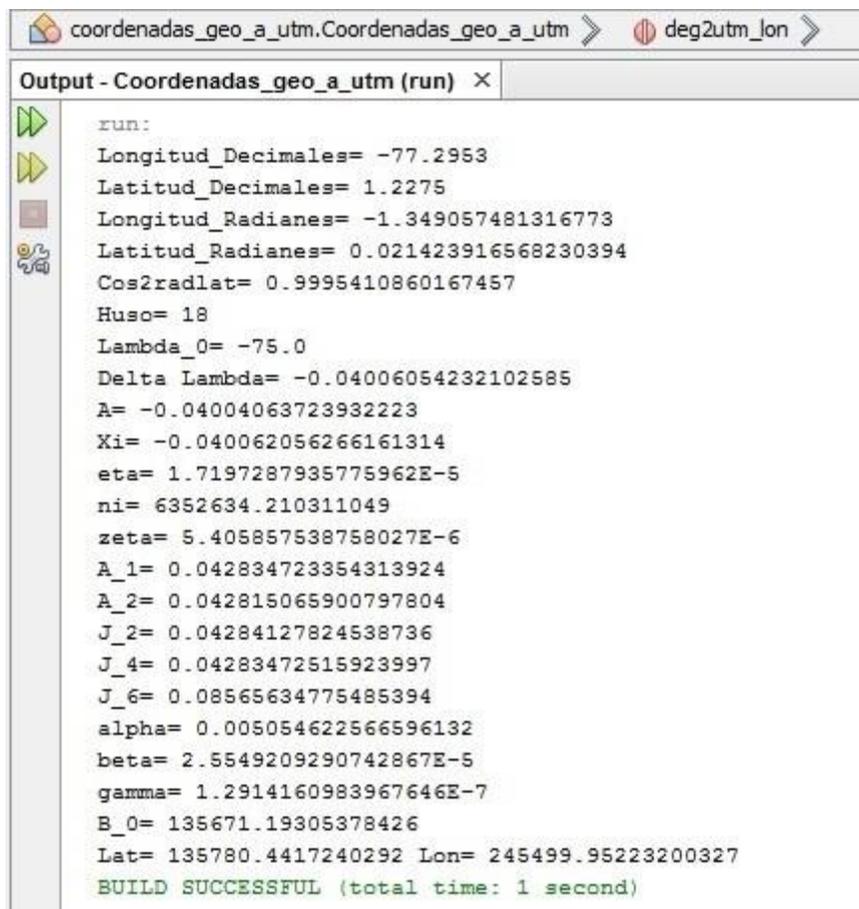
Figura 19. Consulta en Mapa



Una vez el usuario ha situado los marcadores se confirma la elección y se toman los datos de georreferenciación contenidos en los punteros. Sin embargo, dado que la información recibida se encuentra en formato del sistema de coordenadas decimales, es necesario realizar la conversión de coordenadas decimales al sistema de coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator) ya que la información que arroja el software TITAN2D se encuentra en este último formato.

En la Figura 20, se observa los datos de salida del sistema durante el proceso de conversión de las coordenadas:

Figura 20. Conversión de Sistema de Coordenadas Geográficas decimales a Coordenadas Proyectadas UTM.

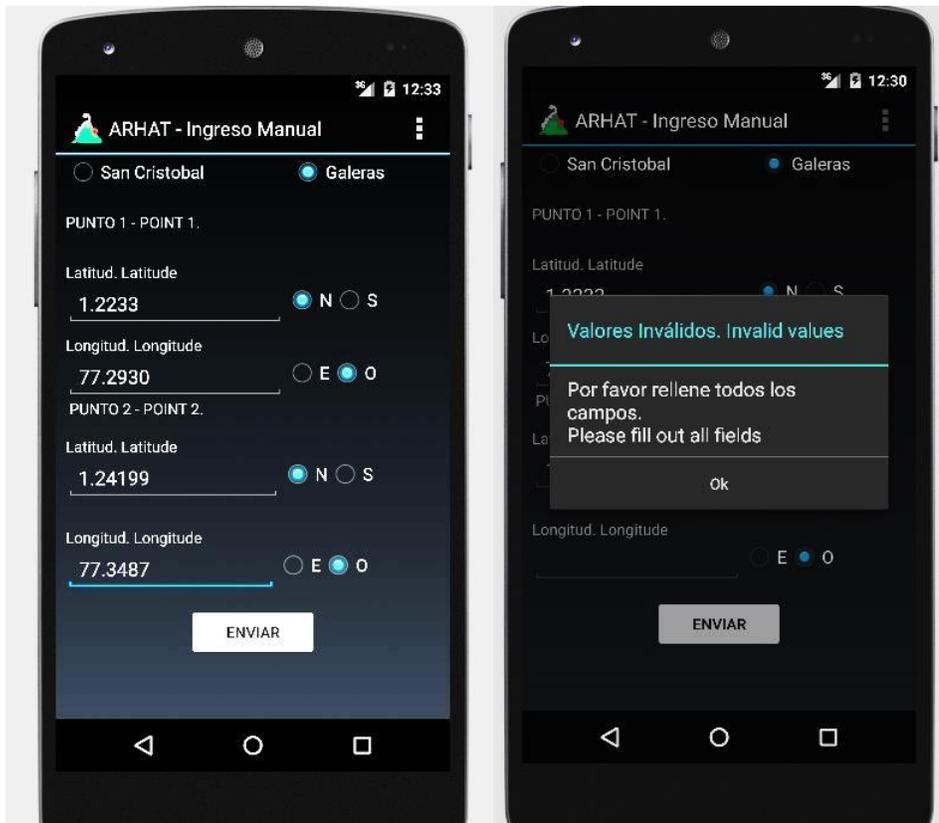


```
run:
Longitud_Decimales= -77.2953
Latitud_Decimales= 1.2275
Longitud_Radianes= -1.349057481316773
Latitud_Radianes= 0.021423916568230394
Cos2radlat= 0.9995410860167457
Huso= 18
Lambda_0= -75.0
Delta Lambda= -0.04006054232102585
A= -0.04004063723932223
Xi= -0.040062056266161314
eta= 1.7197287935775962E-5
ni= 6352634.210311049
zeta= 5.405857538758027E-6
A_1= 0.042834723354313924
A_2= 0.042815065900797804
J_2= 0.04284127824538736
J_4= 0.04283472515923997
J_6= 0.08565634775485394
alpha= 0.005054622566596132
beta= 2.5549209290742867E-5
gamma= 1.2914160983967646E-7
B_0= 135671.19305378426
Lat= 135780.4417240292 Lon= 245499.95223200327
BUILD SUCCESSFUL (total time: 1 second)
```

2.2.7.4 Consulta manual. En esta sección del software se ofrece al usuario la opción de ingresar los datos de ubicación manualmente. Para ello el software cuenta con una interfaz gráfica donde se debe ingresar los datos correspondientes a las coordenadas decimales (latitud y longitud) de las dos localizaciones que se han elegido para la consulta de la amenaza, teniendo en cuenta los hemisferios:

Norte y Sur para la latitud y Este u Oeste para la longitud como se ve en la Figura 21.

Figura 21. Ingreso manual de coordenadas.



El sistema debe asegurarse que la información ingresada sea completa y válida. Una vez la información sea confirmada, al igual que en el anterior módulo se realiza el proceso de conversión del sistema de coordenadas geográficas decimales al sistema de coordenadas UTM.

2.2.7.5 Ayuda. Este último módulo se muestra en la Figura 22 y fue creado con el objetivo de brindar al usuario la información necesaria acerca del manejo y uso del software. Además, contiene una breve explicación de la configuración de la información que se obtiene como resultado de la metodología aplicada en el presente estudio. Para ello el software cuenta con diferentes secciones, donde se encuentra también una breve guía que explica el significado de los mensajes de error más comunes del sistema.

Figura 22. Interfaz gráfica de la sección de ayuda.



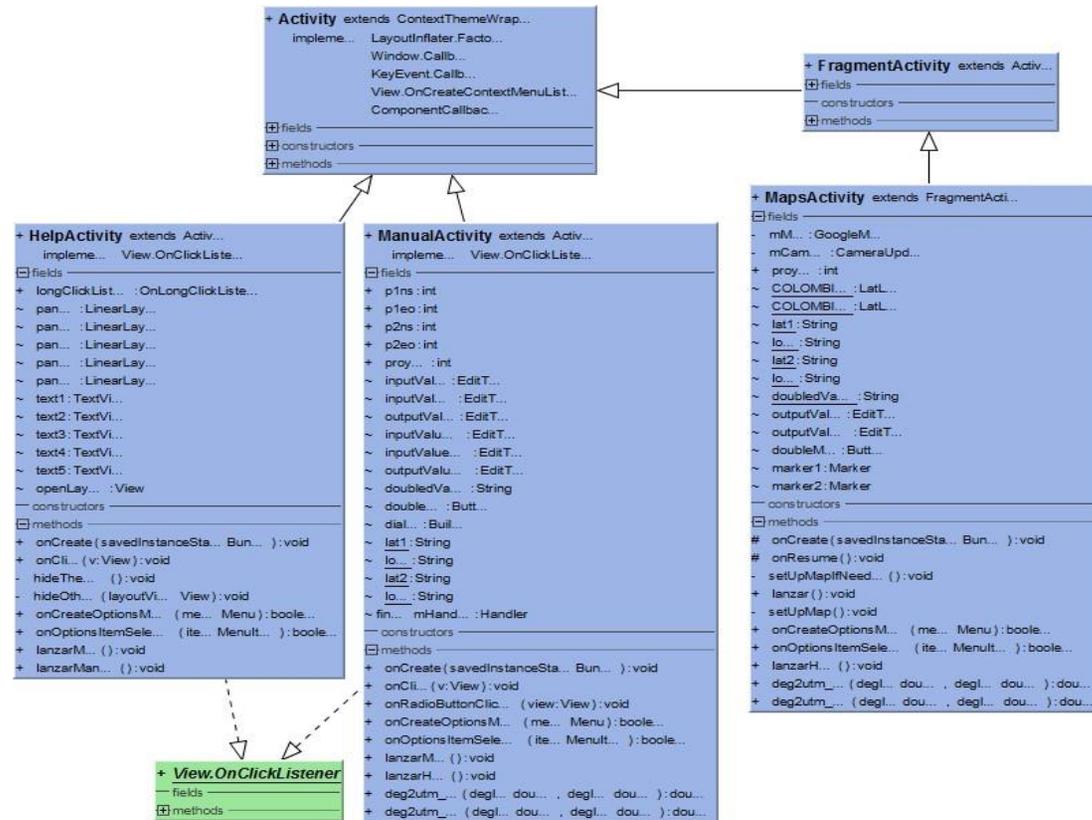
2.2.8. Diagramas de clase

Los diagramas de clase definen las relaciones que presentan entre los objetos que forman el software. Aquí se presentan las variables de cada objeto y los métodos que lo definen⁹⁰. La Figura 23 corresponde al diagrama de clases del aplicativo ANDROID, mientras que la Figura 24 se refiere al diagrama de clases del Servlet.

⁹⁰ McBreen P. UML for Java programmers. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.

3.2.8.1 Diagrama de Clases App Android

Figura 23. Diagrama de clases del aplicativo ANDROID.



2.2.8.1.1 Descripción de las clases

2.2.8.1.1.1 Manual Activity. Esta clase se encarga de recibir los datos de ubicación que el usuario ha ingresado por medio manual. Se reciben los datos de los valores correspondientes a las coordenadas (latitud y longitud) y los hemisferios de cada una de las localizaciones. Esta clase sirve como interfaz para la toma, envío y recepción de datos.

ATRIBUTOS

- p1ns: controla en que hemisferio (norte o sur) se encuentra la latitud del punto 1.
- p1eo: controla en que hemisferio (este u oeste) se encuentra la longitud del punto 1.
- p2ns: controla en que hemisferio (norte o sur) se encuentra la latitud del punto 2.
- p2eo: controla en que hemisferio (este u oeste) se encuentra la longitud del punto 2.
- proy: número de identificación para conocer el área objeto de estudio.
- inputValue: contiene la información de la latitud de la primera ubicación.
- inputValue-1: contiene la información de la longitud de la primera ubicación.
- inputValue2: contiene la información de la latitud de la segunda ubicación.
- inputValue2-1: contiene la información de la longitud de la segunda ubicación.
- doubleValue: recibe el mensaje de respuesta de la consulta.
- enviar: maneja los atributos y las acciones del botón ENVIAR.
- dialog: maneja el dialogo para permitirle al usuario ver la información resultante.
- lat1: cadena de texto dispuesta para el envío de información de la latitud del punto 1.

MÉTODOS

- onCreate: maneja las configuraciones para inicializar los atributos de la clase.
- onClick: se encarga del envío y la recepción de datos cuando el usuario da click en el boton ENVIAR.
- onRadioButtonClicked: Toma los datos de los hemisferios en los que se encuentran las coordenadas.
- onCreateOptionsMenu: Llama a un archivo xml que contiene el menú del aplicativo.
- onOptionsItemSelected: Maneja las acciones de las opciones del menú.

- lanzarMap: finaliza el despliegue de la clase MainActivity y lanza la clase MapsActivity.
- lanzarHelp: finaliza el despliegue de la clase MainActivity y lanza la clase HelpActivity.
- degUtmLat: convierte la latitud del sistema de coordenadas geográficas decimales al sistema UTM.
- degUtmLon: convierte la longitud del sistema de coordenadas geográficas decimales al sistema UTM.

2.2.8.1.1.2 Maps Activity. Esta clase se encarga de gestionar la toma, envío y recepción de los datos necesarios para el cálculo de la amenaza. Para ello el usuario tiene a su disposición dos marcadores posicionados dentro de un mapa GoogleMaps por medio de los cuales se realiza la consulta de información.

ATRIBUTOS

- mMap: mapa de tipo Google Map obtenido por medio de los servicios Google Play APK.
- mCamera: atributo que coordina los enfoques de zoom del mapa.
- proyect: atributo que recoge la información del área de estudio sobre la cual se encuentra trabajando el usuario.
- latlon1: captura las coordenadas (latitud y longitud) del marcador del punto 1.
- latlon2: captura las coordenadas (latitud y longitud) del marcador del punto 2.
- lat1: cadena dispuesta para la recepción de información de latitud del marcador 1.
- lon1: cadena dispuesta para la recepción de información de longitud del marcador 1.
- lat2: cadena dispuesta para la recepción de información de latitud del marcador 2.
- lon2: cadena dispuesta para la recepción de información de longitud del marcador 2.
- searchValue: cadena dispuesta para recepción de la información de la consulta de la amenaza.
- enviar: botón para el envío de información.
- marker1: marcador para la posición 1.
- marker2: marcador para la posición 2.

MÉTODOS

- onCreate: maneja al recurso xml para el despliegue de la interfaz gráfica de la clase.

- onResume: sirve para volver a ejecutar el mapa en caso de haberlo pausado.
- setUpMapIfNeeded: Implementa la configuración del mapa al inicializarse.
- onClick: se encarga del envío y la recepción de datos cuando el usuario da click en el boton ENVIAR.
- onCreateOptionsMenu: Llama a un archivo xml que contiene el menú del aplicativo.
- onOptionsItemSelected: Maneja las acciones de las opciones del menú.
- lanzar: finaliza el despliegue de la clase MapsActivity y lanza la clase ManualActivity.
- lanzarHelp: finaliza el despliegue de la clase MapsActivity y lanza la clase HelpActivity.
- degUtmLat: convierte la latitud del sistema de coordenadas geográficas decimales al sistema UTM.
- degUtmLon: convierte la longitud del sistema de coordenadas geográficas decimales al sistema UTM.

2.2.8.1.1.3 Help Activity. Esta clase se encarga de coordinar el módulo de manual de ayuda al usuario e información general del aplicativo. Se utilizan diferentes paneles desplegados para organizar los datos.

ATRIBUTOS

- longClickListener: escucha de eventos para el despliegue de paneles.
- panel1: panel que contiene información de la primera sección.
- panel2: panel que contiene información de la segunda sección.
- panel3: panel que contiene información de la tercera sección.
- panel4: panel que contiene información de la cuarta sección.
- panel5: panel que contiene información de la quinta sección.
- text1: Muestra el título de la primera sección y despliega el panel1 cuando de hace click en él.
- text2: Muestra el título de la segunda sección y despliega el panel2 cuando de hace click en él.
- text3: Muestra el título de la tercera sección y despliega el panel3 cuando de hace click en él.
- text4: Muestra el título de la cuarta sección y despliega el panel4 cuando de hace click en él.
- text5: Muestra el título de la quinta sección y despliega el panel5 cuando de hace click en él.

MÉTODOS

- hideThemAll: retrae todos los paneles.
- hideOthers: retrae todos los paneles excepto uno.
- onCreate: maneja al recurso xml para el despliegue de la interfaz gráfica de la clase.
- onClick: se encarga del envío y la recepción de datos cuando el usuario da click en el boton ENVIAR.
- onCreateOptionsMenu: Llama a un archivo xml que contiene el menú del aplicativo.
- onOptionsItemSelected: Maneja las acciones de las opciones del menú
- lanzarMap: finaliza el despliegue de la clase HelpActivity y lanza la clase MapActivity.
- lanzarManual: finaliza el despliegue de la clase HelpActivity y lanza la clase ManualActivity.

2.2.8.2 Diagrama de clases Servlet.

Figura 24. Diagrama de Clases del Servlet.



2.2.8.2.1 Descripción de la clase.

2.2.8.2.1.1 SearchAndroid. Esta clase se encarga de recibir los datos de enviados desde el aplicativo. A través de los datos que se encuentran en una malla computacional se realiza una interpolación para obtener el valor de la amenaza en las localizaciones consultadas. De igual manera, la clase envía los datos al aplicativo para que sean mostrados al usuario.

ATRIBUTOS

- ycount: guarda el valor de la posición de la longitud más cercana a la coordenada consultada dentro de la malla computacional.
- yant: valor auxiliar para la búsqueda de la longitud de una coordenada dentro de la malla computacional.
- ysig: valor auxiliar para la búsqueda de la longitud de una coordenada dentro de la malla computacional.
- bany: bandera auxiliar para la búsqueda.
- xcount: guarda el valor de la posición de la latitud más cercana a la coordenada consultada dentro de la malla computacional.
- xant: valor auxiliar para la búsqueda de la latitud de una coordenada dentro de la malla computacional.
- xsig: valor auxiliar para la búsqueda de la latitud de una coordenada dentro de la malla computacional.
- banx: bandera auxiliar para la búsqueda.
- interpolationvalue: guarda el valor de la amenaza interpolada en una coordenada.
- listb: contiene la malla computacional ordenada en una lista.
- message: contiene el mensaje de respuesta que va a ser enviado.
- serialversionUID: contiene la información el serial de la versión de la clase.
- resta: contiene el porcentaje de diferencia de los dos valores de amenaza consultados.
- count: controla el orden de las coordenadas que se van a interpolar.
- bancrater1: bandera para verificar si la primera ubicación se encuentra dentro de la zona de alta probabilidad de llegada de flujos piroclásticos para Galeras.
- bancrater2: bandera para verificar si la segunda ubicación se encuentra dentro de la zona de alta probabilidad de llegada de flujos piroclásticos para Galeras.

MÉTODOS

- doGet: comprueba que el servicio se encuentre activo.
- doPost: recibe el mensaje enviado desde el aplicativo, ordena los datos, calcula y envía la respuesta al aplicativo.
- buscarCrater1 : comprueba si la posición del Punto 1 se ubica dentro de la zona de alta probabilidad definida para Galeras.
- buscarCrater2 : comprueba si la posición del Punto 2 se ubica dentro de la zona de alta probabilidad definida para Galeras.
- buscarY: busca las posiciones anterior y siguiente de la longitud consultada dentro de la malla computacional.

- buscarX: busca las posiciones anterior y siguiente de la latitud consultada dentro de la malla computacional.
- interpolar: interpola un valor teniendo en cuenta la ubicación consultada dentro de la malla computacional. En caso la localización se encuentre por fuera de los límites del área de estudio envía un mensaje de advertencia.

2.2.10. Pruebas al software. Para verificar la funcionalidad de los módulos del software se realizaron pruebas o modelos para la evaluación del software. Cada módulo fue evaluado teniendo en cuenta los distintos flujos de eventos posibles y su respuesta esperada. En este capítulo se muestran únicamente los cuadros correspondientes a las pruebas de unidad.

2.2.10.1 Pruebas de unidad. A través de las pruebas de unidad se comprueba el correcto funcionamiento de un módulo del software. La Tabla 11, corresponde a la prueba de unidad del módulo de cálculo de la amenaza.

Tabla 11. Prueba de unidad número 1

Nombre de la clase:	BayesianApproach
Componente del Sistema:	Cálculo de la Amenaza
Código de la Prueba:	PU-01-BAY
¿Cumple la clase con los siguientes requisitos?	
¿Carga los archivos de resultados de modelamientos?	Si
¿Interpola todas las mallas de resultados en una sola malla computacional?	Si
¿Realiza correctamente el cálculo de probabilidad frecuencial para el área de estudio?	Si
¿Realiza correctamente el cálculo de probabilidad bayesiana para el área de estudio?	Si
Calificación de Prueba:	Implementación correcta

En la Tabla 12, se muestra los chequeos realizados al módulo de consulta en mapa.

Tabla 12. Prueba de unidad número 2.

Nombre de la clase:	MapsActivity
Componente del Sistema:	Consulta en Mapa
Código de la Prueba:	PU-01-MAP
¿Cumple la clase con los siguientes requisitos?	
¿Carga correctamente el mapa?	Si
¿Muestra y permite manipular los marcadores de posición?	Si
¿Toma la información de la posición de los marcadores y la muestra?	Si
¿Convierte las coordenadas geográficas decimales correctamente al sistema UTM?	Si
¿Comprueba el estado de conexión del servidor y muestra al usuario un mensaje de alerta en caso de fallos en la conexión?	Si
¿Recibe la información resultado de la consulta y la muestra al usuario?	Si
Calificación de Prueba:	Implementación correcta

La Tabla 13, exhibe los resultados de la evaluación realizada al módulo de consulta manual.

Tabla 13. Prueba de unidad número 3.

Nombre de la clase:	ManualActivity
Componente del Sistema:	Consulta Manual
Código de la Prueba:	PU-01-MAN
¿Cumple la clase con los siguientes requisitos?	
¿Carga correctamente la interfaz gráfica?	Si
¿Comprueba que todos los datos hayan sido enviados completos?	Si
¿Comprueba que las coordenadas enviadas correspondan a datos numéricos decimales?	Si
¿Convierte las coordenadas geográficas decimales correctamente al sistema UTM?	Si
¿ Comprueba el estado de conexión del servidor y muestra al usuario un mensaje de alerta en caso de fallos en la conexión?	Si
¿Recibe la información resultado de la consulta y la muestra al usuario?	Si
Calificación de Prueba:	Implementación correcta

En Tabla 14, se evidencia los resultados de las pruebas realizadas al módulo de ayuda.

Tabla 14. Prueba de unidad número 4.

Nombre de la clase:	HelpActivity
Componente del Sistema:	AYUDA
Código de la Prueba:	PU-01-HLP
¿Cumple la clase con los siguientes requisitos?	
¿Carga correctamente la interfaz gráfica?	Si
¿Despliega los paneles de información y ayuda cuando se hace click en el título?	Si
¿ Retrae los paneles de información y ayuda abiertos cuando se hace click en el título	Si
Calificación de Prueba:	Implementación correcta

La Tabla 15, corresponde a la prueba de unidad del módulo denominado Servlet.

Tabla 15. Prueba de unidad número 5.

Nombre de la clase:	SearchAndroid
Componente del Sistema:	Servlet
Código de la Prueba:	PU-01-SER
¿Cumple la clase con los siguientes requisitos?	
¿Activa los servicios y envía una notificación?	Si
¿Carga los archivos que contienen la malla computacional correctamente?	Si
¿Realiza las verificaciones de zonas de altay baja probabilidad?	Si
¿Realiza eficientemente la búsqueda de las coordenadas dentro de la malla computacional?	Si
¿Hace el proceso de interpolación correctamente?	Si
¿Envía los datos al aplicativo ANDROID?	Si
Calificación de Prueba:	Implementación correcta

2.3. EJEMPLO DE DESPLIEGUE DEL SISTEMA

A continuación, se observa un ejemplo de funcionamiento del sistema haciendo uso del emulador con el dispositivo Galaxy Nexus S disponible en la herramienta Android Studio⁹¹. Para el ejemplo se eligieron dos puntos que se ubican en las siguientes coordenadas geográficas decimales:

- Punto 1: Latitud: 1.22333999 y Longitud: -77.293082
- Punto 2: Latitud: 1.24199599 y Longitud: -77.34872299

En la Figura 25, se observa que al iniciar el aplicativo se observa el dialogo que permite elegir la localización que se desea consultar:

⁹¹ Google Inc. y Open Handset Alliance. Android developers using emulator. URL <https://developer.android.com/studio/run/emulator.html?hl=es>.

Figura 25. Ingreso al sistema.



Se eligió la localización denominada Galeras y automáticamente el sistema despliega un mapa de tipo satelital donde se ubican dos marcadores de posición. El Punto 1 corresponde al marcador de color verde, mientras que el marcador de color azul hace referencia al Punto 2. Para cambiar de posición cada marcador, se debe presionar el mismo durante un par de segundos, de manera que el marcador se moverá a la localización de la pantalla que sea pulsada a continuación.

Figura 26. Relocalización del Punto 1.



La nueva posición del marcador que ha sido relocalizado es mostrada a través de una alerta ubicada en la parte inferior de la pantalla, como se muestra en la Figura 26.

El aplicativo cuenta con dos botones en la zona inferior derecha con el fin alejar o acercar la vista en el mapa y así tener un mayor control para la localización de los marcadores de posición.

Ahora, el Punto 2 es ubicado en una zona cercana al cráter del volcán como se observa en la Figura 27.

Figura 27. Relocalización del Punto 2.



Se desea conocer el porcentaje de aumento o disminución de la amenaza del Punto 1 con respecto al Punto 2. Una vez ubicadas las dos localizaciones para comparar se confirma la información haciendo click en el botón ENVIAR que se encuentra en la parte superior derecha. A continuación, se mostrará un dialogo con los resultados de salida como se observa a continuación.

Figura 28. Resultados de la consulta.



El dialogo se titula Probabilidad de Llegada de flujos piroclásticos y contiene la siguiente información:

- Punto 1: probabilidad de llegada en la localización denominada Punto 1.
- Punto 2: probabilidad de llegada en la localización denominada Punto 2. En la Figura 28, debido a que la segunda ubicación se encuentra muy cerca del cráter del volcán la probabilidad de llegada de flujos piroclásticos es mayor al 90 %.
- Porcentaje de Diferencia: porcentaje de diferencia se refiere al valor que muestra que tanto aumenta o disminuye la probabilidad del Punto 1 con respecto al Punto y se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de diferencia} = \frac{\text{Punto 2} - \text{Punto 1}}{\text{Punto 1}} * 100$$

Esta información permite deducir si es factible la reubicación de algún establecimiento del denominado Punto 1 respecto al Punto 2. En caso afirmativo o negativo se conoce cuál es el porcentaje de pérdida o disminución de la amenaza

entre los dos lugares. Esto contribuye en gran medida para la toma de decisiones y para los entes encargados de la gestión del riesgo.

CONCLUSIONES

- El proyecto dio como resultado un software funcional, que trabaja bajo el sistema operativo ANDROID, para el tratamiento probabilístico del modelamiento de escenarios de flujos piroclásticos por medio de la estadística frecuencial y el análisis bayesiano.
- La amenaza para los flujos piroclásticos se definió como la probabilidad de que el fenómeno llegue a algún lugar teniendo en cuenta el espesor de este debido a las características destructivas de este evento.
- En el caso de haberse modelado una sola fuente de inicio de flujos de lodo tanto la estadística frecuencial como el análisis bayesiano arroja los mismos resultados
- El método del análisis bayesiano demostró tener mejores resultados en los casos en los que se ha modelado teniendo en cuenta varias fuentes de inicio de flujos piroclásticos que convergen entre sí en comparación con la estadística frecuencial.
- El aplicativo ARHAT muestra el aumento o disminución de la amenaza entre dos lugares teniendo en cuenta zonas de alta y baja probabilidad de ocurrencia.
- El proceso de investigación y construcción del software se encuentra consignado en el documento del proyecto de grado junto al manual de usuario.
- El proyecto ARHAT fue presentado en el departamento de Ciencias Geológicas en la ciudad de Salta, Argentina y en el instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

RECOMENDACIONES

- Tomar en cuenta que la información suministrada no pretende ser un mapa de amenazas. La publicación de información oficial es responsabilidad de los entes de cada país encargados de la gestión del riesgo. El proyecto es una herramienta adicional para la toma de decisiones que hace parte de un ejercicio académico.
- Evaluar los parámetros que se definen como amenaza, por ejemplo el espesor y la presión dinámica de éstos, en el caso de evaluarse otros eventos volcánicos tales como flujos de lodo (lahares). ARHAT evalúa la amenaza por flujos piroclásticos definiendo el espesor como parámetro base.
- Aplicar el programa ARHAT para la evaluación de la amenaza en otros fenómenos volcánicos.

BIBLIOGRAFÍA

Beaver, R., & Mendenhall, B. y. (2006.). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Cengage Learning.

Canavos, G. (1998). *Probabilidad y Estadística. Aplicaciones y Métodos*. McGraw Hil.

ANEXOS

Anexo 1. MANUAL DE USUARIO

Descripción de ARHAT.

Logotipo: ver Figura 29.

Figura 29. Logotipo ARHAT.



Versión: 1.0

Autores: Diana Alejandra Guerrero, Gustavo Córdoba Guerrero y Juan Carlos Castillo.

Universidad de Nariño, Colombia

Sitio del aplicativo:

URL:

<https://www.dropbox.com/sh/ur99mxlqf10fryv/AABIRVkgLG9pj3Bcp5pIX9r4a?dl=0>

Código QR:



ARHAT es un aplicativo para ANDROID que permite conocer el porcentaje de amenaza frente a flujos piroclásticos a la cual se encuentra expuesto un lugar respecto a otro. ARHAT toma como insumo los resultados de modelamiento de escenarios realizados mediante software especializado, los cuales son procesados y se muestran al usuario de un modo comprensible.

ARHAT fue desarrollado en el lenguaje de programación JAVA y utiliza formularios XML. ARHAT puede ser instalado desde la versión 2.3.3 del sistema operativo. Para su funcionamiento se requiere una conexión a internet.

Los datos utilizados para este aplicativo corresponde a simulaciones realizadas por medio del software TITAN 2D, diseñado por la Universidad de Buffalo (USA) para el modelado de avalanchas granulares secas.

Localizaciones Objeto de Estudio. Para la implementación de ARHAT se tomó dos lugares como objeto de estudio. El volcán Galeras en Colombia y el volcán San Cristóbal en Nicaragua.

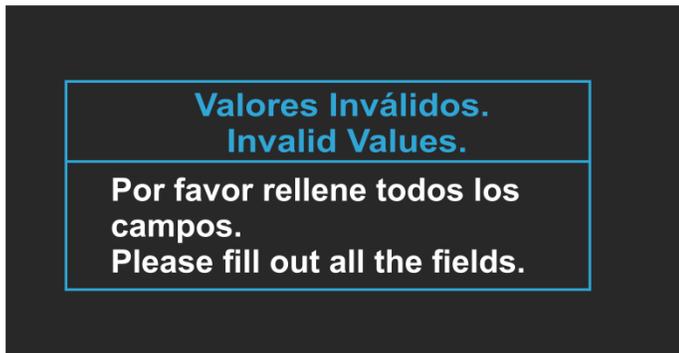
Volcán Galeras, Colombia. En el caso del volcán Galeras, fueron realizadas 5600 simulaciones de flujos piroclásticos que se ubicaron en ocho fuentes de inicio localizadas alrededor del cráter del volcán.

Volcán San Cristóbal, Nicaragua. En el caso del volcán San Cristóbal, fueron realizadas 700 simulaciones de flujos piroclásticos que se ubicaron alrededor del cráter del volcán.

Nota Aclaratoria. La información suministrada aquí no pretende ser un mapa de amenaza. La publicación de información oficial es responsabilidad de los entes de cada país encargados de la gestión del riesgo. El aplicativo es una herramienta adicional para la toma de decisiones que hace parte de un ejercicio académico.

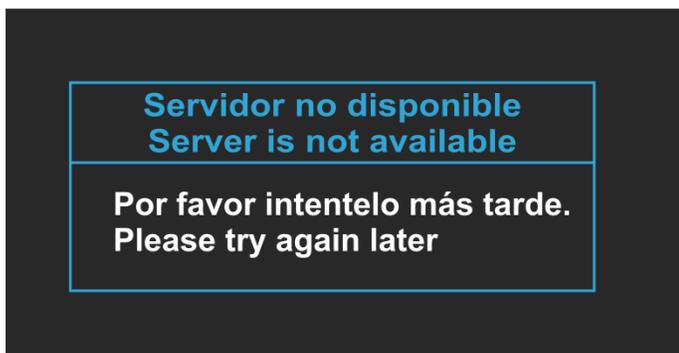
Errores comunes. La Figura 30, muestra uno de los mensajes de error más comunes. Este mensaje se genera debido a que la información de las coordenadas se encuentra incompleta. Se debe ingresar cuatro coordenadas para realizar el cálculo.

Figura 30. Error por valores inválidos.



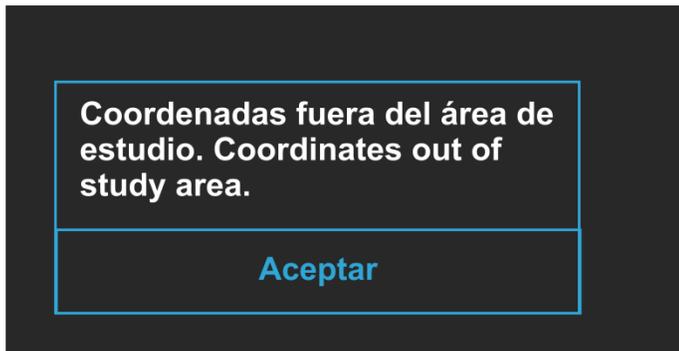
Otro de los errores que pueden encontrarse en el aplicativo es el que se observe en la Figura 31. Este mensaje se produce debido a errores en la conexión con el servidor. Por favor verifique la conexión a internet.

Figura 31. Error de conexión.



Este error aparece en la ventana de resultados. Si se observa un mensaje como el que se ve en la Figura 32, intente acercarse a un lugar más cercano al área de estudio.

Figura 32. Error de ubicación de marcadores de posición.



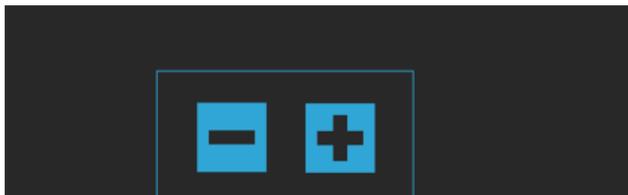
Uso del Aplicativo. La Figura 33 muestra al usuario las pautas básicas para utilizar ARHAT.

Figura 33. Uso del aplicativo.



Mueva los punteros a la ubicación que desea consultar.

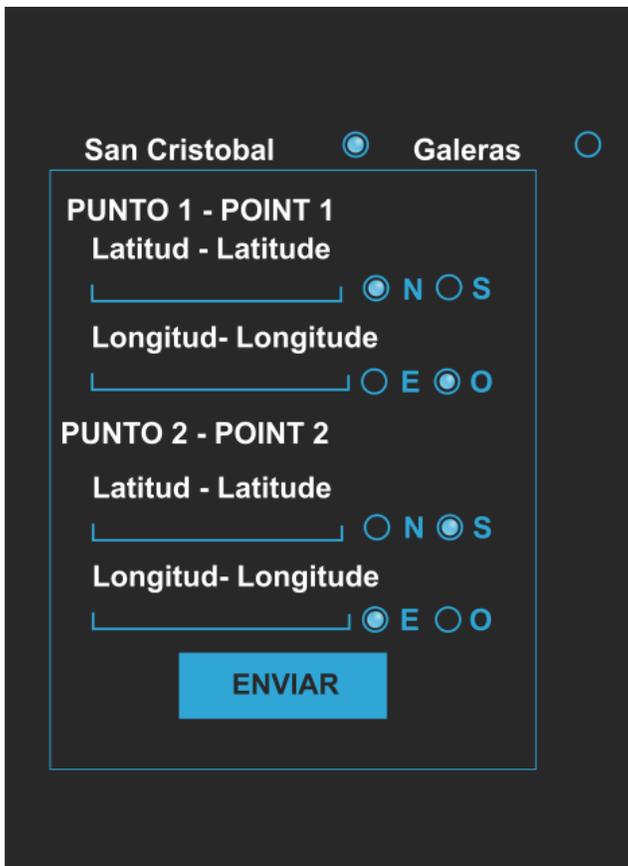
Para realizarlo mantenga presionado el puntero y luego arrástrelo al lugar que desee.



Puede utilizar los botones para alejar y acercar.



Una vez haya fijado los dos punteros, haga click en el botón ENVIAR.



El ingreso manual de información se realiza por medio de coordenadas geográficas decimales. Para cada punto se debe definir la latitud y la longitud, diferenciando la latitud norte de la latitud sur y la longitud este de la longitud oeste.

Es importante tener en cuenta que si no se define la ubicación norte sur de latitud su valor por defecto es norte. De igual manera sucede con la longitud cuyo valor por defecto es el este.