

**APOYO TÉCNICO EN LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA Y
FUNCIONAL DE LAS EDIFICACIONES DE OCUPACIÓN NORMAL A LA CAÍDA
DE CENIZA DEL VOLCÁN GALERAS, UBICADAS EN LOS MUNICIPIOS DE
ANCUYA, CHACHAGÜÍ, LINARES, EL TAMBO Y TÁNGUA**

JAIRO EFRAIN RUALES ESTRADA

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2009**

**APOYO TÉCNICO EN LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA Y
FUNCIONAL DE LAS EDIFICACIONES DE OCUPACIÓN NORMAL A LA CAÍDA
DE CENIZA DEL VOLCÁN GALERAS, UBICADAS EN LOS MUNICIPIOS DE
ANCUYA, CHACHAGÜÍ, LINARES, EL TAMBO Y TÁNGUA**

JAIRO EFRAIN RUALES ESTRADA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial
para optar el título de Ingeniero Civil**

Director

**Ing. Henry Peralta Buriticá
Coordinador técnico – Corporación OSSO**

Codirector

**Ing. Armando Muñoz David
Docente Universidad de Nariño**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2009**

“Las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”.

Artículo 1º del Acuerdo No 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO

JURADO

San Juan de Pasto, Junio de 2009

DEDICATORIA

A mi madre, mis hermanos y a mi adorada Marcela, por su amor, confianza y desinteresado apoyo.

A mis grandes amigos por su colaboración y lealtad.

Jairo Ruales Estrada

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a las siguientes instituciones y personas, cuyo aporte ha sido fundamental para la realización del presente trabajo:

A todo el equipo humano y técnico de la Corporación OSSO por brindarme sus espacios y poder desarrollar el informe de pasantía y por la confianza depositada.

Ing. Henry Adolfo Peralta Buritica por la acertada dirección y transmisión de conocimientos durante el desarrollo de este proyecto, y sobre todo por su incondicional apoyo y sincero aprecio.

A los profesores Jans Meyer y Andrés Velásquez por depositar su confianza en los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño para formar parte del equipo de trabajo.

A Jorge Mendoza y William Burbano por su apoyo y explicaciones.

Carlos Mario Salazar por su colaboración y amistad.

A los compañeros de pasantía Silvana Naspiran, Sandra Rosero, Inti Patiño y Carlos Mosquera por su desinteresada colaboración y compañerismo.

Ing. Armando Muñoz David, por aceptar codirigir este proyecto e impulsar la formación profesional de los estudiantes de Ingeniería Civil.

Ing. William Castillo Valencia por su generosa ayuda.

A todas las personas que de alguna manera contribuyeron a la realización del presente trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. ENTIDAD RESPONSABLE DEL PROYECTO.....	25
1.1 ORGANIZACION EN LA CUAL SE DESARROLLÓ LA PASANTÍA	25
1.2 PERSONAL PARTICIPANTE EN EL PROYECTO	25
2. MARCO TEORICO	26
2.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
2.2 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO	27
2.3 AMENAZA Y EXPOSICIÓN	27
2.4 MODELAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD	28
2.5 DEFINICIÓN DE LAS MATRICES Y/O FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ..	30
2.6 MODELO DE DISPERSIÓN Y ACUMULACIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA ..	31
2.6.1 Determinación de la solicitación.....	31
3. MARCO CONCEPTUAL	38
4. METODOLOGÍA	40
4.1 CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE APOYO TÉCNICO LOCAL.....	40
4.2 ORGANIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA DEL PROYECTO	41
4.3 ENFOQUE	41
4.4 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	41
4.5 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	42
4.6 FASES DEL PROYECTO	43
4.6.1 Fase I. Preparación.....	43
4.6.2 Fase II. Trabajo de campo.	45
4.6.3 Fase III. Análisis y resultados	46
5. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA DE CUBIERTAS A CAÍDA PIROCLÁSTICA (CENIZA VOLCÁNICA)	49
5.1 FORMATO DE MEDICIÓN PARA EL INVENTARIO DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS (EDIFICACIONES DE OCUPACION NORMAL).....	49
5.1.1 Descripción de formato de medición.....	50
5.1.2 Optimización para el proceso de recolección de datos en campo.	50
5.2 TRABAJO DE CAMPO	51
5.2.1 Descripción de tipologías de cubiertas del área de estudio.	51
5.2.3 Inventario de las edificaciones.	53
5.3 VULNERABILIDAD DE CUBIERTAS.....	54
5.3.1 Modelos de vulnerabilidad disponibles en el Galeras.	56
5.3.2 Análisis de sensibilidad de los datos para el chequeo estructural.	57
5.4 DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD A CARGA DE CENIZA	60
5.4.1 Análisis estructural para determinar la resistencia de las cubiertas.....	60
5.4.2 Análisis estructural para cubiertas de madera.	61
5.4.3 Análisis estructural para losas.	69
5.4.4 Resultado análisis estructural.	70

6.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FUNCIONAL DE EDIFICACIONES.....	72
6.1	LA MATRIZ DE INTERDEPENDENCIA.....	72
7.	DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS POR EL ESCENARIO MÁXIMO PROBABLE DE ERUPCIÓN VOLCÁNICA.....	80
7.1	DETERMINACIÓN DE LA SOLICITACIÓN DE CARGA DE CENIZA.....	80
7.2	CÁLCULO DE DAÑO PARA EL ESCENARIO MÁXIMO PROBABLE DEL VOLCÁN GALERAS.....	80
7.2.1	Ejemplo de cálculo de daño.....	81
7.3	RESULTADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE DAÑO PARA LOS MUNICIPIOS DE ESTUDIO.....	82
8.	CONCLUSIONES	84
9.	RECOMENDACIONES	86
	BIBLIOGRAFÍA	87
	ANEXOS	89

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Localización de los municipios en el área de influencias del Volcán Galeras con respecto a la amenaza volcánica.....	26
Figura 2. Actividad eruptiva del Volcán Galeras 1535 - 2009	28
Figura 3. Variables para la definición de funciones y matrices de vulnerabilidad	29
Figura 4. Funciones de vulnerabilidad	31
Figura 5. Efectos de la ceniza volcánica.....	32
Figura 6. Mapa de zonificación piroclástica Ingeominas 1997.....	34
Figura 7. Mapa de isopacas de la erupción del 1991:06:15 del Pinatubo, Filipinas. Espesores de ceniza en [cm].	35
Figura 8. Modelo dispersión y acumulación de ceniza volcánica, Volcán Galeras ...	36
Figura 9. Grupo de apoyo técnico local.	40
Figura 10. Fases del estudio.....	43
Figura 11. Formato de medición para el inventario.....	49
Figura 12. Cubierta pesada	52
Figura 13. Cubierta moderada	52
Figura 14. Cubierta liviana	53
Figura 15. Cubierta en concreto reforzado	53
Figura 16. Comparación de datos de resistencias de proyectos de grado	58
Figura 17. Estructura montante maestro para cubierta pesada	62
Figura 18. Elementos para análisis montante maestro	65
Figura 19. Curvas de vulnerabilidad de cubiertas por ceniza Volcánica para el Galeras	71
Figura 20. Importancia de los elementos de un sistema de cubierta	74
Figura 21. Dependencia de los elementos de un sistema de cubierta.....	74
Figura 22. Importancia de elementos sistema losa.....	75
Figura 23. Dependencia de elementos del sistema losa.....	76

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características constructivas de las tipologías de cubiertas	51
Tabla 2. Resumen inventario de las edificaciones	54
Tabla 3. Comparación resistencias de cubiertas en proyectos de grado	57
Tabla 4. Tipo de cubierta vs resistencia	60
Tabla 5. Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para maderas del grupo estructural C	61
Tabla 6. Resumen de resistencia del ejemplo	65
Tabla 7. Resistencias por espesor de ceniza en cm	70
Tabla 8. Resistencias por carga de ceniza en KPa	71
Tabla 9. Matriz de interdependencia de componentes en cubierta de teja	73
Tabla 10. Matriz de interdependencia de componentes en losas de concreto	75
Tabla 15. Calificación de indicadores de vulnerabilidad de cubiertas en teja	77
Tabla 12. Calificación de indicadores de vulnerabilidad de losas de concreto	78
Tabla 13. Comparación vulnerabilidad de cubiertas	79
Tabla 14. Espesor de ceniza promedio para las cabeceras municipales según el modelo de dispersión y acumulación (Corporación OSSO)	80
Tabla 15. Rangos de daños	81
Tabla 16. Viviendas afectadas según el tipo de cubierta	83

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE ANCUYA.....	90
ANEXO B. DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE CHACHAGÜÍ.....	91
ANEXO C. DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE LINARES	92
ANEXO D. DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE EL TAMBO.....	93
ANEXO E. DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE TÁNGUA.....	95

GLOSARIO

Análisis estadísticos: Este proceso consiste en manejar de la manera más sencilla posible, el conjunto de datos del inventario de elementos expuestos, para representarlos en tablas, graficas ó funciones, con la finalidad de interpretarlos en términos de su posición y dispersión, así como el de analizar sus tendencias.

Análisis probabilísticos: Se determina la probabilidad ó recurrencia del evento en un lugar y tiempo dados (modelo de dispersión, caída y acumulación de ceniza).

Amenaza: se expresa como la probabilidad de que un evento se presente con una cierta intensidad, en un sitio específico y en dentro de un periodo de tiempo definido. Estas pueden ser naturales, socio naturales, antrópicas y tecnológicas.

Aproximaciones heurísticas: Combina el inventario, con el “criterio de experto”, puede ser directo (obtenido en campo), suma de pesos asignados a variables que definen la vulnerabilidad (física y funcional), consideradas como influyentes, en la interacción entre los fenómenos volcánicos analizados, vs los elementos expuestos, o entre los componentes de los mismos sistemas, que puede expresa en matrices (exposición e interdependencia).

Atención de la emergencia: Comprende la movilización social e institucional necesaria para salvar vidas y bienes una vez que el fenómeno ya se ha presentado, y para dar los primeros pasos hacia la recuperación de la comunidad después del desastre.

Caída piroclástica o ceniza: Son fragmentos de roca y pómez (piroclastos), que son lanzados desde el cráter hacia la atmósfera durante una erupción, impulsados gracias al efecto de los gases asociados. El tamaño de estos piroclastos varía desde ceniza (<2mm) a lapilli (2-64 mm)¹.

Desastre: Situación ó proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, tecnológico ó provocado por el hombre (antrópico), que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población, causan alteraciones intensas, graves y extendidas sobre las condiciones normales de funcionamiento de la comunidad. La magnitud de un desastre se mide en términos de pérdidas de vida o de salud, pérdida de bienes o servicios y daños en el ambiente.

¹ Blong, 1984 en Ingeominas, 1997

Edificaciones de ocupación normal: son todas aquellas edificaciones generalmente de uso habitacional, como viviendas de construcción popular, conjuntos residenciales, edificios de apartamentos, etc.

Elementos expuestos: es el entorno social, material y ambiental representado por las personas y por los recursos, servicios e infraestructura y ecosistemas que pueden ser afectados por un fenómeno físico.

Escenario de riesgo: es un análisis presentado en forma escrita, cartográfica o diagramada, utilizando técnicas cuantitativas y cualitativas, y basado en métodos participativos, de las dimensiones del riesgo que afecta a territorios y grupos sociales determinados. Significa una consideración pormenorizada de las amenazas y vulnerabilidades, y como metodología ofrece una base para la toma de decisiones sobre la intervención en reducción, previsión y control de riesgo.

Evaluación de la amenaza: es el proceso mediante el cual se determina la posibilidad de que un fenómeno se manifieste, con un determinado grado de severidad, durante un período de tiempo definido y en un área determinada. Representa la recurrencia estimada y la ubicación geográfica de eventos probables.

Evaluación de la vulnerabilidad: proceso mediante el cual se determina el grado de susceptibilidad y predisposición al daño de un elemento o grupo de elementos expuestos ante una amenaza particular.

Exposición: se refiere a un área o región, expuesta a un fenómeno amenazante, o a un elemento potencialmente sometido a él (vidas, estructuras).

Flujos de lava: Son corrientes de roca fundida, relativamente fluidas, que son expulsadas por el cráter o por grietas en los flancos del cono activo. Al salir del cráter forman lenguas que tienden a canalizarse a lo largo de los valles.

Flujos de lodo: Son mezclas de material volcánico (roca, ceniza, pómez) y material activo de los ríos y quebradas, que recoge a medida que avanza por los cauces; su grado de fluidez está directamente relacionado con la concentración de agua que conlleva el flujo, la cual es proporcionada por suelos saturados, caudales altos en las corrientes y temporadas invernales altas.

Flujos piroclásticos: Es uno de los fenómenos volcánicos más peligrosos. Corresponde a mezclas de fragmentos rocosos, escombros piroclásticos y gases que se mueven rápidamente a ras del suelo, accionados por la gravedad; son secos y calientes (300 - >800°C).

Gases volcánicos: En el interior del volcán, el magma contiene gases disueltos, los cuales antes, durante y después de la erupción escapan hacia la atmósfera.

Su puerta de salida puede ser el cráter principal, o bocas alrededor del cráter llamada fumarolas, como conductos secundarios.

Gestión del riesgo: Proceso social complejo que conduce al planeamiento y aplicación de políticas, estrategias, instrumentos y medidas orientadas a impedir, reducir, prever y controlar los efectos adversos de fenómenos peligrosos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente. “Las experiencias de gestión de riesgos más exitosas en América Latina... ocurren cuando existen procesos de negociación y concertación entre la población y los actores externos que permiten que éstos últimos adecuen sus políticas, programas y proyectos, para tomar en cuenta las percepciones, imaginarios, prioridades y necesidades de los primeros” (Maskrey, 1998).

Índice de explosividad volcánica (IEV): este índice se basa en la medición del volumen de material expulsado, la altitud de la columna de la nube eruptiva y otras observaciones.

Inventarios: Es el método más directo, del que se obtiene la distribución espacial de los elementos expuestos a sí como su caracterización en términos físicos y funcionales, con relación a los fenómenos volcánicos a partir de la desagregación del modelo de amenaza volcánica del Volcán Galeras –INGEOMINAS (1997).

Líneas vitales: son sistemas de infraestructura básica de carácter lineal y de uso continuo, las cuales permiten el desarrollo normal de las actividades en una población. Están conformadas por una serie de componentes puntuales (redes, edificaciones y estructuras) con características constructivas muy singulares, que han sido diseñadas para ejercer funciones por ejemplo, de transporte, movilidad, almacenamiento, abastecimiento, distribución y eliminación. La interrupción en la prestación de su servicio, puede afectar a una gran cantidad de personas y las actividades normales de una población.

Mitigación: Conjunto de acciones tendientes a reducir la exposición ó la vulnerabilidad de una comunidad, de un elemento ó de un sistema, amenazados por uno ó por varios fenómenos previsible de origen natural o tecnológico. Las principales medidas de mitigación se conciben en el mediano y largo plazo, e incluyen tanto medidas de planificación del desarrollo (p. ej. estatutos de usos del suelo, áreas de reserva, áreas no urbanizables por amenazas, normatividad constructiva y urbanizadora, medidas de educación continuada), medidas ingenieriles tales como obras de protección, y medidas de relocalización. Éstas últimas normalmente se toman cuando la exposición a un fenómeno previsible es considerada como alta.

Modelo: Es la representación simplificada de un evento (objeto o proceso) de la realidad, reproduciendo a una escala determinada algunas de sus variables constitutivas o descriptivas en términos cualitativos, cuantitativos, gráficos ó

materiales, integrados de acuerdo con un patrón de interacciones en un escenario de desarrollo espacio – temporal particular (Aguilar, 2005).

Modelos cartográficos de SIG: Estos resultan, como resultado del proceso de combinación de atributos en un conjunto de mapas de entrada con una función (álgebra de mapas) que produce un mapa de salida. La integración de mapas, ocurre en el nivel de los atributos, dado que los mapas son conjuntos de atributos de entidades georreferenciadas, organizados en bases de datos, con las cuales se realizan para obtener resultados: (i). *Operaciones lógicas (booleano)*: involucra la combinación lógica de mapas binarios a través de operadores lógicos condicionales (and, or, xor, not); (ii). *Operaciones aritméticas simples, complejas y modelos numéricos*: los nuevos atributos son el resultado de la suma, resta, multiplicación, división, etc.; (iii). *Análisis estadístico univariado*; (iv). *Métodos estadísticos multivariados* ó estadística bayesiana para clasificación y discriminación; (v). *Métodos multicriterio*, métodos basados en inteligencia artificial (AI) por sus siglas en inglés): redes neurales. Estos han sido desarrollados para determinar nuevos atributos que indican respuestas alternativas a problemas que implican criterios conflictivos y múltiples.

Modelos matemáticos: Son aquellos donde la relación entre las diferentes variables en un sistema se formaliza a través de relaciones matemáticas (normalmente ecuaciones). Estos, incluyen análisis aritméticos e interpretaciones cualitativas de los parámetros objeto de análisis (p. ej. análisis de resistencias de cubiertas a cargas de ceniza) definiendo las funciones que integran a estas variables.

Nubes piroclásticas, ardientes o acompañantes: Corresponden a mezclas de gas y material sólido muy fino, turbulentas, bajas en concentración de partículas con alta velocidad de fluidez.

Ondas de choque: Se genera por la compresión que existe entre el interior y el exterior del volcán cuando sucede una erupción volcánica explosiva, lo que ocasiona el desplazamiento súbito de masa de aire que se alejan de manera concéntrica desde el sitio de la erupción.

Población: son todos aquellos habitantes de un territorio, que pueden verse afectados por la manifestación de un evento adverso.

Preparación para desastres: Hace referencia a las actividades que tienen por objeto alistar a la sociedad y a sus instituciones para responder adecuadamente ante un desastre.

Prevención de desastres: Denota al conjunto de acciones tendientes a evitar que los desastres se produzcan. En otras palabras, son las acciones cuyo objeto es

impedir que sucesos naturales ó antrópicos causen eventos adversos sobre una población.

Proyectiles balísticos: Son fragmentos de roca emitidos a partir del cráter durante una erupción; tienen un rango de diámetro que varía desde 64 mm hasta varios metros. Se desplazan con movimiento parabólico desde el cráter.

Reducción de la vulnerabilidad: Medidas dirigidas a cambiar o disminuir las condiciones de vulnerabilidad existentes. Son medidas de prevención-mitigación y preparación que se adoptan con anterioridad de manera alternativa, prescriptiva o restrictiva, con el fin de evitar que se presente un fenómeno peligroso, o para que no generen daños, o para disminuir sus efectos sobre la población, los bienes y servicios y el ambiente.

Riesgo: es la probabilidad de ocurrencia de efectos adversos sobre el medio físico y humano en un área determinada. En este sentido, es una conjugación de las características de las amenazas (factor externo) y de las vulnerabilidades (factor interno). Estrictamente, es el cálculo anticipado de pérdidas (en vidas y en bienes), para un fenómeno de origen natural o tecnológico, o situación de tipo social que actúa sobre el conjunto social o una porción del mismo y sus bienes. Es importante aclarar que entre vulnerabilidad y riesgo esta (1) una estimación de costos de lo expuesto a pérdida y (2) un modelo de distribución temporal – probabilidad de ocurrencia - de los fenómenos amenazantes. En cambio, en vulnerabilidad solo entra un ‘escenario’ de potenciales fenómenos amenazantes y de impactos y afectaciones.

Riesgo aceptable: posibles consecuencias sociales, económicas y ambientales que, implícita o explícitamente, una sociedad o un segmento de la misma asume o tolera por considerar innecesario, inoportuno o imposible una intervención para su reducción. Por lo tanto es una decisión sobre el nivel de pérdidas esperables que se asume como resultado de aceptar que ocurrirán fenómenos naturales, tecnológicos, o situaciones sociales, los cuales incidirán sobre las vidas y bienes expuestos.

Susceptibilidad: Es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno, dadas unas condiciones intrínsecas ó elementos pasivos del sistema analizado.

Factores Detonantes. Son fenómenos ó procesos, naturales ó no, que actúan con la susceptibilidad en la conformación de una amenaza. Se pueden considerar como elementos activos ó agentes perturbadores del equilibrio del sistema analizado.

Vulnerabilidad física: se refiere al grado de debilidad física de los elementos expuestos de una población (p. eje. Infraestructura vital, edificaciones esenciales, etc.) con respecto a su localización o ubicación frente a determinadas amenazas

(p. ej. terremoto, inundación, tsunami, deslizamiento, marejadas, erupción volcánica, etc.).

Vulnerabilidad funcional: esta puede ser entendida como la debilidad de los sistemas urbanos, líneas vitales y edificaciones esenciales que prestan un servicio público y privado, en términos de su capacidad de operación y respuesta en caso de la ocurrencia de evento adverso, para garantizar la continuidad, calidad y cobertura en la prestación del servicio para el que fue diseñada, o la recuperación del mismo, en el menor tiempo posible, para restablecer las condiciones normales en una comunidad. Para su evaluación se requiere previo conocimiento del funcionamiento de cada uno de los componentes que conforman los sistemas, su nivel de operación, mantenimiento y su interrelación e interdependencia en relación con los demás componentes de cada uno de los sistemas, que pueden verse afectados.

Zona de amenaza alta: Se refiere al área más cercana al cráter activo donde pueden ocurrir alguno de los siguientes fenómenos volcánicos generando destrucción total: flujos piroclásticos (nubes calientes de materiales sólidos y gaseosos), flujos de lava (flujos de rocas fundidas), flujos de lodo, proyectiles balísticos (caídas de piedras), onda de choque (ruido explosivo) y alta concentración de gases tóxicos en las inmediaciones del cono activo.

Zona de amenaza baja: Área en la cual los efectos Volcánicos afectan con menor rigor a la comunidad y en forma parcial a la propiedad. Está definida principalmente por las tendencias de depósito de material de caída piroclástica (cenizas). Así mismo puede ser afectada por ondas de choque.

Zona de amenaza media: Área que bordea los límites de la zona de amenaza volcánica alta en un ancho aproximado de 200 metros; sería afectada por flujos piroclásticos más grandes pero poco probables, y por flujos de lodos secundarios.

RESUMEN

La pasantía fue realizada con el grupo científico y técnico de la Corporación OSSO entre los meses de julio de 2008 y Febrero de 2009, y tuvo como objetivo principal el avanzar en la evaluación de la vulnerabilidad física de las edificaciones de ocupación normal a la caída de ceniza del Volcán Galeras, ubicadas en los municipios de Ancuya, Chachagüí, Linares, El Tambo y Tángua.

El presente informe de pasantía está dividido en nueve capítulos. En el primer capítulo se elabora una descripción de la organización en la cual se desarrolló la pasantía y se relaciona el personal que participó en el proyecto. El segundo capítulo tiene como marco teórico la localización de la zona de estudio, la descripción del entorno, la amenaza y exposición, el modelamiento de la vulnerabilidad y la definición de las matrices y funciones de vulnerabilidad. Adicionalmente se propuso un modelo de dispersión y acumulación de ceniza volcánica, desarrollado por la Corporación OSSO, que para fines del estudio es la solicitud para el análisis. El tercer capítulo contiene definiciones para la vulnerabilidad por fenómenos naturales.

En el capítulo cuatro se describe la metodología empleada para alcanzar los objetivos propuestos, comenzando por presentar el grupo de apoyo local y la organización logística. El enfoque, el tipo y diseño de investigación es tomado según las técnicas planteadas por la Corporación OSSO. De esta manera la realización de este estudio comprende tres fases: Fase I. Preparación; Fase II. Trabajo de campo y Fase III. Análisis y resultados.

El quinto capítulo, titulado *evaluación de la vulnerabilidad física de cubiertas a caída piroclástica*, presenta el formato de medición utilizado para el levantamiento de la información y como se optimizó esta actividad. El trabajo de campo realizado describe las tipologías de cubierta en el área de estudio y un resumen de las edificaciones inventariadas. Para la evaluación de la vulnerabilidad de cubiertas se utiliza una estrategia que consiste en acopiar y conjugar la mayor cantidad de información posible, privilegiando la información local (proyecto Ingeominas, 1997). Conjuntamente para determinar las funciones de vulnerabilidad a carga de ceniza se realizaron chequeos estructurales para determinar la resistencia de las cubiertas y así generar estas curvas para la zona de influencia del volcán Galeras.

El sexto capítulo plantea una matriz de interdependencia para determinar la vulnerabilidad funcional de las cubiertas, calificando dos parámetros: el nivel de importancia y el nivel de dependencia. En el capítulo siete se presenta la distribución de daños por el escenario máximo probable de erupción volcánica.

Finalmente, en los capítulos ocho y nueve se presentan las conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

The internship was made possible with the scientific and technical group of the Corporation OSSO between July 2008 and February 2009 and has as its main objective the evaluation of progress in the physical vulnerability of buildings occupying the normal drop ash from Galeras volcano, located in the municipalities of Ancuya, Chachagüí, Linares, Tambo and Tángua.

The internship report is divided into nine chapters, the first chapter a description of the organization in which the internship took place and related personnel involved in the project. The second chapter is the theoretical location of the study area, the description of the environment, threat and exposure moderating of the vulnerability and the definition of matrices and vulnerability functions. Additionally, proposed a model of accumulation and dispersion of volcanic ash, which was developed by Corporation OSSO, that by the end of the study is requested for analysis. The third chapter contains definitions for the vulnerability of natural phenomena.

In chapter four perceives the methodology employed to achieve these objectives, starting with the present group of local support and logistic organization. The focus, the type and design of research is taken as the technique put forward by the Corporation OSSO. In this way this study involves three phases: Phase I. Preparation; phase II. Field work and phase III. Analysis and results.

The fifth chapter, entitled vulnerability assessment of physical covers pyroclastic fall, presents the format used to the lifting of the information and how this activity was optimized the field work conducted describes the types of cover in the study area and a summary of the building inventory. For vulnerability assessment of casings using a strategy that consists of collecting and combining as much information as possible, giving preference to local information (project Ingeominas, 1997). Together to determine the functions of a vulnerability ash load checks were conducted to determine the structural resistance of the roofing and generate these curves the catchment area of the Galeras Volcano.

The sixth chapter presents a matrix to assess vulnerability interdependence functional decks, two parameters describing the level importance and level of dependency. In chapter seven presents the distribution of damage by the most probable scenario of volcanic eruption.

Finally, in chapters eight and nine presents conclusions and recommendations.

INTRODUCCIÓN

A raíz del aumento de la actividad del Volcán Galeras en el año 2005, el Gobierno Nacional a través del Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres - SNPAD, declaró la situación de desastre en los municipios Pasto, Nariño y La Florida del Departamento de Nariño, mediante el decreto 4106 del 15 de noviembre de 2005. En el marco de esta declaratoria, el Fondo nacional de Calamidades – FNC y la Corporación Observatorio Sismológico del Suroccidente - Corporación OSSO, suscribieron el Convenio de Cooperación N° 1005-08-12-07 con la finalidad de realizar el estudio de “VULNERABILIDAD FÍSICA Y FUNCIONAL A FENÓMENOS VOLCÁNICOS, EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN GALERAS” y cuya interventoría está a cargo de la Dirección de Prevención y Atención de Desastres – DPAD.

En ese sentido y con la finalidad de apoyar este estudio, el Proceso Galeras realizó una solicitud a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, para la vinculación de estudiantes egresados del Programa de Ingeniería Civil en la modalidad de pasantía, la cual se realizó entre los meses de Julio de 2008 a Febrero de 2009. Vale la pena resaltar que en el Documento Conpes 3501 de diciembre de 2007, que se refiere a los *“Lineamientos de política para implementar un proceso de gestión integral del riesgo en la zona de amenaza volcánica alta del Volcán Galeras”*, La Universidad de Nariño es un actor clave para acompañar este proceso.

El estudio se realizó de manera semi-cuantitativa, es decir sin llegar al detalle de análisis o modelamientos estructurales completos, pero se buscó identificar vulnerabilidades genéricas que sirvan para definir medidas de reducción aplicables por la comunidad y las instituciones.

El proyecto de pasantía, tuvo como finalidad apoyar la evaluación de la vulnerabilidad física y funcional de las edificaciones de ocupación normal a la caída de ceniza del volcán Galeras, en las cabeceras municipales de: El Tambo, Ancuya, Linares, Chachagüí y Tángua; se enfoca en el fenómeno más recurrente que es la caída piroclástica, que puede afectar de manera notable las distintas coberturas o techumbres que se encuentran en el área de influencia del volcán.

En este informe se presenta una descripción de las actividades realizadas durante el desarrollo de la pasantía, así como de los aprendizajes específicos adquiridos.

Los estudiantes participantes incluyendo el autor de este informe, en el proyecto ESTUDIO DE VULNERABILIDAD FÍSICA Y FUNCIONAL A FENÓMENOS VOLCÁNICOS EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN GALERAS desarrollaron su trabajo de grado en modalidad de pasantía con los lineamientos

metodológicos de la Corporación OSSO; razón por la cual, toda la información aquí contenida está soportada con base en los resultados de dicho Proyecto.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

ANTECEDENTES

Los estudios realizados en detalle desde 1989 por parte del Ingeominas, han revelado un volcán Galeras con una evolución de centenares de años, lo cual se tomó como base para el desarrollo de la primera evaluación de riesgo volcánico en el país, programa piloto que se creó con el objeto de implementar una metodología que pudiera ser fácilmente aplicable a otros volcanes del país. Es así como Ingeominas a mediados del año 1994 a través de la Unidad Operativa Pasto, dio inicio al proyecto "*Evaluación de riesgo volcánico del Volcán Galeras*" con el fin de contar con un estudio que relacione la amenaza volcánica y la vulnerabilidad ante la ocurrencia de una erupción. Los dos (2) primeros mapas de amenaza fueron publicados en mayo y diciembre de 1989, durante el periodo de reactivación. La primera versión consideró básicamente las investigaciones sobre las fases eruptivas comprendidas en las décadas de los años 30 a los 40, lapso en el cual ocurrió el último flujo piroclástico conocido del Volcán Galeras.

La segunda versión tuvo un mayor trabajo de campo, su elaboración se basó en el concepto de cono de energía para el depósito de flujos piroclásticos, abarcó tres (3) zonas de amenaza (alta, media y baja) y consideró los eventos de edad menor a 10.000 años.

En el año 1997 Ingeominas dio inicio a varios estudios de vulnerabilidad física en los componentes agrícolas, de infraestructura vital y sectores de viviendas, así como también de vulnerabilidad social, los cuales plantean una aproximación de algunos indicadores de vulnerabilidad a los fenómenos volcánicos en poblaciones de la región y permiten identificar los elementos que podrían ser sometidos a diferentes eventos en sus zonas de impacto.

El estudio de vulnerabilidad física en el sector vivienda se realizó en aquellas de ocupación normal, para las cuales se estimó la resistencia estructural de sus cubiertas, teniendo en cuenta las consideraciones de diseño y construcción, severidad de las amenazas y otros factores. Dicho estudio se realizó en los Municipios de Pasto, Nariño, El Tambo, Tángua, Sandoná, Yacuanquer, Chachagüí, La Florida, Consacá y Ancuya.

JUSTIFICACIÓN

El crecimiento poblacional y los procesos naturales de ocupación del territorio han hecho notoria la deficiencia de planificación del desarrollo de la sociedad, agravadas por contextos culturales, socioeconómicos y la falta de compromiso de las autoridades locales, en particular cuando se ha permitido la construcción o ubicación de infraestructura pública o privada y el desarrollo de actividades de carácter económico de una manera inapropiada en relación con las condiciones ambientales del territorio, tal como ocurre frente a las amenazas de origen volcánico.

Una erupción volcánica puede prolongarse durante meses y los factores de peligro que posee son múltiples: flujos piroclásticos, flujos de lava, caída de ceniza, flujos de lodo, proyectiles balísticos, ondas de choque, concentración de gases, lluvia acida, entre otros. Los mapas de amenaza expresan el grado de peligro de que los fenómenos mencionados afecten un lugar; la tercera versión del mapa de amenaza del volcán Galeras (Ingeominas, 1997) contempla tres zonas de amenaza, las cuales en orden descendente de peligrosidad se definieron como alta, media y baja.

No sólo las vidas humanas son los elementos de riesgo, ya que nuestra sociedad posee y depende de estructuras básicas, como son: las edificaciones de vivienda, edificaciones esenciales, sistemas de abastecimiento de agua, sistemas de alcantarillado, sistemas eléctricos y de telecomunicaciones, estructuras de las que se desconoce su vulnerabilidad física y funcional.

Teniendo en cuenta que la amenaza volcánica en esta región, ya ha sido estudiada y delimitada, siendo representada en la tercera versión del mapa del INGEOMINAS en baja, media y alta, es importante para avanzar hacia la valoración de la vulnerabilidad física y funcional de los elementos expuestos, específicamente el contexto físico construido, porque la vulnerabilidad a diferencia de la amenaza volcánica es lo único intervenible y modificable, por que esta ha sido construida por la misma sociedad y no por la naturaleza.

La vulnerabilidad física y funcional de las poblaciones de la zona de influencia volcánica de Galeras, ha tenido un incremento acelerado debido a factores como el desconocimiento de amenazas naturales, inadecuadas prácticas constructivas e ineficiente planeación y control del desarrollo territorial.

En ese sentido, la Universidad de Nariño como la más importante institución académica de la región, tiene el compromiso de apoyar este tipo de estudios que buscan generar insumos para la toma de decisiones, es decir al conocimiento de la vulnerabilidad, en lo referente a la reducción del riesgo volcánico al que se encuentra expuesta la población de la zona de influencia volcánica del Galeras. Es así como a través del desarrollo de trabajos de grado en la modalidad de pasantía,

la Universidad puede prestar servicios profesionales a la comunidad mediante estudiantes egresados del programa de Ingeniería Civil, como personal idóneo para el apoyo de estudios de vulnerabilidad física y funcional de la infraestructura regional.

OBJETIVOS

Objetivo general.

Apoyar y acompañar a la Corporación OSSO en la evaluación de la vulnerabilidad física y funcional de las edificaciones de ocupación normal a la caída de ceniza del volcán Galeras, ubicadas en los municipios de: Ancuya, Chachagüí, Linares, El Tambo Y Tángua.

En el marco del Convenio de Cooperación N° 1005-08-12-07 entre el Fondo Nacional de Calamidades y la Corporación OSSO.

Objetivos específicos.

Apoyar y acompañar los siguientes procesos de evaluación de la vulnerabilidad física y funcional de los elementos expuestos:

- Recopilación de información cartográfica y documental.
- Elaboración de formatos de medición para el inventario de los elementos expuestos.
- Recorridos de campo para la recolección de información.
- Determinar los componentes críticos y vulnerables en las edificaciones de ocupación normal a la caída de ceniza volcánica.
- Elaboración de recomendaciones para reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

ALCANCES

Participación en las tres fases del proyecto - apropiación de metodologías y procedimientos para evaluar la vulnerabilidad física; recolección de información mediante recorridos en campo; procesamiento de información; análisis del efecto sobre las cubiertas de las edificaciones de ocupación normal a la caída de ceniza volcánica, a una escala para el análisis de manzana DANE de cascos urbanos de los municipios de: Ancuya, Chachagüí, Linares, El Tambo y Tángua.

1. ENTIDAD RESPONSABLE DEL PROYECTO

1.1 ORGANIZACION EN LA CUAL SE DESARROLLÓ LA PASANTÍA

La Corporación OSSO es una organización no gubernamental de beneficio público, sin ánimo de lucro, (Resolución No. 17-A del 29 de febrero de 1996 del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA del Municipio de Cali), dedicada a *“promover, apoyar y ejecutar investigaciones científicas, difusión y extensión de conocimientos, apropiación y desarrollo de metodologías y de tecnologías así como actividades afines, en los campos de la dinámica de la tierra sólida, de la hidrósfera y de la atmósfera, y de sus interacciones con la sociedad, en particular aquellas con potencial de evolución ambiental degradante, riesgos y desastres, así como las acciones apropiadas para su intervención, prevención y mitigación”*.

El grupo OSSO ha recibido reconocimientos como el Premio a la Mitigación de Desastres de las Naciones Unidas (Premio Sasakawa, 1997) y, en dos ocasiones, la clasificación de COLCIENCIAS como grupo de excelencia del Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología.

1.2 PERSONAL PARTICIPANTE EN EL PROYECTO

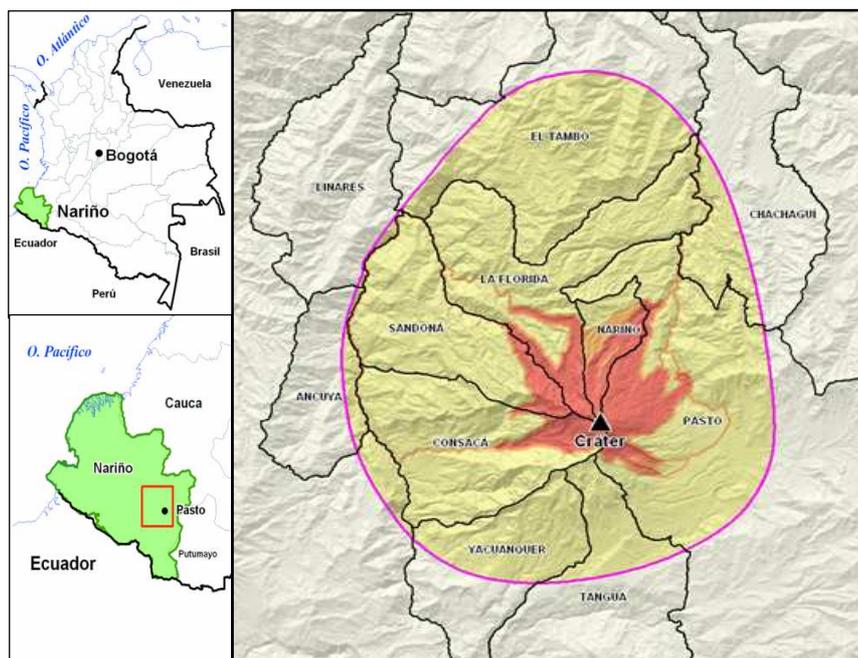
El grupo de trabajo para este estudio, estuvo a cargo de los profesionales de la Corporación OSSO, Msc. Hansjürgen Meyer, Director Científico del Estudio, con la asesoría en el tema de amenazas geológicas, del Ing. Geólogo Andrés Velásquez Restrepo. La coordinación técnica del estudio, estuvo a cargo del Ing. Civil Henry A. Peralta B. especialista en reducción de riesgos de desastres y desarrollo local sostenible. La coordinación del área de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos, estuvo a cargo del Técnico Cartógrafo Jorge Eduardo Mendoza, con el apoyo de los profesionales del área de procesamiento gráfico de la Corporación, la Geógrafa Lized Zabala y los Cand. Ing. Topógrafos William Andrés Burbano y Mauricio Bautista, apoyados por la Sta. Karla Herrera. En las áreas de estudio de ofertas y amenazas geológicas, se tuvo la participación de la Msc. En ciencias de la Tierra, Ing. Diana Mendoza y en la evaluación de vulnerabilidad la Ing. Civil Cristina Rosales. En el área de sistemas para el procesamiento y manejo de las bases de datos, participaron los Técnicos Javier Arboleda y Rubén Darío Mendoza. En el análisis histórico de la vulnerabilidad, la comunicadora Social María Mercedes Durán y para el trabajo de campo, se contó con el señor Carlos Mario Salazar.

2. MARCO TEORICO

2.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Volcán Galeras se localiza en el Departamento de Nariño al Sur Occidente de Colombia, en las coordenadas $77.3587^{\circ}W$ y $1.2231^{\circ}N$ (WGS84), a una altura de más de 4.276 msnm, aproximadamente a 9 km al Occidente y en línea recta, del centro de la Plaza de Nariño de la ciudad de San Juan de Pasto². Su área de influencia, abarca las tres zonas – alta (en color rojo), media (en color naranja) y baja (en color amarillo) - definidas por el actual mapa de amenaza volcánica (Ingeominas, 1997) y cubre un área de aproximadamente 888 km² (óvalo fucsia), centrada en el cráter del volcán. Esta zona incluye a los municipios cuyos límites geográficos cruzan por la cima del volcán Galeras (La Florida, Nariño, Sandoná, Consacá, Yacuanquer, Tángua y Pasto), además, parte de los municipios de Chachagüí, el Tambo, Ancuya y Linares. (Ver figura 1)

Figura 1. Localización de los municipios en el área de influencias del Volcán Galeras con respecto a la amenaza volcánica.



Fuente: Corporación OSSO, 2009.

² INGEOMINAS. Volcán Galeras: generalidades. (en línea). En: Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. San Juan de Pasto: 3 ago. 2008 (consultada : 3 ago. 2008). Disponible en la dirección electrónica : <http://intranet.ingeminas.gov.co/pasto/images/3/35/Generalidades2.PDF>

2.2 DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO

Su topografía presenta un relieve que va desde accidentado hasta escarpado y en él se localiza el Santuario de Flora y Fauna del Galeras – SFFG. Su precipitación promedio está entre 1000 y 3000 mm por año. “Su clima va desde el cálido hasta 1000 m.s.n.m. con una temperatura promedio que fluctúa entre 22.5 ° y mayores a 24°C; pasando por el templado o medio, entre 1000 y 2000 m.s.n.m y una temperatura promedio entre 17.5° y 22.5°; el clima frío desde los 2000 a 3000 m.s.n.m. y temperaturas promedio entre los 12° y 17.5°; clima muy frío (páramo bajo) que va desde 3000 a 3700 m.s.n.m. con temperatura promedio entre 9.4° a 7°C; hasta el clima de Páramo Alto desde los 3800 a 4270 m.s.n.m. con una temperatura que fluctúa entre 5° a 9.4 °C”³.

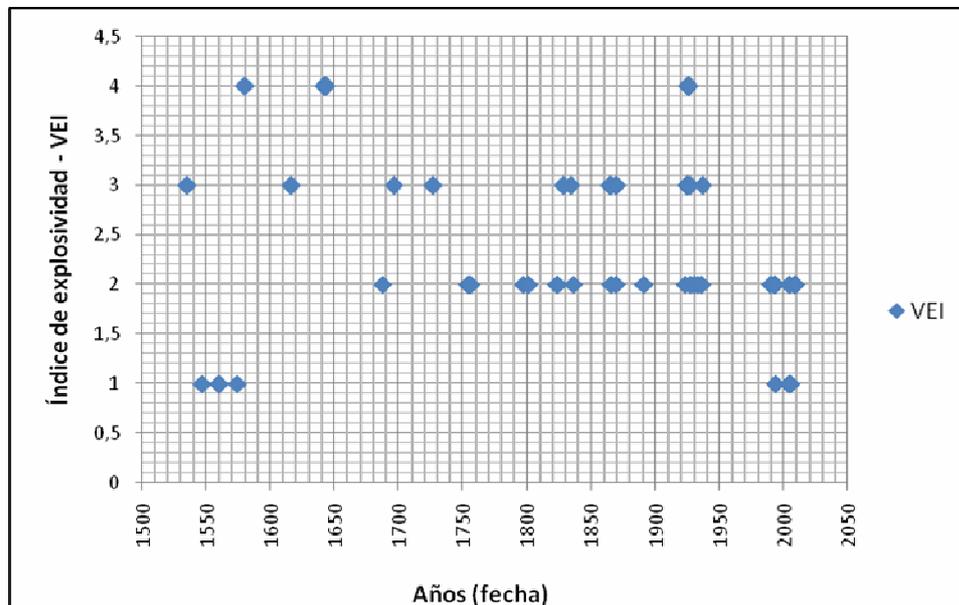
2.3 AMENAZA Y EXPOSICIÓN

Según Ingeominas⁴, “el actual cono activo, llamado volcán Galeras, con una edad estimada en cerca de 4.500 años, tiene una historia de volúmenes relativamente pequeños, producto de erupciones que se han caracterizado por ser moderadamente explosivas. Durante los últimos 5000 años, la mayoría de las erupciones se han catalogado como vulcanianas, con columnas inferidas de baja altura (menores a 10 km), que han producido emisiones de gases y cenizas, pequeños flujos de lava y erupciones explosivas con la generación de flujos piroclásticos, cuyos depósitos han alcanzado distancias de hasta 9,5 km desde el cráter”. Lo de vulcanianas hace referencia al tamaño de las erupciones, lo que equivale a decir que han tenido un tamaño intermedio. En lo que respecta a las emisiones de gases y cenizas y la generación de flujos piroclásticos se refiere a las amenazas que han acompañado estas erupciones, y que constituyen hoy las que enfrentan Pasto y los demás municipios que se encuentran en el área de influencia del volcán. A continuación se reproduce el cuadro que incluye el INGEOMINAS, que resume la actividad del Galeras, en el que MAG es el factor establecido para cuantificar la magnitud de la erupción, y VEI es el Índice de Explosividad Volcánica, (VEI, Volcanic Explosivity Index en inglés). En Figura 2, se presenta la distribución de estas erupciones desde 1535, hasta la última erupción de 20 de febrero de 2009.

³ De acuerdo con Espinal & Montenegro (1977) en Ingeominas (2002).

⁴ Página web de Ingeominas, vínculo Pasto, vínculo Reseña histórica. Documento PDF “Actividad Histórica”.

Figura 2. Actividad eruptiva del Volcán Galeras 1535 - 2009



Fuente: Elaborado y completado por Corporación OSSO, a partir del catálogo del registro de erupciones del Volcán Galeras, Ingeominas (2005)

2.4 MODELAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD

Los criterios para el cálculo de la vulnerabilidad física (V_f) de elementos expuestos a fenómenos volcánicos, se puede representar genéricamente como relación entre el factor externo, propio del sitio, la sollicitación (el agente potencialmente peligroso), y el factor interno, propio del elemento expuesto, la capacidad de resistencia:

$$V_f = \frac{S[\text{sitio}]}{R[\text{elemento}]}$$

Donde:

V_f = Vulnerabilidad física

S = Sollicitación

R = Resistencia

La sollicitación está en función de tres elementos básicos: (i). la naturaleza propia de cada uno los fenómenos volcánicos (Caída piroclástica), (ii) proceso generador de daños (p. ej. peso) y la intensidad del fenómeno con respecto a las condiciones internas o externas que pueden generar daño sobre los elementos expuestos (p. ej. acumulaciones, humedad).

La resistencia de un elemento expuesto al fenómeno volcánico “caída piroclástica” se puede estimar de manera individual o combinada, en función de tres (3) criterios básicos: (i). ubicación U , en áreas de menor o mayor amenaza; (ii). distancia – D , con respecto a fuente de liberación de energía del fenómeno. Así por ejemplo, poblaciones más cercanas al cráter de un volcán, son más susceptibles a ser afectados por la ocurrencia de una erupción volcánica (por impacto directo), a diferencia de poblaciones más alejadas. Estas dos variables por lo general pueden ser representadas en “matrices de vulnerabilidad”

Por último, el tercer criterio se refiere a: (iii). capacidad de carga C_c , que se relaciona con la resistencia mecánica de los elementos sometidos a esfuerzos, a partir de la observación de sus características constructivas y estructurales (estado de conservación, materiales, etc). Es así como la cubierta de una edificación construida con materiales de baja calidad, luces amplias y baja pendientes, es más susceptible a fallar y/o colapsar por cargas de ceniza que se pueden acumular. De otro lado, para vulnerabilidad de cubiertas a carga de cenizas la sollicitación es la carga de ceniza esperable y la resistencia, la carga de ceniza que la cubierta soporta sin daño. Este último criterio de la resistencia puede expresarse en “funciones de vulnerabilidad”. En Figura 3, se presentan las variables necesarias para definir matrices y funciones de vulnerabilidad⁵.

Figura 3. Variables para la definición de funciones y matrices de vulnerabilidad



⁵ Elaborado a partir de figura 3.3 Metodología para evaluación de la vulnerabilidad, en CVC – 2001. Evaluación del Riesgo por Fenómenos de Remoción en Masa, Guía Metodológica

Para el análisis de vulnerabilidad de cubiertas a caída de ceniza volcánica, se dispuso de funciones que describen la resistencia de las cubiertas ante la solicitación de estas cargas.

2.5 DEFINICIÓN DE LAS MATRICES Y/O FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Las matrices o funciones de vulnerabilidad relacionan el daño esperable con la intensidad del fenómeno, para un elemento específico y para un fenómeno específico. Estas matrices y/o funciones de vulnerabilidad, se pueden obtener de diversas maneras, según la información disponible:

Empírica: por análisis de ocurrencias y experiencias anteriores.

Determinística: mediante ensayos de laboratorio.

Opinión experta: cuando no se dispone de información directa.

Erupciones volcánicas desastrosas son relativamente “raras”, por lo cual la información sobre efectos (impacto) de los diversos fenómenos es escasa. En ese sentido, las variables de vulnerabilidad son analizadas sobre la base del conocimiento general, acumulado a través de la evaluación de efectos en otros volcanes; la información sobre fenómenos volcánicos identificados como más probables (*Ingeominas, 1997*), se convierte en un conjunto de variables de vulnerabilidad, formulados de tal manera que puedan ser correlacionados con la información básica en el sistema de información.

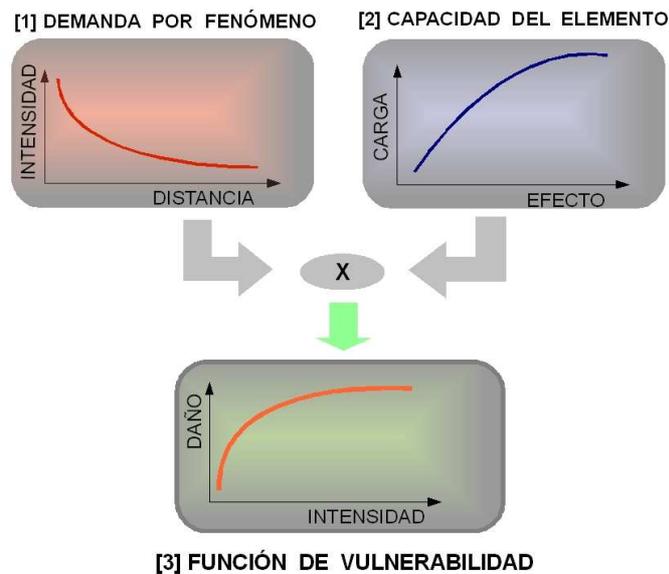
Una “matriz de vulnerabilidad” resulta de la interrelación de componentes que la definen: la solicitación (propia del fenómeno) vs la resistencia (característica del elemento). Basado en las técnicas de soporte decisión para Asignación de Pesos: Analytical Hierarchical Process – AHP, que es una metodología de modelamiento multi-criterio, basada en la lógica de comparación pareada desarrollada por Thomas Saaty en 1978, que permite organizar y evaluar la importancia relativa entre criterios y medir la consistencia de los juicios. Requiere la estructuración de un modelo jerárquico. Con base en la comparación, se ponderan todos los sub-criterios y criterios y determinan los rangos de calificación según sea el caso. Esta puntuación es asignada a partir de los criterios definidos por el grupo de profesionales de la Corporación OSSO encargados del modelamiento.

De otro lado una “función de vulnerabilidad” resulta de la convolución de dos funciones, una que representa la exposición (la variación espacial de la intensidad del fenómeno) – la función de demanda – y una que representa la capacidad o deformación del elemento expuesto bajo carga. Por ejemplo una carga de ceniza, con el nivel o la probabilidad de daño.

Funciones de exposición son variables espaciales. La aplicación de las funciones de vulnerabilidad a la distribución espacial de elementos (generación de mapas de vulnerabilidades) se puede hacer con el mapa de zonificación de amenazas o con

funciones de exposición. En la Figura 4, se presenta el modelo para la construcción de funciones de vulnerabilidad.

Figura 4. Funciones de vulnerabilidad



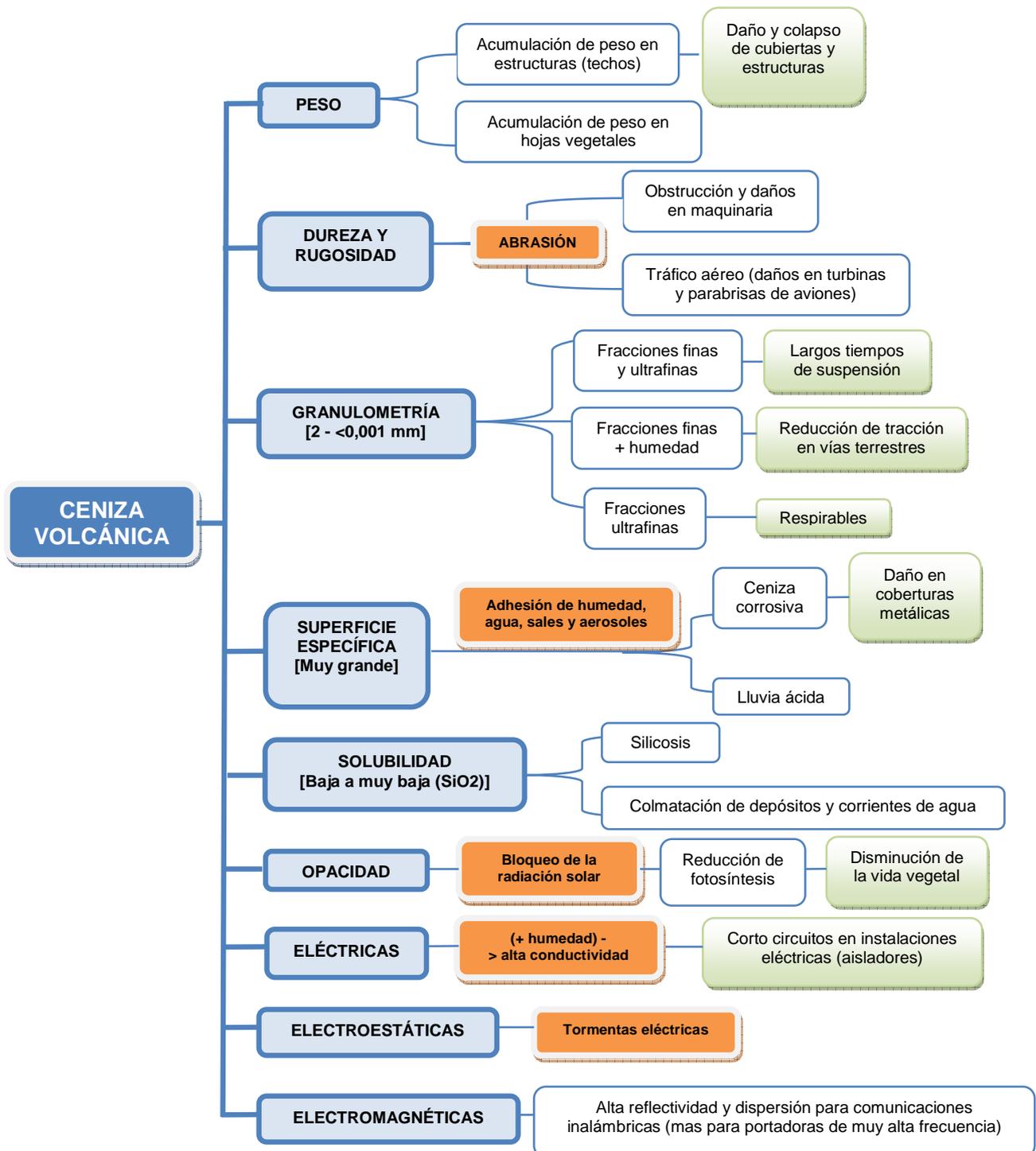
Fuente: Corporación OSSO, 2009.

2.6 MODELO DE DISPERSIÓN Y ACUMULACIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA (Corporación OSSO, 2009)

2.6.1 Determinación de la solicitación. A partir de los modelos de fenómenos del mapa de amenazas (Ingeominas, 1997) se derivaron variables y niveles de severidad que se ingresó a la base de datos (el SIG de vulnerabilidad). Así, por ejemplo, el fenómeno 'caídas piroclásticas' (más comúnmente llamado 'caída de cenizas') se convirtió en una representación espacial con valores de isopacas (niveles de igual espesor de depósitos de cenizas), teniendo en cuenta un régimen de vientos probable y la topografía del terreno con la finalidad de determinar sitios de mayor acumulación de ceniza. Estos valores se convirtieron en estimativos de peso específico, para calcular la carga sobre techos.

Por otro lado, cabe aclarar que la caída de ceniza por sus características físicas, químicas y mecánicas, pueden afectar de forma diversa a los elementos expuestos en un territorio puesto que es el fenómeno más recurrente. Por lo tanto es necesario conocer y comprender su grado de interacción y sus posibles efectos. (Ver Figura 5).

Figura 5. Efectos de la ceniza volcánica



Fuente: Corporación OSSO, 2009

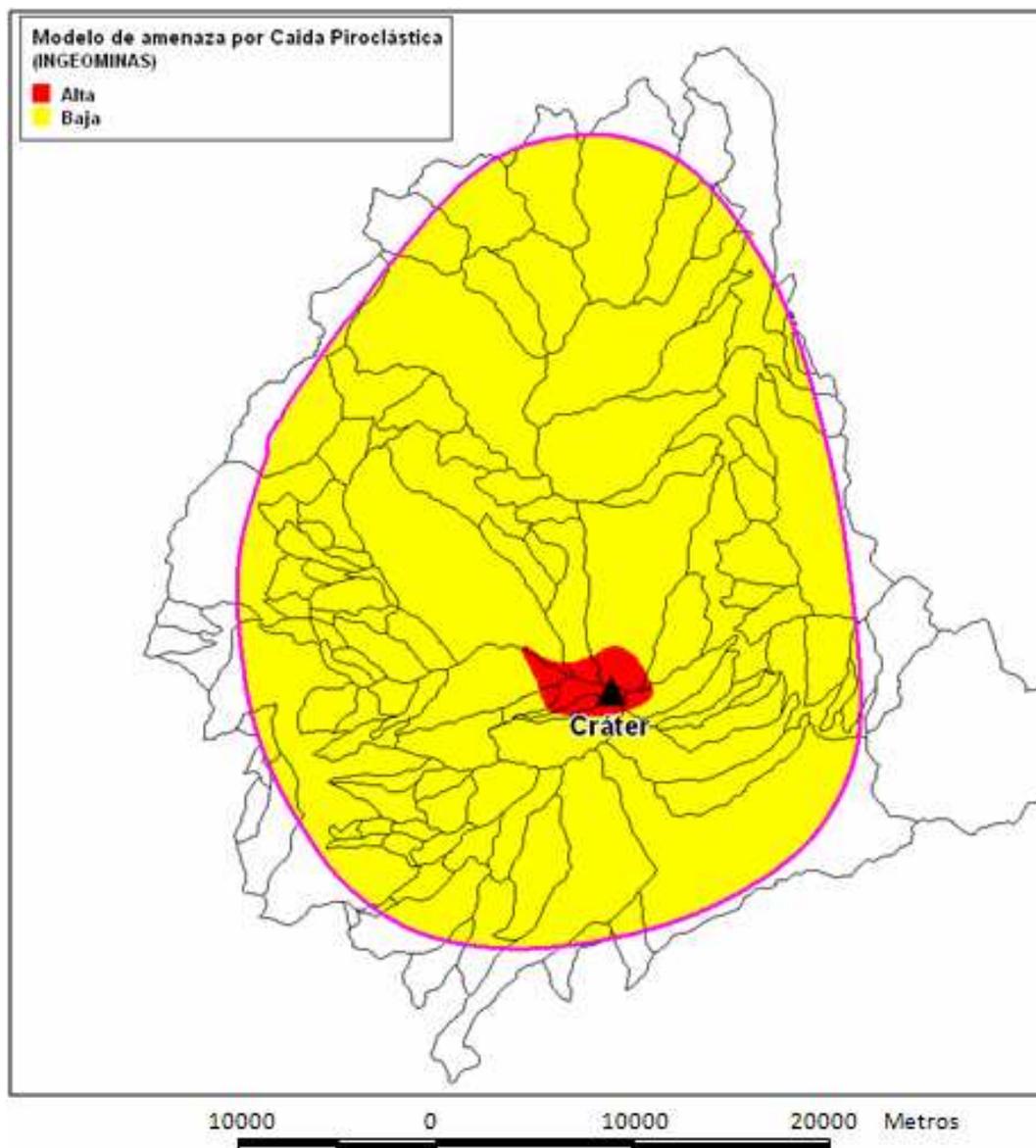
Para lograr modelos de espesores de ceniza más cercanos a la realidad, que la zonificación del Mapa de Amenazas (Ingeominas, 1997) se revisó algunos de los modelos de espesores de ceniza disponibles en la literatura científica, empíricos y simulados (erupciones en Tungurahua, Lascar, Chaiten, Vesubio, etc.), para identificar el más cercano a las especificaciones para la erupción máxima probable en el Mapa de Amenaza Volcánica.

Para determinar hipotéticamente como se distribuiría y se dispersaría la ceniza en el área de estudio, sin contar con una función de dispersión de caída piroclástica para el escenario de erupción, en el cual se fundamenta el mapa de amenaza volcánica del Volcán Galeras, se partió de las valoraciones realizadas por Ingeominas, en donde define que:

De ocurrir erupciones como las de los últimos 5000 años, se esperarían caídas piroclástica superiores a 30 cm, en distancias menores a 5 km del cráter del cono activo. Erupciones de pequeña magnitud similares a las ocurridas en 1989, 1992 y 1993 generarían depósitos de caída piroclástica con espesores de orden métrico en las proximidades del cráter y de orden centimétrico y milimétrico a distancias mayores a 1 km⁶. En la Figura 6, se presenta el mapa de zonificación por caída piroclástica mencionado.

⁶ INGEOMINAS (Instituto Geológico de Minas y Energía). Mapa de amenaza volcánica del Galeras (tercera versión). Santafé de Bogotá: INGEOMINAS, 1997.p. 32.

Figura 6. Mapa de zonificación piroclástica Ingeominas 1997.



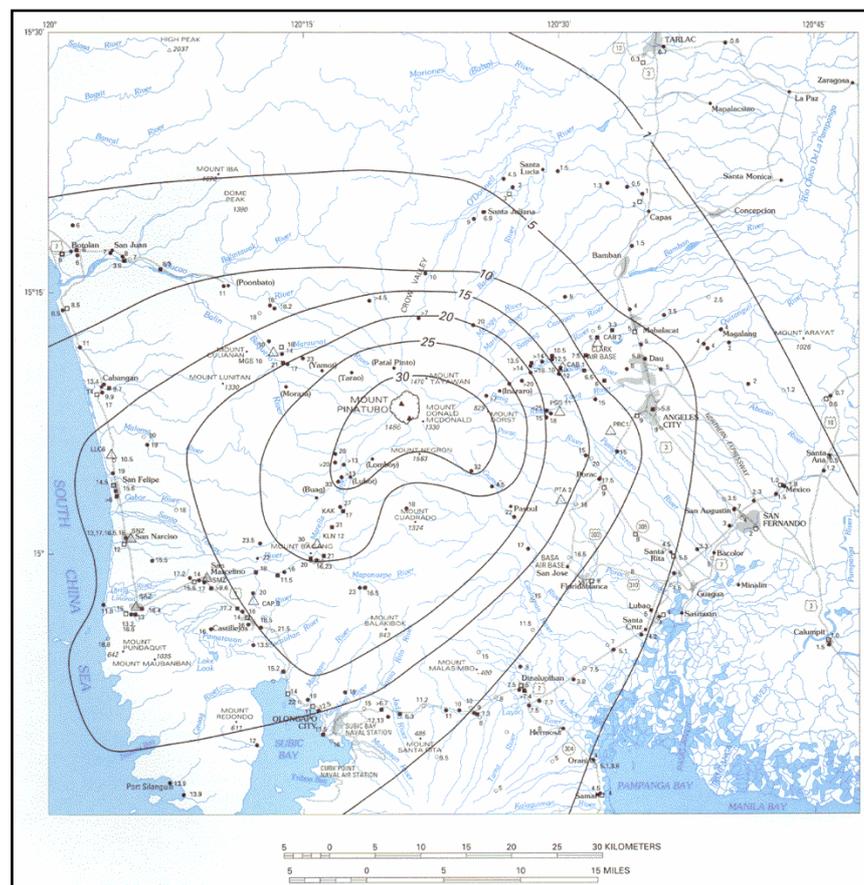
Fuente: INGEOMINAS, 1997

La Corporación OSSO⁷, encontró que el modelo de isópacas (curvas de igual espesor de depósito de cenizas) derivado de levantamiento en campo posterior a

⁷ CORPORACIÓN OSSO (Observatorio Sismológico del Sur Occidente). Evaluación de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras. Informe final, capítulo II. Cali: CORPORACIÓN OSSO, 2009 Pág. 39.

la fase principal de la erupción del Pinatubo del 15 de junio 1991, (Figura. 6 en *Ma. Lynn O. Paladio-Melosantos et al. (1996). Tephra Falls of the 1991 Eruptions of Mount Pinatubo, in Newhall, C.G. and Punongbayan, R.S., 'Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mt. Pinatubo, Philippines', Phil. Inst. of Volc. and Seism., Quezon City and Univ. of Washington Press, Seattle, p. 513-535.*), aproxima aceptablemente el pronóstico del Mapa de Amenaza de Ingeominas: “...se esperarían caídas piroclásticas con espesores superiores a 30 cm en distancias menores a 5 km del cráter del cono activo”. La erupción del 15 de junio en el Pinatubo fue de escala sub-pliniana, y así mayor a lo ocurrido en el Galeras en los últimos 5.000 años (Ingeominas. 1997), pero el modelo de espesores que se derivó del mapa de isopacas es compatible con el que el Mapa de Amenazas pronostica como el evento máximo probable. (Ver la Figura 7).

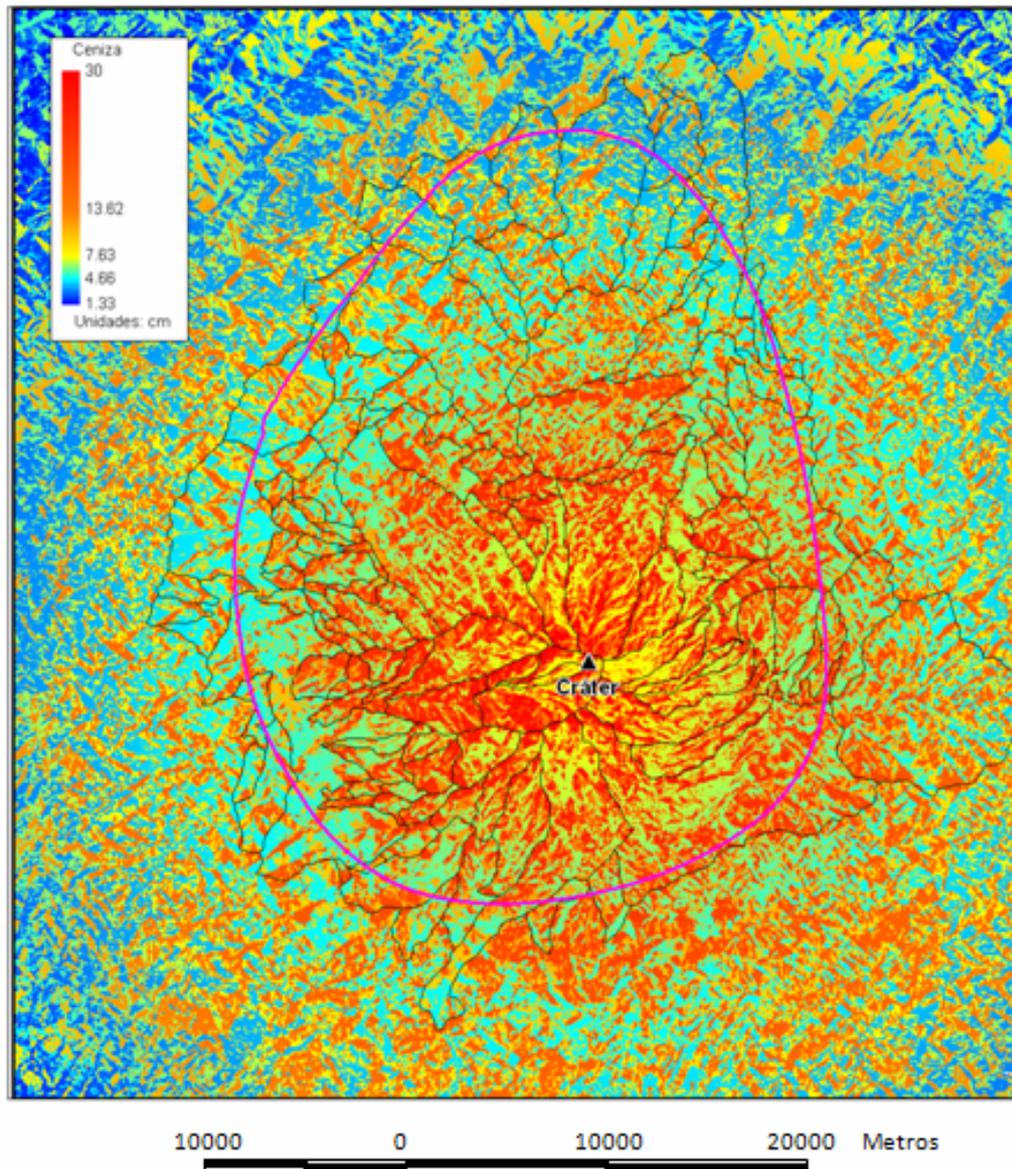
Figura 7. Mapa de isopacas de la erupción del 1991:06:15 del Pinatubo, Filipinas. Espesores de ceniza en [cm].



Fuente: Paladio-Melosantos,

A continuación se presenta el modelo de dispersión y acumulación de ceniza volcánica construido por La corporación OSSO , para una erupción con un periodo de retorno de 5.000 años del volcán Galeras.

Figura 8. Modelo dispersión y acumulación de ceniza volcánica, Volcán Galeras



Fuente: Corporación OSSO, 2009.

Para conocer el procedimiento que siguió La Corporación OSSO en la construcción del modelo de dispersión de ceniza volcánica para el área de influencia del Volcán Galeras, el lector puede remitirse al “ESTUDIO DE VULNERABILIDAD FÍSICA Y FUNCIONAL A FENÓMENOS VOLCÁNICOS EN EL AREA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN GALERAS” (Corporación OSSO, Capítulo II) o al trabajo de grado de Inti David Patiño Agreda (Ing. Civil egresado de la UDENAR), que lleva por título “APOYAR LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA Y FUNCIONAL DE LAS EDIFICACIONES DE OCUPACIÓN NORMAL A LA CAÍDA DE CENIZA DEL VOLCÁN GALERAS, UBICADAS EN LOS MUNICIPIOS DE NARIÑO, LA FLORIDA, SANDONÁ, CONSACÁ Y YACUANQUER”.

3. MARCO CONCEPTUAL

En la literatura técnico-científica, se consignan varias definiciones para la vulnerabilidad por fenómenos naturales. A continuación se presentan algunas de ellas:

Una de las definiciones de vulnerabilidad mas aceptadas, ha sido la propuesta por la UNDRO⁸ (1979), la cual la define, como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala de 0, sin daño a 1 pérdida total. Chaux⁹ (1993), define la vulnerabilidad como *la incapacidad para “absorber”, mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su “inflexibilidad” o incapacidad para adaptarse a ese cambio, que para la comunidad constituye por las razones expuestas, un riesgo. La vulnerabilidad determina la intensidad de los daños que produzca la ocurrencia efectiva del riesgo sobre la comunidad.*

Bajo esta perspectiva, actualmente y desde enero de 2005 la Organización de Naciones Unidas – ONU, está promoviendo el Marco para la Acción de Hyogo 2005-2015¹⁰, difundido en la Conferencia “Mundial de Reducción de Desastres - CMRD” realizada en Kobe Hyogo, Japón. Este marco de acción orienta su compromiso con las comunidades y la reducción de sus pérdidas humanas, sociales, económicas y ambientales cuando se ven involucradas en desastres, como un componente integrado y fundamental en el desarrollo sostenible. Con esta actuación se busca el aumento de la resiliencia de las naciones y comunidades ante los desastres, con la finalidad de lograr una considerable reducción de las pérdidas causadas por los mismos, en las vidas y los bienes sociales, económicos y ambientales de las comunidades y países, para el 2015.

El enfoque anterior, necesariamente orienta a los actores del riesgo a evaluar los desequilibrios ambientales, sociales y económicos que generan las causas, en el marco los procesos y modelos de desarrollo; buscando con ello estrategias de transformación de las condiciones de vulnerabilidad que van más allá de la atención de los desastres. También, exige reconocer que los fenómenos naturales no son la principal causa de la ocurrencia de los mismos, que por el contrario estos devienen de los procesos sociales de acumulación de condiciones de

⁸ Propuesta de UNDRO en conjunto de la UNESCO en reunión de expertos “Desastres Naturales y Análisis de Vulnerabilidad” para unificar definiciones.

⁹ La vulnerabilidad global. Wilches-Chaux (1993) – Los desastres no son naturales – La Red

¹⁰ En enero del 2005, durante la Conferencia Mundial sobre la Reducción de Desastres (CMRD), celebrada en Kobe, Hyogo, Japón, 168 gobiernos adoptaron un plan de 10 años para lograr un mundo más seguro frente a las amenazas naturales (Colombia fue uno de ellos)

vulnerabilidad, que finalmente son los que determinan la susceptibilidad o no por los fenómenos naturales.

O.D. Cardona (pionero del concepto de vulnerabilidad en Colombia) titula una de sus publicaciones recientes “Midiendo lo inmedible”¹¹, en el cual se hace una discusión sobre el riesgo y la vulnerabilidad, que se sintetiza en los siguientes términos: *La necesidad de hacer manifiesto el riesgo es fundamental para incidir en las decisiones, para que se le reconozca y se convierta en una preocupación para alguien. Sin su reconocimiento no hay decisión, pero el riesgo es un concepto extraño, representa algo irreal, en tanto que está siempre relacionado con azar, con posibilidad, con algo que aún no ha sucedido. Es una abstracción de un proceso de transformación que denota simultáneamente posibilidad y realidad. Es algo imaginario y escurridizo que parece solo existir en el futuro y que refleja un estado indeseable de realidad, pero su existencia compleja es consustancial al hombre. El riesgo se dimensiona acotando en el tiempo un estado de realidad indeseable, unas consecuencias o efectos adversos como resultado de sucesos naturales o actividades humanas, lo que revela su carácter normativo. Esta noción implica que existen vínculos causales entre acciones y efectos, y que efectos indeseables pueden ser evitados o reducidos si las acciones causales son evitadas o modificadas. El concepto subyacente de realidad causal corresponde al concepto de vulnerabilidad. De allí su importancia, pues determina el carácter selectivo de la severidad de los daños cuando se presenta un fenómeno. La vulnerabilidad refleja la susceptibilidad, la predisposición intrínseca a ser afectado; las condiciones que favorecen o facilitan que haya daño.*

De todo lo anterior se desprende que la estimación de la vulnerabilidad, es la única variable controlable (intervenible) de la cadena de riesgo, por fenómenos naturales, que es la base para definir las acciones de mitigación o de reducción sobre elementos expuestos existentes en un territorio.

¹¹ A mediados de octubre de 2005 se celebró en la Universidad de Bonn, Alemania, la segunda reunión del grupo de trabajo de expertos en vulnerabilidad bajo la coordinación del Institute for Environment and Human Security (EHS) de la Universidad de las Naciones Unidas, en el marco de la “6th Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community” que promovió IHDP

4. METODOLOGÍA

4.1 CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE APOYO TÉCNICO LOCAL

La Corporación OSSO conformó un “Grupo de apoyo técnico local”, compuesto por profesionales, en cabeza del coordinador técnico del estudio, Ing. Civil Henry Peralta Buriticá, el coordinador del área de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos, el Técnico Cartógrafo Jorge Eduardo Mendoza, con el apoyo en el área de procesamiento gráfico del Cand. Ing. Topógrafo William Andrés Burbano y por la Sta. Karla Herrera. Como apoyo valioso para la realización del proceso, se contó con el acompañamiento para el trabajo de campo, del señor Carlos Mario Salazar.

Como estudiantes egresados del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, en calidad de pasantes (practica profesional): Silvana Naspiran, Sandra Rosero, Carlos Mosquera, Inti Patiño y el autor de este informe de pasantía.

El ejercicio de evaluación de vulnerabilidad física y funcional, contó con el apoyo y acompañamiento de los actores institucionales y comunitarios de cada uno de los municipios. La interventoría del estudio el Ing. Fabio Calvache Santander y el equipo técnico de profesionales del Proceso Galeras, a cargo de los Ing. Jorge Chávez y el Ing. Francisco Javier Mora. Además de la Economista y Antropóloga Esperanza Agreda y el Ing. Javier Escandón del equipo de Gestión de Tierras de la Gerencia.

Figura 9. Grupo de apoyo técnico local.



4.2 ORGANIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA DEL PROYECTO

Para la realización del proyecto se dispuso en la ciudad de Pasto de una oficina permanente, durante seis meses (dotada de 5 computadores, mesas de trabajo), desde donde se coordinaron todas las actividades a desarrollar durante las fases de recolección, organización y procesamiento de información.

En la etapa de análisis de la información se hizo necesario el desplazamiento a la ciudad de Cali, a la sede de la Corporación OSSO, para un manejo unificado de la información donde se dispuso igualmente de una oficina durante un mes.

4.3 ENFOQUE

Con el proyecto de pasantía se pretendió obtener la vulnerabilidad de las edificaciones de ocupación normal ante la caída de ceniza del volcán Galeras; esta se obtuvo siguiendo una serie de pasos concretos para llegar a este cometido. Asimismo, este es un estudio proyectivo que sirve como base fundamental para el desarrollo de futuros trabajos con un grado mayor de detalle.

El enfoque que se adoptó, es el propuesto por la Corporación OSSO el cual se define en los siguientes términos:

“El tipo de evaluación de vulnerabilidad física y funcional que se aplicó en el proyecto es de nivel intermedio, pero buscando identificar vulnerabilidades genéricas y comunes por sectores, áreas y componentes. Éste enfoque garantiza una rápida y eficiente primera aproximación a la identificación de la vulnerabilidad, en un lenguaje al alcance de todos los sectores de la población (comunidades, instituciones, academia, etc.), lo cual permite que cada sector tenga conocimiento y elementos de juicio para evaluar por sí mismo sus condiciones de riesgo. Se obtienen resultados aplicables en el corto plazo para la planificación del desarrollo y la reducción del riesgo asociado a la actividad del Volcán Galeras en las poblaciones objeto de estudio.”¹².

4.4 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se formula una manera de operar basada en un método que permita tener un enfoque para llegar a obtener los resultados de análisis y evaluación de la vulnerabilidad. Para los fines que pretende el estudio se adopta los métodos cualitativo y analítico; en su orden el primero por ser de fácil aplicación fue el más

¹² CORPORACIÓN OSSO (Observatorio Sismológico del Sur Occidente). Estudio de vulnerabilidad física y funcional a fenómeno volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras: propuesta técnico-económica. Cali: Corporación OSSO, 2007. p. 9.

utilizado, empleado para que la evaluación inicial se realice de una manera rápida y sencilla; y el segundo método consiste en un análisis estructural para determinar el comportamiento de las cubiertas, ante el fenómeno de la caída de ceniza o tefra, para posteriormente realizar el análisis y evaluación de la vulnerabilidad de las cubiertas.

Los criterios básicos que se tuvo en cuenta para la evaluación de la vulnerabilidad física de las cubiertas de viviendas de los municipios objeto de este proyecto de pasantía, es la definida por la Corporación OSSO, que relaciona: el grado de exposición, resistencia, densidad y distribución de los elementos expuestos, con respecto a su interacción con la caída de ceniza volcánica sobre las cubiertas. Esto se describe a continuación:

Exposición. Localización de los elementos expuestos con respecto a la amenaza (distancia).

Resistencia. Características constructivas y estructurales (estado de conservación, materiales y disposición), teniendo en cuenta, para el análisis estructural los criterios básicos de la NSR-98 y JUNAC.

Densidad. Número de elementos expuestos por unidad de área, en términos de su resiliencia ante el desastre.

Génesis. Nivel de organización de los elementos expuestos en términos de formas de ocupación del territorio.

4.5 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Como este estudio hace parte del proyecto: *Estudio de vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras*, se tomó como diseño las técnicas planteadas por la Corporación OSSO¹³.

“Esta metodología se ajusta a los objetivos propuestos en el proyecto, considerando que se requiere llegar, en poco tiempo, a resultados que permitan recomendar acciones específicas a implementarse a través de planes de reducción de riesgos. Ella se fundamenta en la combinación de: (i) observaciones directas sobre el tipo de terrenos, su composición, génesis y geomorfología y (ii) su localización espacial en relación con las tipologías constructivas, génesis, densidad, sistemas urbanos y comunitarios, sus fortalezas y debilidades frente al fenómeno esperado”.

¹³ Ibid., p. 12-13.

4.6 FASES DEL PROYECTO

Para el desarrollo de la pasantía se contó con todo el apoyo logístico de la Corporación OSSO y de información proporcionada en el marco del proyecto. Este se desarrollo en tres fases: FASE I. PREPARACIÓN; FASE II. TRABAJO DE CAMPO y FASE III. ANÁLISIS Y RESULTADOS. Los pasos y las técnicas principales desarrolladas, se muestran en la Figura 10 y se describen en los siguientes numerales.

Figura 10. Fases del estudio.



4.6.1 Fase I. Preparación. Correspondió a todas las actividades preliminares a las salidas de campo como: (i). Recopilación de información existente y disponible; (ii). Elaboración de formatos para el inventario de los elementos expuestos (Edificaciones de ocupación normal); (iii). Preparación del trabajo de campo; (iv). Sistema de información Geográfica – SIGVULGALERAS. A continuación se describe de manera detallada en qué consistió cada una de ellas.

Actividad 1.1. Recopilación de información existente y disponible. Esta actividad consistió en la búsqueda de la información existente y disponible de la zona, en las instituciones del orden local, regional y nacional (estudios, información cartográfica y documental - en formatos análogo y/o digital, imágenes, fotografías aéreas, etc., de tipo oficial y dominio público). La información fue inventariada, sistematizada y catalogada en una base de datos; también, analizada y depurada, con la finalidad de determinar la información faltante, a ser recolectada directamente en trabajo de campo en los municipios durante la FASE II, mediante la aplicación y diligenciamiento de formularios específicos previamente elaborados y ajustados.

Actividad 1.2. Elaboración de formatos para el inventario de los elementos expuestos. Se elaboraron formatos estandarizados para el levantamiento de información de las edificaciones de ocupación normal, teniendo en cuenta: material predominante en muros, tipo de cubierta (material de cobertura y estructura de cubierta), inclinación de cubierta, estado general de la estructura, número de pisos y su georreferenciación.

Para optimización del proceso de recolección de datos en campo, el formato diseñado inicialmente para ser diligenciado a mano, fue ingresado por medio del software Arqpad 1.0 a el computador de mano (Pocket PC Hp iPAQ).

Actividad 1.3. Preparación del trabajo de campo. Esta actividad consistió, en preparar las herramientas de levantamiento de datos (formatos previamente elaborados) para localización, caracterización y georreferenciación (Pocket PC y antena GPS), de los elementos expuestos objeto de estudio. De la misma manera y como parte del proceso se coordinó previamente, con cada una de las alcaldías de los municipios, las misiones de campo que se realizarían en la etapa de trabajo de campo. Con la información facilitada por el DANE, cartografía y fotografías aéreas del IGAC, se realizó un primer acercamiento al casco urbano de los municipios de estudio, que abrió la puerta al levantamiento de la información en las salidas de campo.

Actividad 1.4. Sistema de información Geográfica – SIGVULGALERAS. Se maneja y alimenta el Sistema de Información Geográfico denominado SIGVULGALERAS, para el manejo de datos georreferenciables, que fueron útiles para el análisis y elaboración de los modelos de vulnerabilidad, como también para la generación de información temática, representada en informes, documentos y cartografía. SIGVULGALERAS es un sistema de información geográfica, actualizable, dinámico, modificable (atributos y funciones).

La Corporación OSSO, definió el sistema de referencia en que se trabajó la cartografía del estudio, que es la *Proyección Gauss Kruger ó Transversa de Mercator – Elipsoide de Hyford*, así como el modelo cartográfico, la base

cartográfica y las herramientas de Software, que se utilizaron con el propósito de facilitar la transferencia final a las instituciones y comunidad en general.

Las Herramientas de software utilizadas se presentan a continuación:

- MapInfo 9.0, Vertical Mapper 3.1
- Global Mapper 9.0
- ArcView 3.1
- ACAD 2000
- Map Source - GPS
- ArcPAd - GPS
- Google Earth
- Microsoft Office
- Open Office

Las actividades básicas para el diseño e implementación del SIG del estudio se mencionan a continuación, las cuales se desarrollaron de manera progresiva dentro de cada una de las fases del estudio:

- Creación de un banco de datos geográficos (BDG)
- Depuración, corrección e integración de información cartográfica compilada
- Preparación de cartografía digital base para el proyecto
- Procesamiento, modelamiento y análisis de la información
- Generación de información temática

4.6.2 Fase II. Trabajo de campo. Corresponde a todas las actividades relacionadas con las misiones de campo para: (i) Inventario de los elementos expuestos; (ii). Organización y depuración de la información recolectada (iii). Sistema de información Geográfica - SIG. Las actividades desarrolladas en esta fase se presentan a continuación.

Actividad 2.1. Inventario de los elementos expuestos. En este aspecto se determinó el tipo y volumen de elementos que podrían ser afectados por procesos asociados a la amenaza volcánica. Consistió en primera instancia, en la clasificación de los elementos expuestos en tipologías estructurales, mediante conteo, caracterización, ubicación y/o georreferenciación de los elementos expuestos de acuerdo con la clasificación definida.

Para la realización de este inventario se aplicaron formatos diseñados y ajustados específicamente para este estudio. El levantamiento de datos se realizó con Pocket PC y antena GPS, con posicionamiento en tiempo real, lo cual permitió: (i). un trabajo de campo simultáneo de varios equipos; (ii). Optimización del proceso

de levantamiento de información; (iii). Máximo de compatibilidad de los datos levantados; (iv). Facilidad de transferencia de metodología a instituciones y comunidades locales que acompañaron el proceso, muchos de los cuales conocieron el manejo de los equipos y técnicas de trabajo de campo (GPS, cámaras fotográficas y de video digitales).

Actividad 2.2. Organización y depuración de la información recolectada. Esta actividad consistió en la organización de los datos recolectados en campo (puntos georreferenciados, fotografías y notas), y preparación de estos para el ingreso al SIG.

Actividad 2.3. Sistema de información Geográfica – SIGVULGALERAS. En términos de modelamiento las herramientas de SIG permitieron la integración de información disponible, tanto en formato vectorial como *raster*, con aquella que se generó por el proyecto, las cuales fueron principalmente bases de datos levantadas en campo, con ayuda de los formatos mencionados arriba y la incorporación de georreferenciación mediante tecnología de GPS, con ayuda en el Ingreso de datos al Sistema de Información Geográfica de los software: MapSource, Global Mapper 7 y MapInfo Profesional 9.0.

El estudio generó principalmente información de carácter temático, a nivel urbano en escala de manzana DANE. Los atributos que se vincularon a cada elemento expuesto fueron aquellos que permitieron hacer una aproximación a su vulnerabilidad física y funcional, respecto al fenómeno de caída de ceniza.

4.6.3 Fase III. Análisis y resultados. Esta fase correspondió a todas las actividades relacionadas con el análisis y los resultados del estudio para: (i). Elaboración del modelo para evaluar la vulnerabilidad física y funcional (ii). Evaluación de la vulnerabilidad de elementos expuestos; (iii). Elaboración de recomendaciones para la reducción de vulnerabilidad física y funcional. (iv). Sistema de información Geográfica - SIG. Las actividades desarrolladas en esta fase se presentan a continuación.

Actividad 3.1. Elaboración del modelo para evaluar la vulnerabilidad física y funcional. En esta actividad se construyó el modelo para evaluar la vulnerabilidad física y funcional de los elementos expuestos, en función de los resultados de la recopilación de información disponible. A partir de esto se determinaron los atributos y relaciones específicas, para establecer los parámetros necesarios, con el fin de estimar la fragilidad o debilidad de los elementos a sufrir daño o pérdida, con relación al fenómeno.

El fenómeno 'caídas piroclásticas' (más comúnmente llamado 'caída de cenizas') se convirtió en una representación espacial con valores de isópacas (niveles de igual espesor de depósitos de cenizas) para un episodio eruptivo y un régimen de vientos probable, tomando como punto de partida el mapa de amenaza volcánica del Ingeominas para caída piroclástica, con base en el cual se obtuvo el dato de entrada (espesor de ceniza de 30 cm, a cinco km del cráter), para modelar un escenario de caída de ceniza para Galeras, a partir del mapa de isópacas de la erupción del 15 de junio de 1991 del Volcán Pinatubo, Filipinas (ver numeral 2.6).

Las variables definidas para el modelamiento fueron convertidas en estimativos de peso específico para calcular la carga sobre techos. Las variables que describen la vulnerabilidad (física y funcional), se expresaron en matrices de interdependencia y daño. Para la vulnerabilidad de cubiertas, se definió el modelo matemático de las funciones que integran estas variables. Todos los resultados del modelamiento se representan en un modelo cartográfico y de SIG en SIGVULGALERAS.

Actividad 3.2. Evaluación de la vulnerabilidad de elementos expuestos. El tipo de evaluación de vulnerabilidad física y funcional que se aplicó en el estudio es de nivel intermedio, es decir semi-cuantitativo, sin llegar al detalle de análisis numéricos del comportamiento estructural individual de los elementos expuestos.

Como resultado de la aplicación de este tipo de análisis, se logró identificar vulnerabilidades genéricas y comunes por áreas (manzana DANE), identificando las prioridades para análisis detallados, que implican modelamientos y análisis cuantitativos puntuales y que serían objeto de estudios futuros.

La evaluación de vulnerabilidad se realizó por tipologías, sin llegar al detalle individual. Con estos resultados, para las cubiertas expuestas a la caída de ceniza volcánica, se logró inferir la vulnerabilidad, a partir de características generales como materiales, tipo de techo, etc.

Actividad 3.3. Elaboración de recomendaciones para la reducción de vulnerabilidad. A partir del conocimiento de la vulnerabilidad física y funcional de los elementos expuestos evaluados, se generaron una serie de recomendaciones que se constituyen las bases técnicas para acciones posteriores, el diseño de medidas de mitigación, presentadas en un lenguaje al alcance de todos los sectores de la población (comunidades, instituciones, academia, etc.).

Igualmente, se identificaron las vulnerabilidades que pueden ser reducidas mediante acciones directas de la población, ó de instancias locales (recomendaciones de mitigación) y también, las más críticas que deben ser

remediadas mediante políticas o acciones a nivel superior, p. ej., a través de acciones con participación del nivel central del Estado.

Actividad 3.4. Sistema de información Geográfica – SIGVULGALERAS. En todas las etapas del estudio se recurrió al uso de herramientas de SIG, para el procesamiento de las bases de datos cartográficos; así como para el análisis y modelamiento de los indicadores de vulnerabilidad, que generan nuevos insumos para tener una mirada diferente del territorio, lo cual aporta a toma de decisiones.

“Todos los resultados del SIGVULGALERAS, se presentan debidamente documentados (metadatos) y soportados con las fuentes de información y autoría intelectual o de propiedad que correspondan y son presentados tanto en formato digital como análogo.

Todas las bases de datos que produjeron en el estudio, incluyen una llave de acceso lógica, con base en el código único DANE, con su mayor nivel de resolución estadística como lo es la manzana y sector de tal manera que los resultados puedan ser vinculados de manera fácil y directa al Marco Geoestadístico Nacional – MGN¹⁴.

¹⁴ CORPORACIÓN OSSO (Observatorio Sismológico del Sur Occidente). Evaluación de la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras. Informe final, capítulo I. Cali: CORPORACIÓN OSSO, 2009 Pág. 26.

5.1.1 Descripción de formato de medición

Georreferenciación. La georreferenciación se realizó con el sistema WGS-84 (World Geodetic System 1984. Sistema de coordenadas mundiales 1984) utilizando unidades en grados decimales (hddd.ddddd°).

Cuenta con un espacio ficha, que sirve para llevar un orden lógico para el posterior ingreso de la información al SIG.

Estado. El estado se refiere a las características que permiten definir la capacidad resistente de una edificación. Según el formato de encuesta se analizan dos estados; bueno o malo, según criterio del encuestador.

Estado bueno: La madera utilizada en la estructura de cubierta se encuentra sana y la cobertura no presenta ningún tipo de daño.

Estado malo: La madera utilizada en la estructura de cubierta presenta grandes pandeos, debido a que la madera empieza a afectarse de manera notoria por la humedad y ataque de insectos; el material de cobertura presenta desprendimientos y hundimientos.

Tipos de cubierta. Para los tipos de cubierta se tuvo en cuenta el material de cobertura, según esto los tipos son: cubierta pesada, cubierta moderada, cubierta liviana, losa maciza y losa aligerada.

Estructura de cubierta. En este ítem se tuvo en cuenta la información disponible, en ella se identificaron las tipologías estructurales de las cubiertas, que se corroboraron en campo estas son: montante maestro, diente de sierra, correas o vigas y columnas.

Material predominante en muros. Hace referencia al material predominante en muros ya sea, ladrillo, tapia, adobe, bahareque, madera, prefabricado, concreto u otro.

En el formato también se tuvo en cuenta la inclinación de la cubierta en grados (°) y el número de pisos de la vivienda.

5.1.2 Optimización para el proceso de recolección de datos en campo. El formato comprobado en campo y diseñado inicialmente para ser diligenciado a mano, fue ingresado por medio del software Arqpad 1.0 a el computador de mano (Pocket PC Hp iPAQ y antena GPS), para la agilidad del proceso, el trabajo simultaneo de varios grupos en campo y para el ingreso posterior de los datos al SIG.

5.2 TRABAJO DE CAMPO

5.2.1 Descripción de tipologías de cubiertas del área de estudio. A continuación se presentan las tipologías constructivas del área de estudio, definidas a partir de (López, 1997) para Ingeominas (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Características constructivas de las tipologías de cubiertas

<i>Tipo de cubierta</i>	<i>Luz de apoyo (m)</i>	<i>Distancia entre correas (m)</i>	<i>Sección de las correas (cm*cm)</i>	<i>Distancia entre armaduras (m)</i>	<i>Sección de la armadura (cm*cm)</i>	<i>Espesor (cm)</i>	<i># varillas</i>
<i>Liviana</i>	2	1	6.5*6.5	-	-	-	-
	2,5	1,2	9*9	-	-	-	-
	3	1,5	14*14	-	-	-	-
<i>Moderada</i>	2	1,69	6.5*6.5	-	-	-	-
	2,5	1,69	9*9	-	-	-	-
	3	1,69	14*14	-	-	-	-
<i>Pesada</i>	3,5	1,5	5*5	0,8	6.5*6.5	-	-
	4	1,5	6.5*6.5	0,8	9*9	-	-
	5	1,5	9*9	0,8	12*12	-	-
<i>Losa maciza</i>	3	-	-	-	-	15,00	5#4
	3,5	-	-	-	-	17,50	5#4
	4	-	-	-	-	20,00	5#4
<i>Losa aligerada</i>	3	-	-	-	-	18,75	4#5
	4	-	-	-	-	25,00	4#5
	5	-	-	-	-	31,25	4#5

Fuente: Tomado de López (1997) para Ingeominas

Las siguientes características fueron corroboradas en campo.

Cubierta pesada: El material de la cobertura es en tejas de barro, los elementos de sustentación son correas y armaduras en madera, la gran mayoría de estas edificaciones poseen cielo raso. El tipo de estructura usada en la armadura es el denominado montante maestro. (Ver Figura 12).

Figura 12. Cubierta pesada



Cubierta moderada: El material de cobertura es en tejas de asbesto-cemento o fibro-cemento, que se aseguran con amarras de alambre y clavos en los elementos de sustentación (Correas en madera), que se apoyan directamente sobre los muros, dando una condición de simplemente apoyada, pocas de estas edificaciones poseen algún tipo de cielo raso. (Ver Figura 13).

Figura 13. Cubierta moderada



Cubierta liviana: El material de cobertura es en hojas de zinc, que se asegura con amarras de alambre y clavos en los elementos de sustentación (Correas en madera), estas se apoyan directamente sobre los muros, dando una condición de simplemente apoyada, no poseen ningún tipo de cielo raso. (Ver Figura 14).

Figura 14. Cubierta liviana



Cubiertas en losa de concreto reforzado: Losa maciza y losa aligerada.

Figura 15. Cubierta en concreto reforzado



5.2.3 Inventario de las edificaciones. El número de edificaciones de ocupación normal, es decir todas aquellas que cumplen una función habitacional, que se inventariaron y fueron objeto de análisis de vulnerabilidad, corresponden a las localizadas en las cabeceras urbanas de la zona de estudio, ascendieron a unas 3372 que corresponden a más del 90 % de las edificaciones. En la Tabla 2. se presenta el resumen con la totalidad de las edificaciones levantadas, discriminadas según su tipología.

Tabla 2. Resumen inventario de las edificaciones

N°	Municipio	Cubiertas pesadas	Cubiertas livianas	Cubiertas moderadas	Losas	Total
1	Ancuya	97	1	101	271	470
2	Chachaguí	82	5	260	273	620
3	Linares	102	2	130	185	419
4	El Tambo	375	91	271	549	1286
5	Tángua	236	11	153	177	577
	TOTALES	892	110	915	1455	3372

5.3 VULNERABILIDAD DE CUBIERTAS

La capacidad de deformación de estructuras bajo cargas – ceniza sobre techos, en este caso – depende de un sin número de variables de forma y materiales, que además tienen singularidades en cada edificación.

La incertidumbre que se deriva de esta complejidad se maneja de distintas maneras:

- En el diseño de edificaciones se recurre al 'factor de seguridad'.
- En la evaluación de la resistencia de edificaciones existentes se recurre a la evaluación de tipologías de edificaciones, caracterizadas por un conjunto simplificado de los rasgos más relevantes. A la vez, se procura evaluar cada tipo con información concurrente y complementaria (empírica, analítica, ensayos de laboratorio, etc.).

La complejidad de la relación entre intensidad (carga de ceniza) y la resistencia de la estructura también lleva a formular FdV (funciones de vulnerabilidad) muy simples, en términos de las variables que caracterizan cada tipo de estructura.

En la propuesta de FdV para la Comunidad Europea (*Spence et al., 2005*) solo se distinguen cuatro (4) tipologías, caracterizadas con solo 3 variables (material de cobertura, tipo de estructura de soporte, edad y/o condición).

Para calcular las funciones de vulnerabilidad (solicitaciones y resistencias) se ha seguido, en términos generales, una estrategia que consiste en acopiar y conjugar la mayor cantidad de información posible, privilegiando la información local (proyecto Ingeominas, 1997) verificada en campo y la más reciente (proyecto EXPLORIS¹⁵).

Si el lector se interesa por conocer un resumen de los proyectos estudiados, en lo que concierne al estado del arte sobre vulnerabilidad a cargas de tefra (caídas piroclásticas) en cubiertas, y por su carácter ejemplar para la realización del presente informe; puede remitirse al “ESTUDIO DE VULNERABILIDAD FÍSICA Y FUNCIONAL A FENÓMENOS VOLCÁNICOS EN EL AREA DE INFLUENCIA DEL VOLCÁN GALERAS” (Corporación OSSO, Capítulo II) o al trabajo de grado de Inti David Patiño Agreda (Ing. Civil egresado de la UDENAR), que lleva por título “APOYAR LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA Y FUNCIONAL DE LAS EDIFICACIONES DE OCUPACIÓN NORMAL A LA CAÍDA DE CENIZA DEL VOLCÁN GALERAS, UBICADAS EN LOS MUNICIPIOS DE NARIÑO, LA FLORIDA, SANDONÁ, CONSACÁ Y YACUANQUER”

En estos trabajos se hace un resumen de resultados del proyecto EXPLORIS, en cuanto a vulnerabilidad a cargas de tefra. En este programa, financiado por la Comisión Europea, se adelantaron proyectos para evaluar mecanismos de colapso de techos por carga estática de ceniza volcánica y proponer medidas para su mitigación, empezando por la definición de tipologías de edificaciones y la generación de funciones o curvas de vulnerabilidad. *Spence et al.* (2005) realiza una estimación de la vulnerabilidad estructural de edificaciones a carga de ceniza, sobre la base de estudios analíticos, ensayos de laboratorio y análisis de daños observados, y derivan un conjunto de tipologías de edificaciones clasificadas según su vulnerabilidad a esta carga y proponen para esta tipología un conjunto de curvas de vulnerabilidad, aplicables en las regiones volcánicas europeas (inclusive sus territorios con actividad volcánica en ultramar).

Uno de los muchos aspectos interesantes de este programa para el estudio del volcán Galeras está en que hay significativa coincidencia, aunque parcial, entre las tipologías que identificó *Spence et al.* (2005) para territorios europeos con aquellas identificadas en el estudio de Ingeominas (1997) y el presente.

Uno de los insumos del trabajo de *Spence et al.* son los dos únicos estudios de casos de daños en edificaciones por carga de tefra sistemáticos y sobre muestras de tamaño significativo publicados hasta la fecha (Pinatubo por *Spence* en Mud&Fire, Rabaul por *Blong*).

¹⁵ SPENCE et al. (2005) “Residential building and occupant vulnerability to tephra fall” y Zuccaro et al., (2008),

Mecanismos de falla en techos. El estudio de Pinatubo encuentra que, en su orden, las causas de falla y colapso más comunes son: grandes luces (> 5m), estructuras de cubiertas de madera, grandes voladizos en techos; también concluyen que los daños fueron mayores en edificaciones no residenciales y que el efecto de la pendiente de cubiertas es ambiguo, sobre todo por el efecto de la humedad sobre el Angulo de reposo.

5.3.1 Modelos de vulnerabilidad disponibles en el Galeras. No existe información empírica de vulnerabilidad a carga de cenizas en el área de Galeras, pero Ingeominas realizó un trabajo riguroso y detallado sobre la vulnerabilidad de viviendas en el área del Galeras (1997), con base en análisis esfuerzo-deformación y especificaciones de cargas de otras normas.

En el primer proyecto de vulnerabilidad para el área del Galeras (López, 1997) se utilizó este recurso, aplicando procedimientos para cálculo de cargas vivas del código de sismo resistencia colombiano y procedimientos del Manual de Construcción en Madera de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC-Comunidad Andina).

De todo lo anterior se ha adoptado para la determinación de tipologías y la estimación de rangos de resistencias, resultados (disponibles parcialmente) del proyecto de Ingeominas (López, 1997) y, en lo procedimental, resultados publicados del proyecto EXPLORIS (Spence et al., 2005 et al.)

Del proyecto de Ingeominas sólo se tuvo a disposición una descripción del procedimiento (López, 1997)

En este proyecto solo se calcularon resistencias para las cinco (5) tipologías de cubiertas determinadas (livianas, moderadas, pesadas, losa maciza, losa aligerada), para varios valores de sollicitación en un rango de 1 Kpa a 10,9 Kpa pero no se calcularon funciones de vulnerabilidad completas, es decir, con probabilidad de daño para cada uno de los niveles de carga.

5.3.2 Análisis de sensibilidad de los datos para el chequeo estructural. En el marco del proyecto de Ingeominas (1997), se elaboraron diversos proyectos de grado, con lo cual se estableció las características constructivas predominantes de las tipologías de cubiertas clasificadas, en términos de distancias entre apoyos, secciones transversales de correas y armaduras, para el caso de cubiertas y para el caso de las losas, espesores y diámetro de refuerzos (varillas), entre otros. Sin embargo no fue posible acceder a todos estos proyectos, ni tampoco a los resultados desagregados de resistencias de la muestra de más de 7000 viviendas. Por otro lado se comparó los resultados con otros proyectos de grado posteriores, con la misma metodología de análisis. A pesar de esto, los resultados obtenidos en la comparación de siete (7) proyectos de grado presenta gran variabilidad en los datos de resistencias, debido a la alta sensibilidad de los componentes del sistema cubierta, al realizar el cálculo o chequeo estructural de las mismas para diferentes distancias entre apoyos y secciones transversales de elementos estructurales. En la siguiente tabla se relacionan los proyectos de grado y sus resultados.

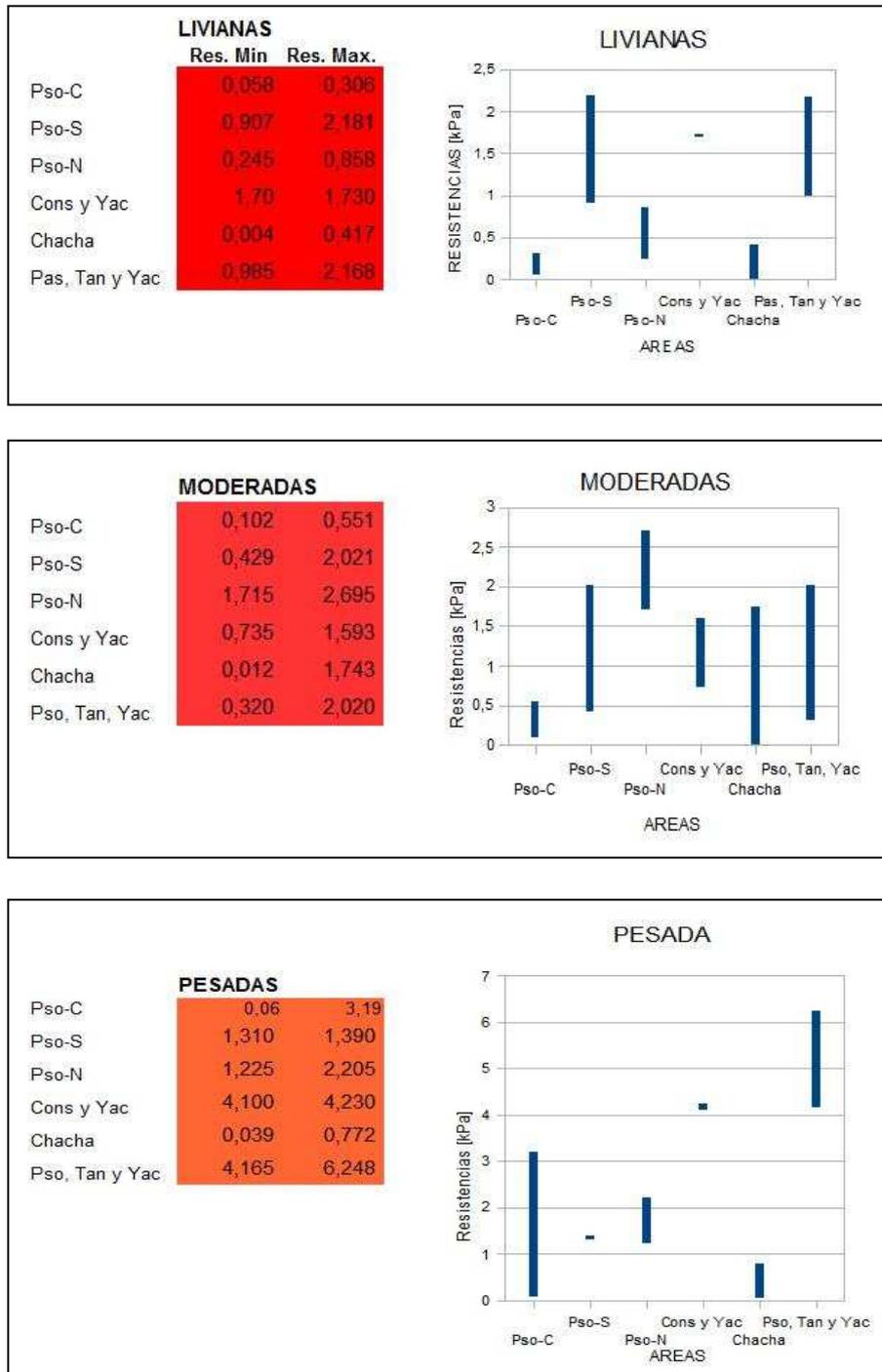
Tabla 3. Comparación resistencias de cubiertas en proyectos de grado

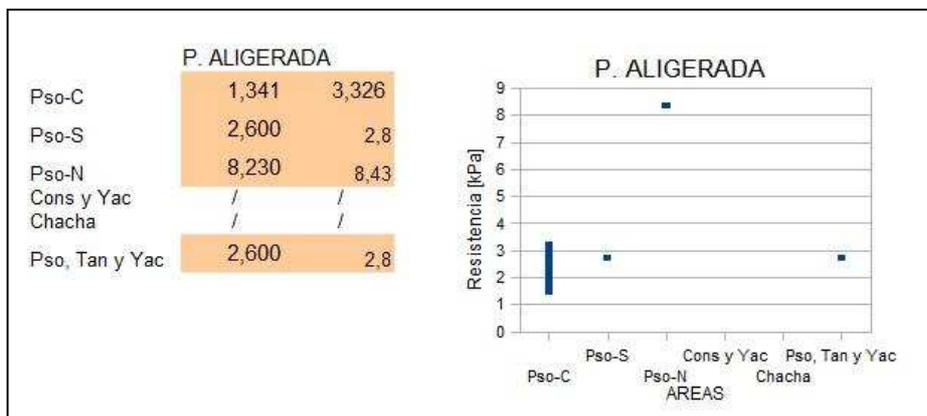
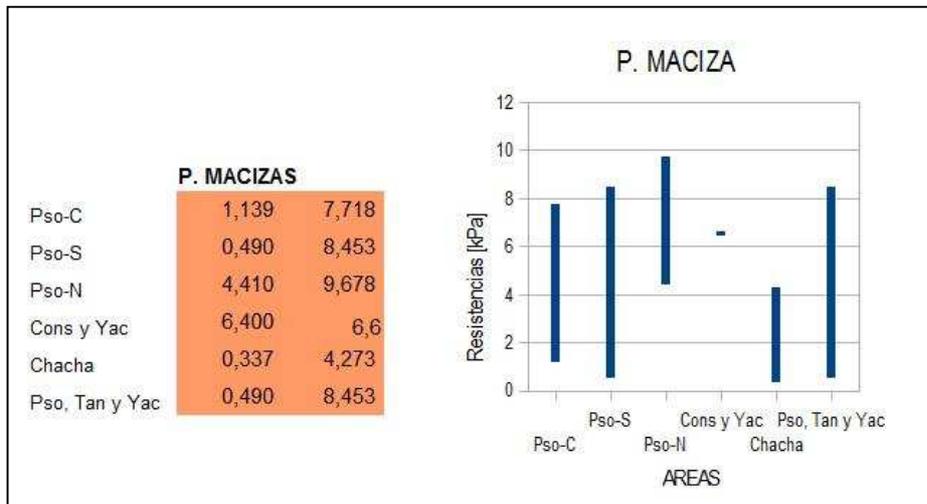
TIPO DE CUBIERTA		RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Centro Paato	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Paato Sur	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Paato norte	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Comaca - norte & Yacuarquer Sur	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Chachegui	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Paato, Tongua y Yacuarquer	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima
LIVIANA	I	entre 0,47 y 2,31	0,058	0,283	entre 7,4 y 17,8	0,907	2,181	entre 2 y 7	0,245	0,858	14	SD	1,715	entre 0,03 y 3,34	0,004	0,417	8,04 y 17,7	0,985	2,168
	II	2,5	0,306	SD															
MODERADA	III	entre 2,96 y 4,50	0,363	0,551	entre 3,5 y 16,5	0,429	2,021	entre 14 y 22	1,715	2,695	entre 6 y 13	0,735	1,593	entre 0,10 y 14,23	0,012	1,743	entre 2,61 y 16,49	0,320	2,020
	IV	entre 0,83 y 4,50	0,102	0,551															
PESADA	V	entre 2,46 y 19,52	0,102	2,389	11	SD	1,348	entre 10 y 18	1,225	2,205	34	SD	4,165	entre 0,32 y 6,30	0,039	0,772	entre 31 y 51	4,165	6,248
	VI	entre 0,52 y 26,01	0,064	3,185															
PLACA MACIZA		entre 9,31 y 63,03	1,139	7,718	Entre 4 y 69	0,490	8,453	Entre 36 y 79	4,410	9,678	53	SD	6,493	entre 2,75 y 34,88	0,337	4,273	entre 4 y 69	0,490	8,453
PLACA ALIGERADA		entre 10,95 y 27,15	1,341	3,326	22	SD	2,695	entre 68 y 420	8,330	51,450	SD	SD	SD	SD	SD	SD	22	SD	2,695

Fuente: Corporación OSSO

En las figuras siguientes se muestra gráficamente la gran variabilidad de los datos.

Figura 16. Comparación de datos de resistencias de proyectos de grado





Fuente: Corporación OSSO

Por otro lado, para propósitos del estudio de vulnerabilidad, se tomó los valores promedio de resistencia en términos de espesores de ceniza encontrados por Ingeominas, para modelar el daño en las cabeceras urbanas de los municipios de la zona de estudio por el escenario máximo de erupción, mayor a 5000 años que define el Ingeominas (1997), tomando como base el modelo de ceniza elaborado por la Corporación OSSO. Cabe resaltar que las losas macizas y aligeradas hacen parte de una misma categoría, a la cual se le asignó el valor promedio de la resistencia; de la misma manera que a la cubierta pesada. Para el caso de la cubierta liviana y moderada el valor de resistencia asignado corresponde a la resistencia propia de la teja.

Este modelamiento busca mostrar bajo un escenario de amenaza y unas condiciones de vulnerabilidad de las cubiertas en términos de su resistencia, la

posible distribución de daños en las cabeceras municipales. En la Tabla 4, se presenta los valores asignados para dicho cálculo.

Tabla 4. Tipo de cubierta vs resistencia

Tipo cubierta	Espesor ceniza (cm)	Resistencia (Kpa)
Liviana	2,5	0,307
Moderada	4,5	0,552
Pesada	23	2,82
Losa	45	5,52

5.4 DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE VULNERABILIDAD A CARGA DE CENIZA

5.4.1 Análisis estructural para determinar la resistencia de las cubiertas. El proceso de revisión o análisis estructural, es el punto de partida para determinar las funciones de vulnerabilidad; para esto se requiere relacionar, las propiedades de los materiales de construcción y su funcionamiento como parte fundamental de la estructura, y así establecer dichas funciones.

Para calcular la resistencia de cada cubierta se realizaron cálculos estructurales para las diferentes tipologías encontradas en la zona de estudio, teniendo en cuenta las solicitaciones a cargas a que se someten: carga muerta, carga viva o de barrido y sobrecarga adicional por ceniza; esta última se la considera estática y uniformemente distribuida, por que se acumula lentamente, por lo tanto es importante conocer el espesor de ceniza que lleva al colapso a la estructura. El método de revisión estructural para estructuras de madera que se adoptó fue el de esfuerzos admisibles y para losas en concreto se adopto el método de carga última (USD).

Se debe tener en cuenta que los cálculos son aproximaciones a la estructura real que constituyen los tipos de cubierta encontradas en el área de estudio, partiendo que estas no responden a diseños estructurales para que sean calculadas por métodos propuestos por manuales y normas de diseño, ya que estas edificaciones siguen procesos de autoconstrucción, de igual modo para las construidas en concreto reforzado que son edificadas sin permisos de una curaduría urbana o entes regionales reguladores del cumplimiento de las exigencias de diseño de la NSR – 98 (o su antecesor el CCCSR-84), que garanticen la asesoría de profesionales en ingeniería civil.

En el caso de las estructuras de cubierta en madera, en la zona de estudio predomina el uso de eucalipto en estado rollizo (estado natural y sin modificar su sección), por lo cual no se la puede considerar como madera estructural y por

consiguiente los esfuerzos de diseño que se presentan en los manuales no son aplicables a este tipo de madera.

Como se dijo anteriormente, al tratarse de una aproximación al comportamiento de estas estructuras y no encontrar literatura que ayude a acercarse a un chequeo mas adecuado, se empleara las estimaciones y esfuerzos considerados en el manual de diseño para maderas del grupo andino (JUNAC, 1984).

En cuanto a las cubiertas de concreto se emplea las consideraciones de la NSR – 98.

5.4.2 Análisis estructural para cubiertas de madera. El eucalipto tiene una densidad básica de 0.55 g/cm³, pertenece al grupo de las maderas del grupo estructural C. En la Tabla 5 se presentan los esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para maderas de este grupo.

Tabla 5. Esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad para maderas del grupo estructural C

Esfuerzos Admisibles (kg/cm²)	<i>Flexión (fm)</i>	<i>Tracción Paralela (ft)</i>	<i>Compresión Paralela (fc ||)</i>	<i>Compresión Perpendicular (fc ⊥)</i>	<i>Corte Paralelo (fv)</i>
	100	75	80	15	8
Módulos de Elasticidad (kg/cm²)	<i>E mínimo</i>			<i>E promedio</i>	
	55.000			90.000	

Fuente: JUNAC, 1984

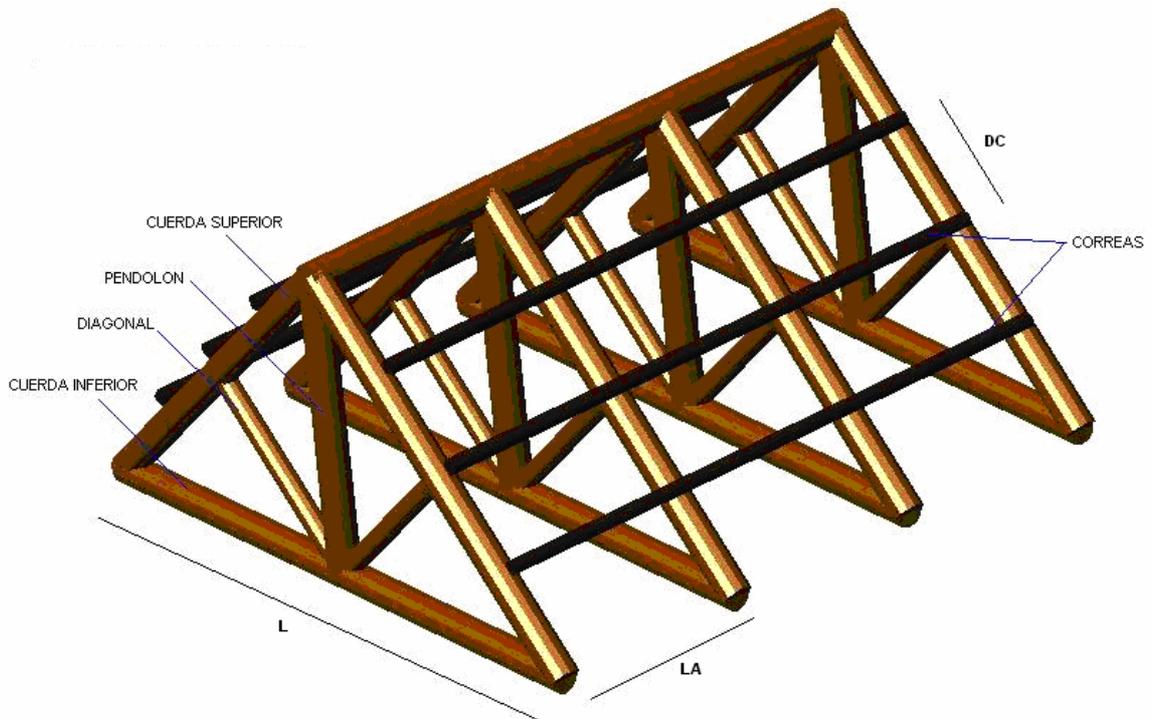
Para el análisis de cargas se tomaron valores de la NSR – 98 (Titulo B); en el caso particular de la ceniza, se tomo una densidad para ceniza húmeda de 1250 kg/m³ como carga crítica (Ingeominas).

Análisis de correas

El procedimiento de cálculo para las correas de las diferentes tipologías (liviana, moderada y pesada) es el mismo.

A continuación se presenta el procedimiento del análisis estructural para una cubierta pesada, teniendo en cuenta los esfuerzos admisibles y módulos de elasticidad, relacionados en la Tabla 5. Además las dimensiones para el ejemplo, se toman de la Tabla 1.

Figura 17. Estructura montante maestro para cubierta pesada



Datos:

Distancia entre armaduras (L_A) = 0.8 m

Diámetro de correas (ϕ_C) = 0.065 m

Área de correas (A_c) = 33.18 cm²

Distancia entre correas (D_C) = 1.50 m

Carga viva (WL) = 35 Kg/m²

Carga muerta: Peso propio de la correa (W_C)= 1.99 Kg/m²

 Peso teja de barro (W_t)= 75 Kg/m²

$\gamma_{ca} = 1250 \text{ Kg/m}^3$

Cálculos:

MÓDULO DE SECCIÓN TRANSVERSAL

$$Z = \frac{\pi \phi_C^3}{32}$$

$$Z = 26.96 \text{ cm}^3$$

Momento máximo (M_{\max}):

$$M_{\max} = f_m * Z$$

$$M_{\max} = 26.96 \text{Kg.m}$$

Carga total repartida por correa (WTR):
(Viga simplemente apoyada)

$$WTR = \frac{8 * M_{\max}}{L_A}$$

$$WTR = 528.29 \text{Kg / m}$$

Carga total (WT):

$$WT = \frac{WTR}{D_C}$$

$$WT = 224.68 \text{Kg / m}^2$$

Carga adicional por acumulación de ceniza (W_{cza}):

$$W_{cza} = WT - W_c - W_t - W_L$$

$$W_{cza} = 112.69 \text{Kg / m}^2$$

Espesor de ceniza (e):

$$e = \frac{W_{cza}}{\gamma_{cza}}$$

$$e = 0.09 \text{m}$$

MOMENTO DE INERCIA POR LIMITACIÓN DE DEFLEXIONES

$$I = \frac{\pi \phi_C^4}{64}$$

$$I = 87.62 \text{cm}^4$$

Carga total repartida por correa (WTR):
(Viga simplemente apoyada)

$$WTR = \frac{384 * I * E}{5 * L_A * k} \quad k = 250$$

$$WTR = 473.17 \text{Kg / m}$$

Carga total (WT):

$$WT = \frac{WTR}{D_c}$$

$$WT = 315.45 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

Carga adicional por acumulación de ceniza (W_{cza}):

$$W_{cza} = WT - W_c - W_t - W_L$$

$$W_{cza} = 203.46 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

Espesor de ceniza (e):

$$e = \frac{W_{cza}}{\gamma_{cza}}$$

$$e = 0.16 \text{ m}$$

POR ACCIÓN DEL ESFUERZO CORTANTE

Fuerza cortante en la sección crítica a una distancia h del apoyo.

$$V_h = \frac{f_v * A_c}{1.5}$$

$$V_h = 176.98 \text{ Kg}$$

Carga total repartida por correa (WTR):

$$WTR = \frac{2 * V_h}{L_A - 2 * \phi_c}$$

$$WTR = 473.17 \text{ Kg} / \text{m}$$

Carga total (WT):

$$WT = \frac{WTR}{D_c}$$

$$WT = 352.19 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

Carga adicional por acumulación de ceniza (W_{cza}):

$$W_{cza} = WT - W_c - W_t - W_L$$

$$W_{cza} = 240.20 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

Espesor de ceniza (e):

$$e = \frac{W_{cza}}{\gamma_{cza}}$$

$$e = 0.19m$$

Tabla 6. Resumen de resistencia del ejemplo

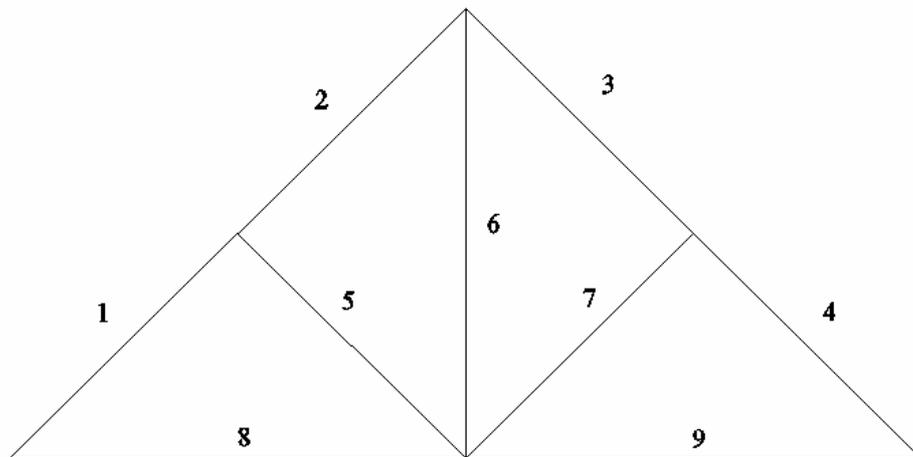
Analisis por:	e (m)	e (cm)	Kg/m2	Kpa
MODULO DE SECCION TRANSVERSAL	0,09	9,0	112,69	1,105
LIMITACION DE DEFLEXIONES	0,16	16,3	203,46	1,996
ESFUERZO CORTANTE	0,19	19,2	240,20	2,356

Se escoge el valor critico (BAJO) de resistencia a la carga sobre impuesta; en este caso la falla en las correas se produce por el modulo de sección transversal a los 9 cm de ceniza o en términos de carga a los 1,105 KPa.

Análisis de la armadura

Con el espesor que produce la falla en las correas se realiza un chequeo de los elementos de la armadura.

Figura 18. Elementos para análisis montante maestro



Datos:

Distancia entre apoyos (L) = 3.5 m

$\alpha = 30^\circ$

Diámetro diagonales (ϕ_d) = 0.09 m

Diámetro cuerda superior e inferior y pendolón (ϕ_{CsiP}) = 0.09 m

Peso por metro de diagonales (P_d) = 5.73 Kg/m

Peso por metro de cuerda superior e inferior y pendolón (P_{CsiP}) = 5.73 Kg/m

Suma de las longitudes de las diagonales (L_d) = 2.02 m

Suma de las longitud de las cuerdas superior, inferior y pendolón (L_{CsiP}) = 8.55 m

Peso Cielo raso (P_{CR}) = 90Kg/m²

Cálculos:

Carga con proyección en el plano horizontal (WH):

$$WH = \frac{W_c + W_t + W_{cza}}{\cos \alpha}$$

$$WH = 218.81 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

Peso de la armadura (WA):

$$WA = \frac{(P_d * L_d + P_{CsiP} * L_{CsiP})}{(L * L_A)}$$

$$WA = 21.62 \text{ Kg} / \text{m}^2$$

Carga uniformemente repartida sobre las cuerdas superiores (Wp):

$$Wp = (WH + WA + WL) * L_A$$

$$Wp = 220.34 \text{ Kg} / \text{m}$$

Carga uniformemente repartida sobre las cuerdas inferiores (Wq):

$$Wq = W_{CR} * L_A$$

$$Wq = 112.5 \text{ Kg} / \text{m}$$

Carga concentrada sobre las cuerdas superiores (P):

$$P = \frac{Wp * L}{4}$$

$$P = 192.80 \text{ Kg}$$

Carga concentrada sobre las cuerdas inferiores (Q):

$$Q = \frac{Wq * L}{2}$$
$$Q = 196.87$$

Análisis de elementos: los componentes críticos en este tipo de armadura son los elementos 1 y 4 (Ver Figura 31, y fallan a flexo-compresión.

Longitud para momento (L_m) :

$$L_m = \frac{L}{4}$$
$$L_m = 0.88m$$

Momento flector máximo en el elemento en valor absoluto (M):

$$M = \frac{Wp * L^2}{10}$$
$$M = 16.87Kg.m$$

Longitud efectiva (L_{ef}):

$$L_{ef} = 0.4 * (E1 + E2)$$
$$L_{ef} = 0.81m$$

Relación de esbeltez (λ):

$$\lambda = \frac{L_{ef}}{\phi_{CsiP}}$$
$$\lambda = 8.98$$

Como $\lambda < 10$, se toma el elemento como columna corta

Carga axial admisible (N_{adm}):

$$N_{adm} = f_c * A_{Cs}$$
$$N_{adm} = 5089.38Kg$$

Carga crítica de Euler (Ncr):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{L_{ef}^2}$$
$$N_{cr} = 26758.86Kg$$

Factor de magnificación de momentos debido a la presencia de la carga axial (Kma):

$$K_{ma} = \frac{1}{(1 - 1.5 * \frac{N}{N_{cr}})}$$

N es la carga axial sobre el elemento que falla (Elemento 1 y 4):

$$N = \frac{P * 1.5}{\text{Sen} \alpha} + \frac{Q * 0.5}{\text{Sen} \alpha}$$
$$N = 775.27Kg$$

Por lo tanto:

$$K_{ma} = 1.05$$

Modulo de sección transversal con respecto al eje alrededor del cual se produce flexión (Z):

$$Z = \frac{\pi * \phi_{CsiP}^3}{32}$$
$$Z = 71.57cm^3$$

Condición de falla (FC):

$$FC = \frac{N}{N_{adm}} + \frac{(K_{ma} * |M|)}{(Z * f_m)}$$
$$FC = 0.4$$

Cuando $FC \geq 1$ la estructura colapsa

Después de realizar un proceso iterativo, aumentando la carga por ceniza se encontró que el elemento a flexo-compresión falla con un espesor de ceniza igual

a 38 cm o en términos de carga 4,66 KPa, que es mucho mayor que el valor que produce falla en las correas.

Con los resultados anteriores se obtuvieron datos donde se concluye que la falla se produce en las correas y luego en la armadura, lo que indica que el espesor de ceniza que es crítico para las correas no es crítico para la armadura, aunque se podría decir que iniciaría una falla gradual y progresiva hasta llegar al colapso total de la cubierta.

5.4.3 Análisis estructural para losas. El procedimiento del análisis estructural para losa maciza y aligerada es el mismo, tomando que las nervaduras de la losa aligerada se comportan como viga rectangular, según su geometría, refuerzo y las propiedades de los materiales.

Datos:

Materiales Concreto (f'_c): 210 Kg/cm²
 Refuerzo (f_y): 4200 Kg/cm²

Área de refuerzo (A_s)

Distancia entre apoyos (L)

Ancho aferente (b)

Altura efectiva (d)

Factor de reducción de resistencia (ϕ)

Cálculos:

Análisis de cargas Carga muerta (W_D)
 Carga viva (W_L): 180 Kg/m²

Calculo de la cuantía (ρ):

$$\rho = \frac{A_s}{b * d}$$

Coeficiente de diseño que expresa la relación del momento de diseño al producto del área y profundidad efectiva (K):

$$K = \phi * \rho * f_y * \left(1 - 0.59 * \rho * \frac{f_y}{f'_c}\right)$$

Momento resistente (M_r):

$$M_r = K * b * d^2$$

Carga resistente (W_r):

$$W_r = \frac{Mr * 8}{L^2}$$

Factor de carga (U):

$$U = \frac{(1.4 * W_D + 1.7 * W_L)}{W_D + W_L}$$

Carga total (WT):

$$WT = \frac{W_r}{U}$$

Carga adicional por acumulación de ceniza (W_{cza}):

$$W_{cza} = \frac{WT}{b} - W_D - W_L$$

Espesor de ceniza (e):

$$e = \frac{W_{cza}}{\gamma_{cza}}$$

5.4.4 Resultado análisis estructural. Mediante los anteriores procedimientos se calcularon las cargas máximas, medias y mínimas que puede soportar una cubierta. Para el caso de las cubiertas (liviana, moderada y pesada), la resistencia estimada de la estructura y para propósitos del análisis de probabilidad de colapso se estimó por falla de las correas, ya que se demostró que las correas tienen menor resistencia que la armadura. En las Tablas 7 y 8 se presenta la resistencias en términos de espesor de ceniza en (cm) y en capacidad de carga (Kpa) respectivamente.

Tabla 7. Resistencias por espesor de ceniza en cm

<i>Tipo de cubierta</i>	<i>Resistencia baja</i>	<i>Resistencia media</i>	<i>Resistencia alta</i>
<i>Liviana</i>	1,8	3,7	9,2
<i>Moderada</i>	1,2	6	11,7
<i>Pesada</i>	2	9	38,6
<i>Losa maciza</i>	18	33	50
<i>Losa aligerada</i>	16	34	89

Tabla 8. Resistencias por carga de ceniza en KPa

<i>Tipo de cubierta</i>	<i>Resistencia baja</i>	<i>Resistencia media</i>	<i>Resistencia alta</i>
<i>Liviana</i>	0,22	0,45	1,13
<i>Moderada</i>	0,15	0,74	1,43
<i>Pesada</i>	0,25	1,10	4,73
<i>Losa maciza</i>	2,21	4,05	6,13
<i>Losa aligerada</i>	1,96	4,17	10,91

Como se observa en la tabla anterior los valores de resistencias por falla en las correas a carga de ceniza de las cubiertas livianas y moderadas están muy cercanas, por lo tanto y para propósito de la definición de las funciones de vulnerabilidad de cubiertas, se decidió agrupar a estas dos tipologías en una sola (Tipo A)¹⁶. En la Figura 39, se presentan las curvas de vulnerabilidad para cuatro tipos de cubiertas: Tipo A, B, C y D.

Figura 19. Curvas de vulnerabilidad de cubiertas por ceniza Volcánica para el Galeras



¹⁶ Es necesario precisar que la resistencia del material de cobertura de la teja de zinc de una vivienda liviana es menos resistente que una teja de asbesto cemento o fibro cemento, sin embargo el criterio de la falla por colapso de cubierta se asume por la resistencia de las correas.

6. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FUNCIONAL DE EDIFICACIONES

6.1 LA MATRIZ DE INTERDEPENDENCIA

Para evaluar la vulnerabilidad funcional, de los elementos del área de estudio, se construyó una matriz de interdependencia de los elementos que componen cada cubierta, calificando dos parámetros: el nivel de importancia (NI) y el nivel de dependencia (ND), el primero está relacionado con la importancia de de cada uno de los componentes en relación con la función dentro de la cubierta y el segundo, está asociado al grado de dependencia de cada elemento, en particular para poder funcionar. Al elaborar este análisis hay que tener en cuenta que aún más importantes que los factores en sí mismos, son las interrelaciones que existen entre ellos. Ese conjunto de interrelaciones constituye la base fundamental para aumentar la resiliencia, es decir la capacidad de recuperarse en un corto tiempo.

Para calificar esta matriz se ha asignando una puntuación de [0] para dependencia nula, [1] para baja, [3] para media y [5] para dependencia alta. A este proceso se le denomina ponderación de clases.

A continuación, se muestra el análisis realizado a cada uno de los componentes que conforman una cubierta, para estimar su vulnerabilidad dentro del sistema y comparar la vulnerabilidad entre tipologías de cubiertas, a partir de la definición y calificación de nueve (9) indicadores para el caso de cubierta en teja y seis (6) indicadores para losas.

En la Tabla 9, se presenta el análisis para cubierta de teja.

Tabla 9. Matriz de interdependencia de componentes en cubierta de teja

Elemento de apoyo										
Elemento dependiente	Resistencia de la cobertura o teja	Distancia entre Armaduras	Tipo estructura de soporte	Distancia entre elementos de soporte (Correas)	Sección elementos de soporte	Uniones o conexiones	Inclinación cubierta	Material de soporte	Estado conservación de la estructura	Total dependencia
Resistencia de la cobertura o teja	0	0	3	5	3	1	5	1	5	23
Distancia entre Armaduras o apoyos	1	0	5	0	5	3	0	3	0	17
Tipo estructura de soporte	3	5	0	1	5	5	1	3	0	23
Distancia entre elementos de soporte (Correas)	5	1	3	0	3	3	0	1	1	17
Sección elementos de soporte	0	3	3	3	0	3	1	5	0	18
Uniones o conexiones	0	3	3	3	3	0	3	3	3	21
Inclinación cubierta	3	0	5	0	3	1	0	1	1	14
Material de soporte	3	3	1	3	0	0	1	0	0	11
Estado conservación de la estructura	3	1	1	1	1	3	3	5	0	18
Total importancia	18	16	24	16	23	19	14	22	10	

Como se observa el elemento más importante dentro del sistema de cubierta y califica con el valor más alto es el tipo de estructura de soporte, seguido por la sección de los elementos de soporte y en tercer puesto el material de soporte. Lo anterior indica que la vulnerabilidad de un sistema de cubierta depende de estos tres elementos. De otro lado los elementos que dependen en gran medida de los otros para cumplir su función son: en un mismo nivel la resistencia de la cobertura del techo y el tipo de estructura de soporte, seguido por las uniones o conexiones.

En las Figuras 20 y 21 se representa gráficamente lo anterior

Figura 20. Importancia de los elementos de un sistema de cubierta

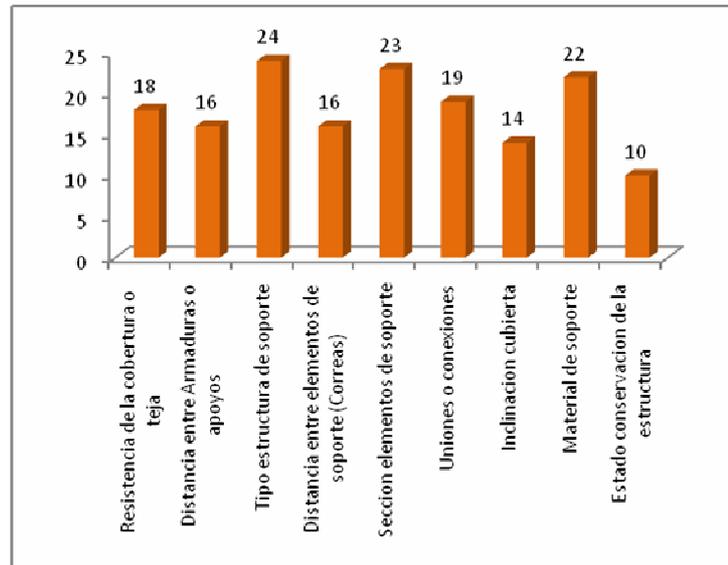
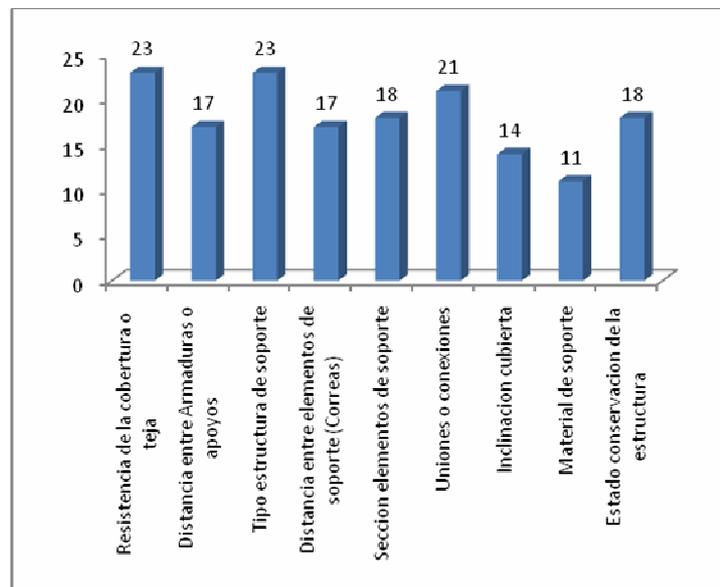


Figura 21. Dependencia de los elementos de un sistema de cubierta



En la Tabla 10, se presenta el análisis para las losas.

Tabla 10. Matriz de interdependencia de componentes en losas de concreto

Elemento dependiente		Elemento de apoyo						Total dependencia
		Espesor	Sistema estructural	Distancia entre apoyos	Resistencia de la estructural	Estado conservación estructura	Calidad de los materiales	
Espesor	0	5	5	3	0	1	14	
Sistema estructural	0	0	5	3	0	0	8	
Distancia entre apoyos	0	5	0	3	0	1	9	
Resistencia de la estructura	5	5	3	0	3	5	21	
Estado conservación estructura	3	1	3	3	0	5	15	
Calidad de los materiales	0	3	1	3	1	0	8	
Total importancia	8	19	17	15	4	12		

Como se observa en la Tabla 10 el elemento más importante dentro del sistema de cubierta de losa en concreto es el sistema estructural, seguido por la distancia entre apoyos y la resistencia de la estructura. (Ver en siguientes figuras, la importancia y la dependencia de los elementos)

Figura 22. Importancia de elementos sistema losa

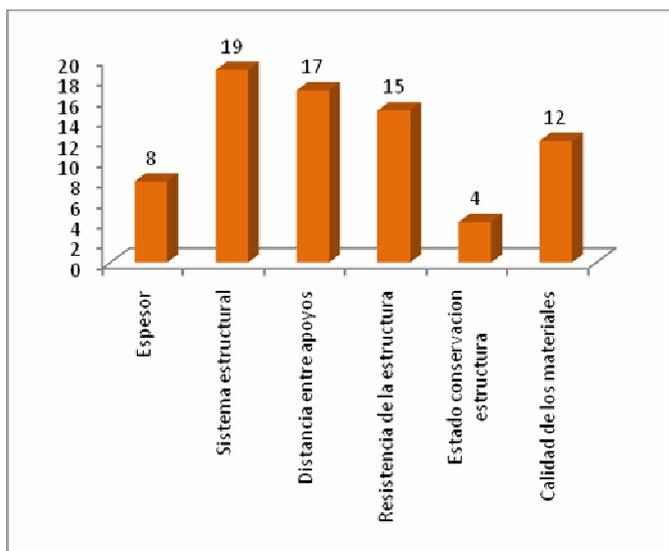
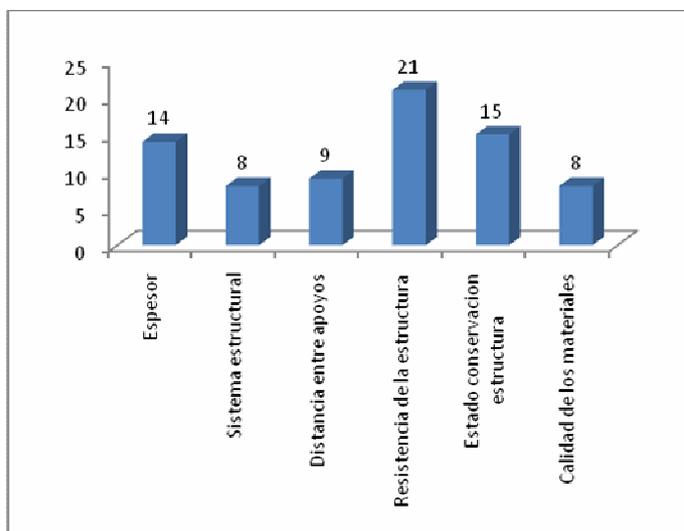


Figura 23. Dependencia de elementos del sistema losa



A partir de la determinación y categorización del grado de importancia de los elementos que componen los sistemas de cubierta de madera y losa, se procedió a definir tres (3) indicadores de vulnerabilidad (IV), para cada uno de ellos y se definió una ponderación ó peso para calificarlos, a partir de criterios de comportamiento estructural, calidad y resistencia de materiales y estado de conservación. Los valores definidos fueron [1] para la condición más favorable, [5] para una condición de favorabilidad intermedia y [10] para una condición más desfavorable. Estos se presentan en las tablas siguientes.

Tabla 11. Calificación de indicadores de vulnerabilidad de cubiertas en teja

<i>ELEMENTO</i>	<i>Variables</i>	<i>Peso componente</i>	<i>Peso opción</i>
CUBIERTA EN TEJA	Tipo estructura de soporte	.....24	
	Simple (Correas)		.....10
	Compuesta (Vigas y correas)		.....5
	Varios elementos (Armaduras, vigas y correas)		.....1
	Sección elementos de soporte	.....23	
	Pequeña (D < 8cm)		.....10
	Moderada (D 8cm<=>12cm)		.....5
	Grande (D > 12cm)		.....1
	Material de soporte	.....22	
	Madera		.....10
	Metal		.....3
	Concreto		.....1
	Uniones o conexiones	.....19	
	Deficientes (simplemente conectadas: con clavos insuficientes o amarradas con lasos)		.....10
	Eficientes (bien conectadas, pernadas o con clavos y/o bien amarradas con alambre)		.....1
	Resistencia de la cobertura o teja	.....18	
	Baja (Zinc)		.....10
	Moderada (Eternit, Barro)		.....5
	Distancia entre elementos de soporte (Correas)	.....16	
	Amplia (> 2.5m)		.....10
	Moderada (1.5m<=>2.5m)		.....5
	Cortas (< 1.5m)		.....1
	Distancia entre Armaduras o apoyos	.....16	
	Luces amplias (> 4m)		.....10
	Luces moderadas (1.5m <=> 4m)		.....5
	Luces cortas (< 1.5m)		.....1
	Inclinación cubierta	.....14	
	< 20°		.....10
	20°- 35°		.....5
	> 35°		.....1
Estado conservación de la estructura	.....10		
Malo		.....10	
Bueno		.....1	

El valor de sumatoria de calificación más alto posible es 1620, un intermedio de 811 y el valor más bajo es de 234.

Tabla 12. Calificación de indicadores de vulnerabilidad de losas de concreto

<i>ELEMENTO</i>	<i>Variables</i>	<i>Peso componente</i>	<i>Peso opción</i>
CUBIERTAS EN LOSA	Sistema estructural	.....19	
	En una dirección		.....5
	En dos direcciones		.....1
	Distancia entre apoyos	.....17	
	Amplia (5m)		.....10
	Moderada (4m)		.....5
	Cortas (3m)		.....1
	Resistencia de la estructura	.....15	
	Baja		.....3
	Moderada		.....1
	Calidad de los materiales	.....12	
	Malo		.....5
	Bueno		.....1
	Espesor	.....8	
	Pequeño (<12cm)		.....10
	Moderado (12cm <=> 20cm)		.....5
	Grande (>20cm)		.....1
	Estado conservación estructura	.....4	
	Malo		.....10
	Bueno		.....1

El valor sumatoria de calificación más alto posible es 490, un intermedio de 253 y el valor más bajo es de 75.

Teniendo en cuenta los criterios de calificación de vulnerabilidad de cubiertas y los pesos asignados, se determinó y comparó la vulnerabilidad de las tres tipologías de cubiertas definidas en el área de estudio (liviana, moderada y pesada). Los resultados indican que por sus características constructivas y estructurales las más vulnerables a la caída de ceniza resultan siendo las cubiertas livianas, seguidas por las moderadas y las pesadas, esta última resulta siendo la mas resistente.

Esto se explica en primera instancia, debido a que la conformación estructural de una cubierta pesada presenta mayor cantidad de elementos que se interconectan entre sí, (armaduras, correas y elementos de apoyo para tejas de barro (caña brava)) que se colocan a distancias más cortas en comparación de las cubiertas livianas y moderadas, debido al tamaño de la teja, que junto con la caña brava conforma una estructura articulada y flexible que puede distribuir mejor las cargas a la que esta puede estar sometida, a diferencia de la teja de zinc o teja de

asbesto cemento, que por sus características funcionales pueden cubrir luces mayores, mediante apoyos simples, con espesores de elementos estructurales (vigas y/o correas) de menor sección por el peso de la teja, en comparación con los espesores utilizados para cargar teja de barro, pueden resultar más frágiles sometidas a carga de ceniza volcánica por ejemplo. En la siguiente tabla se presentan estos resultados.

Tabla 13. Comparación vulnerabilidad de cubiertas

<i>Variables</i>	<i>Peso componente</i>	<i>Peso opción</i>	Cubierta liviana	Cubierta moderada	Cubierta pesada
Tipo estructura de soporte	.....24				
Simple (Correas)		.....10	240	120	24
Compuesta (Vigas y correas)		.....5			
Vernacular (Cerchas, vigas y correas)		.....1			
Sección elementos de soporte	.....23				
Pequeña (D < 8cm)		.....10	230	115	23
Moderada (D 8cm<=>12cm)		.....5			
Grande (D > 12cm)		.....1			
Material de soporte	.....22				
Madera		.....10	220	220	220
Metal		.....3			
Concreto		.....1			
Uniones o conexiones	.....19				
Deficientes		.....10	19	19	19
Eficientes		.....1			
Resistencia de la cobertura o teja	.....18				
Baja (Zinc)		.....10	180	90	90
Moderada (Eternit, Barro)		.....5			
Distancia entre elementos de soporte (Correas)	.....16				
Amplia (> 2.5m)		.....10	160	80	16
Moderada (1.5m<=>2.5m)		.....5			
Cortas (< 1.5m)		.....1			
Distancia entre Armaduras o apoyos	.....16				
Luces amplias (> 4m)		.....10	80	80	16
Luces moderadas (1.5m <=> 4m)		.....5			
Luces cortas (< 1.5m)		.....1			
Inclinación cubierta	.....14				
< 20°		.....10	140	70	70
20° - 35°		.....5			
> 35°		.....1			
Estado conservación de la estructura	.....10				
Malo		.....10	10	10	10
Bueno		.....1			
TOTAL			1279	804	488

7. DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS POR EL ESCENARIO MÁXIMO PROBABLE DE ERUPCIÓN VOLCÁNICA

7.1 DETERMINACIÓN DE LA SOLICITACIÓN DE CARGA DE CENIZA.

A partir del modelo de dispersión y acumulación de ceniza de la corporación OSSO, como escenario probable de la erupción mayor a 5000 años que define el Ingeominas (1997), se tomó un valor promedio de las cantidades de espesor de ceniza que establece el modelo para el área de la cabecera municipal, Ver tabla 14.

Tabla 14. Espesor de ceniza promedio para las cabeceras municipales según el modelo de dispersión y acumulación (Corporación OSSO)

MUNICIPIO	ESPESOR CENIZA (cm)
Ancuya	12,91
Chachagüí	9,90
Linares	8,32
El Tambo	10,22
Tángua	17,76

7.2 CÁLCULO DE DAÑO PARA EL ESCENARIO MÁXIMO PROBABLE DEL VOLCÁN GALERAS.

Con el inventario de viviendas de ocupación normal citado en el numeral 5.2.3, y relacionando cada vivienda a la manzana representativa DANE, se organizó de acuerdo al tipo de cubierta con el fin de llevar un orden lógico de los datos y establecer un ángulo promedio de inclinación para cada tipo de cubierta, el cual sirvió como base para calcular el factor de reducción por pendiente (FRP), igual al coseno del ángulo promedio, afectando con este resultado la solicitud del modelo de dispersión y acumulación de ceniza de la Corporación OSSO, con el cual se determinó el índice de vulnerabilidad para cada tipo de cubierta, relacionando la solicitud afectada por el FRP con su resistencia (Ver Tabla 8), para lo cual se estableció unos rangos de análisis según criterio del grupo evaluador, basado en el análisis del comportamiento estructural el cual determina si los daños son recuperables o no. Ver tabla 15.

Tabla 15. Rangos de daños

DAÑO	RANGOS
COLAPSO	>1
GRAVE	0,75 - 1
MODERADO	0,5 - 0,75
PARCIAL	0,2 - 0,5
LEVE	0 - 0,2

7.2.1 Ejemplo de cálculo de daño. A continuación se presenta el procedimiento para el cálculo de daño para una manzana del municipio de El Tambo.

Datos:

Código manzana DANE: 52260100010408

Numero cubiertas pesadas: 4

Angulo de inclinación promedio cubiertas pesadas (α_p): 30°

Resistencia cubierta pesada (R_p): 23 cm (Tabla 8)

Numero cubiertas moderadas: 2

Angulo de inclinación promedio cubiertas moderadas (α_M): 18°

Resistencia cubierta moderada (R_M): 4,5 cm (Tabla 8)

Solicitud de ceniza municipio de El Tambo (Sc): 10,22 cm (tabla 18)

Calculos:

Factor de reducción por pendiente (FRP). Como se explico anteriormente este es el coseno del ángulo de inclinación de la cubierta. Entonces:

$$\begin{aligned} \text{Cubiertas pesadas } FRP &= \text{Cos} \alpha_p \\ FRP &= 0.866 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cubiertas moderadas } FRP &= \text{Cos} \alpha_M \\ FRP &= 0.866 \end{aligned}$$

Solicitud por carga de ceniza afectada por el FRP (Scf). La solicitud arrojada por el modelo de dispersión y acumulación de ceniza, para el municipio de El Tambo es de 10,22 cm de ceniza en el área del casco urbano. Entonces el valor para el cálculo será:

$$\begin{aligned} \text{Cubiertas pesadas } Scf &= Sc * FRP \\ Scf &= 8.851 \text{cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cubiertas moderadas} \quad Scf &= Sc * FRP \\ Scf &= 9.720cm \end{aligned}$$

Índice de vulnerabilidad (Iv). Como se explico en el modelamiento de la vulnerabilidad, este se calcula a partir de la siguiente formula:

$$\begin{aligned} \text{Cubiertas pesadas} \quad Iv &= \frac{Scf}{R_p} \\ Iv &= 0.385 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Cubiertas moderadas} \quad Iv &= \frac{Scf}{R_M} \\ Iv &= 2.160 \end{aligned}$$

Daño en la cubierta. Con el dato de índice de vulnerabilidad (Iv) y el rango de daños (Tabla 10), se puede determinar el daño para cada tipo de cubierta.

El Iv para cubiertas pesadas en esta manzana se encuentra en el rango de 0.2 – 0.5, el daño esperable será: PARCIAL.

El Iv para cubiertas moderadas en esta manzana se encuentra en el rango de mayor que 1, el daño esperable será: COLAPSO.

7.3 RESULTADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE DAÑO PARA LOS MUNICIPIOS DE ESTUDIO.

Los resultados consignados en la Tabla 16 muestran el número de viviendas afectadas según el tipo de cubierta, para el escenario probable de la erupción mayor a 5000 años que define el Ingeominas, para el fenómeno de caída piroclástica.

Para una presentación detallada en los anexos A – E se muestran la distribución de daño por manzana DANE, donde se indica el número de viviendas para cada tipo de cubierta y el daño esperado con el escenario máximo probable de caída de ceniza.

Tabla 16. Viviendas afectadas según el tipo de cubierta

ANCUYA					
DAÑO	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	1	101	0	102
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	33	0	0	0	33
PARCIAL	64	0	0	271	335
LEVE	0	0	0	0	0
CHACAHGÜÍ					
DAÑO	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	5	260	0	265
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	0	0	0	0	0
PARCIAL	82	0	0	273	355
LEVE	0	0	0	0	0
LINARES					
DAÑO	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	2	130	0	132
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	0	0	0	0	0
PARCIAL	102	0	0	0	102
LEVE	0	0	0	185	185
EL TAMBO					
DAÑO	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	91	271	0	362
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	0	0	0	0	0
PARCIAL	375	0	0	549	924
LEVE	0	0	0	0	0
TÁNGUA					
DAÑO	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	11	153	0	164
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	236	0	0	0	236
PARCIAL	0	0	0	177	177
LEVE	0	0	0	0	0

8. CONCLUSIONES

Los principales factores que contribuyen a los desastres volcánicos incluyen la falta de un mapa preciso de las amenazas volcánicas y el crecimiento continuo de las poblaciones, dando como resultado que muchas personas viven en área de actividad volcánica.

El modelo de dispersión y acumulación de ceniza desarrollado por la corporación OSSO Para una erupción con un periodo de retorno de 5000 años, prioriza en una idea mas real del comportamiento de este fenómeno teniendo en cuenta factores como la distancia, el relieve y el viento.

Las erupciones volcánicas son eventos naturales, cuya ocurrencia no puede ser evitada, por lo tanto aquellas regiones, zonas o ciudades que estén expuestas, deben de estar preparados para mitigar sus efectos reduciendo la vulnerabilidad de las edificaciones, que es lo único intervenible y modificable. Claro esta en las zonas donde sea posible según su ubicación con la amenaza.

La construcción de edificaciones con procesos de autoconstrucción utilizando materiales inapropiados e informales, en gran porcentaje se construyen sin considerar normativas sismo resistentes y sin especificaciones técnicas adecuadas, lo que las hace poco confiables; todo ello repercute en un incremento de su vulnerabilidad.

El inventario y la documentación estudiada constituyeron la base para la construcción de un modelo representativo de los tipos de cubierta.

Los resultados del análisis permitieron obtener curvas de vulnerabilidad en función de la probabilidad de colapso y la sobrecarga por acumulación de ceniza, así mismo también representar la distribución del daño.

El modelo de dispersión y acumulación de ceniza para una erupción con un periodo de retorno de 5000 años, genero los siguientes espesores promedio para las cabeceras municipales: Ancuya, 12.91 cm. Chachagüí, 9.90 cm. Linares, 8.38. El Tambo, 10.22 cm. Tángua, 17.76 cm.

Del análisis realizado a las cubiertas pesadas se concluye que la falla se produce en las correas y luego en la armadura, lo que indica que el espesor de ceniza que es critico para las correas no es critico para la armadura, aunque se podría decir que iniciaría una falla gradual y progresiva hasta llegar al colapso total de la cubierta.

A partir de la matriz de interdependencia para cubiertas en teja, se obtuvo que el tipo de estructura de soporte, seguido por la sección de los elementos de soporte y el material de soporte son los elementos más importantes en el sistema de cubierta y por siguiente son los indicadores más notorios de su vulnerabilidad. De otro lado los elementos que dependen en gran medida de los otros para cumplir su función son: en un mismo nivel la resistencia de la cobertura del techo y el tipo de estructura de soporte, seguido por las uniones o conexiones.

Los resultados indican que por sus características constructivas y estructurales las cubiertas en teja más vulnerables a la caída de ceniza son las cubiertas livianas, seguidas por las moderadas y las pesadas.

A partir de la matriz de interdependencia para losas, se obtuvo que elemento más importante dentro del sistema de cubierta de losa en concreto es el sistema estructural, seguido por la distancia entre apoyos y la resistencia de la estructura.

El daño calculado para las cubiertas de las edificaciones de ocupación normal, en función de la resistencia, ángulo de inclinación y la sollicitación; para un escenario de una erupción del volcán Galeras con un periodo de retorno de 5000 años, proporcionó los siguientes resultados:

Casco urbano del municipio de Ancuya: Colapso en cubiertas livianas y moderadas, daño Moderado en cubiertas pesadas y daño Parcial en las losas.

Casco urbano del municipio de Chachagüí: Colapso en cubiertas livianas y moderadas, daño Parcial en cubiertas pesadas y losas.

Casco urbano del municipio de Linares: Colapso en cubiertas livianas y moderadas, daño Parcial en cubiertas pesadas y daño Leve en las losas.

Casco urbano del municipio de El Tambo: Colapso en cubiertas livianas y moderadas, daño Parcial en cubiertas pesadas y losas.

Casco urbano del municipio de Tángua: Colapso en cubiertas livianas y moderadas, daño Moderado en cubiertas pesadas y daño Parcial en las losas.

El proyecto generó insumos cartográficos, documentales, gráficos, fotográficos y fílmicos, que pueden utilizarse para la generación de estrategias educativas masivas tendientes a capacitar las comunidades e instituciones en la gestión de riesgos, a partir del reconocimiento del territorio como punto de partida y las interacciones con el mismo, identificando los roles cada actor.

9. RECOMENDACIONES

Realizar la evaluación del comportamiento de las cubiertas de las edificaciones a escala real, sometidas a acciones de sobrecarga de ceniza, es el ideal de este tipo de estudios, lo que permitirá conocer como se comportan en realidad este tipo de cubiertas y así ajustar las curvas de vulnerabilidad.

Efectuar investigaciones detalladas que generen una norma que tenga en cuenta la sobrecarga por acumulación de ceniza para las zonas de amenaza volcánica, donde se recomiende para qué tipo de carga de ceniza es recomendable diseñar las edificaciones que se encuentren en estas zonas.

Realizar pruebas sobre estructuras reales, como ensayos con cargas estáticas, que indiquen el comportamiento real de los diferentes tipos de cubiertas y así ajustar las curvas de vulnerabilidad.

Especificar por parte de los proveedores de tejas la resistencia a la flexión de sus productos ya que no se encontró este valor para la mayoría de ellos. Se consulto en los manuales y en las líneas de atención al cliente.

Tratar con mucho cuidado las medidas de mitigación, ya que se puede entender mal y se desvié hacia un estímulo para seguir el desarrollo de las poblaciones en estas zonas, con la confianza de una falsa seguridad.

Extender la socialización del desarrollo del proyecto, así como esta pasantía, con sus resultados, ante la comunidad educativa de la Universidad de Nariño, sería una estrategia para estimular la creación de una línea de investigación-acción sobre el tema en la región, que se podría implementar mediante una electiva técnica en evaluación de vulnerabilidades.

Implementar en el plan curricular del programa de Ingeniería Civil una asignatura que abarque la temática de la vulnerabilidad, el riesgo, el desarrollo local sostenible etc. Mucho más encontrándonos en una región que ha sido afectada por sismos, tsunamis, además de contar con un buen número de volcanes.

Generar programas educativos hacia la gestión del riesgo, y convertir en asignatura obligatoria en prevención de desastres para centros educativos municipales en la zona de influencia del volcán Galeras.

BIBLIOGRAFÍA

BADOS, Burbano Sandra Cecilia; LÓPEZ, Rodríguez Oscar Guillermo. Análisis y evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones expuestas a eventos eruptivos del Volcán Galeras en el sector central de San Juan de Pasto. Tesis de Grado para optar por el título en Ingeniería Civil. Universidad de Nariño. 1998.

BENAVIDES, William Fernando. Análisis y evaluación de la vulnerabilidad de las cubiertas de vivienda expuestas a la caída de ceniza volcánica del Galeras, para el Municipio de Chachagüí. Tesis de Grado para optar por el título en Ingeniería Civil. 2001.

BLONG, R. Building damage in Rabaul, Papua New Guinea, 1994. Bull. Volcanology vol. 65, no. 1, 1994. 54 p.

CORPORACIÓN OSSO (Observatorio Sismológico del Sur Occidente). Comprendiendo la vulnerabilidad física y funcional de poblaciones. Cali: Corporación OSSO, 2008. 90 p.

CORPORACIÓN OSSO (Observatorio Sismológico del Sur Occidente). Estudio de vulnerabilidad física y funcional a fenómeno volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras: propuesta técnico-económica. Cali: Corporación OSSO, 2006. 30 p.

CORPORACIÓN OSSO (Observatorio Sismológico del Sur Occidente). Estudio de vulnerabilidad física y funcional a fenómeno volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras: informe final. Pasto: Corporación OSSO, 2009.

INGEOMINAS. Volcán Galeras: generalidades. (en línea). En: Observatorio vulcanológico y sismológico de Pasto. San Juan de Pasto: 3 ago. 2008 (consultada : 3 ago. 2008). Disponible en la dirección electrónica : <http://intranet.ingeminas.gov.co/pasto/images/3/35/Generalidades2.PDF>

INGEOMINAS (Instituto Geológico de Minas y Energía). Atlas de Amenaza Volcánica en Colombia. Popayán: Impretec Ltda., 1999. 121 p.

INGEOMINAS (Instituto Geológico de Minas y Energía). Mapa de amenaza volcánica del Galeras (tercera versión). Santafé de Bogotá: INGEOMINAS, 1997. 46 p.

INGEOMINAS (Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química). Evaluación de la resistencia estructural de las cubiertas de las edificaciones ubicadas en la zona de influencia del Volcán Galeras. San Juan de Pasto: INGEOMINAS, 1997. 122 p.

LÓPEZ, Oscar. Evaluación de la resistencia estructural de las cubiertas de las edificaciones ubicadas en la zona de influencia del Volcán Galeras. San Juan de Pasto: INGEOMINAS, 1997. 133 p.

LÓPEZ, Eraso Juan Carlos; TUMAL, Zambrano Luz Agélica. Análisis y evaluación de la vulnerabilidad edificaciones expuestas a eventos eruptivos del Volcán Galeras para el sector norte de la ciudad San Juan de Pasto. Tesis de Grado para optar por el título en Ingeniería Civil. 1997.

MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO

OSSO 2002. Propuesta: Evaluación de la vulnerabilidad física por terremoto y sus fenómenos asociados en poblaciones del litoral de Nariño. Cali. 2002.

PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DEL INTERIOR Y JUSTICIA. Documento CONPES 3501. Santa fe de Bogotá: Presidencia de la República de Colombia, 2007. 51 p.

PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO. Ley 400 de 1997. NSR-98 (Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente) Santafé de Bogotá: Presidencia de la República de Colombia, 1997. 1147 p.

SPENCE, R. J. S., Pomonis, A., Baxter, P. J., Coburn, A. W., White, M., Dayrit, M., and Field Epidemiology Training Program Team. Building Damage Caused by the Mount Pinatubo Eruption of 15 June 1991, in: Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines, edited by: Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S., University of Washington Press, London, UK, 1995. 1061 p.

ANEXOS

ANEXO A
DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE ANCUYA

ANCUYA				
Codigo Mz	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)
52036100010306	2	1	11	7
52036100010302	4	0	3	6
52036100010303	2	0	18	10
52036100010103	0	0	0	3
52036100010104	0	0	0	0
52036100010305	5	0	2	9
52036100010105	4	0	8	7
52036100010304	4	0	1	22
52036100010107	4	0	1	5
52036100010106	0	0	5	15
52036100010307	8	0	3	18
52036100010308	4	0	1	10
52036100010309	2	0	2	12
52036100010108	5	0	4	18
52036100010109	4	0	3	15
52036100010111	2	0	2	1
52036100010110	4	0	5	10
52036100010112	2	0	1	2
52036100010201	3	0	3	5
52036100010202	6	0	5	10
52036100010205	0	0	1	8
52036100010204	4	0	1	2
52036100010203	2	0	2	16
52036100010213	0	0	0	0
52036100010215	1	0	3	3
52036100010214	3	0	0	12
52036100010209	1	0	1	2
52036100010208	5	0	4	10
52036100010207	4	0	4	12
52036100010206	5	0	2	11
52036100010212	5	0	4	8
52036100010211	2	0	1	2

CONVENCIONES COLAPSO GRAVE MODERADO PARCIAL LEVE

**ANEXO B
DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE CHACHAGÜÍ**

CHACHAGÜÍ				
Codigo Mz	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)
52240100010107	5	0	4	8
52240100010106	3	0	9	11
52240100010101	0	0	0	0
52240100010105	1	0	7	7
52240100010108	0	0	15	6
52240100010119	0	1	1	2
52240100010102	1	0	2	4
52240100010118	4	0	12	12
52240100010109	1	2	7	15
52240100010104	0	0	2	2
52240100010204	0	0	10	2
52240100010117	8	0	8	13
52240100010110	2	0	3	19
52240100010103	1	0	4	4
52240100010203	8	0	14	2
52240100010116	5	0	6	13
52240100010205	0	0	1	2
52240100010111	1	1	3	7
52240100010112	1	0	5	6
52240100010202	7	0	8	16
52240100010210	6	0	30	26
52240100010115	3	0	3	16
52240100010113	1	0	3	3
52240100010206	0	0	0	0
52240100010201	2	1	6	13
52240100010114	2	0	1	7
52240100010207	2	0	17	5
52240100010208	8	0	22	16
52240100010209	6	0	16	14
52240100010211	2	0	15	18
52240100010120	2	0	20	3
52240100010112	0	0	6	1

CONVENCIONES **COLAPSO** **GRAVE** **MODERADO** **PARCIAL** **LEVE**

ANEXO C
DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE LINARES

LINARES				
Codigo Mz	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)
52411100010103	11	2	13	11
52411100010110	7	0	3	4
52411100010101	2	0	5	7
52411100010207	8	0	2	11
52411100010102	3	0	5	6
52411100010107	4	0	5	9
52411100010111	1	0	0	1
52411100010108	5	0	2	7
52411100010106	9	0	9	18
52411100010206	2	0	6	4
52411100010109	5	0	5	10
52411100010201	7	0	10	15
52411100010205	4	0	5	11
52411100010209	2	0	5	7
52411100010105	9	0	4	10
52411100010204	3	0	6	12
52411100010202	5	0	5	3
52411100010203	7	0	4	13
52411100010210	5	0	6	5
52411100010211	3	0	3	3
52411100010112	0	0	25	10
52411100010212	0	0	2	8

CONVENCIONES COLAPSO GRAVE MODERADO PARCIAL LEVE

ANEXO D
DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE EL TAMBO

EL TAMBO				
Codigo Mz	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)
52260100010408	4	0	2	0
52260100010410	0	0	0	0
52260100010412	0	0	0	0
52260100010112	6	1	10	0
52260100010401	0	0	0	0
52260100010409	2	0	5	4
52260100010407	11	1	1	5
52260100010402	3	4	6	15
52260100010105	2	0	4	0
52260100010406	9	0	3	12
52260100010411	10	3	7	14
52260100010403	8	1	0	2
52260100010107	8	0	1	2
52260100010405	4	0	3	1
52260100010104	7	1	6	14
52260100010308	5	2	3	9
52260100010404	10	0	0	5
52260100010305	8	0	2	4
52260100010301	20	1	3	11
52260100010307	14	2	9	6
52260100010108	13	0	3	7
52260100010304	0	0	0	0
52260100010306	18	0	4	10
52260100010302	18	0	1	16
52260100010109	9	0	1	1
52260100010102	20	0	7	16
52260100010103	22	0	5	24
52260100010210	15	0	0	19
52260100010303	19	0	4	8
52260100010205	13	0	2	16
52260100010204	14	0	1	17
52260100010209	7	0	4	15
52260100010203	5	0	6	22
				CONTINUA

EL TAMBO				
52260100010206	8	0	2	9
52260100010310	0	0	0	0
52260100010101	10	0	3	50
52260100010207	0	0	5	2
52260100010111	1	0	2	13
52260100010202	13	0	6	9
52260100010208	8	1	18	20
52260100010201	10	1	7	4
52260100010110	2	1	0	1
52260100010113	0	0	8	73
52260100010211	2	0	3	1
52260100010229	0	0	4	1
52260100010212	1	0	10	4
52260100010214	0	0	0	0
52260100010227	1	4	15	1
52260100010114	0	0	1	7
52260100010215	1	1	0	0
52260100010115	5	3	13	14
52260100010216	4	1	2	4
52260100010228	0	1	0	0
52260100010122	0	10	3	3
52260100010230	0	1	0	0
52260100010123	1	4	4	5
52260100010117	4	0	8	7
52260100010217	0	3	3	0
52260100010121	0	19	2	3
52260100010218	0	7	0	0
52260100010120	0	9	2	0
52260100010219	0	0	0	0
52260100010124	0	3	3	0
52260100010125	0	3	0	0
52260100010131	0	0	8	1
52260100010130	0	1	12	2
52260100010129	0	0	9	3
52260100010128	0	1	8	1
52260100010126	0	0	3	34
52260100010127	0	1	4	2

CONVENCIONES **COLAPSO** **GRAVE** **MODERADO** **PARCIAL** **LEVE**

ANEXO E
DISTRIBUCION DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE TÁNGUA

TÁNGUA				
Codigo Mz	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)
52788100010401	4	0	3	1
52788100010415	0	0	0	0
52788100010403	1	0	1	0
52788100010404	0	0	2	0
52788100010402	8	0	6	2
52788100010201	10	2	11	6
52788100010406	11	0	0	2
52788100010413	6	0	6	8
52788100010411	6	0	54	28
52788100010202	0	0	1	0
52788100010407	13	0	4	2
52788100010303	10	0	3	3
52788100010304	3	0	1	6
52788100010204	8	2	5	9
52788100010306	14	2	1	7
52788100010205	3	0	0	2
52788100010110	3	0	3	5
52788100010103	1	0	1	2
52788100010102	8	0	2	6
52788100010408	17	0	6	9
52788100010305	0	0	0	0
52788100010207	12	0	2	9
52788100010101	2	1	11	8
52788100010307	16	3	2	4
52788100010206	5	0	4	2
52788100010104	3	0	3	4
52788100010308	6	0	3	6
52788100010106	6	0	3	16
52788100010208	7	0	2	9
52788100010105	10	1	1	9
52788100010301	21	0	5	3
52788100010203	8	0	1	6
52788100010107	5	0	3	2
52788100010108	5	0	1	0
52788100010109	4	0	2	1
52788100010113	0	0	0	0

