

**“APOYO 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
NARIÑO, LA FLORIDA, SANDONÁ, CONSACÁ Y YACUANQUER”**

INTI DAVID PATIÑO AGREDA

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO**

2009

**“APOYO 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
NARIÑO, LA FLORIDA, SANDONÁ, CONSACÁ Y YACUANQUER”**

INTI DAVID PATIÑO AGREDA

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

**Director
Ing. HENRY PERALTA
Director del proyecto – Corporación OSSO**

**Codirector
Ing. CARLOS BUCHELI NARVÁEZ**

**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 su autor”.

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

NOTA DE ACEPTACIÓN

**ING. RUBY ALICIA CRIOLLO
JURADO**

**ING. MICHEL BOLAÑOS GUERRERO
JURADO**

San Juan de Pasto, mayo de 2009

DEDICATORIA

Al gran espíritu cuya voz escucho en los vientos y cuyo aliento da vida al mundo.

A mis abuelos, mis madres, mi padre, hermano, tíos, familiares y amigos por su amor, colaboración y confianza.

A Sarita por brindarme su sonrisa y profundos abrazos.

A mi amor por ser amiga, compañera y confidente.

Al Inti y a Quilla por iluminar la extensión de los Andes.

Inti David Patiño Agreda

AGRADECIMIENTOS

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

A mi tía Pancha por ser mi ejemplo, por brindarme su confianza, amistad y apoyo.

A la Universidad de Nariño por ser mi casa por estos años.

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

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

A los profesores Hansjürgen Meyer y Andrés Velásquez por su dedicación y trabajo incansable.

A Jorge Mendoza, Carlos Mario Salazar y William Burbano por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

A los compañeros de pasantía Silvana Naspirán, Sandra Rosero, Carlos Mosquera y Jairo Ruales por su desinteresada colaboración y compañerismo.

Ing. Carlos Bucheli Narváez, por aceptar codirigir este proyecto, igualmente al Ing. William Castillo por impulsar la formación profesional de los estudiantes de Ingeniería Civil.

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

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	22
1. ASPECTOS GENERALES	24
1.1 ALCANCES.....	24
1.2 ORGANIZACION EN LA CUAL SE DESARROLLÓ LA PASANTÍA	24
1.3 INSTITUCIONES Y PERSONAL PARTICIPANTE EN EL PROYECTO	24
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 (Corporación OSSO, 2009)	32
2.6.1 Determinación de la solicitud.....	32
3. MARCO CONCEPTUAL	43
4. METODOLOGÍA	45
4.1 CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE APOYO TÉCNICO LOCAL.....	45
4.2 ORGANIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA DEL PROYECTO	46
4.3 ENFOQUE	46
4.4 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	46
4.5 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	47
4.6 FASES DEL PROYECTO	48
4.6.1 Fase I. Preparación.....	48
4.6.2 Fase II. Trabajo de campo.	50
4.6.3 Fase III. Análisis y resultados.	51
5. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA DE CUBIERTAS A CAÍDA PIROCLÁSTICA (CENIZA VOLCÁNICA)	54
5.1 ELABORACIÓN DE FORMATO DE MEDICIÓN PARA EL INVENTARIO DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS	54
5.1.1 Descripción de formato de medición.....	55
5.1.2 Optimización para el proceso de recolección de datos en campo.	56
5.2 TRABAJO DE CAMPO	56

5.2.1 Clasificación de los elementos expuestos.....	56
5.2.2 Descripción de tipologías de cubiertas del área de estudio.	57
5.2.3 Inventario de las edificaciones.	60
5.3 VULNERABILIDAD DE CUBIERTAS.....	62
5.3.1 Estado del arte de la estimación de vulnerabilidad de cubiertas.....	63
5.3.2 Modelos de vulnerabilidad disponibles en el Galeras.	72
5.3.3 Análisis de sensibilidad de los datos para el chequeo estructural.	73
5.4 DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS POR EL ESCENARIO MÁXIMO PROBABLE DE ERUPCIÓN VOLCÁNICA.....	76
5.4.1 Determinación de la sollicitación de carga de ceniza.	76
5.4.2 Cálculo de daño para el escenario máximo probable del volcán Galeras.....	76
5.4.3 Ejemplo de cálculo de daño.	77
5.4.4 Resultado de la distribución de daño para los municipios de estudio.	78
5.5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA DE LAS CUBIERTAS.....	81
5.5.1 Análisis para cubiertas en madera.....	81
5.5.2 Análisis para correas.	81
5.5.3 Análisis de armadura.	86
5.5.4 Análisis de cubiertas en losa.....	89
5.6 DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE COLAPSO.....	91
5.7 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FUNCIONAL DE EDIFICACIONES.....	93
6. CONCLUSIONES.....	100
7. RECOMENDACIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS.....	105

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
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.....	30
Figura 4. Funciones de vulnerabilidad	31
Figura 5. Efectos de la ceniza volcánica.....	33
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 de espesores de ceniza derivado del mapa de isopacas para la erupción del Pinatubo, Filipinas, 1991 (Paladio-Melosantos, 1996)...	36
Figura 9. Mapa de isopacas Volcán Galeras	37
Figura 10. Modelo de interpolación de valores de ceniza	38
Figura 11. Esquema simplificado del modelo de acumulación de cenizas volcánicas	39
Figura 12. Diagrama de Rosa de los Vientos, Volcán Galeras.	39
Figura 13. Esquema de exposición de las vertientes topográficas al viento	40
Figura 14. Índice de aspecto.....	41
Figura 15. Modelo final de dispersión y acumulación de ceniza volcánica, Volcán Galeras.....	42
Figura 16. Grupo de apoyo técnico local.	45
Figura 17. Fases del estudio.....	48
Figura 18. Formato de medición para el inventario.....	54
Figura 19. Clasificación de los elementos expuestos	56
Figura 20. Clasificación del sector de vivienda y población	57
Figura 21. Cubierta pesada	57
Figura 22. Cubierta moderada	58
Figura 23. Cubierta liviana	58
Figura 24. Cubierta en concreto reforzado	59
Figura 25. Distribución de viviendas en el municipio de Nariño	60
Figura 26. Distribución de viviendas en el municipio de La Florida.....	61
Figura 27. Distribución de viviendas en el municipio de Sandoná	61
Figura 28. Distribución de viviendas en el municipio de Consacá	61
Figura 29. Distribución de viviendas en el corregimiento de Bomboná.....	62
Figura 30. Distribución de viviendas en el municipio de Yacuanquer	62
Figura 31. Diagrama de daños en vivienda en Rabaul por la erupción del Tavurvur (Papua-Nueva Guinea), 1994	64
Figura 32. Datos de Vulnerabilidad disponibles de trabajos de campo o experimentales.....	65

Figura 33. Curvas de vulnerabilidad de cubiertas a caída de tefra para clases de cubiertas europeas.....	68
Figura 34. Superposición de conjuntos de funciones de vulnerabilidad a carga de ceniza.....	69
Figura 35. Comparación de datos de resistencias de proyectos de grado	74
Figura 36. Elementos de la armadura montante maestro tipo 1	86
Figura 37. Funciones de probabilidad de colapso de cubiertas por ceniza Volcánica para el Galeras	92
Figura 38. Importancia de los elementos de un sistema de cubierta	94
Figura 39. Dependencia de los elementos de un sistema de cubierta.....	94
Figura 40. Importancia de elementos sistema losa.....	95
Figura 41. Dependencia de elementos del sistema losa.....	96

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Características constructivas de las tipologías de cubiertas	59
Tabla 2. Resumen inventario de las edificaciones	60
Tabla 3. Indicador de vulnerabilidad física a partir del daño severo	66
Tabla 4. Parámetros (carga Q media y su desviación estándar)	67
Tabla 5. Valores de densidad de la ceniza	71
Tabla 6. Material vs resistencia.....	71
Tabla 7. Comparación resistencias cubiertas proyecto de grado.....	73
Tabla 8. Tipo de cubierta vs resistencia.....	76
Tabla 9. Espesor de ceniza según modelo de Corporación OSSO	76
Tabla 10. Rangos de daños	77
Tabla 11. Características de la cubierta pesada (Ejemplo).....	77
Tabla 12. Distribución de daño por manzana	78
Tabla 13. Distribución del daño en viviendas.....	80
Tabla 14. Propiedades de la madera	82
Tabla 15. Datos para la correa.....	82
Tabla 16. Resistencia de correa para cubierta pesada.....	85
Tabla 15. Datos para la armadura	86
Tabla 18. Datos de inicio para losa en concreto	89
Tabla 19. Resistencias por espesor de ceniza en cm.....	91
Tabla 20. Resistencias por carga de ceniza en KPa.....	92
Tabla 21. Matriz de interdependencia de componentes en cubierta de teja	93
Tabla 22. Matriz de interdependencia de componentes en losas de concreto	95
Tabla 23. Calificación de indicadores de vulnerabilidad de cubiertas en teja	97
Tabla 24. Calificación de indicadores de vulnerabilidad de losas de concreto	98
Tabla 25. Comparación vulnerabilidad de cubiertas	99

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A. INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE NARIÑO.....	106
ANEXO B. INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE LA FLORIDA.....	108
ANEXO C. INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE SANDONA.....	109
ANEXO D. INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE CONSACA.....	112
ANEXO E. INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE YACUANQUER.....	114
ANEXO F. DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE NARIÑO.....	115
ANEXO G. DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE LA FLORIDA...	117
ANEXO H. DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE SANDONÁ.....	119
ANEXO I. DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE COSACÁ.....	122
ANEXO J. DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE YACUANQUER.	124
ANEXO K. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CORREAS	125

GLOSARIO

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.

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, gráficas 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).

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 expresarse 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.

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.

¹ Blong, 1984 en Ingeominas, 1997

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).

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.

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 conlleve 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 a 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).

Inventario: 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 previsibles 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.

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 Volcánica Alta (ZAVA): 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 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.

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.

RESUMEN

EL PRESENTE INFORME DE PASANTÍA FUE REALIZADO CON EL GRUPO CIENTÍFICO Y TÉCNICO DE LA CORPORACIÓN OSSO ENTRE LOS MESES DE JULIO DE 2008 Y ENERO 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 NARIÑO, LA FLORIDA, SANDONÁ, CONSACÁ Y YACUANQUER.

EN PRIMERA INSTANCIA SE REALIZA UN INVENTARIO DE LAS EDIFICACIONES QUE SE ENCUENTRAN EN LA ZONA DE ESTUDIO, IDENTIFICANDO TIPOLOGÍAS DE CUBIERTAS, PARA EFECTUAR LA EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y ENCONTRAR LA RESISTENCIA DE CADA TIPOLOGÍA; ADEMÁS SE APOYA LA REALIZACIÓN DEL MODELO DE DISPERSIÓN Y ACUMULACIÓN DE CENIZA, DONDE SE ENCUENTRA LA SOLICITACIÓN EN TÉRMINOS DE CARGA EN UN ÁREA ESPECÍFICA, DE ESTA MANERA SE PROCEDE A ENCONTRAR LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DAÑOS Y SE DETERMINA LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE COLAPSO DE CUBIERTAS.

EN ESTE INFORME SE PRESENTA LA DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS DURANTE EL DESARROLLO DE LA PASANTÍA, ASÍ COMO LA EXPERIENCIA REALIZADA Y LOS APRENDIZAJES ESPECÍFICOS ADQUIRIDOS EN LOS TEMAS DE AMENAZAS, VULNERABILIDAD Y RIESGO.

ABSTRACT

THIS REPORT OF INTERNSHIP WAS MADE POSSIBLE WITH THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL GROUP OF THE CORPORATION OSSO BETWEEN JULY 2008 AND JANUARY 2009 AND HAD AS 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 NARIÑO, LA FLORIDA, SANDONA, CONSACÁ AND YACUANQUER.

IN THE FIRST INSTANCE IS REALIZED AN INVENTORY OF THE BUILDINGS THAT THEY FIND IN THE ZONE OF STUDY, IDENTIFYING TYPOLOGY OF COVERS, TO CARRY OUT THE STRUCTURAL EVALUATION AND TO FIND THE RESISTANCE OF EVERY TYPOLOGY; IN ADDITION THERE IT IS REALIZED THE ACCOMPLISHMENT OF THE MODEL OF DISPERSION AND ACCUMULATION OF TEFRA, WHERE ONE FINDS THE SOLICITATION IN TERMS OF LOAD IN A SPECIFIC AREA, HEREBY ONE PROCEEDS TO FIND THE DISTRIBUTION OF THE HURTS AND ONE DETERMINES THE FUNCTIONS OF PROBABILITY OF COLLAPSE OF COVERS

THE THIS REPORT PROVIDES A DESCRIPTION OF ACTIVITIES UNDERTAKEN DURING THE INTERNSHIP AND THE EXPERIENCE AND SPECIFIC LEARNING ACQUIRED THREATS, VULNERABILITY AND RISK.

INTRODUCCIÓN

Desde la reactivación del Volcán Galeras en 1989, tanto las autoridades locales y regionales como las nacionales, se han visto en la necesidad de diseñar y aplicar acciones que mitiguen a corto y mediano plazo los riesgos que se presentan por los fenómenos asociados al Volcán Galeras, no obstante la mayoría de estas medidas se han enfocado solo a las acciones de contingencia, que han permitido establecer diversos protocolos de actuación, organización logística, provisión de alojamientos temporales, señalización de rutas y zonas seguras a partir del conocimiento de la amenaza volcánica. Por el contrario el conocimiento de la vulnerabilidad a diferencia de la amenaza es lo único intervenible y modificable, debido a que es una construcción humana y social no de carácter natural, lo cual ha sido poco estudiado en la región, con excepción de trabajos realizados a finales de los años noventas por el INGEOMINAS.

Teniendo en cuenta que la actividad del Volcán Galeras ha presentado un aumento en los últimos años especialmente en el 2004 y dada la magnitud de la problemática social, económica, política, ambiental y cultural que este tipo de eventos generan, el Gobierno Nacional a través del Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres - SNPAD, y mediante el decreto 4106 del 15 de noviembre de 2005 declaró la situación de desastre en los municipios de Pasto, Nariño y La Florida del Departamento de Nariño, donde el Fondo Nacional de Calamidades – FNC y la Corporación OSSO, suscribieron el Convenio de Cooperación N° 1005-08-12-07 con la finalidad de realizar el estudio de “VULNERABILIDAD FISICA 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 – DGPAD.

De esta manera y con el fin de apoyar este estudio, se vinculan estudiantes egresados del Programa de Ingeniería Civil en la modalidad de pasantía, la cual abarcó un periodo de seis (6) meses. Cabe resaltar que en el Documento CONPES 3501 de diciembre de 2007, referente 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 custodiar este proceso.

El proyecto en mención, tuvo como finalidad evaluar la vulnerabilidad física y funcional de las edificaciones de ocupación normal a la caída de ceniza del volcán Galeras, en las cabeceras municipales de Nariño, La Florida, Sandoná, Consacá y Yacuanquer; se hace énfasis 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.

El concepto de vulnerabilidad física aplicado en el proyecto, cubre también la funcionalidad, principalmente en aquellos elementos que son vitales para el normal desarrollo de las actividades en las poblaciones; es preciso aclarar que a pesar de que la vulnerabilidad física suele contener la funcional, la funcional no necesariamente contiene a la física, por lo que la estimación de la vulnerabilidad se realizó en ambas vías, tanto en lo físico como en lo funcional.

Así el objetivo de este proyecto es *“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 Nariño, La Florida, Sandoná, Consacá y Yacuanquer, que realiza la Corporación OSSO”*

Para lo cual se debe:

- Elaborar formatos de medición para el inventario de los elementos expuestos.
- Apropiar procedimientos metodológicos para la evaluación de la vulnerabilidad física y funcional ante la caída de ceniza.
- Determinar los componentes críticos y vulnerables en las edificaciones de ocupación normal a la caída de ceniza volcánica.
- Identificar con el grupo de trabajo, alternativas específicas de aplicación generalizada (según tipologías constructivas, localización, etc.), medidas y/o estrategias para la mitigación del riesgo de los elementos o sectores determinados como vulnerables.
- Observar aspectos constructivos y determinar indicadores de vulnerabilidad en edificaciones.

Las actividades usuales realizadas durante la pasantía consistieron en la recolección de información (trabajo de campo), mediante recorridos terrestres sobre los cascos urbanos de los municipios de estudio; participación y asistencia en la mayoría de las reuniones de socialización del proyecto a entidades locales y comunitarias (transferencia de conocimientos); organización, procesamiento y análisis de la información recolectada (trabajo de oficina).

En este informe se presenta un análisis de las actividades realizadas durante el desarrollo de la pasantía, así como la experiencia plasmada y los aprendizajes específicos adquiridos. Toda la información aquí contenida, se soporta en los resultados del Proyecto.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1 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: Nariño, La Florida, Sandoná, Consacá y Yacuanquer.

1.2 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.

1.3 INSTITUCIONES Y 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.

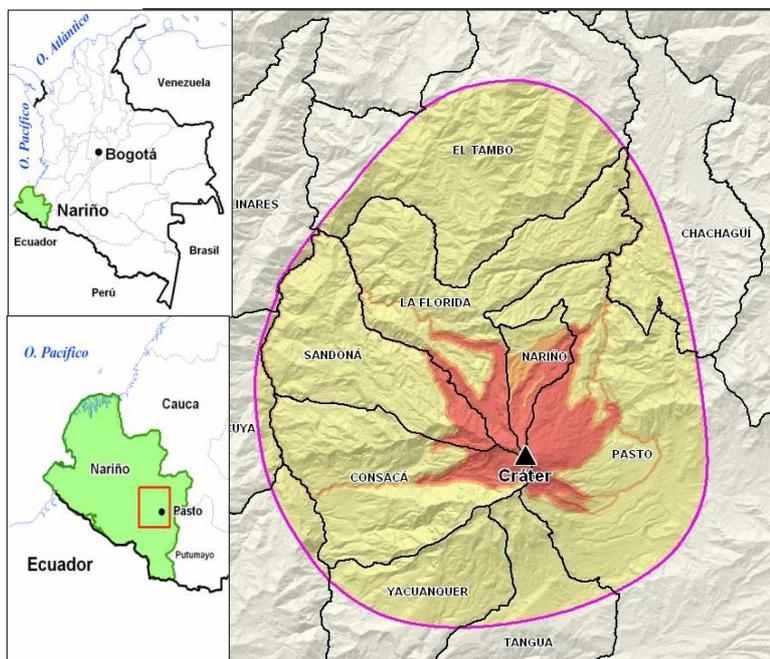
El ejercicio de evaluación de vulnerabilidad física y funcional, contó con el apoyo y acompañamiento de los actores institucionales y comunitarios de cada uno de los municipios. Como apoyo vital para la realización del proceso, se conto con el acompañamiento para el trabajo de campo, de funcionarios de las todas las alcaldías de los municipios, objeto de estudio.

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° W y 1.2231° 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, Tangua y Pasto), además, parte de los municipios de Chachagüí, el Tambo 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.ingeominas.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.

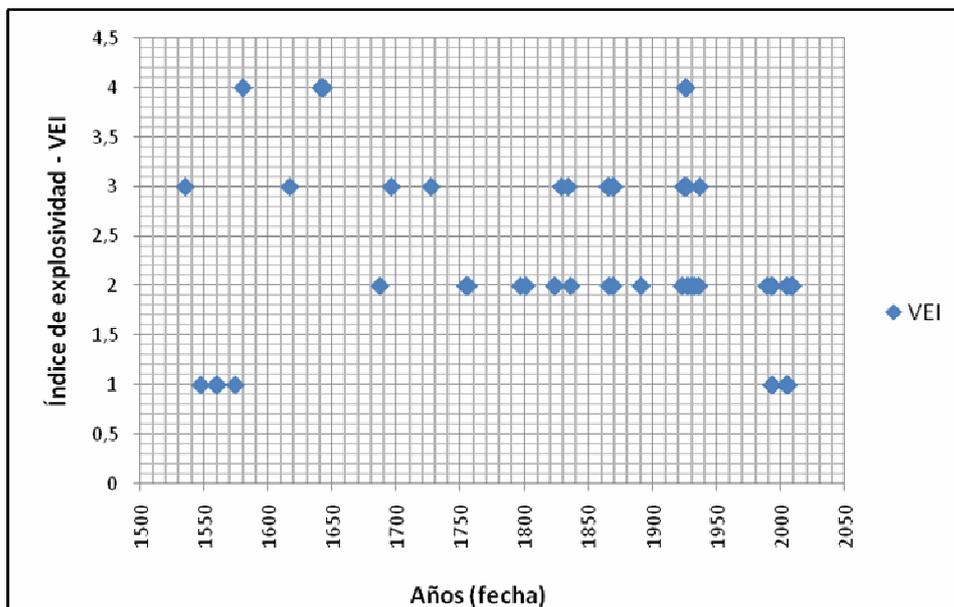
2.3 AMENAZA Y EXPOSICIÓN

Según el 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.

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 sollicitación de estas cargas.

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

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



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.

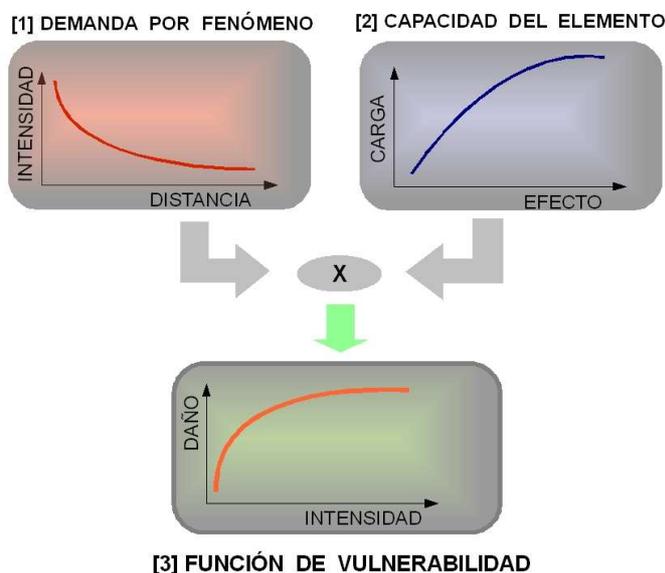
Una “matriz de vulnerabilidad” resulta de la interrelación de componentes que la definen: la sollicitación (propia del fenómeno) vs la resistencia (característica del elemento). Basado en las técnicas de soporte decisión para Asignación de Pesos:

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).

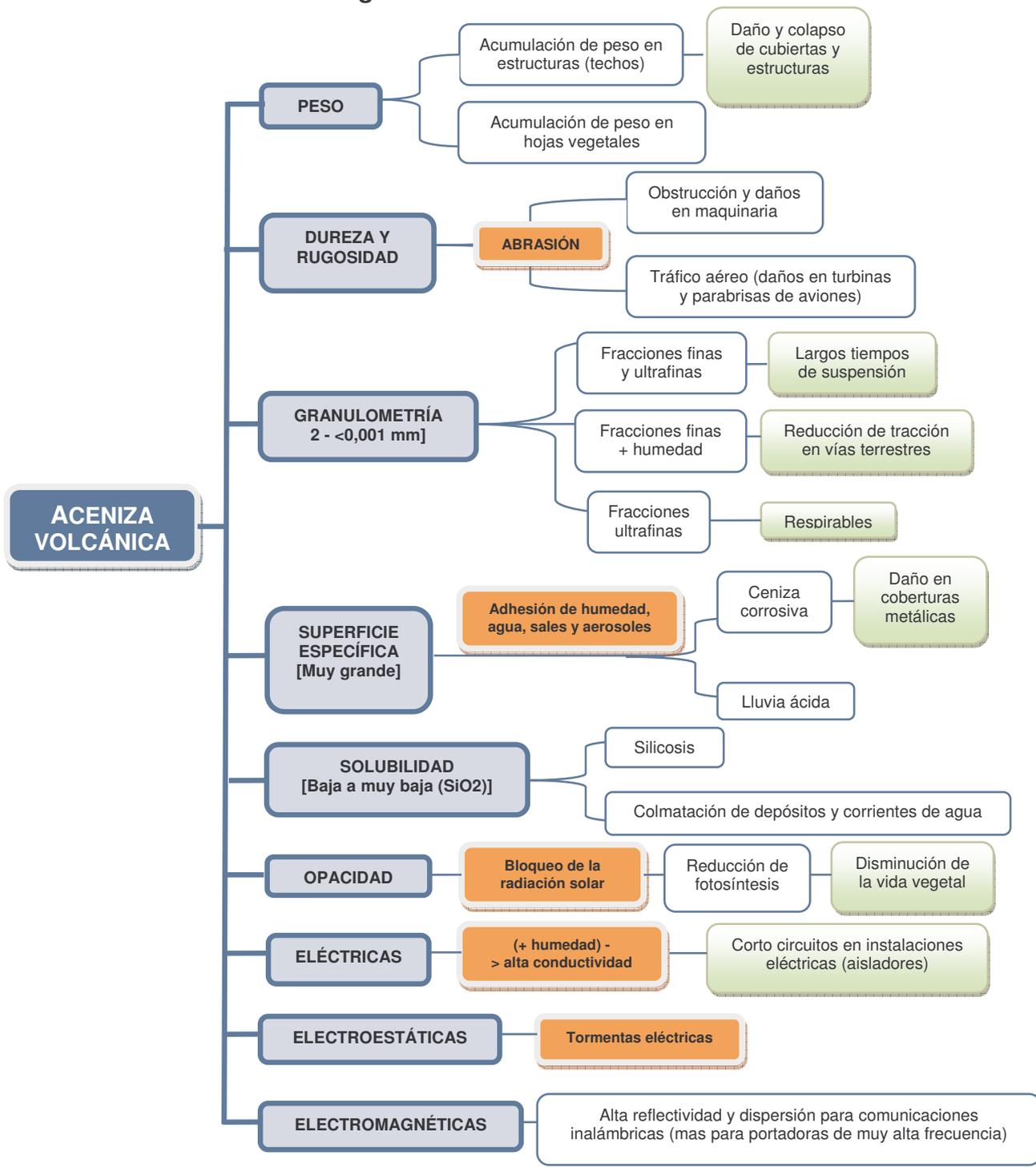
Para lograr modelos de espesores de ceniza más cercanos a la realidad, que la zonificación del Mapa de Amenazas (Ingeominas, 1997) se revisó algunos de los modelos de espesores de ceniza disponibles en la literatura científica, empíricos y simulados (erupciones en Tungurahua, Lascar, Chaiten, Vesubio, 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.

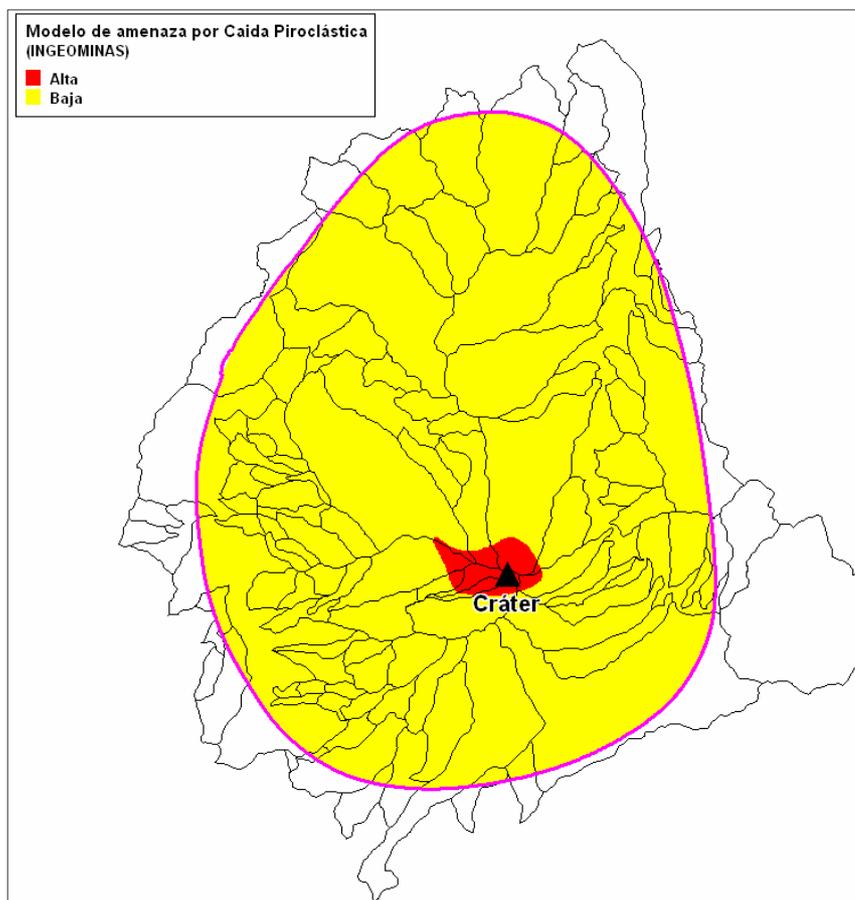
⁶ INGEOMINAS (Instituto Geológico de Minas y Energía). Mapa de amenaza volcánica del Galeras (tercera versión). Santafé de Bogotá: INGEOMINAS, 1997.p. 32.

Figura 5. Efectos de la ceniza volcánica



Fuente: Corporación OSSO, 2009

Figura 6. Mapa de zonificación piroclástica Ingeominas 1997.



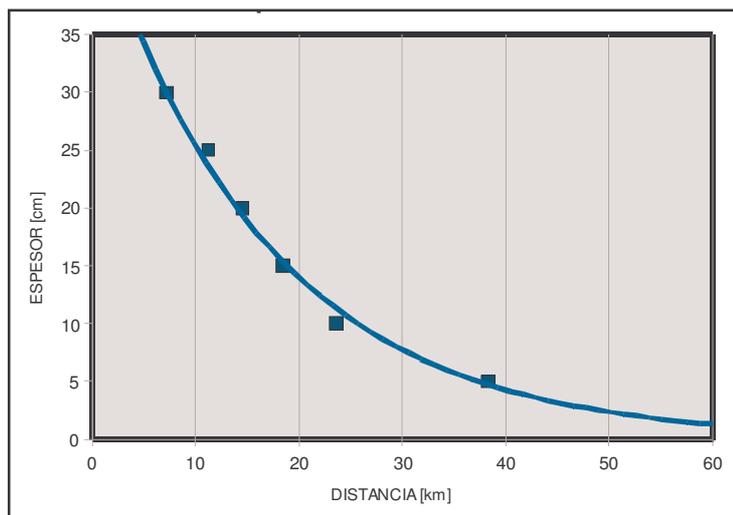
Fuente: INGEOMINAS, 1997

La Corporación OSSO⁷, encontró que el modelo de isópacas (curvas de igual espesor de depósito de cenizas) derivado de levantamiento en campo posterior a la fase principal de la erupción del Pinatubo del 15 de junio 1991, (Figura. 7 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 de 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

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.

escenario de caída de ceniza para Galeras, a partir de mapa de isopacas de la erupción del 15 de junio de 1991 del Volcán Pinatubo, Filipinas. En Figura 8, se presenta la curva de la función resultante.

Figura 8. Modelo de espesores de ceniza derivado del mapa de isopacas para la erupción del Pinatubo, Filipinas, 1991 (Paladio-Melosantos, 1996).



Fuente: Corporación OSSO, 2009.

Teniendo en cuenta lo anterior, para propósitos del modelamiento de la vulnerabilidad y partiendo de la premisa anterior, a continuación se presenta la manera como la Corporación OSSO construyó el modelo de dispersión de ceniza volcánica para el área de influencia del Volcán Galeras, estimado a partir de la zonificación por caída piroclástica del Ingeominas (1997); la dirección predominante de los vientos, y la topografía.

Para establecer el modelo de dispersión de ceniza, a partir de la zonificación de caída piroclástica definido por el Ingeominas (1997), se definieron dos factores de atenuación del fenómeno: *i*). con respecto a la distancia (**Ad**) y *ii*). la topografía (**At**), el cual considera la dirección del viento para establecer, las áreas de posible afectación.

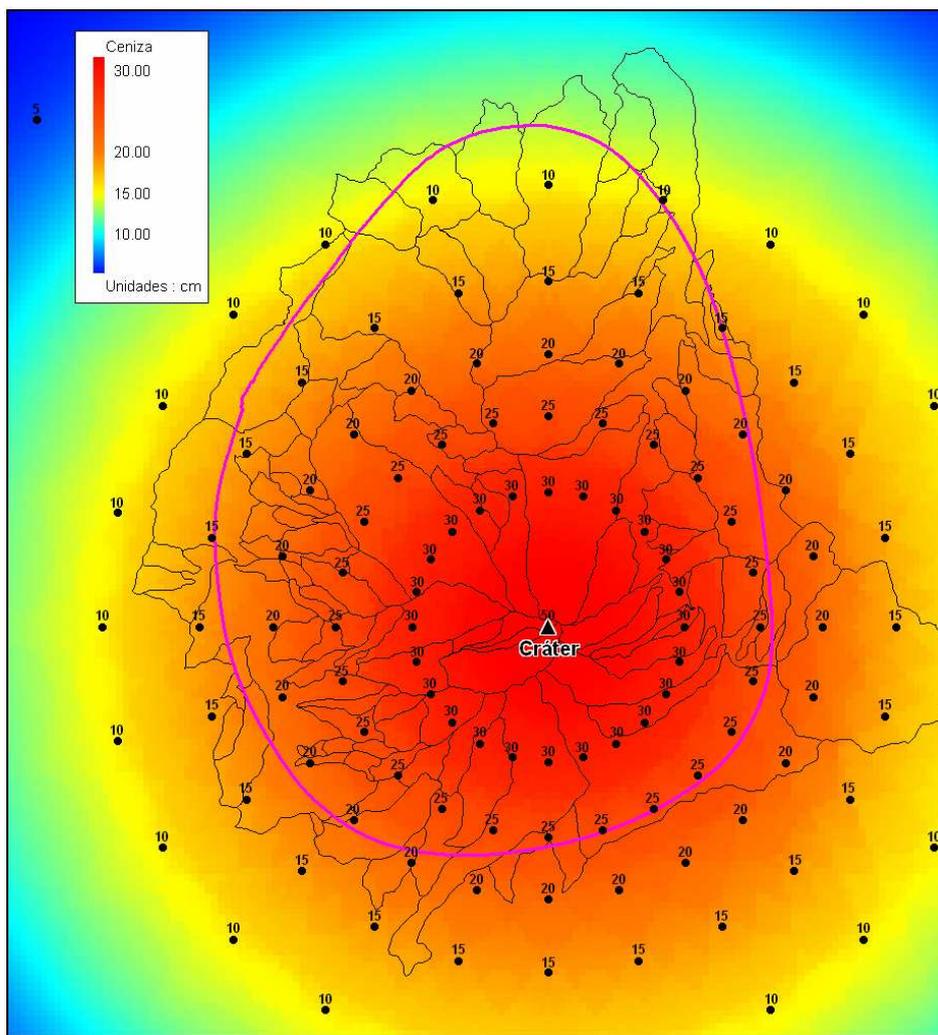
Factores de atenuación. La siguiente expresión, permite relacionar los factores de atenuación a caída de ceniza

$$(E_c, X) = (A, X) \times (V, 0)$$

Donde (Ec), representa el espesor de ceniza, (X) el vector de posición del punto considerado y (A) es la función, que representa la atenuación del fenómeno (en

Posteriormente, a partir del mapa anterior, se interpolaron los valores de caída de ceniza que se representan de manera radial alrededor del Volcán Galeras, para obtener sus valores de dispersión en cualquier punto del área de análisis y construcción del modelo que se extendió hasta los 2762 km². Los resultados se presentan en la Figura 10.

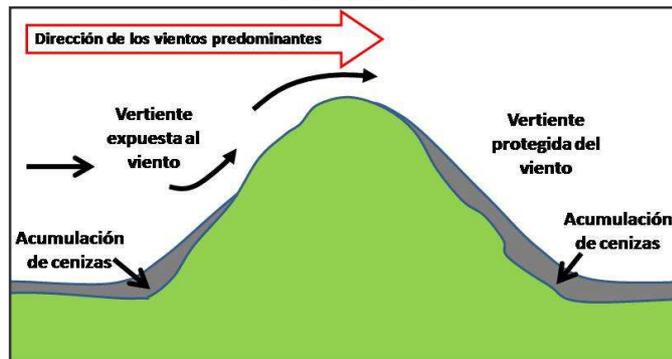
Figura 10. Modelo de interpolación de valores de ceniza



Fuente: Corporación OSSO, 2009.

Modelo de atenuación de caída piroclástica por la topografía. Considera el efecto de la topografía, en estrecha relación con la dirección del viento, que define el factor de acumulación de ceniza sobre la superficie. En la Figura 11, se presenta un esquema simplificado del modelo de depositación de cenizas.

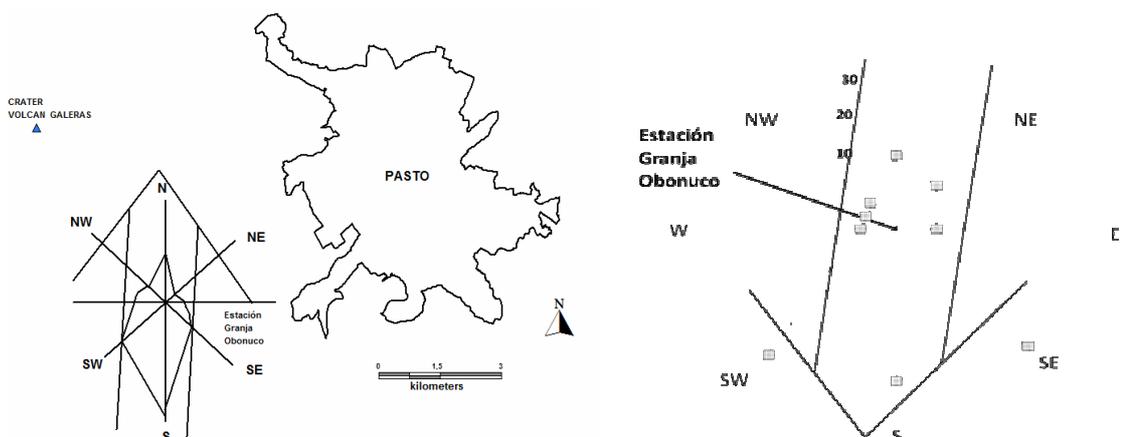
Figura 11. Esquema simplificado del modelo de acumulación de cenizas volcánicas



Fuente: Adaptado del modelo de depósito de cenizas volcánicas en la Patagonia.F. Colmet-Daage elaborado a partir Gerding & Thiers, 2002

Para el modelamiento del efecto topográfico en relación con el viento, se tuvo en cuenta el diagrama de Rosa de los vientos que podrían afectar una eventual columna de erupción del Volcán Galeras establecido por el Ingeominas (1997), la cual se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Diagrama de Rosa de los Vientos, Volcán Galeras.

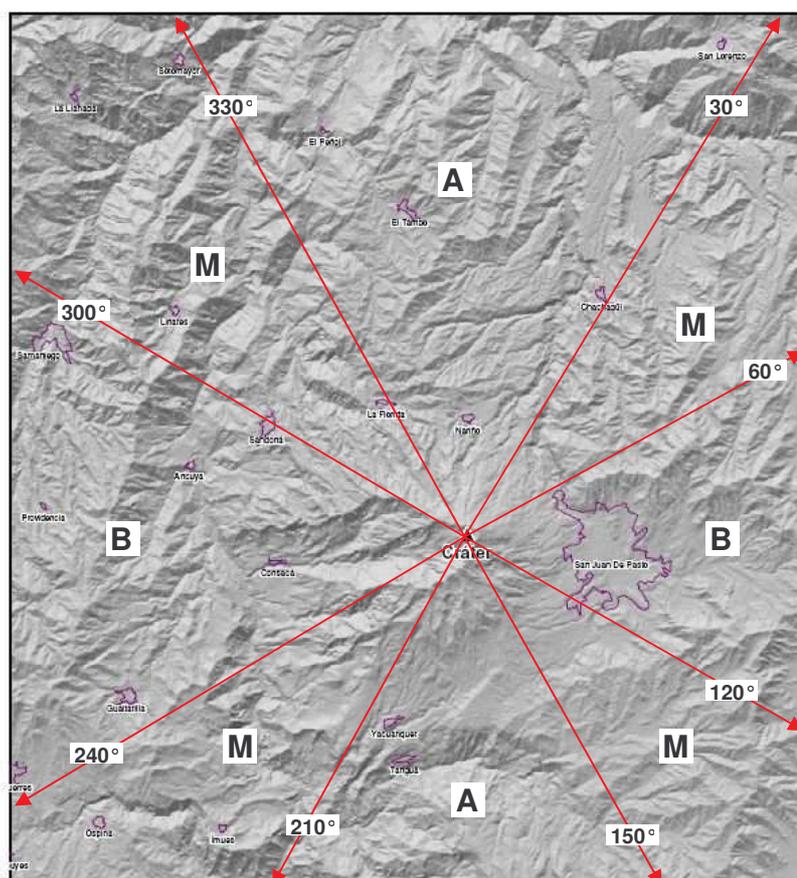


Fuente: INGEOMINAS, 1997

Teniendo en cuenta lo anterior y para propósitos del estudio, se definieron tres rangos de exposición: alta, media y baja. La afectación alta, corresponde a todos los elementos topográficos con exposición directa a la acción del viento y que están determinados por la dirección de los vientos predominantes en el Galeras, definidos para la zonificación de caída piroclástica del Ingeominas (1997) y que corresponde a dos direcciones, Norte y Sur Occidente.

Los rangos de exposición alta (**A**), se establecieron entre $[30^\circ - 330^\circ]$ y $[150^\circ - 210^\circ]$ calificándoles con un factor de ponderación de 1; el rango de exposición media (**M**) entre $[30^\circ - 60^\circ]$, $[120^\circ - 150^\circ]$, $[210^\circ - 240^\circ]$ y $[300^\circ - 330^\circ]$ con factor de ponderación de 0,5; por último, el rango bajo (**B**): $[240^\circ - 300^\circ]$ y $[60^\circ - 90^\circ]$ con factor de ponderación de 0,25. En la Figura 13, se presentan los rangos especificados, los cuales se definen haciendo centro el cráter del Volcán Galeras.

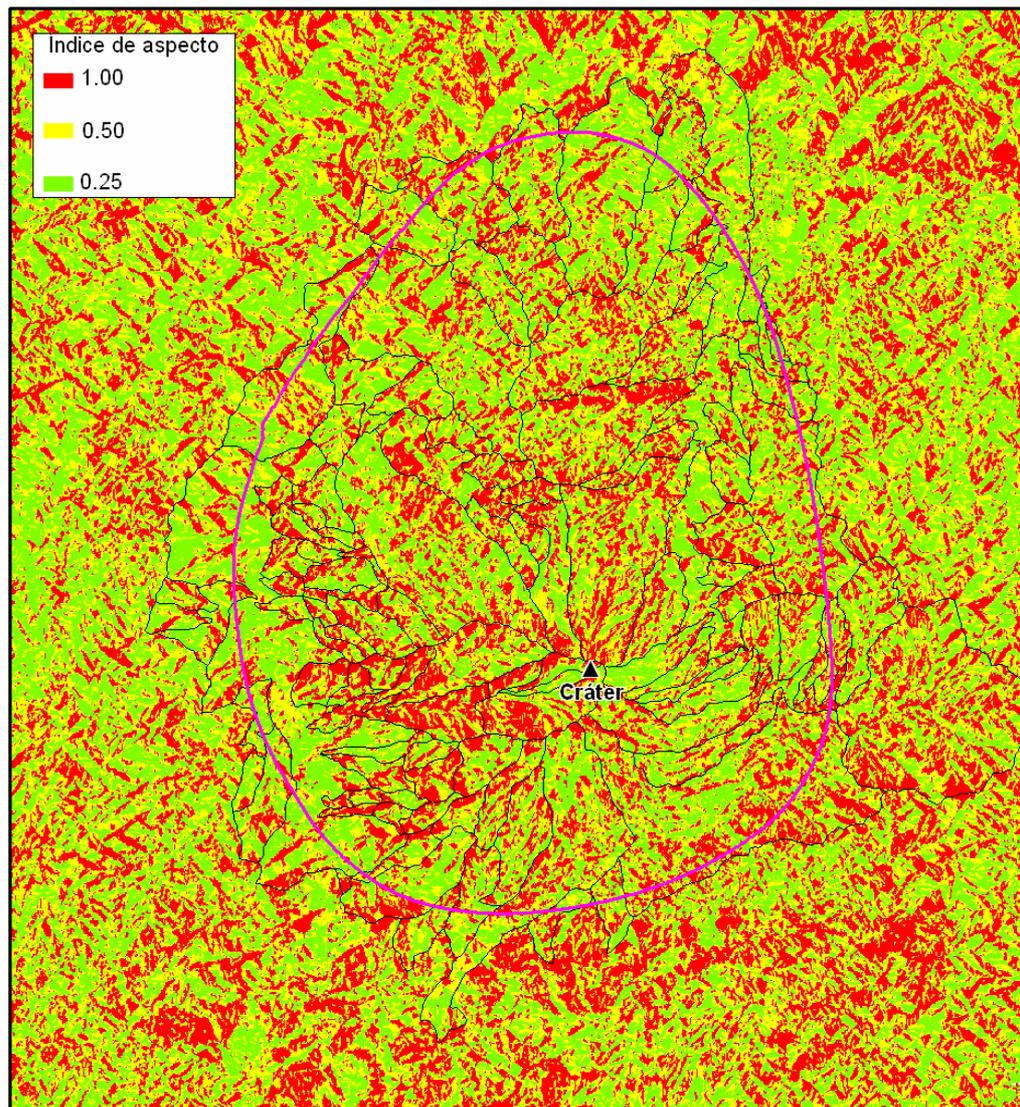
Figura 13. Esquema de exposición de las vertientes topográficas al viento



Fuente: Corporación OSSO, 2009.

A partir de lo anterior, se define el índice de aspecto, que representa la exposición de la topografía del relieve a la acumulación de ceniza. Este resultado se presenta en la Figura 14.

Figura 14. Índice de aspecto

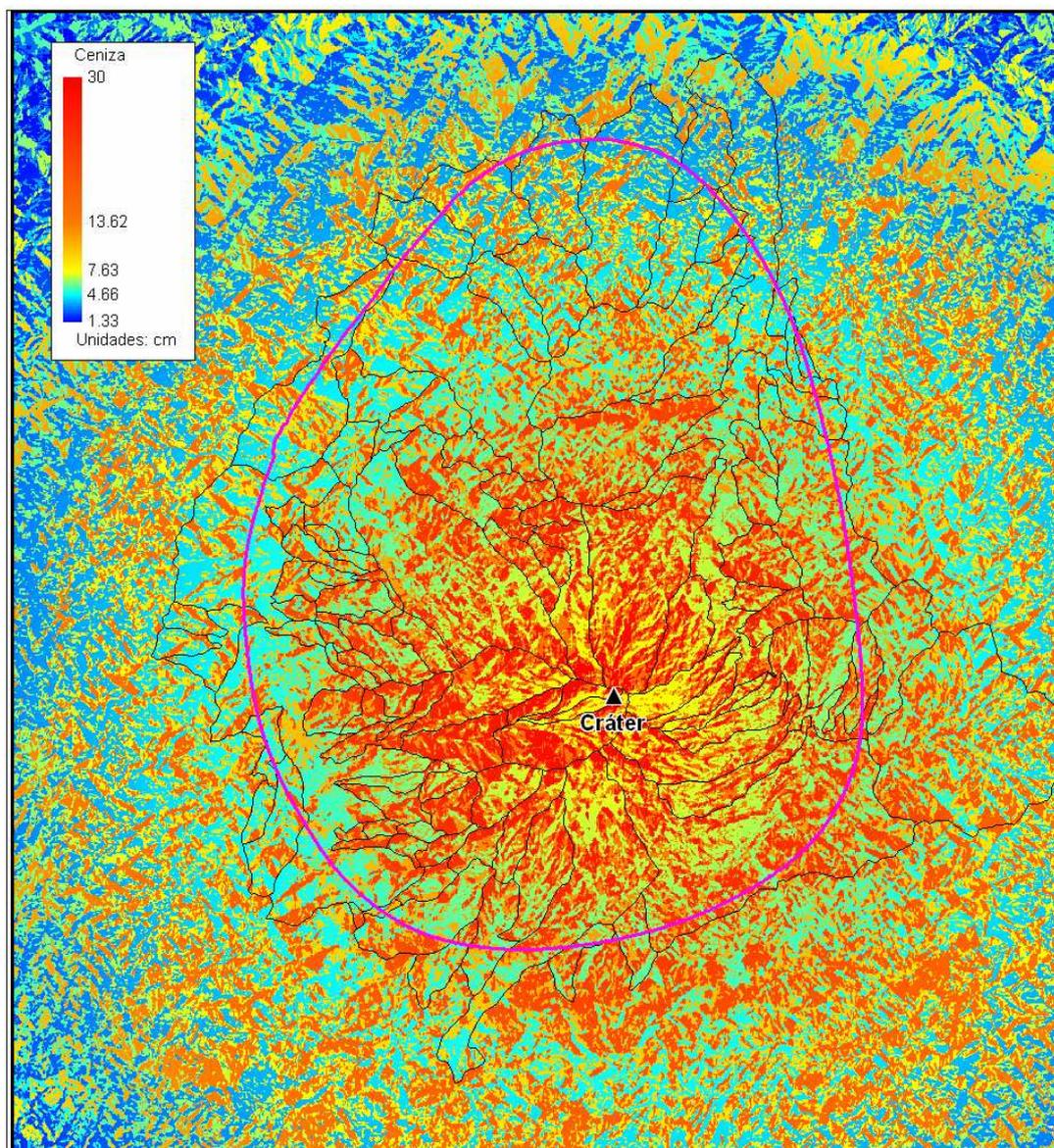


Fuente: Corporación OSSO, 2009.

Teniendo en cuenta que la acumulación de ceniza sobre la superficie no es homogénea, por aspectos antes mencionados (p. eje, topografía del relieve y dirección del viento), a continuación se presenta el resultado de la intersección entre el índice de aspecto y el modelo de dispersión de cenizas calculado, que da como resultado el modelo de dispersión y acumulación de ceniza final. Como se

observa en el grafico anterior que las vertientes con mayor susceptibilidad a la acumulación de ceniza, representadas en rojo, son todas aquellas que tienen una orientación desfavorable, con respecto a la caída de ceniza. Estos resultados se presentan a continuación en la Figura 15.

Figura 15. Modelo final de dispersión y acumulación de ceniza volcánica, Volcán Galeras



Fuente: Corporación OSSO, 2009.

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: Silvana Naspiran, Sandra Rosero, Carlos Mosquera, Jairo Ruales y el autor de este informe.

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 16. 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 el grado de vulnerabilidad de las edificaciones de ocupación normal al nivel más confiable posible; este 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 17 y se describen en los siguientes numerales.

Figura 17. 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 georeferenciación.

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 georeferenciación (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 manejó y alimentó el Sistema de Información Geográfico denominado SIGVULGALERAS, para el manejo de datos georeferenciables, 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. Correspondió 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 georeferenciados, 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 física y funcional. 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 – MGN”¹⁴.

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. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA DE CUBIERTAS A CAÍDA PIROCLÁSTICA (CENIZA VOLCÁNICA)

5.1 ELABORACIÓN DE FORMATO DE MEDICIÓN PARA EL INVENTARIO DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS

Para el proceso de recolección de datos el autor diseñó el formato estandarizado, que permitió realizar el levantamiento de una manera eficiente; el formato se presenta y describe a continuación.

Figura 18. Formato de medición para el inventario



Estudio de vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos, en el área de influencia del Volcán Galeras – Convenio de Cooperación N° 1005-08-12-07 entre el Fondo Nacional de Calamidades/DPAD y la Corporación OSSO.



VIVIENDAS			
CONTEXTO FÍSICO			
Georreferenciación (hddd.dddd° - WGS84)	Tipo de cubierta	Estructura de cubierta	Material predominante en muros
Ficha <input type="text"/> Latitud <input type="text"/> Longitud <input type="text"/> Altura (mmmm) <input type="text"/> Estado: Bueno <input type="checkbox"/> Malo <input type="checkbox"/>	Pesada <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Liviana <input type="checkbox"/> L_Maciza <input type="checkbox"/> L_Aligerada <input type="checkbox"/> Inclínación <input type="checkbox"/>	Mon_maestro <input type="checkbox"/> Dient_de_cierra <input type="checkbox"/> Corras <input type="checkbox"/> Vigas_y_colum <input type="checkbox"/> No_de_pisos <input type="checkbox"/>	Ladrillo <input type="checkbox"/> Tapia <input type="checkbox"/> Adobe <input type="checkbox"/> Bahareque <input type="checkbox"/> Madera <input type="checkbox"/> Prefabricado <input type="checkbox"/> Concreto <input type="checkbox"/> Otro <input type="text"/>

VIVIENDAS			
CONTEXTO FÍSICO			
Georreferenciación (hddd.dddd° - WGS84)	Tipo de cubierta	Estructura de cubierta	Material predominante en muros
Ficha <input type="text"/> Latitud <input type="text"/> Longitud <input type="text"/> Altura (mmmm) <input type="text"/> Estado: Bueno <input type="checkbox"/> Malo <input type="checkbox"/>	Pesada <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Liviana <input type="checkbox"/> L_Maciza <input type="checkbox"/> L_Aligerada <input type="checkbox"/> Inclínación <input type="checkbox"/>	Mon_maestro <input type="checkbox"/> Dient_de_cierra <input type="checkbox"/> Corras <input type="checkbox"/> Vigas_y_colum <input type="checkbox"/> No_de_pisos <input type="checkbox"/>	Ladrillo <input type="checkbox"/> Tapia <input type="checkbox"/> Adobe <input type="checkbox"/> Bahareque <input type="checkbox"/> Madera <input type="checkbox"/> Prefabricado <input type="checkbox"/> Concreto <input type="checkbox"/> Otro <input type="text"/>

VIVIENDAS			
CONTEXTO FÍSICO			
Georreferenciación (hddd.dddd° - WGS84)	Tipo de cubierta	Estructura de cubierta	Material predominante en muros
Ficha <input type="text"/> Latitud <input type="text"/> Longitud <input type="text"/> Altura (mmmm) <input type="text"/> Estado: Bueno <input type="checkbox"/> Malo <input type="checkbox"/>	Pesada <input type="checkbox"/> Moderada <input type="checkbox"/> Liviana <input type="checkbox"/> L_Maciza <input type="checkbox"/> L_Aligerada <input type="checkbox"/> Inclínación <input type="checkbox"/>	Mon_maestro <input type="checkbox"/> Dient_de_cierra <input type="checkbox"/> Corras <input type="checkbox"/> Vigas_y_colum <input type="checkbox"/> No_de_pisos <input type="checkbox"/>	Ladrillo <input type="checkbox"/> Tapia <input type="checkbox"/> Adobe <input type="checkbox"/> Bahareque <input type="checkbox"/> Madera <input type="checkbox"/> Prefabricado <input type="checkbox"/> Concreto <input type="checkbox"/> Otro <input type="text"/>

Responsables Levantado por <input type="text"/> Fecha (AMD) <input type="text"/>	Sistematizado por <input type="text"/> Fecha (AMD) <input type="text"/>
---	--

INVENTARIO EDIFICACIONES DE OCUPACION NORMAL


Fuente: Corporación OSSO, 2008.

5.1.1 Descripción de formato de medición

Georeferenciación. La georeferenciación 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 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 principalmente el material de la cobertura, según esto los tipos son: cubierta pesada, cubierta moderada, cubierta liviana, losa maciza y losa aligerada. Estas tipologías se describen en detalle mas adelante.

Estructura de cubierta. Para el diseño del formato en el ítem de estructura de cubierta, 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.

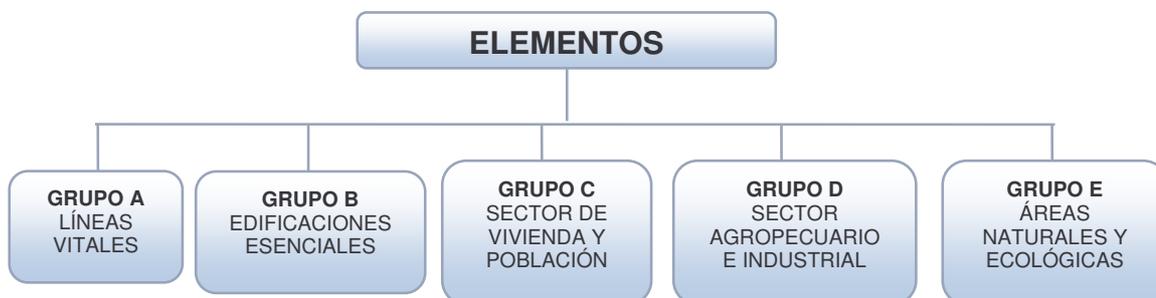
5.1.2 Optimización para el proceso de recolección de datos en campo. El formato comprobado en campo y diseñado inicialmente para ser diligenciado a mano, fue ingresado por medio del software Arqpad 1.0 a el computador de mano (Pocket PC Hp iPAQ y antena GPS), para la agilidad del proceso, el trabajo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

5.2 TRABAJO DE CAMPO

5.2.1 Clasificación de los elementos expuestos. Los elementos expuestos a evaluar en el estudio son parte constitutiva del entorno social y material, representado por las personas y por los recursos, que pueden ser afectados por el fenómeno de caída de ceniza volcánica.

En este aspecto se determinó el tipo y volumen de elementos que podrían ser afectados por procesos asociados a la amenaza volcánica y consistió en clasificar los elementos expuestos en categorías, mediante conteo, caracterización, ubicación y/o georreferenciación de los mismos de acuerdo con la clasificación de los cinco (5) grandes grupos (A, B, C, D, E), que se presenta en las siguientes figuras y se describe de manera general a continuación en la figura 19:

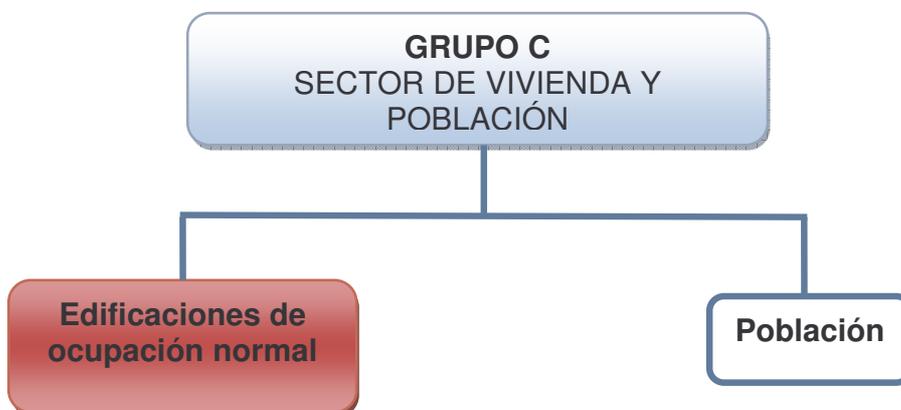
Figura 19. Clasificación de los elementos expuestos



Fuente: Corporación OSSO

En el desarrollo del presente trabajo se tuvo en cuenta las edificaciones de ocupación normal que se encuentran en el grupo C, donde clasifican el sector vivienda y población, el cual agrupa a las edificaciones de uso habitacional y residencial, así como a la población en general (ver Figura 20).

Figura 20. Clasificación del sector de vivienda y población



Fuente: Corporación OSSO

5.2.2 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). Vale la pena señalar que estas características se corroboraron en campo. Estas son:

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 21).

Figura 21. 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 22).

Figura 22. 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 23).

Figura 23. Cubierta liviana



Cubiertas en losa de concreto reforzado: Losa maciza es aquella que se construye totalmente en concreto reforzado y losa aligerada es aquella placa que se construye con casetones.

Figura 24. Cubierta en concreto reforzado



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

5.2.3 Inventario de las edificaciones. El número de viviendas de ocupación normal, es decir todas aquellas edificaciones 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, contando con en corregimiento de Bomboná, ascendieron a unas 4293 que corresponden a más del 90 % del total de edificaciones (Edificaciones esenciales y viviendas de ocupación normal). A continuación en la Tabla 2. se presenta el resumen con la totalidad de las viviendas levantadas, discriminadas según su tipología.

Para ver el inventario de una manera más detallada con la manzana representativa DANE, ver Anexo A - E.

Tabla 2. Resumen inventario de las edificaciones

<i>N°</i>	<i>Municipio</i>	<i>Cubiertas pesadas</i>	<i>Cubiertas livianas</i>	<i>Cubiertas moderadas</i>	<i>Losas</i>	<i>Total</i>
1	Nariño	333	19	122	118	592
2	La Florida	163	10	96	164	433
3	Sandona	642	29	344	746	1761
4	Consaca	173	8	136	219	536
	Bombona	34	6	237	45	322
5	Yacuanquer	276	9	93	271	649
TOTAL		1621	81	1028	1563	4293

Figura 25. Distribución de viviendas en el municipio de Nariño

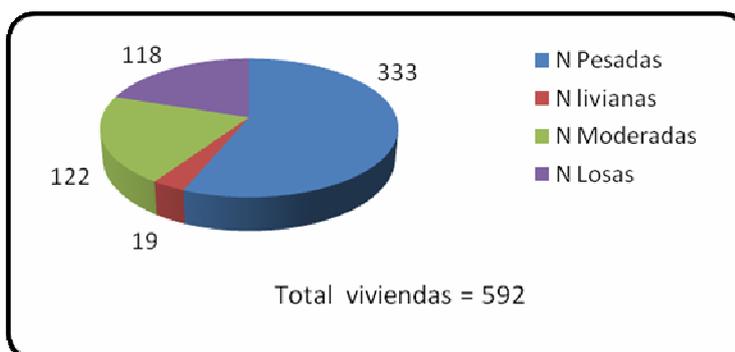


Figura 26. Distribución de viviendas en el municipio de La Florida

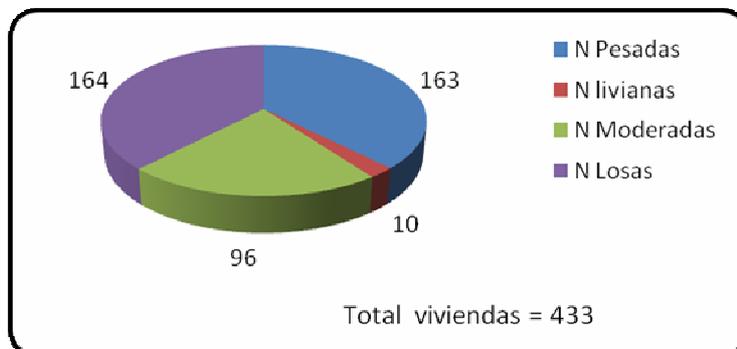


Figura 27. Distribución de viviendas en el municipio de Sandoná

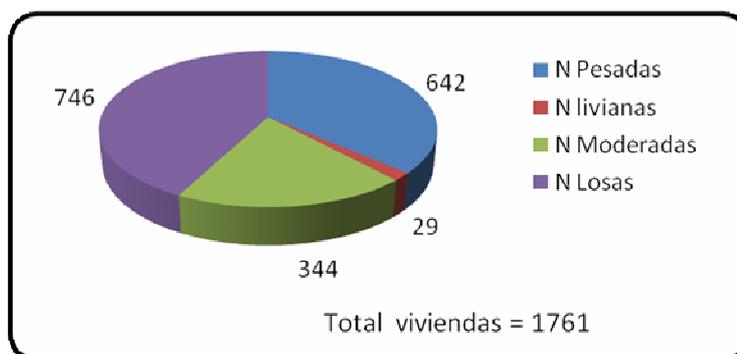


Figura 28. Distribución de viviendas en el municipio de Consacá

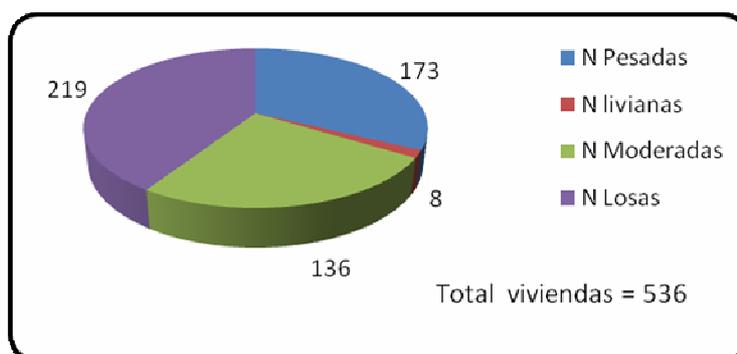


Figura 29. Distribución de viviendas en el corregimiento de Bomboná

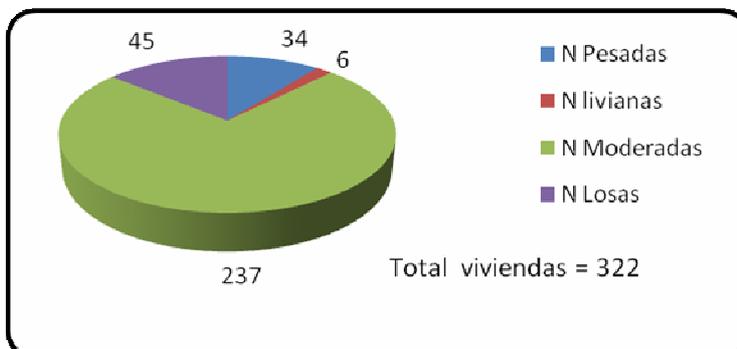
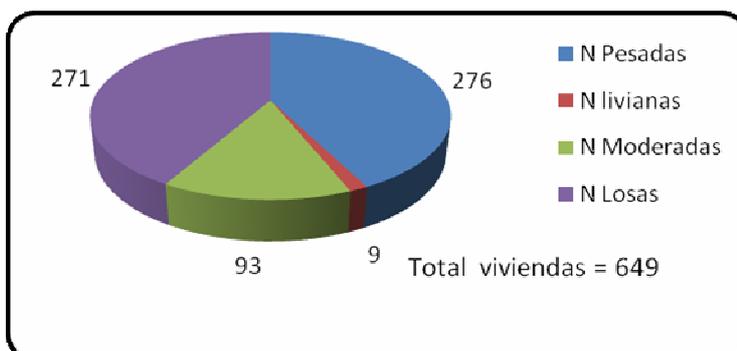


Figura 30. Distribución de viviendas en el municipio de Yacuanquer



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 individual.

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).

5.3.1 Estado del arte de la estimación de vulnerabilidad de cubiertas. 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).

Por ser el trabajo más completo y sistemático sobre vulnerabilidad a cargas de tefra (caídas piroclásticas) en cubiertas, y por su carácter ejemplar para la realización del presente informe, se hace aquí 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).

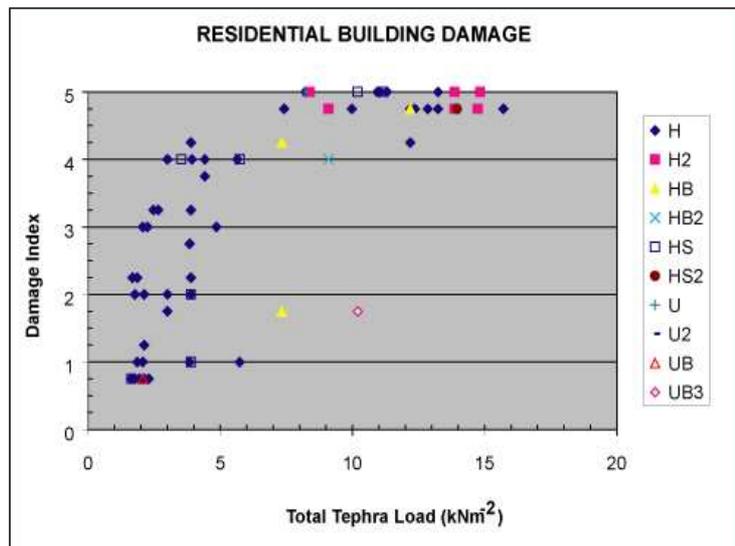
Uno de los muchos aspectos interesantes de este programa para el estudio del volcán Galeras está en que hay significativa coincidencia, aunque parcial, entre las tipologías que identificó *Spence et al. (2005)* para territorios europeos con aquellas identificadas en el estudio de *Ingeominas (1997)* 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*). En la Figura 31. se presenta el diagrama de daños en vivienda en Rabaul por la erupción del Tavurvur (Papua-Nueva Guinea), 1994;

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

la muestra de esta evaluación sistemática de viviendas, de distintas tipologías y buena calidad y estado, clasifica con una escala de índices de daños (0 > colapso) comparable con una escala de probabilidad de daño; nótese que esta distribución tiene una forma similar a la de funciones de vulnerabilidad.

Figura 31. Diagrama de daños en vivienda en Rabaul por la erupción del Tavurvur (Papua-Nueva Guinea), 1994



Fuente: Blong, 1994.

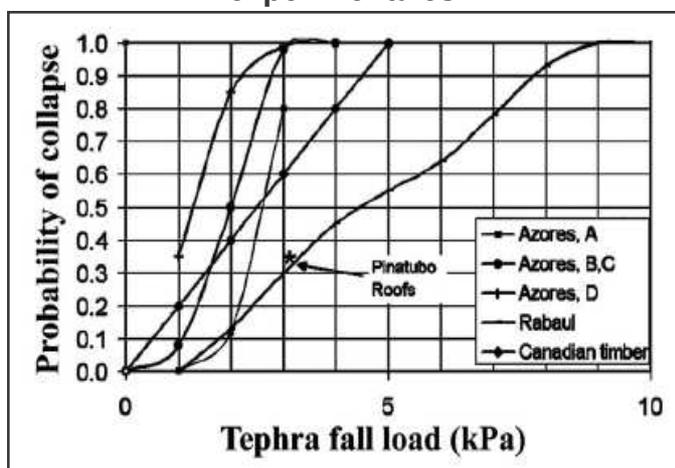
Spence et al. Incluyen la tabla de distribución de daños por la erupción del Pinatubo en 1991 (Spence et al., en Newhall & Punongbayan edit. (1994)), hecha con base en la clasificación de vulnerabilidades y daños por sismo de la norma sismorresistente europea (EMS-98), que utiliza una escala de seis clases. Bajo cargas de más de 15-20 cm de ceniza, el 49% de las edificaciones de la muestra sufrieron entre daños severos y colapso.

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 ángulo de reposo.

De la misma manera, incluye curvas 'Azores' (Pomonis), curva de Rabaul, datos de Pinatubo (3 Kpa y 33% daños graves, y datos de laboratorio para estructuras de madera canadiense, para cargas 0.9-6 Kpa. Conclusión: rango muy grande de

vulnerabilidades. En general, desempeño mejor en promedio que pronósticos a partir de cálculos, quizá por diversidad de trayectorias de carga posibles en las estructuras. En la Figura 32, se presenta el compendio de datos disponibles para probabilidad de colapso de cubiertas bajo carga de tefra. Las curvas 'Azores' son resultado de cálculos basados en ensayos de materiales con maderas típicas para estructuras de cubiertas. Los datos 'Pinatubo' y 'Rabaul' son de evaluaciones sistemáticas de daños por caída de ceniza, y la relación 'Canadian timber' es resultado de ensayos de laboratorio con cubiertas pequeñas (vivienda) con madera canadiense.

Figura 32. Datos de Vulnerabilidad disponibles de trabajos de campo o experimentales.



Fuente: Spence et al. (2005)

Estudios en área Vesubio. *Spence et al. (2005)* describe en detalle estudios de resistencia mediante mediciones de vibración ambiental en edificaciones y correlación con propiedades geométricas y constitutivas de la estructura que definen la resistencia de cubiertas.

Cálculo de la carga vertical limite (ceniza) mediante masa y geometría de losa, momento de flexión limite en centro, peso de la losa, para 5 tipos de cubiertas, con límites inferior y superior de cargas verticales estáticas inferiores, y sus medias aritméticas. Las cinco (5) tipologías (Tabla 3. p. 484) son muy similares a la clasificación posterior (Zuccaro et al., 2008). En la Tabla 3. se presentan parámetros usados para evaluar el límite inferior y superior de resistencias de cubiertas para cada tipología (área Vesubio), resultado de cálculos de resistencia con base en ensayos de vibración en edificaciones reales.

Tabla 3. Indicador de vulnerabilidad física a partir del daño severo

Type	Lower Limit						Upper Limit					
	w (kPa (N/m ²))	M (kNm/m)	δ	β	L (m)	Q_{lim} (kPa)	M (kNm/m)	δ	β	L (m)	Q_{lim} (kPa)	Q_{mean} (kPa)
Wooden pitched roof and flat iron.	5	1	8	1.0	1*	2	1.5	8	1.0	1*	7	4.5
Reinforced concrete SAP.	5	9	12	1.2	6	<0	12	16	1.5	4	10	5
Reinforced concrete older than 20 years.	5	17.5	12	1.2	6	2	22.5	16	1.5	4	25	13.5
Reinforced concrete younger than 20 years or steel beam with reinforced concrete slab.	5	22.5	12	1.2	6	4	27.5	16	1.5	4	35	20
Reinforced concrete pitched roof	5	30**	12	1.2	6	7	40**	16	1.5	4	50	28.5

* Distance between the beam. In this case, the collapse is due to the failure of infill material between the iron beams.
 ** M is strengthened by axial stress.

Fuente: Spence et al., 2005.

Las cargas limite unitarias se calculó con base en los valores de la tabla así:

$$Q_{lim} = \frac{\delta\beta M}{L^2} - w$$

Con M = ancho unitario de la losa, con momento de flexión limite en el centro, β = incremento de resistencia por capas no estructurales, δ = coeficiente relacionado con apoyos de losa en extremos, L = longitud, w = peso propio de la losa (5 Kpa).

En el paso siguiente se calculó la probabilidad de colapso con:

$$p(\text{collapse}) = \Phi(Q_{mean}, Q_{dev})$$

Como la distribución normal cumulativa Φ , especificada con la media Q_{mean} y la desviación estándar Q_{dev} . Los valores respectivos para las cuatro clases de la tipología 'vesubiana' están en la Tabla 4. Para todas las cinco clases se asumió – juicio experto de los autores europeos (Programa EXPLORIS)– como Q_{dev} el 20% de Q_{mean} . Esta variación se supone dar cuenta de incertidumbres en la resistencia de los materiales, en dimensiones estructurales y en trayectorias de carga. Se presenta los parámetros (carga Q media y su desviación estándar) para la estimación de probabilidades de colapso para tipos de cubiertas en el área del Vesubio.

Tabla 4. Parámetros (carga Q media y su desviación estándar)

Type	Q_{mean} (kPa)	Q_{dev} (kPa)
Wooden pitched roof and flat iron.	4.5	0.9
Reinforced concrete SAP.	2.5	0.5
Reinforced concrete older than 20 years.	9.5	1.9
Reinforced concrete younger than 20 years or steel beam with reinforced concrete slab.	13.5	2.7
Reinforced concrete pitched roof.	20	4

Fuente: Spence et al., 2005.

Para todos los tipos de cubiertas vesubianas la desviación estándar de las Q (cargas) se asumen como 20% (con base en juicio de autores, más que de una muestra estadística satisfactoria. Esta DS se supone incorporar las variaciones en resistencia de materiales, en dimensiones estructurales, y en trayectorias de carga.

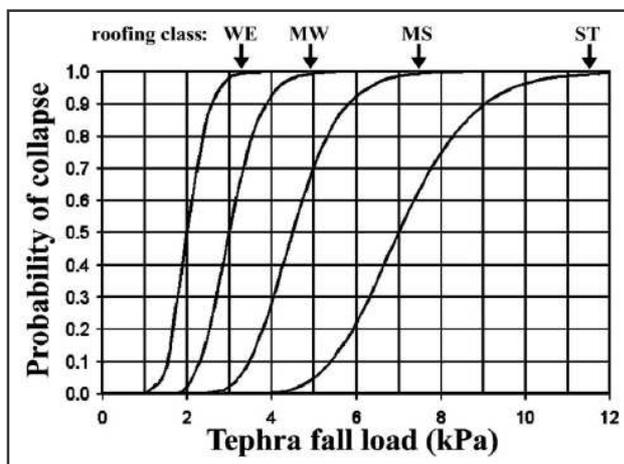
En esta clasificación 'SAP' (tipo 2) es una tipología especial (no comparable con nada en la región del Galeras), una tecnología muy económica con adobe, concreto y acero, común en el sur de Italia en la post-guerra, que actualmente ya presenta casos de colapso espontaneo (lo que explica el $Q_{lim}<0$ en la tabla).

Con base en lo anterior, y en particular el compendio de datos sobre probabilidad de colapsos de cubiertas bajo carga de ceniza y la tabla de parámetros para edificaciones en el área del Vesubio, Spence et al. Proponen un conjunto de curvas de vulnerabilidad para territorios europeos, en las cuales también tienen en cuenta que la información disponible de evaluaciones de daños, de estudios analíticos y de laboratorio donde mostraron que la resistencia de la mayoría de las cubiertas está entre 1 y 8 Kpa. En consecuencia, y considerando que cuatro clases de tipologías eran suficientes por ahora, definieron las tipologías de manera tal que las resistencias medias (de las $p_{(colapso)}$) de las cuatro clases quedaran en este rango, equiespaciadas en una escala logarítmica, con la mas débil en 2 Kpa y la más resistente 7 Kpa, y las intermedias (MW, MS) en resistencias medias de 3 y 4.5 Kpa.

Esta clasificación se presenta más adelante, en la cual también se ha incluido, para comparación, la tipología publicada por los mismos autores para el área del Vesuvio (Zuccaro et al., 2008), comentada más abajo. En la figura 33, se presentan las curvas de vulnerabilidad de cubiertas a caída de tefra para clases de cubiertas europeas descritas en "Tabla 5"¹⁶. Para descripción de clases (tipologías) WE, MW, MS y ST

¹⁶ Table 5. Proposed classification of European roof types for tephra fall resistance. p. 487. *Spence et al., 2006*

Figura 33. Curvas de vulnerabilidad de cubiertas a caída de tefra para clases de cubiertas europeas



Fuente: Fig. 6 en Spence et al., 2006.

WE: débil, **MW:** medianamente débil, **MS:** medianamente resistente, **ST:** resistente. (Fig. 6 de *Spence et al.*, 2005).

MW: Techo de lámina o tejas, viejo o en mal estado. Muros de mampostería.

MW: Techo de lamina sobre madera, calidad media; tejas sobre madera.

MS: Techo de concreto reforzado. Techo de lámina sobre estructura de madera, buena calidad y condición, diseñado para soportar vientos ciclónicos.

ST: Losa de concreto reforzado diseñado para acceso, buena calidad, edad menor de 20 años.

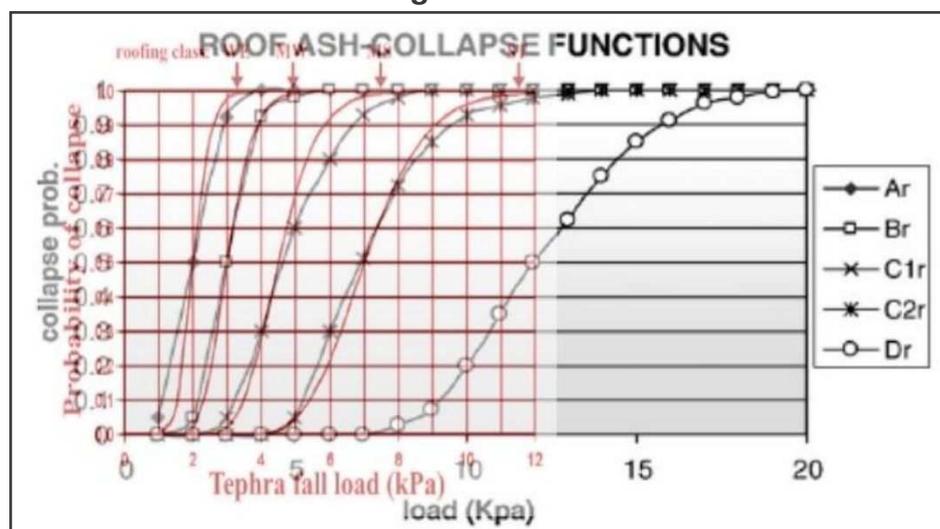
Luego definieron la curva de vulnerabilidad para cada clase (ver Figura 36) como distribución logarítmica normal cumulativa, con un coeficiente de variación de 20% y para medias definidas por juicio de autores sobre una escala logarítmica, lo cual da una dispersión similar a cubiertas del área de Vesubio. Cabe anotar aquí que la distribución log-normal es apropiada para procesos aleatorios de distribución sesgada como producto de interacción de fuerzas independientes pero de efectos multiplicativos, como de hecho puede ocurrir en el proceso de falla en una estructura compleja.

En una publicación posterior del programa EXPLORIS (*Zuccaro, G., F. Cacace, R.J.S. Spence & P.J. Baxter* (2008)¹⁷, en la cual se evalúan vulnerabilidades a

¹⁷ *Zuccaro, G., F. Cacace, R.J.S. Spence & P.J. Baxter. Impacto of explosive scenarios at Vesubius. J. Volcanology Geothermal Res., vol. 178, pp. 416-453)*

sismo volcánico, caída de ceniza y flujos piroclásticos en el área del Vesubio, los autores asumen una tipología de edificaciones diferente a la propuesta para Europa (*Spence et al., 2005*) pero similar a la descrita en esa misma publicación en la sección sobre estudios en el área del Vesubio. También utilizan un conjunto de curvas de vulnerabilidad (probabilidad de daño en función de carga) que se distingue de la propuesta para Europa (*Spence et al., 2005*) en la adición de una curva para la quinta tipología – más resistente –, con un rango de resistencias entre 1 y 20 KPa (las curvas propuestas para Europa solo abarcan cargas entre 1 y 12 Kpa. Las cuatro curvas contenidas en ambos conjuntos (*Spence et al., 2005* y *Zuccaro et al., 2008*) muestran ciertas diferencias (ver superposición en la Figura 36); una consulta a los autores no fue respondida hasta ahora. Por otro lado, y considerando que la quinta tipología (D_r) de la clasificación 'vesubiana' es para cubiertas inclinadas, una carga de 12 KPa (la Q media) equivale aproximadamente a una capa de ceniza de 1 metro, lo que podría superar el ángulo de reposo de la ceniza y además es mucho mayor a los probables espesores en el Galeras, según el Mapa de Amenazas Volcánicas (Ingeominas, 1997). En la siguiente figura, se presenta la superposición de conjuntos de funciones de vulnerabilidad a carga de ceniza publicadas por *Spence et al., 2005* (rojo) y *Zuccaro et al., 2008* (negro).

Figura 34. Superposición de conjuntos de funciones de vulnerabilidad a carga de ceniza



Los métodos de cálculo de las funciones. Las funciones de vulnerabilidad para cubiertas bajo carga de cenizas pueden ser derivadas de diversas fuentes de datos, que idealmente se complementan y conjugan:

- Datos empíricos
- Análisis a partir de primeros principios

- Funciones o normas existentes
- Ensayos de laboratorios
- Funciones de V o valores límite para otros tipos de carga (ej. nieve, 'cargas vivas').

Datos empíricos. Funciones empíricas a partir de observaciones de campo (evaluación de daños post—erupción). Hasta la fecha solo existen dos evaluaciones sistemáticas de daños, Pinatubo (Filipinas) 1991 y Rabaul (PNG) 1994. Ambas, así como las FdV que de ahí se derivaron (Spence et al., 2005), estas fueron útiles en el estudio como base comparativa (tipologías de edificaciones). El mejor ejemplo publicado de una FdV empírica es la publicada por *Blong* (1994) para Rabaul; cubre todo el rango de niveles de daño y distingue tipologías constructivas.

Estos datos empíricos, empezaron a ser reportados a partir del estudio de los efectos de las erupciones del volcán Pinatubo, Filipinas (Newhall & Punongbayan edit., 1996), que dejaron depósitos de ceniza de más de 30 cm y causaron destrucción y daño en gran cantidad y diversidad de edificaciones.

Para Galeras no existen aún datos o relaciones empíricas; la historia eruptiva reciente del volcán no incluye caídas de ceniza mayores a pocos milímetros, insuficiente para causar daños en las coberturas.

La primera evaluación de daños en coberturas de un rango de tipologías de edificaciones que muestra la forma característica de una función de vulnerabilidad fue la publicada por *Blong* (2003) para la erupción del Tavurvur, que destruyó parte de la ciudad de Rabaul (Papúa – Nueva Guinea).

Para derivar FdV específicas hay que recurrir a todas las fuentes de información disponibles:

Análisis a partir de primeros principios. Es el cálculo de la respuesta (deformación) de estructuras sometidas a sollicitaciones, como en este caso las cargas verticales de una caja de ceniza, mediante relaciones constitutivas (esfuerzo-deformación) que tienen en cuenta la geometría y las propiedades materiales relevantes de la estructura.

Un ejemplo de este procedimiento es el aplicado en el primer estudio de vulnerabilidad para la región del Galeras (Ingeominas, 1997), realizado con las prescripciones de manuales de diseño sismo resistente y de diseño de estructuras de madera de la época.

Los ensayos de laboratorio. También pueden ser una ruta hacia la estimación de funciones de vulnerabilidad. En el marco del proyecto EXPLORIS se realizaron distintos tipos de pruebas sobre estructuras reales (Spence et al., 2005), incluyendo respuestas a vibraciones y ensayos con cargas estáticas (Zuccaro et.

Al., 2008). Este tipo de evaluaciones no se han realizado para edificaciones en el área de influencia del Galeras.

Análisis de cargas y normas se formulan en términos de esfuerzo (Kpa ó KNm²) pero evaluaciones empíricas solo se han hecho midiendo espesores de ceniza. El parámetro de conversión – la densidad – es muy variable, en función de granulometría, compactación y humedad principalmente y por tanto introduce un factor de incertidumbre. Algunos valores reportados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores de densidad de la ceniza

	Densidad[kg/m ³]	Carga[kg/m ³]
Ceniza seca, suelta	500-1.300	5 - 13
Ceniza húmeda compacta	1.000-2.000	10 - 20

Fuente: US Geol. Survey

En los estudios realizados por Ingeominas 1997, se encontró el valor de densidad de 1.250 kg/m³, para ceniza húmeda que es el utilizado para los cálculos de este informe.

Funciones o normas existentes. Este recurso, común en muchos casos de normas de desarrollo de normas de diseño y construcción (p.ej. los códigos de sismo resistencia desarrollados en diversos países a partir de la norma empleada en los EEUU) cuenta, para el caso de la vulnerabilidad a cargas de ceniza, con la propuesta para países europeos (Spence et al., 2005), la única existente actualmente, fundamentada en un conjunto amplio de investigaciones.

Por ejemplo, las cargas especificadas de manera preliminar por expertos para el Vesubio (Italia), según Zuccaro & Petrazzuoli (2004), con 3 valores de cargas límite para estructuras de cubierta de 200 kg/m² (madera), 300 kg/ m² (hierro) y 400 kg/ m² (concreto reforzado), y la propuesta de curvas de vulnerabilidad para la Comunidad Europea de Spence et al. (2005), para cuatro tipos de cubiertas, derivadas de la conjugación de resultados de evaluaciones de daños (Pinatubo, Rabaul).

Tabla 6. Material vs resistencia

Material	Resistencia
Madera	200 kg/m ²
Hierro	300 kg/m ²
Concreto reforzado	400 kg/m ²

Fuente: Zuccaro & Petrazzuoli, 2004

Por el sólido soporte de esta propuesta y por ser la única existente, también se ha tenido en cuenta para la determinación de funciones de vulnerabilidad a carga de cenizas de este proyecto. ¡Las cubiertas más pesadas son las más resistentes a carga de ceniza!

Funciones de Vulnerabilidad o cargas límite para otros tipos de carga. En muchos países ya existen normas o guías para el diseño de estructuras bajo cargas distintas a ceniza volcánica (cargas vivas, nieves, vientos ciclónicos, etc.). De estas normas se pueden asimilar en algunos casos procedimientos de cálculo y valores límite para los estimativos de vulnerabilidad a carga de cenizas.

5.3.2 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.

Con los resultados del proyecto EXLORIS, en cambio, la principal dificultad estuvo en la comparación de sus tipologías (4 en Spence et al., 2005, y 5 en Zuccaro *et. al.*, 2008), con las tipologías apropiadas para el conjunto de edificaciones en el área del Galeras.

Con algunos de los autores de EXPLORIS se hicieron consultas por correo, para aclarar dudas y aparentes inconsistencias entre lo publicado en 2005 (Spence *et. al.*) y 2008 (Zuccaro *et. al.*)

5.3.3 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, vigas 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.

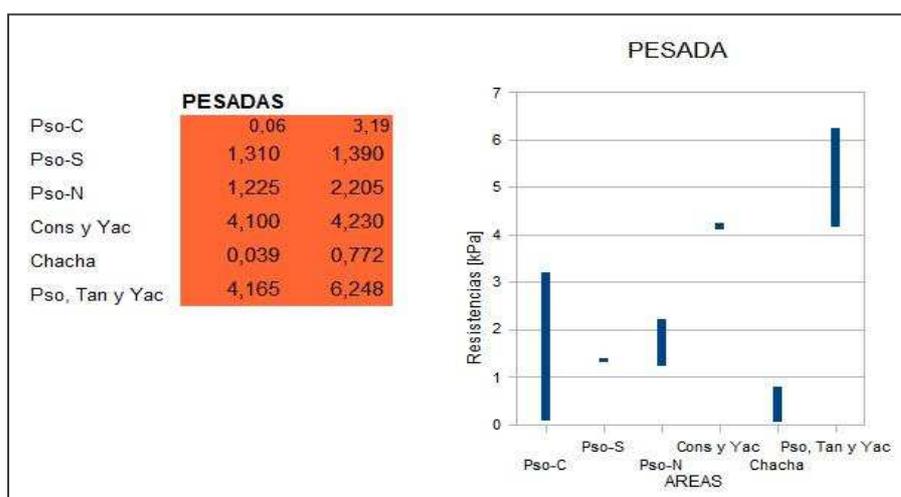
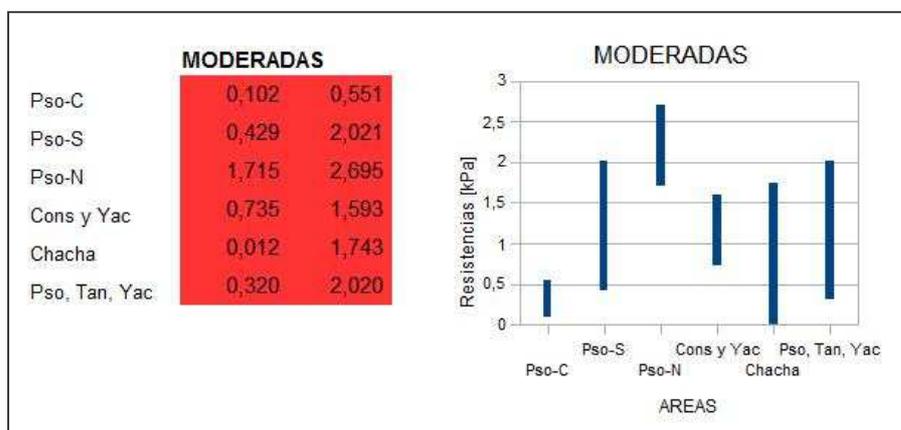
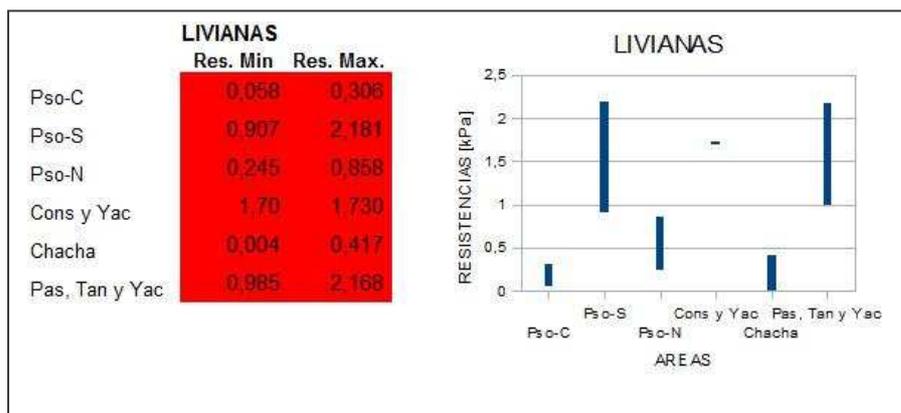
Tabla 7. Comparación resistencias de cubiertas en proyectos de grado

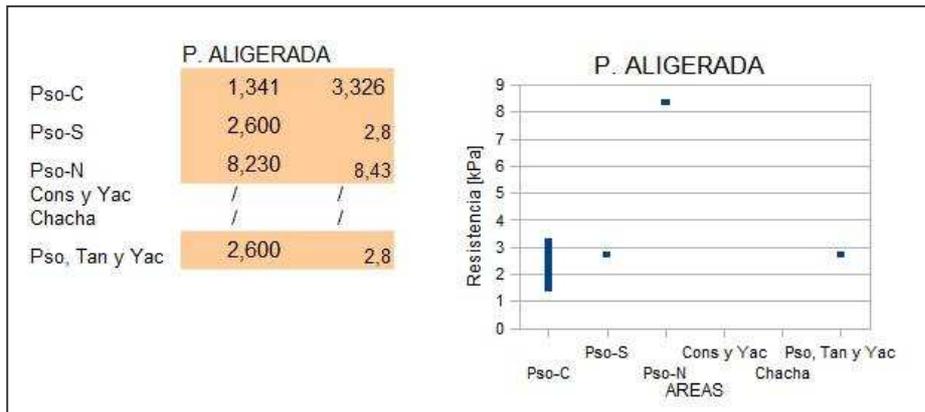
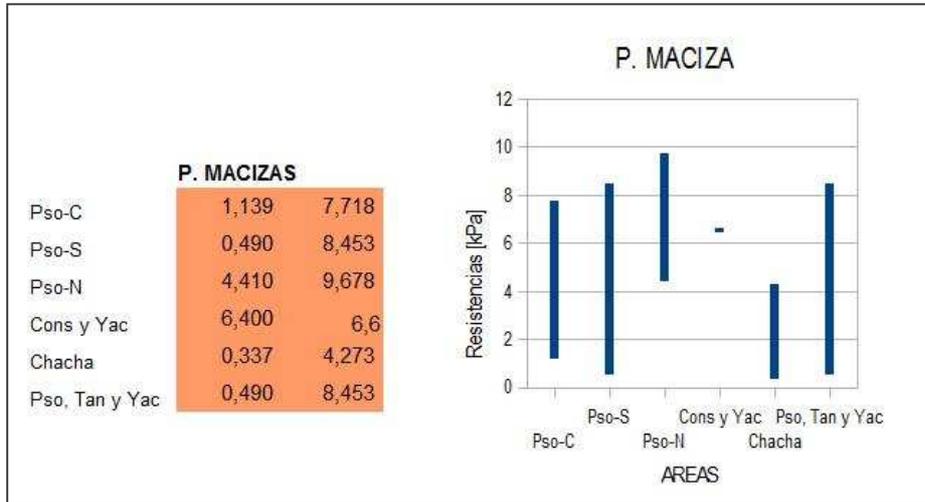
TIPO DE CUBIERTA		RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Centro Pasto			RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Pasto Sur			RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Pasto norte			RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Comarca - norte & Yacuquir Sur			RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Chachagui			RESISTENCIA - ESPESOR DE CENIZA (e) - Pasto, Tungua y Yacuquir		
		entre	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	entre	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	entre	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	entre	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	entre	Resistencia Kpa mínima	Resistencia Kpa máxima	entre	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 35. 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 asigno 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 siguiente, se presenta los valores asignados, para dicho cálculo.

Tabla 8. 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 DISTRIBUCIÓN DE DAÑOS POR EL ESCENARIO MÁXIMO PROBABLE DE ERUPCIÓN VOLCÁNICA

5.4.1 Determinación de la sollicitación de carga de ceniza. A partir del modelo de dispersión y acumulación de ceniza de la corporación OSSO, como escenario probable de la erupción de los 5000 años, se tomó un valor promedio de las cantidades de espesor ceniza que establece el modelo para el área de la cabecera municipal, Ver tabla 9.

Tabla 9. Espesor de ceniza según modelo de Corporación OSSO

Nº	MUNICIPIO	ESPESOR DE CENIZA(cm)
1	Nariño	13,89
2	La Florida	22,47
3	Sandoná	9,47
4	Consacá	15,04
	Bomboná	16,1
5	Yacuanquer	10,12

5.4.2 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, para lo cual se estableció unos rangos de análisis según criterio del autor, basado en el análisis del comportamiento estructural el cual determina si los daños son recuperables o no. Ver tabla 10.

Tabla 10. 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

Fuente: este informe

5.4.3 Ejemplo de cálculo de daño. Para efectos del ejemplo se ha tomado aleatoriamente una manzana del municipio de Nariño, en donde se encontró solamente una cubierta pesada (ejemplo) y una cubierta en losa, las características de esta se muestran a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. Características de la cubierta pesada (Ejemplo)

Manzana DANE	5248100010301
Tipo de cubierta	Pesada
Angulo de inclinacion	30°
Material de muros	Tapia pisada
Numero de pisos	1

Fuente: este informe

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

$$FRP = \text{Cos}(30) = 0.866$$

Solicitud por carga de ceniza afectada por el FRP. La solicitud arrojada por el modelo de dispersión y acumulación de ceniza, para el municipio de Nariño

es de 13.89cm de ceniza en el área del casco urbano. Entonces el valor para el cálculo, será:

$$Scf = S * FRP$$

Donde:

S = Solicitación de carga de ceniza

$$Scf = 13.89 * 0.866 = 12.03 \text{ cm}$$

Índice de vulnerabilidad. Como se explicó en el modelamiento de la vulnerabilidad, este se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$Iv = \frac{Scf}{R}$$

Donde:

R = resistencia de la cubierta en términos de cm de ceniza (Tabla 8)

$$Iv = 12.03 \text{ cm} / 23 \text{ cm} = 0.523$$

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 este tipo de cubierta.

Como el Iv se encuentra en el rango de 0.5 – 0.75, el daño esperable para la cubierta será: MODERADO

5.4.4 Resultado de la distribución de daño para los municipios de estudio.

Los resultados consignados muestran la distribución del daño por manzana según el tipo de cubierta (Tabla 12) y la distribución del daño en viviendas (Tabla 13), con el escenario máximo probable de caída piroclástica.

Estos resultados se encuentran referenciados con la manzana representativa DANE en los Anexo F – J.

Tabla 12. Distribución de daño por manzana

MUNICIPIO DE NARIÑO							
TIPO CUBIERTA	FENOMENO	DISTRIBUCION DEL DAÑO POR MANZANA					
		NA	LEVE	PARCIAL	MODERADO	GRAVE	COLAPSO
Pesada	CP	8	0	2	46	0	0
Liviana		41	0	0	0	0	15
Moderada		17	0	0	0	0	39
Losa		13	0	43	0	0	0

MUNICIPIO DE LA FLORIDA							
TIPO CUBIERTA	FENOMENO	DISTRIBUCION DEL DAÑO POR MANZANA					
		NA	LEVE	PARCIAL	MODERADO	GRAVE	COLAPSO
Pesada	CP	11	0	0	0	28	0
Liviana		29	0	0	0	0	10
Moderada		14	0	0	0	0	25
Losa		13	0	26	0	0	0
MUNICIPIO DE SANDONÁ							
TIPO CUBIERTA	FENOMENO	DISTRIBUCION DEL DAÑO POR MANZANA					
		NA	LEVE	PARCIAL	MODERADO	GRAVE	COLAPSO
Pesada	CP	17	0	75	0	0	0
Liviana		69	0	0	0	0	23
Moderada		23	0	0	0	0	69
Losa		10	0	82	0	0	0
MUNICIPIO DE CONSACÁ							
TIPO CUBIERTA	FENOMENO	DISTRIBUCION DEL DAÑO POR MANZANA					
		NA	LEVE	PARCIAL	MODERADO	GRAVE	COLAPSO
Pesada	CP	15	0	0	23	0	0
Liviana		32	0	0	0	0	6
Moderada		11	0	0	0	0	27
Losa		6	0	32	0	0	0
CORREGIMIENTO DE BOMBONÁ							
TIPO CUBIERTA	FENOMENO	DISTRIBUCION DEL DAÑO POR MANZANA					
		NA	LEVE	PARCIAL	MODERADO	GRAVE	COLAPSO
Pesada	CP	10	0	0	14	0	0
Liviana		19	0	0	0	0	5
Moderada		4	0	0	0	0	20
Losa		6	0	18	0	0	0
MUNICIPIO DE YACUANQUER							
TIPO CUBIERTA	FENOMENO	DISTRIBUCION DEL DAÑO POR MANZANA					
		NA	LEVE	PARCIAL	MODERADO	GRAVE	COLAPSO
Pesada	CP	7	0	28	0	0	0
Liviana		28	0	0	0	0	7
Moderada		11	0	0	0	0	24
Losa		8	0	27	0	0	0

** NA: número de manzanas en las que no se encuentra la respectiva tipología

Tabla 13. Distribución del daño en viviendas

MUNICIPIO DE NARIÑO					
Viviendas afectadas	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	19	122	0	141
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	329	0	0	0	329
PARCIAL	4	0	0	118	122
LEVE	0	0	0	0	0
MUNICIPIO DE LA FLORIDA					
Viviendas afectadas	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	10	96	0	106
GRAVE	163	0	0	0	163
MODERADO	0	0	0	0	0
PARCIAL	0	0	0	164	164
LEVE	0	0	0	0	0
MUNICIPIO DE SANDONÁ					
Viviendas afectadas	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	29	344	0	373
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	0	0	0	0	0
PARCIAL	642	0	0	746	1388
LEVE	0	0	0	0	0
MUNICIPIO DE CONSACÁ					
Viviendas afectadas	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	8	136	0	144
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	173	0	0	0	173
PARCIAL	0	0	0	219	219
LEVE	0	0	0	0	0
CORREGIMIENTO DE BOMBONÁ					
Viviendas afectadas	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	6	237	0	243
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	34	0	0	0	34
PARCIAL	0	0	0	45	45
LEVE	0	0	0	0	0
MUNICIPIO DE YACUANQUER					
Viviendas afectadas	Pesada (P)	Liviana (L)	Moderada (M)	Losas (Ls)	Total
COLAPSO	0	9	93	0	102
GRAVE	0	0	0	0	0
MODERADO	0	0	0	0	0
PARCIAL	276	0	0	271	547
LEVE	0	0	0	0	0

5.5 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 probabilidad de colapso; 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 adoptó el método de carga última (USD).

5.5.1 Análisis para cubiertas en madera. La madera que se utiliza en la construcción de estructuras en la zona de estudio es el Eucalipto (madera rolliza) (Figura 23), la madera es usada en estado seco. La densidad básica del Eucalipto es 0.55 g/cm^3 , razón por la cual pertenece a las maderas del grupo estructural C (JUNAC, 1984). La densidad de la ceniza húmeda es 1250 kg/m^3 (Ingeominas)

5.5.2 Análisis para correas. Consistió en calcular los momentos máximos que producen las cargas a que se someten las correas, de la manera más a aproximada posible a la real, para poder verificar si las dimensiones de los elementos utilizados son adecuadas para soportar las sobrecargas impuestas por acumulación de ceniza. Las correas están sometidas a esfuerzos de flexión y cortante. Para el análisis de las correas se asumió la teoría de diseño de la JUNAC (1984) y las cargas de la NSR – 98 (Capítulo B). Vale la pena decir que el procedimiento de cálculo para las correas de las diferentes tipologías (liviana, moderada y pesada) es el mismo. (Ver Anexo K). A continuación se muestra un ejemplo de análisis para una correa de cubierta pesada.

Datos iniciales para el cálculo de resistencia de la correa.

Tabla 14. Propiedades de la madera

fm	100	kg/cm ²
ft	75	kg/cm ²
fc II	80	kg/cm ²
fc I-	15	kg/cm ²
fv	8	kg/cm ²
Eprom	90000	kg/cm ²
Emin	55000	kg/cm ²

Fuente: JUNAC, 1984

Tabla 15. Datos para la correa

Luz	0,8	m	Carga de montaje ó barrido		
Diámetro correas ϕ	0,09	m	Carga viva	35	kg/m ²
DCO	1,5	m	Peso vigas (WV)	3,82	kg/m ²
Z	71,57	cm ³	Peso techo (Teja de barro)	75	kg/m ²
I	322,06	cm ⁴	Área vigas	63,62	cm ²

Fuente: este informe



Variables tomadas de la Tabla 1.

- Modulo de sección transversal (Z).

Momento máximo en kg - m (Mmx)

$$M_{mx} = f_m \cdot Z$$

$$M_{mx} = 71,57 \text{ kg - m}$$

Carga total repartida por correa en kg/m (WTR)

Viga simplemente apoyada

$$WTR = \frac{8 \cdot M_{mx}}{L \cdot f^2}$$

$$WTR = 894,62 \text{ kg/m}$$

Carga total en kg/m (WT)

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

$$WT = 596,41 \text{ kg/m}^2$$

Peso que absorbe la correa en kg/m² (WV)

$$WCO = \frac{Pmc}{DCO}$$

$$WCO = 3,82 \text{ kg/m}^2$$

Carga adicional por acumulación de ceniza en kg/m² (WC)

$$WC = WT - WCO - Wt - WL$$

$$WC = 482,59 \text{ kg/m}^2$$

Espesor de ceniza en m (e)

$$e = \frac{WC}{\gamma_e}$$

$$e = 0,39 \text{ m}$$

- **Momento de inercia por limitación de flexiones (I).**

Carga total repartida por correa en kg/m (WTR)

Viga simplemente
apoyada

$$WTR = \frac{304 * l * E}{5 * Le^3 * k}$$

k = 250
(JUNAC)

$$WTR = 1739,14 \text{ kg/m}$$

Carga total en kg/m (WT)

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

$$WT = 1159,42 \text{ kg/m}^2$$

Peso que absorbe la correa en kg/m² (WV)

$$WCO = \frac{Finc}{DCO}$$

$$WV = 3,82 \text{ kg/m}^2$$

Carga adicional por acumulación de ceniza en kg/m² (WC)

$$WC = WT - WCO - Wt - WL$$

$$WC = 1045,61 \text{ kg/m}^2$$

Espesor de ceniza en m (e)

$$e = \frac{WC}{\gamma_c}$$

$$e = 0,84 \text{ m}$$

- **Por acción del esfuerzo cortante (fv).**

Fuerza cortante en la sección crítica a una distancia h del apoyo en kg (Vh)

$$Vh = \frac{fv * A}{1,5}$$

$$Vh = 339,29 \text{ kg}$$

Carga total repartida por correa en kg/m (WTR)

$$WTR = \frac{2 * Vh}{Lef - 2 * D}$$

$$WTR = 1094,49 \text{ kg/m}$$

Carga total en kg/m² (WT)

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

$$WT = 729,66 \text{ kg/m}^2$$

Peso que absorbe la correa en kg/m² (WV)

$$WV = 3,82 \text{ kg/m}^2$$

Carga adicional por acumulación de ceniza en kg/m² (WC)

$$WC = WT - WCO - Wt - WL$$

$$WC = 615,84 \text{ kg/m}^2$$

Espesor de ceniza en m (e)

$$e = \frac{WC}{\gamma_c}$$

$$e = 0,49 \text{ m}$$

Tabla 16. Resistencia de correa para cubierta pesada

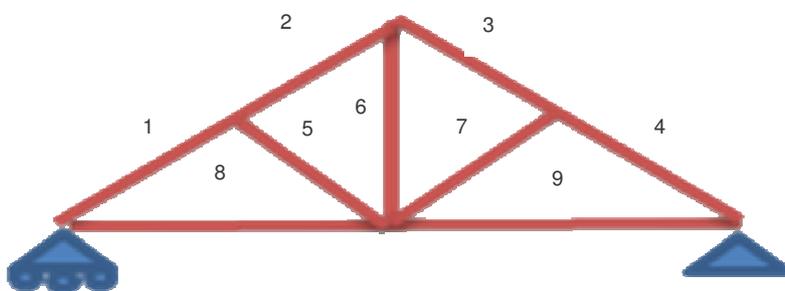
Análisis por:	Carga en:			
	e (m)	e (cm)	kg/m ²	KPa
MODULO DE SECCION TRANSVERSAL	0,39	38,6	482,59	4,734
LIMITACION DE FLEXIONES	0,84	83,6	1045,61	10,257
ESFUERZO CORTANTE	0,49	49,3	615,84	6,041

Para las correa con estas características la falla se produce por el módulo de sección transversal a los 38.6 cm de ceniza o es lo mismo decir en términos de carga 4.73 KPa

5.5.3 Análisis de armadura. Con el espesor que produce la falla en las correas se realiza un chequeo de los elementos de la armadura, en los que generalmente se encuentran esfuerzos de tracción o compresión; aunque este espesor de ceniza no es crítico para la armadura, puede iniciar un la falla de manera lenta, gradual y progresiva hasta llegar al colapso total de la estructura de cubierta.

Para que la falla se produzca en la armadura es necesario seguir el proceso de chequeo de la estructura de manera iterativa, variando el espesor de ceniza hasta que alguno de los elementos de la armadura cumpla con las condiciones limite y finalmente colapse. Se encontró que los elementos críticos de la estructura de cubierta montante maestro tipo I, son los elementos 1 y 4. (Ver Figura 36)

Figura 36. Elementos de la armadura montante maestro tipo 1



Fuente: dibujado a partir de JUNAC, 1984

Las propiedades de la madera son las mismas empleadas para el cálculo de las correas (Tabla 14)

Tabla 17. Datos para la armadura

Luz	3	m	Wt	75	kg/m ²	I	2485,05	cm ⁴
α	30	°	Carga viva	35	kg/m ²			
Díámetro correas	0,09	m	Peso correas (WCO)	7,16	kg/m ²	Área correas	36,353	cm ²
DCO	0,8	m	Peso cielo raso	90	kg/m ²			
DC	1	m						
Díámetro diagonales	0,1	m	Peso diagonales (Pmd)	7,07	kg/m	Área diagonales	78,54	cm ²
Díámetro cuerda sup	0,15	m	Peso cuerdas y pendolón (Pmcp)	15,90	kg/m	Área cuerdas y p.	176,71	cm ²
Díámetro cuerda inf	0,15	m						
Díámetro pendolón	0,15	m						



Carga adicional por acumulación de ceniza en kg/m² (WC)

$$e = 0,386 \text{ m}$$

$$WC = 482,5 \text{ kg/m}^2$$

Carga muerta en kg/m² (WD)

$$WD = 564,66 \text{ kg/m}^2$$

Carga con proyección en el plano horizontal en kg/m² (CEH)

$$CEH = 652,01 \text{ kg/m}^2$$

Peso de la cercha en kg/m² (WA)

$$WA = 30,75 \text{ kg/m}^2$$

Carga uniformemente repartida sobre las cuerdas superiores en kg/m (wp)

$$Wp = 717,76 \text{ kg/m}$$

Carga uniformemente repartida sobre las cuerdas inferiores en kg/m (wq)

$$Wq = 90 \text{ kg/m}$$

Carga concentrada sobre las cuerdas superiores en Kg (P)

$$P = 717,76 \text{ kg}$$

Carga concentrada sobre las cuerdas inferiores en kg (Q)

$$Q = 180 \text{ kg}$$

Análisis de elementos

Longitud para momento en m (L)

$$L = 1 \text{ m}$$

Momento flector máximo en el elemento en kg-m (valor absoluto) (M)

$$M = 71,78 \text{ kg-m}$$

$$M = 7177,57 \text{ kg-cm}$$

Longitud efectiva en m (Lef)

$$L_{ef} = 0,92 \text{ m}$$

$$L_{ef} = 92,38 \text{ cm}$$

Relación de esbeltez (λ)

$$\lambda = 7,70 \text{ Como } \lambda < 10, \text{ se toma el elemento como columna corta}$$

Carga axial admisible en kg (Nadm)

$$N_{adm} = 9047,79 \text{ kg}$$

Carga crítica de euler en kg (Ncr)

$$N_{cr} = 64749,83 \text{ kg}$$

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

$$N = 2333,27 \text{ kg}$$

$$K_{ma} = 1,06$$

Modulo de sección transversal con respecto al eje alrededor el cual se produce flexión en cm³ (Z)

$$Z = 169,65 \text{ cm}^3$$

Condición de falla

$$FC = 0,705 \text{ OK!!}$$

Como la condición de falla ($FC \geq 1$) no se da, la armadura no colapsa con los 38.6 cm de ceniza con los que si lo hacen las correas, pero puede iniciar el proceso de falla como ya se dijo.

Después del proceso de iteración se encontró que la carga de ceniza para que la armadura colapsa es de 59 cm, que se encuentra alejado del valor con los que falla una correa para este tipo de cubierta.

Se toma entonces para este tipo de cubiertas la falla por CORREAS.

5.5.4 Análisis de cubiertas en losa. La losa o placa es un elemento resistente de concreto reforzado; tiene generalmente su refuerzo principal en una dirección.

El concreto tiene una resistencia estimada de 210 kg/cm^2 , que se obtiene a los 28 días, con una mezcla 1:2:3 (CAT), la cual es comúnmente usada en la zona de estudio.

A continuación se muestra un ejemplo de análisis para una cubierta en losa.

Tabla 18. Datos de inicio para losa en concreto

Varilla	4	#	Área	1,27	cm
Numero de varillas	5	n	ϕ	0,9	
Ancho aferente (b)	1	m	f_y	4200	kg/cm ²
Altura efectiva (d)	0,15	m	f'_c	210	kg/cm ²
Distancia entre apoyos (L)	3,5	m	FS	1,89	
Espesor de losa (t)	0,175	m	γ_{cr}	2400	kg/m ³
Recubrimiento del acero	0,025	m	γ_{cs}	2300	kg/m ³
			WL	180	kg/m ²

Cálculo del área de refuerzo en cm² (As)

$$A_s = 6,33 \text{ cm}^2$$

Cálculo de la cuantía (ρ)

$$\rho = 0,0043$$

Coficiente de diseño que expresa la relación del momento de diseño al producto del área y profundidad efectiva en kg/m² (K)

$$K = 15,46 \text{ kg/cm}^2$$

$$K = 154589,43 \text{ kg/m}^2$$

Momento último en kg - m (Mu)

$$M_u = 3340,52 \text{ kg - m}$$

Carga última en kg/m (Wu)

$$W_u = 2181,57 \text{ kg/m}$$

Cálculo de factor de carga (U)

$$U = 1,70$$

Cálculo de carga total en kg/m (WT)

$$W_T = 1282,52 \text{ kg/m}$$

Peso propio placa en kg/m² (PPP)

$$PPP = 420 \text{ kg/m}^2$$

Pañete cielo raso en kg/m²

$$PCR = 57,5 \text{ kg/m}^2$$

Sobre carga adicional por ceniza en kg/m²
(WC)

$$WC = 625,02 \text{ kg/m}^2$$

Cálculo de espesor de ceniza en m (e)

$$e = 0,50 \text{ m}$$

$$e = 50,00 \text{ cm}$$

5.6 DETERMINACIÓN DE LAS FUNCIONES DE PROBABILIDAD DE COLAPSO

A partir de estos datos 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 daño se estimó por falla de las correas, ya que se demostró en el numeral 5.5 las correas tienen menor resistencia que la armadura. En las Tablas 19 y 20 se presenta la resistencias en términos de espesor de ceniza en (cm) y en capacidad de carga (Kpa), respectivamente.

Tabla 19. 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 20. 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 curvas de probabilidad de colapso de cubiertas se decidió, agrupar a estas dos tipologías en una sola (Tipo A)¹⁸. En la siguiente figura se presenta las funciones de daño para cuatro tipos de cubiertas: Tipo A, B, C y D.

Figura 37. Funciones de probabilidad de colapso de cubiertas por ceniza Volcánica para el Galeras



¹⁸ 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, sin embargo el criterio de la falla por colapso de cubierta se asume por la resistencia de las correas.

5.7 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FUNCIONAL DE EDIFICACIONES

Como se observó en la figura anterior, la losa aligerada es la más resistente ante cargas de ceniza, seguida en ese orden por la losa maciza y la cubierta pesada. La menos resistente es la cubierta liviana y moderada. A continuación, se muestra el análisis realizado a cada uno de los componentes que conforman una cubierta, para estimar su vulnerabilidad dentro del sistema (matriz de interdependencia) (ver Tabla 21) 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. Valores de dependencia: 5 alto, 3 medio, 1 bajo y 0 nulo.

Tabla 21. 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 38 y 39 se representa gráficamente lo anterior

Figura 38. Importancia de los elementos de un sistema de cubierta

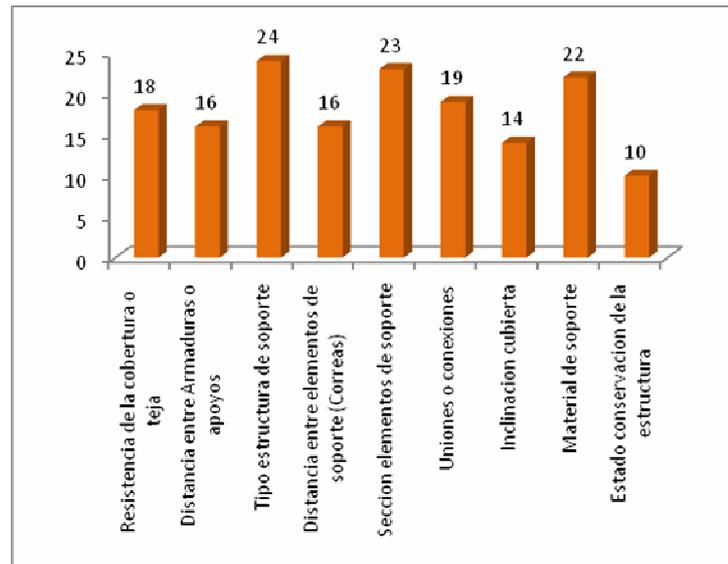
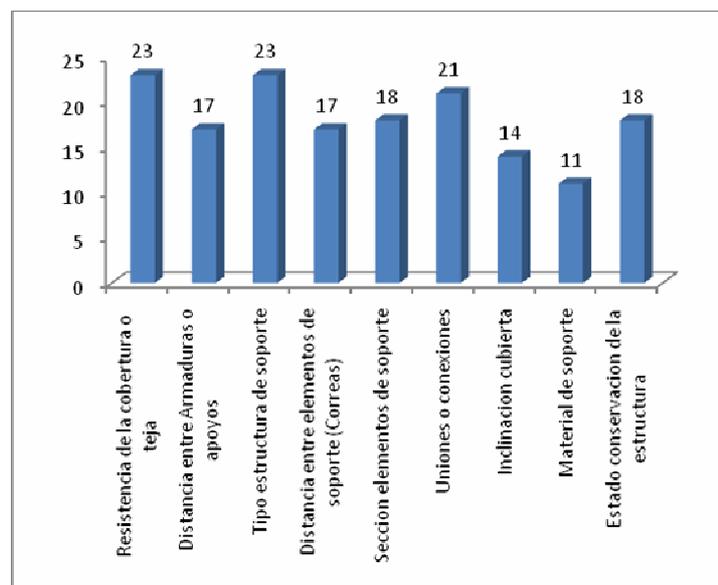


Figura 39. Dependencia de los elementos de un sistema de cubierta



En la tabla siguiente se presenta el análisis para las losas.

Tabla 22. Matriz de interdependencia de componentes en losas de concreto

Elemento dependiente Elemento de apoyo	Espe- sor	Sistema estructural	Distancia entre apoyos	Resistencia de la estructural	Estado conservación estructura	Calidad de los materiales	Total dependencia
Espe- sor	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 22, 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 las siguientes figuras 40 y 41, la importancia y la dependencia de los elementos)

Figura 40. Importancia de elementos sistema losa

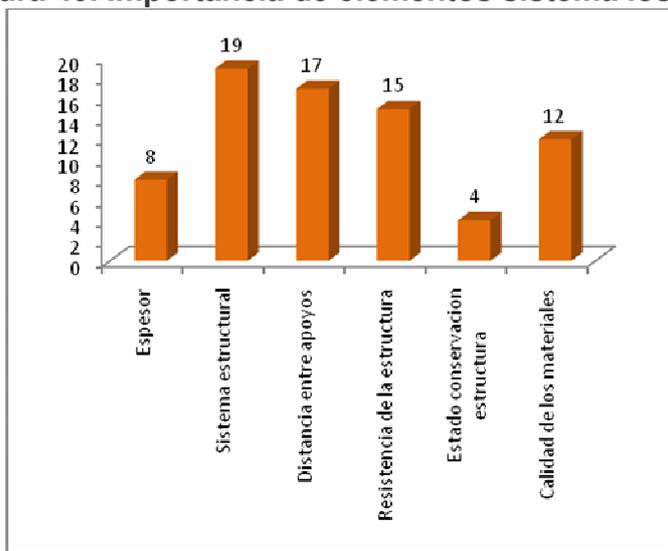
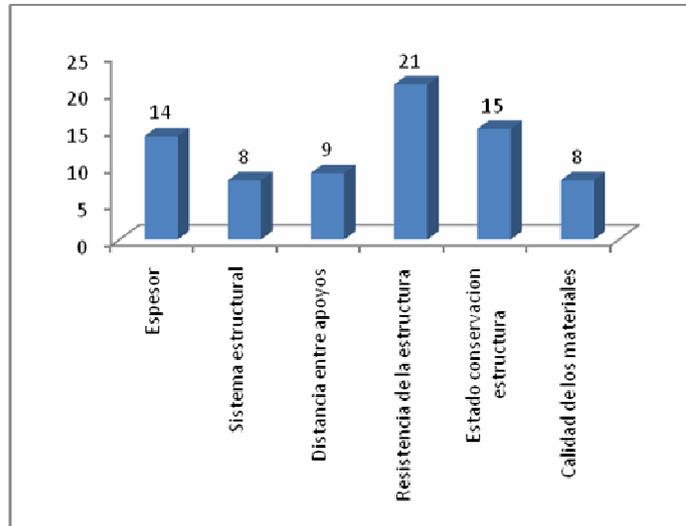


Figura 41. Dependencia de elementos del sistema losa



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 23. Calificación de indicadores de vulnerabilidad de cubiertas en teja

ELEMENTO	Variables	Peso componente	Peso opción
CUBIERTA EN TEJA	Tipo estructura de soporte	.....24	
	Simple (Correas)		.....10
	Compuesta (Vigas y correas)		.....5
	Vernacular (Cerchas, 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)		.....10
	Eficientes (bien conectadas, pernadas y/o amarradas)		.....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 1400, un intermedio de 811 y el valor más bajo es de 234.

Tabla 24. 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 más 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, (cerchas o 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 25. 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

6. CONCLUSIONES

Según el modelo y metodología aplicada, se pueden extraer las siguientes:

El formato de medición para el levantamiento de los elementos expuestos es de aplicación generalizada para cualquier tipo de vivienda de ocupación normal y de fácil aplicación para las instituciones así como para la población.

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, esta última resulta siendo la más resistente.

El espesor de ceniza crítico encontrado en la revisión estructural demuestra que en las cubiertas pesadas la falla se inicia en las correas y luego en las armaduras.

A partir de los resultados obtenidos en la revisión de las cubiertas en losa, se determinó que la más resistente a la sobrecarga por ceniza es la losa aligerada.

Para el escenario máximo probable de caída piroclástica las cubiertas con mayor susceptibilidad al colapso son las livianas y moderadas.

En el casco urbano del municipio de Nariño los daños a partir de la resistencia de las cubiertas vs. el espesor de ceniza del modelo de dispersión y acumulación, da como resultado COLAPSO en las cubiertas livianas y moderadas, daño MODERADO en las cubiertas pesadas y daño PARCIAL en las losas.

En el casco urbano del municipio de La Florida los daños a partir de la resistencia de las cubiertas vs. el espesor de ceniza del modelo de dispersión y acumulación, da como resultado COLAPSO en las cubiertas livianas y moderadas, daño GRAVE en las cubiertas pesadas y daño PARCIAL en las losas.

En el casco urbano del municipio de Sandoná los daños a partir de la resistencia de las cubiertas vs. el espesor de ceniza del modelo de dispersión y acumulación, da como resultado COLAPSO en las cubiertas livianas y moderadas, y daño PARCIAL en las cubiertas pesadas y losas.

En el casco urbano del municipio de Consacá los daños a partir de la resistencia de las cubiertas vs. el espesor de ceniza del modelo de dispersión y acumulación, da como resultado COLAPSO en las cubiertas livianas y moderadas, daño MODERADO en las cubiertas pesadas y daño PARCIAL en las losas.

En el casco urbano del municipio de Yacuanquer los daños a partir de la resistencia de las cubiertas vs. el espesor de ceniza del modelo de dispersión y

acumulación, da como resultado COLAPSO en las cubiertas livianas y moderadas, y daño PARCIAL en las cubiertas pesadas y losas.

La participación de profesionales de la región en el proyecto, fue un positivo acierto de la institución promotora y de la ejecutora del estudio (Corporación OSSO), debido a que en primera instancia, se logró la transferencia de conocimientos a personal técnico no versado en el tema, lo que permite contar hoy en día con personal local capacitado para liderar, participar y gestionar nuevos proyectos afines.

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.

7. RECOMENDACIONES

Realizar estudios detallados de los diferentes tipos de cubiertas en laboratorio a escala 1:1, para conocer el comportamiento real de las cubiertas y así ajustar las funciones de probabilidad de colapso.

Crear para las diferentes zonas de actividad volcánica en Colombia una norma de diseño anexa a la NSR-98, que considere la sobrecarga por acumulación por ceniza.

Socializar el desarrollo del proyecto, así como esta pasantía, con sus resultados, ante la comunidad educativa de la Universidad de Nariño y crear 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, como complementación de la formación académica de los estudiantes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Nariño, además de generar espacios de apoyo técnico de la academia hacia la comunidad.

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.

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

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.

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.

ANEXOS

ANEXO A
INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE NARIÑO

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
5248100010304	4	3	8	7
5248100010303	0	0	0	0
5248100010302	1	0	0	0
5248100010305	6	1	3	0
5248100010101	3	0	2	2
5248100010202	4	0	0	2
5248100010301	1	0	0	1
5248100010203	4	0	0	0
5248100010306	12	0	3	5
5248100010201	0	0	0	0
5248100010204	15	1	4	5
5248100010102	0	0	0	0
5248100010308	2	1	4	1
5248100010205	24	1	4	6
5248100010313	3	2	4	1
5248100010307	6	0	2	2
5248100010103	0	0	0	0
5248100010312	3	1	22	4
5248100010106	6	0	2	2
5248100010311	4	0	1	5
5248100010207	18	0	0	4
5248100010105	16	0	3	2
5248100010310	2	0	4	3
5248100010206	8	0	1	5
5248100010104	2	1	2	0
5248100010309	19	0	1	4
5248100010314	4	0	1	0
5248100010107	16	0	1	4
5248100010315	11	0	4	4
5248100010208	0	0	0	0
5248100010108	7	1	1	1
5248100010316	7	0	3	1
5248100010209	11	0	0	8
5248100010109	5	0	0	1
5248100010317	11	0	3	6
5248100010113	5	0	1	3
5248100010112	1	0	0	1
5248100010320	0	1	2	0
5248100010211	5	0	4	3

5248100010111	16	1	1	3
5248100010319	3	1	3	2
5248100010210	14	0	3	1
5248100010110	3	0	2	2
5248100010318	9	0	2	1
5248100010114	7	0	1	7
5248100010212	8	0	3	1
5248100010115	2	1	3	1
5248100010213	8	0	7	1
5248100010321	2	2	2	1
5248100010116	4	0	1	1
5248100010117	4	0	2	1
5248100010215	4	1	0	0
5248100010216	0	0	0	1
5248100010214	2	0	1	1
5248100010118	1	0	0	1
5248100010217	0	0	1	0
Sub Total	333	19	122	118
Total	592			

ANEXO B
INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE LA FLORIDA

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52381100010201	2	0	2	1
52381100010102	9	0	0	1
52381100010103	10	0	0	0
52381100010203	10	0	6	16
52381100010204	0	0	0	0
52381100010202	3	0	4	3
52381100010101	1	0	4	8
52381100010104	0	0	0	0
52381100010105	0	1	0	0
52381100010106	5	0	10	12
52381100010107	3	0	4	10
52381100010205	1	0	0	0
52381100010216	15	1	0	3
52381100010207	6	0	1	8
52381100010208	6	1	2	8
52381100010206	1	1	1	2
52381100010209	15	1	2	19
52381100010108	7	1	0	9
52381100010210	3	0	8	11
52381100010110	5	0	2	4
52381100010109	5	1	3	9
52381100010215	6	0	1	5
52381100010214	8	1	3	5
52381100010213	10	1	5	4
52381100010212	1	0	1	0
52381100010211	2	0	3	3
52381100010217	2	0	0	3
52381100010224	0	0	7	2
52381100010226	0	0	2	0
52381100010225	0	0	2	0
52381100010223	0	0	6	3
52381100010222	0	0	10	4
52381100010228	0	0	3	6
52381100010227	0	0	4	5
52381100010229	4	0	0	0
52381100010218	11	0	0	0
52381100010219	4	0	0	0
52381100010221	0	0	0	0
52381100010220	8	1	0	0
Sub Total	163	10	96	164

ANEXO C
INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE SANDONA

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52683100010512	32	0	8	6
52683100010502	1	0	5	2
52683100010511	0	0	0	0
52683100010509	3	0	5	2
52683100010503	0	0	5	1
52683100010510	11	1	6	13
52683100010513	7	1	2	9
52683100010518	5	0	2	2
52683100010504	6	1	4	8
52683100010508	16	1	9	17
52683100010514	21	0	5	12
52683100010501	8	0	9	13
52683100010505	1	0	0	4
52683100010517	5	0	8	11
52683100010506	16	0	5	6
52683100010507	12	0	4	19
52683100010307	4	0	3	12
52683100010515	14	0	4	21
52683100010306	5	1	5	5
52683100010317	14	0	7	8
52683100010516	25	1	2	13
52683100010318	14	0	2	15
52683100010308	6	0	2	3
52683100010305	1	0	1	0
52683100010404	7	0	15	24
52683100010316	2	0	1	2
52683100010304	2	1	8	34
52683100010405	1	0	0	0
52683100010315	7	0	0	7
52683100010319	0	0	0	0
52683100010413	21	1	6	10
52683100010301	0	0	14	4
52683100010302	2	0	12	8
52683100010309	0	0	0	3
52683100010310	1	0	0	2
52683100010311	4	2	2	5
52683100010403	15	1	2	20
52683100010314	12	0	1	10
52683100010303	0	0	4	13

52683100010406	19	0	10	19
52683100010320	11	1	1	29
52683100010312	5	0	5	3
52683100010412	7	1	0	2
52683100010313	18	0	2	10
52683100010402	10	1	3	34
52683100010411	10	1	5	4
52683100010414	1	0	0	0
52683100010321	8	0	0	22
52683100010407	23	1	8	13
52683100010415	3	0	3	0
52683100010410	4	1	4	3
52683100010204	2	0	0	4
52683100010401	13	0	7	17
52683100010203	4	0	0	0
52683100010205	18	0	1	13
52683100010416	12	2	16	2
52683100010408	23	0	6	8
52683100010202	0	0	0	2
52683100010216	14	1	3	16
52683100010201	16	0	1	2
52683100010409	7	3	10	5
52683100010217	5	1	7	8
52683100010209	0	0	0	1
52683100010206	5	1	0	6
52683100010215	4	0	2	2
52683100010208	2	0	0	7
52683100010207	2	0	0	5
52683100010218	7	1	1	24
52683100010210	1	0	0	11
52683100010214	6	0	4	5
52683100010211	0	0	2	7
52683100010212	0	0	0	0
52683100010213	2	0	8	2
52683100010107	0	0	1	5
52683100010219	2	0	5	0
52683100010108	1	0	8	1
52683100010106	12	1	3	13
52683100010112	0	0	8	6
52683100010101	23	2	8	17
52683100010113	0	0	5	2
52683100010109	1	0	2	3
52683100010111	1	0	0	1
52683100010114	0	0	0	0

52683100010105	5	0	6	9
52683100010104	6	0	2	7
52683100010103	6	0	4	6
52683100010110	3	0	2	5
52683100010102	5	0	0	5
SD	0	0	8	19
SD	0	0	2	8
SD	0	0	1	7
SD	14	0	2	2
Sub Total	642	29	344	746
Total	1761			

ANEXO D
INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE CONSACA

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52207100010101	0	0	4	2
52207100010312	0	0	0	0
52207100010304	8	0	0	4
52207100010103	0	0	0	2
52207100010303	4	0	4	6
52207100010302	2	0	2	2
52207100010104	7	0	4	4
52207100010301	1	0	3	3
52207100010201	12	0	4	9
52207100010105	6	0	4	4
52207100010106	0	0	0	0
52207100010308	6	1	8	7
52207100010309	8	0	3	5
52207100010310	8	0	4	9
52207100010202	6	0	6	16
52207100010203	7	0	8	9
52207100010204	0	0	0	0
52207100010206	7	0	4	8
52207100010205	14	0	7	10
52207100010305	8	0	9	3
52207100010207	6	2	7	9
52207100010307	5	0	0	0
52207100010211	21	0	11	9
52207100010213	0	0	0	0
52207100010210	5	0	2	3
52207100010209	6	0	4	1
52207100010208	8	0	7	6
52207100010212	0	0	0	0
52207100010114	0	0	0	16
52207100010113	1	0	9	3
52207100010115	0	0	0	3
52207100010112	0	1	4	3
52207100010111	0	2	2	12
52207100010110	0	1	4	9
52207100010107	0	0	0	12
52207100010108	0	0	5	18
52207100010109	0	0	1	6
52207100010313	17	1	6	6
Sub Total	173	8	136	219
Total	536			

INVENTARIO DE VIVIENDAS BOMBONÁ

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52207200010101	2	0	15	4
52207200010102	1	0	6	3
52207200010110	1	0	8	3
52207200010109	0	0	15	5
52207200010111	1	0	7	1
52207200010112	0	0	0	0
52207200010103	0	0	11	4
52207200010108	0	0	0	0
52207200010113	1	2	20	3
52207200010104	0	0	11	4
52207200010116	2	0	6	1
52207200010114	1	0	16	3
52207200010107	4	0	34	3
52207200010106	0	0	0	0
52207200010105	0	1	12	0
52207200010115	0	0	17	2
52207200010117	3	0	26	1
52207200010118	0	0	4	0
52207200010119	2	1	1	1
52207200010120	0	0	1	1
52207200010121	4	1	0	0
52207200010122	3	0	10	3
52207200010123	7	1	12	2
52207200010124	2	0	5	1
Sub Total	34	6	237	45
Total	322			

ANEXO E
INVENTARIO DE VIVIENDAS MUNICIPIO DE YACUANQUER

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52885100010403	3	0	0	3
52885100010407	14	1	5	2
52885100010402	9	0	13	107
52885100010405	11	0	0	3
52885100010404	2	0	1	0
52885100010304	14	0	8	4
52885100010301	10	0	3	2
52885100010103	4	0	1	0
52885100010303	18	0	3	8
52885100010305	11	1	3	4
52885100010202	11	0	2	10
52885100010302	18	0	2	7
52885100010306	10	0	2	10
52885100010201	16	0	0	9
52885100010309	13	0	4	8
52885100010102	0	0	0	0
52885100010203	19	0	1	10
52885100010105	6	0	2	0
52885100010307	5	1	0	2
52885100010104	0	0	0	0
52885100010204	11	0	6	8
52885100010308	3	0	0	9
52885100010206	0	0	0	0
52885100010106	6	1	3	8
52885100010205	26	0	5	5
52885100010112	2	1	1	14
52885100010207	8	0	3	2
52885100010108	7	0	4	10
52885100010111	2	1	3	7
52885100010208	5	0	5	3
52885100010107	12	0	1	3
52885100010109	0	0	0	0
52885100010101	0	0	0	0
52885100010209	0	0	12	9
52885100010408	0	3	0	4
Sub Total	276	9	93	271
Total	649			

ANEXO F

DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE NARIÑO

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
5248100010304	4	3	8	7
5248100010303	0	0	0	0
5248100010302	1	0	0	0
5248100010305	6	1	3	0
5248100010101	3	0	2	2
5248100010202	4	0	0	2
5248100010301	1	0	0	1
5248100010203	4	0	0	0
5248100010306	12	0	3	5
5248100010201	0	0	0	0
5248100010204	15	1	4	5
5248100010102	0	0	0	0
5248100010308	2	1	4	1
5248100010205	24	1	4	6
5248100010313	3	2	4	1
5248100010307	6	0	2	2
5248100010103	0	0	0	0
5248100010312	3	1	22	4
5248100010106	6	0	2	2
5248100010311	4	0	1	5
5248100010207	18	0	0	4
5248100010105	16	0	3	2
5248100010310	2	0	4	3
5248100010206	8	0	1	5
5248100010104	2	1	2	0
5248100010309	19	0	1	4
5248100010314	4	0	1	0
5248100010107	16	0	1	4
5248100010315	11	0	4	4
5248100010208	0	0	0	0
5248100010108	7	1	1	1
5248100010316	7	0	3	1
5248100010209	11	0	0	8
5248100010109	5	0	0	1
5248100010317	11	0	3	6
5248100010113	5	0	1	3
5248100010112	1	0	0	1
5248100010320	0	1	2	0

5248100010211	5	0	4	3
5248100010111	16	1	1	3
5248100010319	3	1	3	2
5248100010210	14	0	3	1
5248100010110	3	0	2	2
5248100010318	9	0	2	1
5248100010114	7	0	1	7
5248100010212	8	0	3	1
5248100010115	2	1	3	1
5248100010213	8	0	7	1
5248100010321	2	2	2	1
5248100010116	4	0	1	1
5248100010117	4	0	2	1
5248100010215	4	1	0	0
5248100010216	0	0	0	1
5248100010214	2	0	1	1
5248100010118	1	0	0	1
5248100010217	0	0	1	0

CONVENCIONES

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

NULO

ANEXO G
DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE LA FLORIDA

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52381100010201	2	0	2	1
52381100010102	9	0	0	1
52381100010103	10	0	0	0
52381100010203	10	0	6	16
52381100010204	0	0	0	0
52381100010202	3	0	4	3
52381100010101	1	0	4	8
52381100010104	0	0	0	0
52381100010105	0	1	0	0
52381100010106	5	0	10	12
52381100010107	3	0	4	10
52381100010205	1	0	0	0
52381100010216	15	1	0	3
52381100010207	6	0	1	8
52381100010208	6	1	2	8
52381100010206	1	1	1	2
52381100010209	15	1	2	19
52381100010108	7	1	0	9
52381100010210	3	0	8	11
52381100010110	5	0	2	4
52381100010109	5	1	3	9
52381100010215	6	0	1	5
52381100010214	8	1	3	5
52381100010213	10	1	5	4
52381100010212	1	0	1	0
52381100010211	2	0	3	3
52381100010217	2	0	0	3
52381100010224	0	0	7	2
52381100010226	0	0	2	0
52381100010225	0	0	2	0
52381100010223	0	0	6	3
52381100010222	0	0	10	4
52381100010228	0	0	3	6
52381100010227	0	0	4	5
52381100010229	4	0	0	0
52381100010218	11	0	0	0
52381100010219	4	0	0	0
52381100010221	0	0	0	0

52381100010220	8	1	0	0
----------------	---	---	---	---

CONVENCIONES

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

<i>NULO</i>

ANEXO H
DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE SANDONÁ

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52683100010512	32	0	8	6
52683100010502	1	0	5	2
52683100010511	0	0	0	0
52683100010509	3	0	5	2
52683100010503	0	0	5	1
52683100010510	11	1	6	13
52683100010513	7	1	2	9
52683100010518	5	0	2	2
52683100010504	6	1	4	8
52683100010508	16	1	9	17
52683100010514	21	0	5	12
52683100010501	8	0	9	13
52683100010505	1	0	0	4
52683100010517	5	0	8	11
52683100010506	16	0	5	6
52683100010507	12	0	4	19
52683100010307	4	0	3	12
52683100010515	14	0	4	21
52683100010306	5	1	5	5
52683100010317	14	0	7	8
52683100010516	25	1	2	13
52683100010318	14	0	2	15
52683100010308	6	0	2	3
52683100010305	1	0	1	0
52683100010404	7	0	15	24
52683100010316	2	0	1	2
52683100010304	2	1	8	34
52683100010405	1	0	0	0
52683100010315	7	0	0	7
52683100010319	0	0	0	0
52683100010413	21	1	6	10
52683100010301	0	0	14	4
52683100010302	2	0	12	8
52683100010309	0	0	0	3
52683100010310	1	0	0	2
52683100010311	4	2	2	5
52683100010403	15	1	2	20
52683100010314	12	0	1	10
52683100010303	0	0	4	13

52683100010406	19	0	10	19
52683100010320	11	1	1	29
52683100010312	5	0	5	3
52683100010412	7	1	0	2
52683100010313	18	0	2	10
52683100010402	10	1	3	34
52683100010411	10	1	5	4
52683100010414	1	0	0	0
52683100010321	8	0	0	22
52683100010407	23	1	8	13
52683100010415	3	0	3	0
52683100010410	4	1	4	3
52683100010204	2	0	0	4
52683100010401	13	0	7	17
52683100010203	4	0	0	0
52683100010205	18	0	1	13
52683100010416	12	2	16	2
52683100010408	23	0	6	8
52683100010202	0	0	0	2
52683100010216	14	1	3	16
52683100010201	16	0	1	2
52683100010409	7	3	10	5
52683100010217	5	1	7	8
52683100010209	0	0	0	1
52683100010206	5	1	0	6
52683100010215	4	0	2	2
52683100010208	2	0	0	7
52683100010207	2	0	0	5
52683100010218	7	1	1	24
52683100010210	1	0	0	11
52683100010214	6	0	4	5
52683100010211	0	0	2	7
52683100010212	0	0	0	0
52683100010213	2	0	8	2
52683100010107	0	0	1	5
52683100010219	2	0	5	0
52683100010108	1	0	8	1
52683100010106	12	1	3	13
52683100010112	0	0	8	6
52683100010101	23	2	8	17
52683100010113	0	0	5	2
52683100010109	1	0	2	3
52683100010111	1	0	0	1
52683100010114	0	0	0	0

52683100010105	5	0	6	9
52683100010104	6	0	2	7
52683100010103	6	0	4	6
52683100010110	3	0	2	5
52683100010102	5	0	0	5
	0	0	8	19
	0	0	2	8
	0	0	1	7
	14	0	2	2

CONVENCIONES

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

NULO

ANEXO I
DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE COSACÁ

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52207100010101	0	0	4	2
52207100010312	0	0	0	0
52207100010304	8	0	0	4
52207100010103	0	0	0	2
52207100010303	4	0	4	6
52207100010302	2	0	2	2
52207100010104	7	0	4	4
52207100010301	1	0	3	3
52207100010201	12	0	4	9
52207100010105	6	0	4	4
52207100010106	0	0	0	0
52207100010308	6	1	8	7
52207100010309	8	0	3	5
52207100010310	8	0	4	9
52207100010202	6	0	6	16
52207100010203	7	0	8	9
52207100010204	0	0	0	0
52207100010206	7	0	4	8
52207100010205	14	0	7	10
52207100010305	8	0	9	3
52207100010207	6	2	7	9
52207100010307	5	0	0	0
52207100010211	21	0	11	9
52207100010213	0	0	0	0
52207100010210	5	0	2	3
52207100010209	6	0	4	1
52207100010208	8	0	7	6
52207100010212	0	0	0	0
52207100010114	0	0	0	16
52207100010113	1	0	9	3
52207100010115	0	0	0	3
52207100010112	0	1	4	3
52207100010111	0	2	2	12
52207100010110	0	1	4	9
52207100010107	0	0	0	12
52207100010108	0	0	5	18
52207100010109	0	0	1	6
52207100010313	17	1	6	6

DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL CORREGIMIENTO DE BOMBONÁ

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52207200010101	2	0	15	4
52207200010102	1	0	6	3
52207200010110	1	0	8	3
52207200010109	0	0	15	5
52207200010111	1	0	7	1
52207200010112	0	0	0	0
52207200010103	0	0	11	4
52207200010108	0	0	0	0
52207200010113	1	2	20	3
52207200010104	0	0	11	4
52207200010116	2	0	6	1
52207200010114	1	0	16	3
52207200010107	4	0	34	3
52207200010106	0	0	0	0
52207200010105	0	1	12	0
52207200010115	0	0	17	2
52207200010117	3	0	26	1
52207200010118	0	0	4	0
52207200010119	2	1	1	1
52207200010120	0	0	1	1
52207200010121	4	1	0	0
52207200010122	3	0	10	3
52207200010123	7	1	12	2
52207200010124	2	0	5	1

CONVENCIONES

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

NULO

ANEXO J
DISTRIBUCIÓN DEL DAÑO EN EL MUNICIPIO DE YACUANQUER

Código Manzana DANE	Numero Pesadas	Numero livianas	Numero Moderadas	Numero Losas
52885100010403	3	0	0	3
52885100010407	14	1	5	2
52885100010402	9	0	13	107
52885100010405	11	0	0	3
52885100010404	2	0	1	0
52885100010304	14	0	8	4
52885100010301	10	0	3	2
52885100010103	4	0	1	0
52885100010303	18	0	3	8
52885100010305	11	1	3	4
52885100010202	11	0	2	10
52885100010302	18	0	2	7
52885100010306	10	0	2	10
52885100010201	16	0	0	9
52885100010309	13	0	4	8
52885100010102	0	0	0	0
52885100010203	19	0	1	10
52885100010105	6	0	2	0
52885100010307	5	1	0	2
52885100010104	0	0	0	0
52885100010204	11	0	6	8
52885100010308	3	0	0	9
52885100010206	0	0	0	0
52885100010106	6	1	3	8
52885100010205	26	0	5	5
52885100010112	2	1	1	14
52885100010207	8	0	3	2
52885100010108	7	0	4	10
52885100010111	2	1	3	7
52885100010208	5	0	5	3
52885100010107	12	0	1	3
52885100010109	0	0	0	0
52885100010101	0	0	0	0
52885100010209	0	0	12	9
52885100010408	0	3	0	4

CONVENCIONES

DAÑO	RANGOS
------	--------

COLAPSO	>1	
PARCIAL	0,2 - 0,5	NULO

ANEXO K

PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE CORREAS EN MADERA

MODULO DE SECCION TRANSVERSAL (Z)

La falla se produce cuando $Z = Z_1$

- **Momento máximo en kg - m (Mmx)**

$$M_{mx} = f_m * Z$$

Donde:

F_m = esfuerzo de flexión

Z = modulo de sección transversal alrededor del cual se produce la flexión (cm^3)

- **Carga total repartida por correa en kg/m (WTR)**

(Viga simplemente apoyada)

$$WTR = \frac{8 * M_{mx}}{L_{ef}^2}$$

Donde:

L_{ef} = longitud efectiva

- **Carga total en kg/m^2 (WT)**

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

Donde:

DCO = distancia entre correas (m)

- **Peso que absorbe la correa en kg/m^2 (WV)**

$$WCO = \frac{P_{mc}}{DCO}$$

Donde:

P_{mc} = peso por metro de las vigas en Kg/m

- **Carga adicional por acumulación de ceniza en kg/m^2 (WC)**

$$WC = WT - WCO - W_t - WL$$

Donde:

WL = carga viva

W_t = peso de la teja

- **Espesor de ceniza en m (e)**

$$e = \frac{WC}{\gamma_c}$$

MOMENTO DE INERCIA POR LIMITACION DE FLEXIONES (I)

- Carga total repartida por correa en Kg/m (WTR)

$$WTR = \frac{384 * I * E}{5 * L_{ef}^3 * k}$$

Donde:

E = modulo de elasticidad minimo en kg/ cm²

k = factor de longitud efectiva

I = momento de inercia de la sección transversal de elemento que falla en cm⁴

- Carga total en kg/m² (WT)

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

- Peso que absorbe la correa en kg/m² (WV)

$$WCO = \frac{Pmc}{DCO}$$

Donde:

Pmc= peso por metro de las vigas en kg/m

- Carga adicional por acumulación de ceniza en kg/m² (WC)

$$WC = WT - WCO - W_t - WL$$

Donde:

WL = carga viva

W_t= peso de la teja

- Espesor de ceniza en m (e)

$$e = \frac{WC}{\gamma_c}$$

POR ACCION DEL ESFUERZO CORTANTE

- Fuerza cortante en la sección critica a una distancia h del apoyo en kg (Vh)

$$V_h = \frac{fv * A}{1.5}$$

Donde:

fv = esfuerzo de corte afectado por el coeficiente de reducción en kg/ cm²

A = área de las correas en cm²

- Carga total repartida por correa en kg/m (WTR)

Se la deduce de la siguiente expresión:

$$V_h = V_{mx} - WTR * D$$

Donde:

V_{mx} = cortante máximo en kg

$$V_{mx} = \frac{WTR * L_{ef}}{2}$$

Entonces:

$$V_h = \frac{WTR * L_{ef}}{2} - WTR * D$$

Por lo tanto:

$$WTR = \frac{2 * V_h}{L_{ef} - 2 * D}$$

- Carga total en kg/m² (WT)

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

- Carga adicional por acumulación de ceniza en kg/m² (WC)

$$WC = WT - WCO - W_t - WL$$

Donde:

WL = carga viva

W_t = peso de la teja

- Espesor de ceniza en m (e)

$$e = \frac{WC}{\gamma_c}$$