



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Enfoque Metodológico para la Evaluación e Incorporación del Riesgo de Desastres en los Instrumentos de Ordenamiento Territorial**

**Cristian Camilo González Largo**

Universidad Nacional de Colombia sede Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Manizales, Colombia  
2014



# **Enfoque Metodológico para la Evaluación e Incorporación del Riesgo de Desastres en los Instrumentos de Ordenamiento Territorial**

**Cristian Camilo González Largo**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:  
**Magister en Hábitat**

Director:  
Omar Darío Cardona Arboleda Ph.D

Línea de Investigación:  
Gestión Integral de Riesgo y Desastres

Universidad Nacional de Colombia sede Manizales  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Manizales, Colombia  
2014



## **Dedicatoria**

*A mis padres y mi hermana.*



## **Agradecimientos**

Agradezco a mi tutor, jefe, ejemplo a seguir y amigo Omar Darío Cardona por permitirme hacer parte de este proceso que empezó desde el pregrado continuo con la especialización y ahora con este bonito esfuerzo de la maestría, siempre teniendo la fortuna de tenerlo como el gran profesor de vida.

A mis padres, mi hermana, mis tías y tíos y demás familiares quienes han acolitado este bonito capricho.

A la querida Universidad Nacional de Colombia, por estos once años que me han formado como profesional y como persona, además, de abrirme sus puertas como profesional y así dar mis primeros pasos en la vida laboral con el valor agregado del constante aprendizaje.

El presente documento ha recopilado el esfuerzo de un grupo interdisciplinar que en diferentes proyectos ha tenido la oportunidad de generar nuevos espacios en el ámbito investigativo, aplicado a las realidades y necesidades actuales, en este caso enfocado a la planificación territorial. Por lo anterior debo mencionar y agradecer al Instituto de Estudios Ambientales-IDEA por brindarme la posibilidad de participar, aportar y aprender en los diferentes proyectos que en gestión de integral de riesgo y desastres se han en hecho el último tiempo.

Dentro de este proceso se resaltan los valiosos aportes de profesionales como Ketty Mendes por sus orientaciones metodologías en planificación urbana, los aportes conceptuales y metodológicos de Juan Pablo Londoño en deslizamientos, Gabriel Andrés Bernal y su experticia en inundaciones y Paula Andrea Cifuentes por sus aportes en relación con la Ley 388 de 1997.





## Resumen

Los fenómenos naturales en Colombia han producido a lo largo de la historia desastres producto de la alta vulnerabilidad existente de los asentamientos humanos; eventos como las inundaciones, deslizamientos y sismos han generado cuantiosas pérdidas humanas y materiales, reflejando los serios problemas en el territorio heredados de una equivocada planificación y un evidente déficit en el desarrollo del país. Uno de los problemas ha sido la falta de planificación territorial y la no identificación apropiada de los riesgos como determinantes en el ordenamiento territorial. Solamente hasta hace unas décadas se empezó a observar la importancia del ordenamiento territorial en Colombia, mostrando los grandes desafíos que esto implica y el inmenso esfuerzo gubernamental necesario para lograr estrategias de gestión de riesgo de desastres.

En relación con la incorporación de las amenazas naturales de tipo cualitativo en el ordenamiento territorial, en Colombia hasta ahora se han realizado zonificaciones utilizando sistemas de información geográfica (SIG) que han permitido identificar, fundamentalmente, zonas con mayor susceptibilidad de ser afectadas, áreas consideradas como más vulnerables y finalmente, se han identificado zonas de riesgo definiendo con este tipo de mapas temáticos categorías de amenaza o riesgo bajo, medio y alto.

Actualmente estas técnicas simplificadas no son las más apropiadas para definir restricciones y usos del suelo, debido a que, en general, estos mapas de amenaza y riesgo no tienen asociados períodos de retorno; es decir, no tienen en cuenta la frecuencia de los eventos. Estas técnicas en su momento fueron útiles para la toma de decisiones; sin embargo, hoy existen otras metodologías del estado del arte que permiten abordar el problema de una manera más rigurosa. Por lo anterior la metodología que aquí se considera más apropiada para la evaluación de amenaza y riesgo de acuerdo con la experiencia y que se expondrá en este documento, es el enfoque probabilista que permite definir con la frecuencia de los eventos la aptitud del suelo y así realizar un ordenamiento territorial que salvede la vida y mejore la calidad de vida de los habitantes.

En el presente trabajo se ilustrará como a partir de la ley 388 de 1997 se comenzaron a implementar los planes de ordenamiento territorial (POT) en los diferentes municipios de Colombia y cómo debía haberse incluido como determinante, del ordenamiento territorial o los usos del suelo, las amenazas y el riesgo. Tomando como ejemplo el realizado en la ciudad de Manizales, se expondrá como se ha incluido el riesgo en el POT en Colombia y se describirán metodologías las cuales ya han sido aplicadas en diferentes proyectos piloto. Este caso se presenta como ilustrativo de lo que se ha debido hacer en todas las ciudades del país, pero que desafortunadamente ha sido más la excepción que la regla. La resiliencia de las ciudades depende en buena medida de la incorporación apropiada del riesgo en el ordenamiento territorial. De aquí la importancia de implementar este proceso de gestión del riesgo de desastres en forma apropiada y efectiva.

La finalidad de este trabajo académico es ilustrar que en la actualidad existen formas apropiadas de abordar el problema; es decir, cómo medir ó dimensionar las amenazas naturales de una manera cuantitativa con metodologías probabilistas y de esta manera definir los determinantes para la planificación territorial. Se plantea aquí como se pueden caracterizar y discriminar las metodologías que pueden servir en cada municipio según sus capacidades económicas, nivel socioeconómico e importancia geopolítica. Lo anterior se ilustra con ejemplos prácticos de trabajos académicos y pilotos, algunos en convenios con organizaciones no gubernamentales, otros con la Universidad Nacional de Colombia y el Gobierno Nacional. Como ejemplos se incluyen los enfoques utilizados en el Plan de Ordenación y Manejo Ambiental de la cuenca del Río Chinchiná (POMCA), el Plan Parcial del sector El Rosario de la ciudad de Manizales, la actualización del POT de la ciudad de Manizales y el Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital, Bogotá-Cundinamarca-PRICC.



## Abstract

### **Methodological approach for evaluation and incorporation of disaster risk in land use plans**

In relation to qualitative natural-hazards inclusion for zoning, Colombia has been classifying areas through Geographic Information Systems (GIS) until now that have let it to identify feasible and susceptible zones mainly, considering them extremely vulnerable. So, a set of maps with low, medium and high hazards have been created to categorize zones under risk.

Due to return periods have not been associated with risk-hazard maps, these mentioned techniques have been improperly to define either restrictions or land-use classes nowadays; in fact, events frequency have not been included for them either. These techniques were useful to take strategic decisions; however, new state-of-the-art methodologies can deal with this problem rigorously. For instance, probabilistic emphasis considered in this document is one of the most appropriate methodologies for hazard and risk evaluation based on previous experiences. Probabilistic emphasis allows characterizing soil suitability according to events frequency so that new land-use plans will be undertaken to protect and improve locals' lifestyle.

In the course of this document, it is exposed how zoning plans were implemented at first in line with the 388 of 1997 Colombian Law and how should have been included as a key feature for land-use classes and risks-hazards evaluation. Taking the City of Manizales' Zoning Plan as an example, it analyzes how risk has been included on Colombian zonings; moreover, it describes the applied methods for previous projects. However, this successful case has still deliberately ignored. In general, cities' resilience depends largely on how risk is incorporated for zoning; for instance, it is quite important to implement well-organized risk management' processes to get a final positive result.

Finally, the purpose of this document is to expose satisfactory methods to solve this matter; in other words, how to measure quantitative natural-hazards using probabilistic methodologies so that they can define important elements for zoning. In addition, it is explained how to characterize and discriminate these methodologies that can help cities in agreement with their economical, social and geo-political status. Some studies were included such as Landing Plan and Environmental Management for The Chinchiná River (POMCA for its acronym in Spanish), Partial Zoning Plan for El Rosario area in The City of Manizales, the Up-to-date Zoning Plan for The City of Manizales and Local Plan for Bogota's Climate Change (PRICC for its acronym in Spanish) that were leading by recognized Colombian universities, non-governmental organizations and central government

**Palabras clave** Ordenamiento territorial, amenazas naturales, riesgo, vulnerabilidad, calculo probabilístico del riesgo.

**Keywords** land use planning, natural hazard, risk, vulnerability, management probabilistic of the risk



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>21</b>
	1.1. Antecedentes .....	21
	1.2. Propósito de la investigación .....	22
	1.3. Metodología de la investigación .....	22
<b>2.</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>25</b>
	2.1. El riesgo de desastres .....	25
	2.2. La identificación del riesgo de desastres.....	33
	2.3. La reducción del riesgo de desastres.....	37
	2.4. El riesgo en el ordenamiento territorial.....	39
	2.4.1. Seguridad territorial .....	42
<b>3.</b>	<b>MARCO JURÍDICO.....</b>	<b>47</b>
	3.1. Evaluación de la normativa .....	47
	3.2. Otros aspectos relevantes .....	52
<b>4.</b>	<b>EL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO .....</b>	<b>65</b>
	4.1. Cálculo del riesgo desde una perspectiva probabilística.....	65
	4.2. Una plataforma de evaluación del riesgo al alcance de los interesados .....	68
	4.3. Elementos importantes para el cálculo probabilista del riesgo .....	69
	4.3.1. Caracterización de la exposición. ....	69
	4.3.2. Caracterización de la vulnerabilidad. ....	69
	4.3.3. Estimación de pérdidas potenciales. ....	69
	4.4. Aplicaciones de la evaluación del riesgo en el ordenamiento territorial y sus intervenciones derivadas .....	70
	4.5. Propuesta sobre la zonificación de la amenaza en el ordenamiento territorial en Colombia .....	78
	4.6. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza por deslizamiento en diferentes niveles territoriales.....	83
	4.6.1. Nivel 1. Métodos de zonificación con bajos niveles de información.....	84
	4.6.2. Nivel 2. Método de zonificación con niveles medios de información.....	89
	4.6.3. Nivel 3. Métodos de zonificación con niveles altos de información.....	99
	4.7. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza por inundaciones con diferentes niveles de complejidad.....	108
	4.7.1. Parámetros para la selección de los modelos.....	110
	4.7.2. Delimitación de rondas hídricas .....	114
	4.7.3. Susceptibilidad topográfica.....	118
	4.7.4. Curvas PADF y tormentas estocásticas.....	120
	4.7.5. Volúmenes de flujo.....	129
	4.7.6. Análisis lluvia-escorrentía .....	132
	4.7.7. Inundación por encharcamiento.....	135
	4.7.8. Inundación aluvial o torrencial – modelo 1D.....	136
	4.7.9. Inundación aluvial – modelo 2D.....	137
	4.7.10. Zonificación de la amenaza.....	138

<b>5.</b>	<b>EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....</b>	<b>141</b>
5.1.	Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná-POMCA.....	141
5.1.1.	<i>Antecedentes</i> .....	141
5.1.2.	<i>Estructura para el desarrollo del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Chinchiná – POMCA</i> .....	141
5.1.3.	<i>Fase de diagnóstico</i> .....	142
5.2.	Pieza intermedia de planificación, zona de expansión urbana de Manizales, El Rosario.....	159
5.2.1.	<i>Localización geográfica del sector El Rosario</i> .....	160
5.2.2.	<i>Clasificación de la amenaza como determinante para el ordenamiento territorial.</i> .....	160
5.2.3.	<i>Flujo de lodo</i> .....	161
5.2.4.	<i>Consideraciones acerca de la influencia del cambio climático</i> .....	162
5.2.5.	<i>Enfoque metodológico adoptado para la estimación de la ronda hídrica</i> .....	164
5.2.6.	<i>Resultados de las rondas hídricas.</i> .....	164
5.2.7.	<i>Delimitación por fenómenos asociados a flujos de lodo, avalanchas y lahares.</i> .....	170
5.2.8.	<i>Planificación urbana en el Rosario.</i> .....	172
5.3.	Zonificación de la susceptibilidad, amenaza por deslizamientos y umbrales de lluvia detonante para POT de la ciudad de Manizales.....	175
5.3.1.	<i>Susceptibilidad por deslizamiento</i> .....	175
5.3.2.	<i>Áreas con Tratamiento Geotécnico (ATG)</i> .....	178
5.3.3.	<i>Áreas de Planificación</i> .....	180
5.3.4.	<i>Amenaza por deslizamiento</i> .....	183
5.3.4.1.	<i>Tasa</i> .....	183
5.3.5.	<i>Riesgo Implícito por Deslizamiento</i> .....	187
5.3.6.	<i>Umbrales Intensidad – Duración</i> .....	189
5.3.7.	<i>Riesgo Implícito por Inundación</i> .....	193
5.3.8.	<i>Valoración de pérdidas</i> .....	196
5.3.9.	<i>Pérdidas esperadas</i> .....	198
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>201</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>203</b>
	<b>ANEXO I. EL CASO DE MANIZALES: SU PRIMER ENFOQUE.....</b>	<b>211</b>
	<b>ANEXO II. EJEMPLOS DE MÉTODOS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS (MOVIMIENTOS EN MASA).....</b>	<b>219</b>
	<b>ANEXO III. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA AMENAZA POR INUNDACIONES (PARTE BAJA DE LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ).....</b>	<b>255</b>

## Tabla de figuras

Figura 1. Marco para la reducción del riesgo de desastre de la EIRD .....	29
Figura 2. Marco y modelo teórico para el enfoque holístico de la evaluación y gestión del riesgo de desastre, a partir de Cardona y Barbat (2000) Fuente: Cardona et al. (2005). .....	30
Figura 3. Nueva versión del modelo (Carreño et al. 2004; 2005) .....	32
Figura 4. Conceptos básicos SREX. Fuente: IPCC AR5, 2012 .....	33
Figura 5. Curva de tasa de excedencia del parámetro de intensidad para cada ubicación y mapas de amenaza de igual período de retorno para Colombia. Fuente: ERN-AL (2009) .....	34
Figura 6. Curvas de amenaza en formato log-log y aritmético para una ubicación y mapa de amenaza del Perú para un período de retorno de 100 años. Fuente: ERN-AL (2009) .....	35
Figura 7. Segmentos de la curva de excedencia de pérdidas o curva de riesgo. Fuente (Velásquez et al, 2011).....	36
Figura 8. Ejemplo de una curva “híbrida” de excedencia de pérdidas. Fuente: ( Velásquez et al, 2011) .....	36
Figura 9. Adaptación de figura sobre estratificación del riesgo. ERN-AL, 2011.....	38
Figura 10. Esquema sobre Seguridad Territorial .....	44
Figura 11. Caratulas principales de los documentos orientadores del riesgo en el OT.....	61
Figura 12. Esquema general de cálculo para los modelos de Nivel 3. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II) .....	99
Figura 13. Esquema conceptual para el cálculo de la amenaza por deslizamientos en el nivel 3 .....	100
Figura 14. Ejemplo de muestra de análisis para métodos de Nivel 3. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II) .....	103
Figura 15. Topología de la RNA para susceptibilidad a deslizamientos (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II). .....	106
Figura 16. Proceso de modelización mediante RNAs (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II) .....	107
Figura 17 Esquema de clasificación morfológica basada en información geoespacial .....	117
Figura 18. Esquema de selección de celdas pertenecientes a ronda geomorfológica.....	118
Figura 19. Procedimiento para estimar áreas de exposición por viento. ....	119
Figura 20 Curva de distribución de precipitación tipo III del Soil Conservation Service .....	128
Figura 21-Hietograma derivado de la curva de distribución.....	129
Figura 22-Esquema de distribución de hietogramas en una tormenta estocástica. ....	129
Figura 23 Modelo de hidrograma unitario triangular. (Cardona, Mendes, et al, 2013, parte III) .....	132
Figura 24 Figura que ejemplifica las regiones de ampliación en zonas bajas.....	135
Figura 25. Distribución de niveles de amenaza por incendios forestales.....	143
Figura 25. Distribución de la aceleración máxima del terreno para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná.....	144
Figura 27. Distribución de la aceleración máxima del terreno para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná incluyendo la influencia de la Caldas Tear (Cardona, González, Mora et al, 2013). .....	145
Figura 28. Distribución de la aceleración espectral de 0.5seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).....	145
Figura 29. Distribución de la aceleración espectral de 0.5seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná incluyendo la influencia de la Caldas Tear. (Cardona, González, Mora et al, 2013).....	146
Figura 30. Distribución de la aceleración espectral de 1.0seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013). .....	146

Figura 31. Distribución de la aceleración espectral de 1.0seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná incluyendo la influencia de la Caldas Tear (Cardona, González, Mora et al, 2013).	147
Figura 32. Distribución de niveles de amenaza por Caída de cenizas en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).	148
Figura 33. Categorización de la susceptibilidad a deslizamientos.	148
Figura 34. Distribución de niveles de amenaza por susceptibilidad de deslizamiento en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).	149
Figura 35. Distribución de niveles de amenaza por inundación en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).	150
Figura 36. Distribución de niveles de amenaza por flujos piroclásticos en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).	151
Figura 37. Distribución del riesgo implícito por la combinación de los niveles.	152
Figura 38. Áreas de afectación por amenaza para el predio rural. (Cardona, González, Mora et al, 2013).	155
Figura 39. Distribución del índice de afectación por susceptibilidad de deslizamiento en los predios rurales de la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).	157
Figura 40. Distribución del índice de afectación por inundación en los predios rurales.	158
Figura 41. Distribución del índice de afectación por flujos piroclásticos en los predios rurales de la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).	158
Figura 42. Distribución del índice de afectación por amenazas combinadas (riesgo implícito).	159
Figura 43. Localización zona de expansión urbana El Rosario. Mapa geográfico del municipio de Manizales.	160
Figura 44. Retracción del glaciar del Nevado del Ruiz (Marulanda & Fonseca, 2013).	163
Figura 45. Resultados ronda hídrica mediante la metodología que integra el componente ecosistémico.	166
Figura 46. Resultados ronda hídrica mediante metodología que integra el componente geomorfológico.	167
Figura 47. Resultados ronda hídrica mediante metodología que integra el componente geológico.	168
Figura 48. Resultados compilados de las tres metodologías. (Marulanda & Fonseca, 2013).	169
Figura 49. Envolvente de las rondas hídricas evaluadas. (Marulanda & Fonseca, 2013).	170
Figura 50. Amenaza flujo de lodo en el sector El Rosario. (Correa & Hincapié, 2010).	171
Figura 51. Comparación flujo de lodo (rojo) con envolvente de las rondas hídricas (azul).	172
Figura 52. Superposición de la ronda hídrica envolvente, el flujo de 1985 y el plan parcial.	174
Figura 52. Comparativa de tres métodos de modelización de susceptibilidad. (Londoño, 2014).	176
Figura 53. Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales. (Londoño, 2014).	176
Figura 54. Mapa de susceptibilidad por el método multivariado de Análisis Discriminante.	177
Figura 55. Mapa de susceptibilidad mediante la aplicación de conjuntos difusos. (Londoño, 2014).	177
Figura 56. Mapa de áreas de tratamiento geotécnico ATG. (Londoño, 2014).	179
Figura 57. Mapa de susceptibilidad por el método RNA, considerando la influencia de las ATGs. (Londoño, 2014).	180
Figura 58. Mapa de susceptibilidad en contornos. (Londoño, 2014).	181
Figura 59. Susceptibilidad agregada por predios. (Londoño, 2014).	182
Figura 60. Mapa de Susceptibilidad mediante relación de frecuencias. (Londoño, 2014).	183
Figura 61. Precipitación anual multianual para la zona de estudio. (Londoño, 2014).	184
Figura 62. Tasa anual de excedencia (Amenaza) de deslizamientos para la ciudad de Manizales. (Londoño, 2014).	185
Figura 63. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 50 años. (Londoño, 2014).	186



<i>Figura 64. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 100 años. (Londoño, 2014)</i> .....	187
<i>Figura 65. Mapa de riesgo implícito para la ciudad. (Londoño, 2014)</i> .....	188
<i>Figura 66. Riesgo Implícito sector norte. (Londoño, 2014)</i> .....	188
<i>Figura 67. Riesgo implícito sector sur. (Londoño,2014)</i> .....	189
<i>Figura 68. Eventos de lluvia que generaron deslizamientos</i> .....	190
<i>Figura 69. Estimación de la curva de densidad de probabilidad para las diferencias (Londoño, 2014)□</i> .....	191
<i>Figura 70. Estimación de umbrales Intensidad-Duración para la ciudad de Manizales</i> .....	192
<i>Figura 71. Umbrales ID propuestos para Manizales</i> .....	193
<i>Figura 72. Riesgo implícito por inundación para la ciudad. (Londoño, 2014)</i> .....	194
<i>Figura 73. Riesgo Implícito por Inundación Sector Norte. (Londoño, 2014)</i> .....	195
<i>Figura 74. Riesgo Implícito por Inundación Sector Sur. (Londoño, 2014)</i> .....	195
<i>Figura 75. Modelo de exposición en términos monetarios. (Londoño, 2014)</i> .....	197
<i>Figura 76. Modelo de exposición de habitantes. (Londoño, 2014)</i> .....	197
<i>Figura 77. Pérdidas económicas 50 años. (Londoño, 2014)</i> .....	198
<i>Figura 78. Pérdidas económicas en 100 años. (Londoño, 2014)</i> .....	198
<i>Figura 79. Pérdidas humanas en 50 años. (Londoño, 2014)</i> .....	199
<i>Figura 80. Pérdidas humanas en 100 años</i> .....	199



## Tabla de tablas

Tabla 1. Incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial. PREDECAN.2006 .....	40
Tabla 2. Comparación de conceptos POT de la ciudad de Manizales de 2001 y la Ley 1523 de 2012 .....	51
Tabla 3. Clasificación del suelo según el Artículo 30, Ley 388 de 1997.....	64
Tabla 4. Niveles de amenaza relativa y riesgo implícito para el caso de inundaciones y deslizamientos.....	72
Tabla 5. Intervenciones prospectivas, correctivas y prescriptivas indicativas, asociadas a los niveles de riesgo implícito. .....	73
Tabla 6. Clasificación actual del ordenamiento territorial en Colombia .....	78
Tabla 7. Categorización de los municipios en Colombia según la Ley 1551 de 2012 .....	80
Tabla 8. Categorización de municipios haciendo un cruce con la Ley 388 de 1997.....	81
Tabla 9. Categorización en tres grupos y número de municipios .....	81
Tabla 10. Nivel de resolución para la evaluación de amenazas en la planificación territorial. PREDECAN. 2006 .....	82
Tabla 11. Nivel de resolución para la evaluación de amenazas en la planificación territorial. ....	83
Tabla 12. Niveles de cálculo de amenaza por deslizamiento.....	84
Tabla 13. Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a deslizamientos (Kanungo, 1993) .....	85
Tabla 14. Factores de inestabilidad y pesos correspondientes (Ambalagan, 1992) .....	86
Tabla 15. Pesos de los diferentes factores a considerar en la evaluación de amenazas a deslizamientos (Ambalagan,1992) .....	87
Tabla 16. Asignación de categorías de amenaza según la suma de pesos.....	88
Tabla 17. Estimación del parámetro de relieve relativo $R_r$ en el método de Mora y Vahrson .....	91
Tabla 18. Estimación del parámetro asociado a litología en el método de Mora y Vahrson .....	93
Tabla 19. Clasificación de los promedios mensuales máximos de precipitación .....	94
Tabla 20. Determinación del parámetro de humedad en el método de Mora y Vahrson.....	94
Tabla 21. Estimación de la influencia de la actividad sísmica en el método de Mora y Vahrson .....	95
Tabla 22. Determinación del parámetro $L_l$ de lluvias intensas en el método de Mora y Vahrson .....	96
Tabla 23. Rangos de amenaza por deslizamientos por el método de Mora y Vahrson .....	97
Tabla 24. Factores generales de propensividad a la inestabilidad de laderas.....	101
Tabla 25. Distribución de datos en grupos para configurar modelos de RNA.....	107
Tabla 26 Relación entre la categoría del municipio y el nivel de complejidad .....	110
Tabla 27 .Asignación de niveles de amenaza para el método de la ronda geomorfológica.....	118
Tabla 28 Asignación de niveles de amenaza para el método de la ronda geomorfológica.....	120
Tabla 29 Determinación de patrones sintéticos espaciales .....	125
Tabla 30. Ejemplo de generación de un hietograma a partir de su curva de distribución. ....	127
Tabla 31 Valores de $N$ para diferentes tipos de suelo y usos de la tierra (cobertura) .....	131
Tabla 32. Ejemplo de relación entre el nivel de amenaza y el periodo de retorno con fines de zonificación .....	139
Tabla 33. Estructura del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Chinchiná .....	142
Tabla 34: Límites de intensidad para cada nivel de amenaza por caída de cenizas .....	147
Tabla 35: Límites de intensidad para cada nivel de amenaza por inundación.....	149
Tabla 36: Límites de intensidad para cada nivel de amenaza por flujos piroclásticos .....	150
Tabla 37. Pesos de ponderación de niveles de amenaza .....	154
Tabla 38. Cálculo del índice de afectación por amenaza (Cardona, González, Mora et al, 2013) .....	156
Tabla 39. Cálculo del índice de afectación combinado (múltiples amenazas). (Cardona, González, Mora et al, 2013) ...	157
Tabla 40. Valoración de probabilidades relativas según (IPCC 2013, p.36).....	178
Tabla 41. Criterios para categorizar la susceptibilidad.....	178
Tabla 42. Tipos de obras de mitigación y reducción de la susceptibilidad .....	180



## **1. INTRODUCCIÓN**

### ***1.1. Antecedentes***

Los desastres producto de fenómenos naturales han estado presentes a lo largo de nuestra historia, con consecuencias catastróficas que van desde lo económico hasta la pérdida de vidas, afectando gravemente nuestras sociedades. En el caso latinoamericano es producto por un lado de la transición de ser sociedades rurales a sociedades urbanas en lapsos muy cortos de tiempo. Esto ha generado un crecimiento desaforado de las urbes que de manera desorganizada y con poco control gubernamental se hicieron múltiples asentamientos humanos, sin una identificación de los riesgos asociados al territorio sino más bien motivados por factores económicos; debido a que los lotes son atractivos por su poco valor más no por las condiciones de seguridad para el ciudadano y su calidad de vida. Lo anterior se refleja en la actualidad observando cómo la mayoría de las personas con bajo nivel socioeconómico están en las zonas de alto riesgo, es decir, se concentra la vulnerabilidad en dichas comunidades.

Lo anterior es muestra de problemas sociales como el desempleo, el analfabetismo, la corrupción y la poca presencia gubernamental, principalmente en las provincias debido a democracias débiles y constantes fuentes de corrupción, además de un factor cultural en muchos casos desafortunado. Estas circunstancias no han permitido que el territorio haya sido planificado en tiempos pasados, lo que ha desencadenado múltiples desastres. Por citar ejemplos en Colombia producto de la falta de planificación se han presentado desastres como el ocurrido en la ciudad de Armero en 1985, fenómenos como El Niño en 1995, La Niña en 2011, los constantes deslizamientos en la ciudad de Manizales especialmente en años trágicos como 2003, 2007, 2011 ó el terremoto de la ciudad de Armenia en 1999 por citar algunos. Lo anterior es muestra de la falta de políticas de prevención y reducción de riesgo, es decir, ausencia por muchos años de gestión de riesgo de desastres y su inclusión en la planificación territorial.

Si bien en Colombia se han hecho intentos de evaluar e incluir el riesgo en la planificación territorial esta ha sido tardía, además, con metodologías que en su momento fueron de utilidad pero en la actualidad el estado del arte del conocimiento en evaluación del riesgo permite aplicar otras metodologías y no se justifica seguir utilizando las anteriores sin estimar la frecuencia de los eventos. Esto es debido a los vacíos jurídicos, ya que no existen orientaciones metodológicas en la legislación colombiana que ilustren a los tomadores de decisiones de cada municipio como identificar el riesgo, como reducir el riesgo y como utilizar esta información como determinante en la planificación del territorio, generando confusión a la hora de contratar estudios que en muchos casos se hacen con personal no capacitado u oportunistas y se generan planes de ordenamiento que no reflejan las verdaderas necesidades del municipio o región.

Debido a los exitosos casos de estudio que se han presentado en el último tiempo se considera importante ilustrar en la teoría y en la práctica con casos reales como las metodologías probabilistas con cierto éxito y confiabilidad pueden ser orientadoras en la planificación del territorio. Dichas metodologías están enfocadas a los tomadores de decisiones, sin embargo, pesar de estar disponibles, la legislación en Colombia aún no da una guía en esta dirección que permita a los municipios tener claridad en cómo afrontar la gestión de riesgo de desastres como determinante en el territorio según sea su capacidad fiscal y social.

### ***1.2. Propósito de la investigación***

El objetivo general de esta investigación es determinar cómo deben evaluarse las amenazas naturales y el riesgo de desastres y cómo deben incorporarse los resultados en los instrumentos de ordenamiento territorial. Sus objetivos específicos son:

- a. Analizar los aciertos y desaciertos de cómo se ha incluido la amenaza y el riesgo en los planes de ordenamiento territorial.
- b. Descripción de las metodologías probabilistas de evaluación de amenazas y del riesgo de desastres y su pertinencia para el ordenamiento territorial.
- c. Criterios para la zonificación y planteamiento de medidas correctivas y prospectivas de reducción del riesgo.
- d. Aportar herramientas justificadas en el estado del arte del conocimiento en la evaluación del riesgo de desastres naturales para facilitar la toma de decisiones de las entidades competentes.

### ***1.3. Metodología de la investigación***

El enfoque de la presente investigación es de carácter descriptivo, con el fin de correlacionar y explicar los procesos y realidades de la incorporación de las amenazas y riesgos en la planificación. Las técnicas e instrumentos que se utilizaron para la recolección de la información se basaron en el levantamiento de datos de carácter documental y participación en proyectos de investigación y consultoría con la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales por intermedio del Instituto de Estudios Ambientales-IDEA, La Corporación Autónoma Regional de Caldas y la Alcaldía de Manizales.

En principio se consultaron los libros, documentos, revistas, consultorías concernientes con la temática de gestión de riesgos, con la finalidad de obtener los antecedentes jurídicos y académicos realizados en Colombia especialmente en la ciudad de Manizales. Se revisó con sumo cuidado la aplicación de la Ley 388 de 1997 en el municipio de Manizales y su respectivo POT

Se aprovechó la participación en proyectos como el Plan de Manejo Ambiental de la Cuenca del Río Chinchiná, El Plan Parcial de sector el Rosario de la ciudad de Manizales,

en el proyecto Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital Bogotá-Cundinamarca; de igual manera se ilustra la actualización del POT de la ciudad de Manizales 2013-2014 y como se incorporó el riesgo en el plan de ordenamiento. Con base en estos proyectos se elaboró la presente tesis tanto en su componente teórico como de los ejemplos reales aplicados en diferentes territorios y a diferentes escalas como se expondrá en el transcurso del documento.





## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. *El riesgo de desastres***

De acuerdo con la UNISDR (2004) un desastre es una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos

Los desastres han sido considerados desde la antigüedad como castigos divinos, hechos del destino o el infortunio y, en años más recientes, como castigos de la naturaleza; de allí el origen de la idea de que los desastres son naturales (Cardona, 2002). Se ha llegado a tratar erróneamente a los “*fenómenos o eventos naturales*” como sinónimo de “*desastres naturales*”. No obstante, el hecho de que ocurra el fenómeno natural no necesariamente implica que ocurra un desastre. Es más, hay ocasiones que ciertos eventos ni siquiera llegan a ser peligrosos para las comunidades (Maskrey, 1993). Un huracán en medio del océano o un terremoto en el desierto donde no se afecte a alguien incluso siendo eventos muy intensos como fenómenos pueden no originar un desastre. Por otra parte no necesariamente el desastre debe estar asociado a un número de personas fallecidas o a un gran impacto. En muchas ocasiones se presentan fenómenos que, por no ocasionar un amplio número de fallecidos ni lesionados, estimados como desastres, pero estos eventos en forma acumulativa pueden estar causando efectos crónicos importantes en los medios de sustento o medios de vida de las poblaciones (Cardona, 2002).

Darle la denominación de natural al desastre hace que se vea al ser humano solamente como una víctima del mismo y no como un posible responsable de las causas que lo originaron, es decir, la construcción del riesgo. Esta actitud de resignación lo único que aparentemente es posible hacer por las personas -de manera individual o colectiva, organizadas en comunidades o a través de las instituciones- es prepararse para atender el desastre (Gellert, 2012). Bajo esta lectura de los desastres usualmente se han dejado de lado las acciones que se pueden hacer para reducir los riesgos ya existentes y las acciones para prevenir la construcción social de otros nuevos riesgos. En la actualidad el cambio climático ha sido víctima de este fenómeno en donde las autoridades e instituciones le atribuyen responsabilidades de ciertos eventos que generan desastres en diferentes partes del mundo, sin embargo, el verdadero problema es la vulnerabilidad, lo anterior ilustra que se utiliza un discurso a conveniencia con la finalidad de evadir responsabilidades trasladando las verdaderas causas a imaginarios por fuera del alcance del ser humano, justificando así, los graves problemas de desarrollo que existen en la sociedad.

Por lo anterior los desastres deben ser analizados desde diferentes perspectivas, por ejemplo desde el ámbito económico, político y social, Este enfoque, desarrollado y difundido por el grupo de investigadores que constituyen La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, LA RED (creada en 1992), ha contribuido a lo

largo de los años a cambiar la forma como se abordaba esta problemática, en la cual las acciones del Estado estaban principalmente dirigidas a dar respuesta cuando el desastre ya había ocurrido, dejando de actuar, o actuando muy poco, sobre las causas sociales subyacentes de los desastres. Dicho enfoque ha tenido como premisa: El riesgo de desastre se construye socialmente, el componente natural, por sí sólo, no genera el desastre. Para Wilchex-Chaux (1998) el riesgo es la probabilidad de que se produzca un desastre. Dicho autor señala que entre las principales características que presenta el riesgo de desastres están: a) Es dinámico y cambiante, esto se debe a que los dos aspectos esenciales que lo configuran (la amenaza y la vulnerabilidad) no son estáticos; b) Es diferenciado; es decir, afecta de distintas formas a los diversos actores que hacen vida en una misma comunidad; y c) Tiene un carácter social, ya que no es algo determinado por fenómenos de la naturaleza exclusivamente sino que surge de la interacción continua entre la comunidad y su entorno (Cardona,2002).

Por su parte, Cardona (2002) indica que el riesgo -cuando se utiliza en la planificación- es un concepto normativo y depende del nivel de aceptabilidad o tolerancia de las pérdidas que tiene la comunidad. Dicho autor señala que el riesgo se mide en función de: a) la amenaza que se deriva de la posibilidad de que un evento se presente en un lugar determinado; b) las condiciones de vulnerabilidad de los elementos que se encuentran expuestos a los eventos que caracterizan la amenaza. Dicho autor señala que el riesgo es un concepto compuesto que significa posibilidad y realidad al mismo tiempo. La posibilidad se relaciona con la amenaza y la realidad con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, lo anterior se trasluce en la siguiente ecuación.

$$Rie|_t = (Hi, Ve)|_t$$

$Hi$ , entendida como la probabilidad de que se presente un suceso con una intensidad mayor o igual a  $i$  durante un período de exposición  $t$ , y conocida la vulnerabilidad  $Ve$ , entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto  $e$  a ser afectado o de ser susceptible a sufrir un daño ante la ocurrencia de un suceso con una intensidad  $i$ , el riesgo  $Rie$  se expresa como la probabilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento  $e$ , como resultado de la ocurrencia de un suceso con una intensidad mayor o igual a  $i$ . Es decir, el riesgo en general puede entenderse como la probabilidad de pérdida durante un período de tiempo  $t$  dado (Cardona 2002).

Las amenazas, de acuerdo con su origen, se dividen en dos grupos: a) amenazas naturales: asociadas a la posible ocurrencia de fenómenos de la naturaleza, como expresión de su dinámica y funcionamiento –geodinámicas (sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, remoción en masa); hidrológicas (inundaciones, erosiones o sedimentaciones, sequías), atmosféricas (huracanes, incendios forestales, fenómenos de El Niño y La Niña) y; biológicas (epidemias)– y b) amenazas antrópicas: originadas por sucesos provocados intencionalmente o accidentalmente por el ser humano o por la falla en la operación de un sistema –sucesos tecnológicos (accidentes aéreos, rompimiento de represas, incendios industriales, entre otros); sucesos contaminantes (derrames de hidrocarburos, las emisiones o escapes de radiación nuclear, la disposición inadecuada de desechos líquidos y sólidos domésticos o industriales, entre otros) y sucesos antropogénicos y conflictos (guerras, acciones terroristas, vandalismo, entre otros). Puede darse el caso en el que se materialice

una amenaza como consecuencia de otra, ejemplo: un sismo puede generar un incendio o puede desencadenar deslizamientos. Cada amenaza se caracteriza por su localización, intensidad y frecuencia (Cardona, 2002).

Ahora bien, las amenazas pueden conformarse producto de la intervención inapropiada del hombre en la naturaleza, las cuales se pueden clasificar como de origen “socio-natural”. Respecto a estas amenazas Lavell (1996) explica que, en el proceso de construcción del riesgo, el aspecto social no solamente es característico de la vulnerabilidad, también contribuye en la conformación de nuevas amenazas o la agudización de unas ya existentes. Este proceso de conformación o agudización de las amenazas se ha dado debido al crecimiento exponencial de las necesidades de las sociedades modernas lo que ha catapultado la explotación en diferentes frentes del medio natural. Mansilla (2000) indica que, según estudios históricos, las sociedades primitivas basaban la relación hombre-naturaleza en el respeto y en la protección de los recursos naturales, existía un equilibrio entre la explotación de dichos recursos y la satisfacción de las necesidades de estas sociedades. Este equilibrio muy probablemente no se daba basado en una conciencia ecológica per se, sino por el limitado desarrollo de las fuerzas productivas, la naturaleza aún ejercía una posición dominante sobre la sociedad. La construcción del riesgo se daba, principalmente, por las amenazas de origen natural sobre las cuales poco se conocía y, por ende, poco se podía actuar. Fue con el desarrollo de las nuevas fuerzas productivas y de organización de la sociedad que el factor dominante en la relación hombre-naturaleza cambió. Los avances en la tecnología permitieron que el hombre ejerciera un mayor dominio sobre la naturaleza, convirtiendo la construcción del riesgo en un proceso inherente al desarrollo de la sociedad y en una condición propia de ella, ya que no sólo modifica las amenazas sino que contribuye a aumentar los niveles de vulnerabilidad (Cardona 2002).

Por otra parte, la vulnerabilidad no debe estar solamente relacionada con la susceptibilidad física de los elementos expuestos a ser afectados por la manifestación de un evento de origen natural o antropogénico, sino también con las fragilidades sociales y la falta de resiliencia de la comunidad que está propensa a ser afectada, es decir, su capacidad para responder o absorber el impacto. (Cardona, 2001). No sólo se debe considerar el factor físico sino también los factores ambientales, económicos y sociales. Dentro de estos últimos se encuentran los políticos, educativos, institucionales, ideológicos y culturales (Wilches-Chaux, 1998).

Para evitar que las condiciones de riesgo existentes en un lugar determinado se materialicen en un desastre, se deben llevar a cabo acciones que intervengan la amenaza y la vulnerabilidad. Sin embargo, dado que en muchas ocasiones no es posible intervenir la amenaza, por ejemplo la amenaza sísmica y volcánica, para reducir el riesgo no queda más alternativa que intervenir las condiciones de vulnerabilidad de los elementos expuestos, considerando no sólo los aspectos físicos sino también los sociales y económicos, todo enmarcado en un proceso que los expertos han denominado gestión del riesgo (Cardona 2002).

La gestión de riesgo es el conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, con el fin de disminuir o mitigar los riesgos existentes. Tiene como objetivo articular los tipos de intervención dándole un papel principal a la prevención-mitigación. Toma como punto de partida la noción de que el riesgo como manifestación social es una situación dinámica. No debe ser un propósito o política solo del Estado sino que debe convocar también a fuerzas no gubernamentales y se debe tener en cuenta en todos los niveles territoriales. De acuerdo con lo anterior la sostenibilidad y la resiliencia son el resultado de la implementación efectiva de una política de gestión del riesgo de desastres (Cardona, 2001).

La reducción del riesgo es el resultado de la gestión de riesgos, y una forma de ver su proceso fue propuesto por la Estrategia Internacional para reducción de Desastres (EIRD), con un marco conceptual que proporciona una mirada global de las fases que se deben tomar en cuenta en la reducción del riesgo de desastre, como el análisis de la vulnerabilidad, el análisis del riesgo y la evaluación del riesgo, alerta temprana y repuesta; representado en la Figura 1, sin embargo no es fácil evidenciar cómo se debe hacer la reducción del riesgo a través de la reducción de la vulnerabilidad y la mitigación de las amenazas (Birkmann, 2013).



**Figura 1. Marco para la reducción del riesgo de desastre del proyecto MOVE**  
 Fuente: Birkmann, 2013

La gestión de riesgo para su reducción debe ser un compromiso de las administraciones públicas y debe convertirse en una política pública, tanto nacional como local, y entre mayor claridad se tenga sobre la dimensión del problema y el tipo de medidas que se deben tomar será más precisa y efectiva. Según Cardona, esta política debe tener en cuenta aspectos como: la articulación de fuerzas sociales, políticas, institucionales, públicas, privadas de todos los niveles territoriales; promover planteamientos y participación democráticos; intervenir sobre el conocimiento de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo, los mecanismos de reducción del riesgo, de preparación de la población e instituciones para enfrentar casos de desastre, incorporación en la toma de decisiones y procesos educativos (Cardona, 2001).

Cardona (2001) señala que la gestión del riesgo es una estrategia fundamental para el desarrollo sostenible, que contribuye a dosificar y orientar la acción del hombre sobre el medio ambiente y viceversa, evitando o reduciendo en este caso la ocurrencia de los desastres. Esta se entiende como un proceso social complejo, conformado por un conjunto de elementos, medidas y herramientas dirigidas a la intervención de la amenaza o la vulnerabilidad, con el fin de reducir los riesgos existentes y evitar la construcción de nuevos riesgos. La formulación e implementación de dichas medidas pueden y deben darse, de forma organizada y concertada, desde los distintos niveles territoriales (nacional, regional y local) y temporales (corto, mediano y largo plazo) según las competencias que referentes al tema les correspondan a cada actor (instituciones y comunidades).

La gestión de riesgo también estima los procedimientos y herramientas para actuar después de materializado el desastre, teniendo en cuenta las acciones necesarias para la atención, respuesta y rehabilitación de la emergencia, sin embargo, se da suma importancia a las medidas de prevención y mitigación del riesgo, estas deben ser asociadas a políticas de corto mediano y largo plazo, que en un futuro se reflejarán en una cuantiosa disminución de los costos económicos y sociales de futuros desastres. Para que dicha gestión cumpla con su objetivo; facilitar y orientar la toma de decisiones que conlleven a la reducción del riesgo de desastre en un área geográfica; en principio, el riesgo tiene que ser estimado o valorado adecuadamente, es decir, basado en una visión holística, consistente y coherente, fundamentada en los planteamientos teóricos de la complejidad, que tenga en cuenta no sólo variables geofísicas y estructurales, sino también variables económicas, sociales, políticas, culturales entre otras (Cardona,2002).

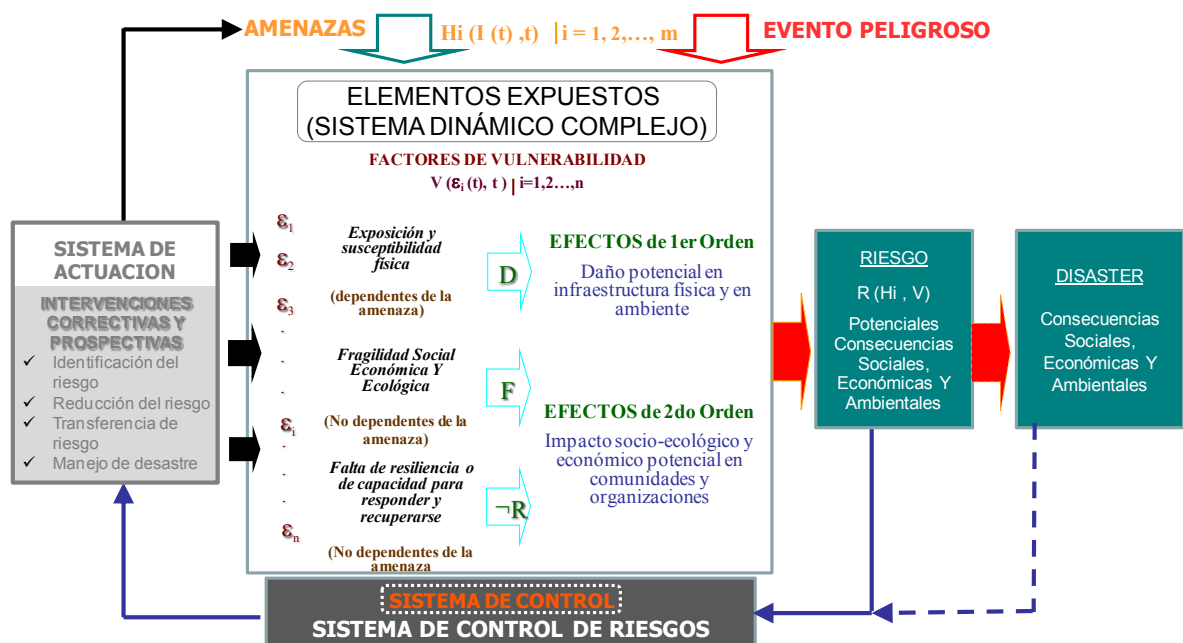


Figura 2. Marco y modelo teórico para el enfoque holístico de la evaluación y gestión del riesgo de desastre, a partir de Cardona y Barbat (2000) Fuente: Cardona et al. (2005).

Entrando en la evaluación del riesgo la Figura 2 ilustra uno de los modelos teóricos el cual es considerado por Birkmann (2006) como una de las seis escuelas existentes de discusión de marcos conceptuales y analíticos diferentes, la aproximación de la valoración holística del riesgo y la vulnerabilidad fue propuesto por Cardona (2001) y aplicada con Hurtado y Barbat (2000), donde la vulnerabilidad se evalúa considerando dimensiones o aspectos que se pueden subdividir en tres categorías o factores(Carreño, et al., 2004):

- ✓ Exposición física y susceptibilidad, D, que corresponde a un riesgo *hard*, relacionado con el daño potencial en la infraestructura física y el ambiente (dependiente de la amenaza).
- ✓ Fragilidades socio-económicas, F, que contribuyen a un riesgo *soft*, relacionado con el impacto potencial sobre el contexto social, (independiente de la amenaza) y
- ✓ La falta de resiliencia para enfrentar desastres y recuperarse, R, que contribuye también al riesgo *soft* o factor de impacto de segundo orden sobre comunidades y organizaciones (independiente de la amenaza).

El modelo del enfoque holístico consiste en que los elementos expuestos constituyen un sistema dinámico complejo, con unos factores de vulnerabilidad (riesgo *hard* y riesgo *soft*), que en la presencia de una amenaza generan riesgo. El sistema de gestión de riesgo, que debe contar con un sistema de control y de actuación representado en la organización institucional, determina las medidas e intervenciones correctivas y prospectivas. Aplicando las políticas públicas y acciones de reducción del riesgo a la amenaza pero principalmente a cada una de las variables que constituyen los factores de vulnerabilidad: exposición y susceptibilidad física, fragilidades sociales y económicas, y falta de resiliencia, se constituye un bucle de retroalimentación (Cardona, 2002).

*“La vulnerabilidad y, por lo tanto, el riesgo son el resultado del crecimiento económico inadecuado, por una parte, y de deficiencias que pueden corregirse a través de procesos apropiados de desarrollo. Indicadores e índices se podrían proponer para medir la vulnerabilidad desde una perspectiva integral y multidisciplinaria”* (Carreño, et al., 2004).

El modelo holístico fue actualizado mediante una versión específica de Carreño, Cardona y Barbat en el 2004 y 2005 (ver Figura 3 ), donde se redefine el significado de riesgo *hard* y *soft* en términos de “daño físico”, obtenido de la exposición y susceptibilidad física, y de un “factor de impacto” obtenido de fragilidades socio-económicas y la falta de resiliencia del sistema para resistir y recuperarse de un desastre.

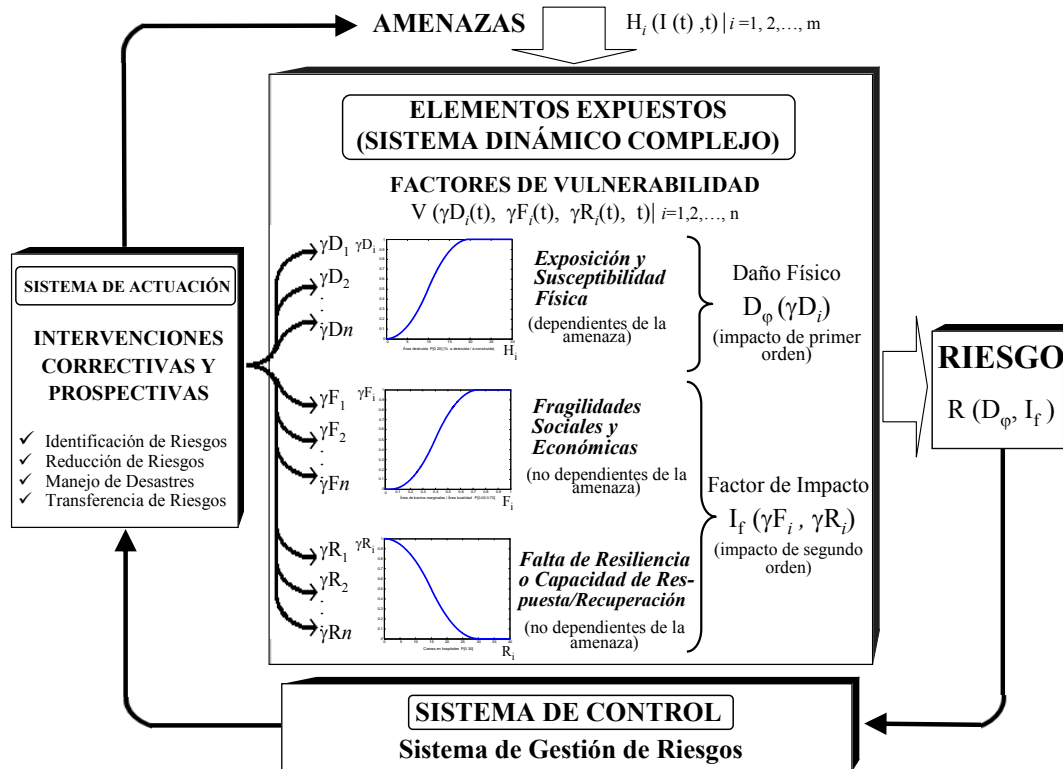


Figura 3. Nueva versión del modelo (Carreño et al. 2004; 2005)

Fuente: Cardona et al. (2005).

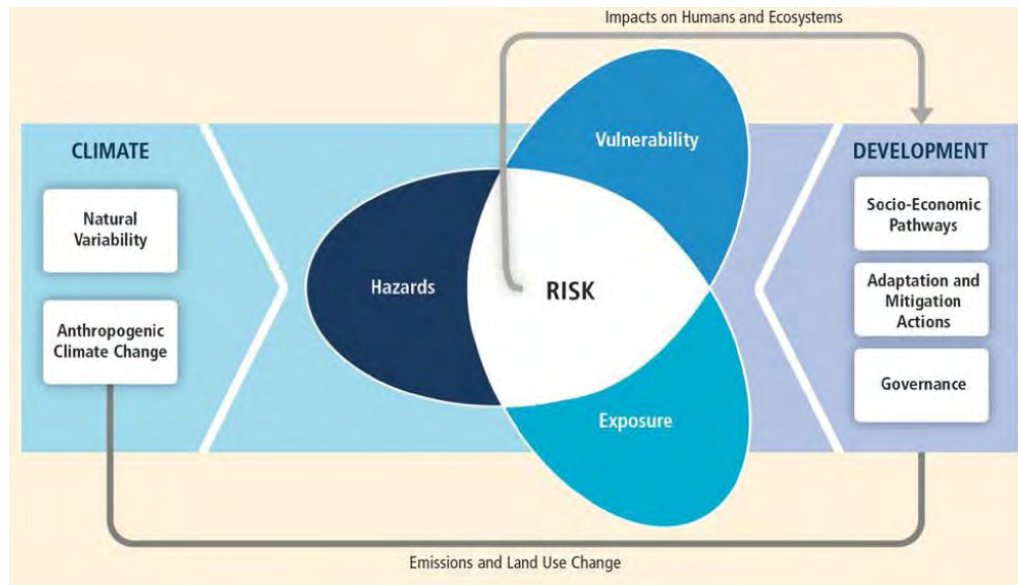
Desde un enfoque holístico el riesgo,  $R$ , es una función del daño físico potencial,  $D_\phi$ , y de un factor de impacto,  $I_f$ . El primero es obtenido de la susceptibilidad de los elementos expuestos,  $\gamma D_i$ , a las amenazas,  $H_i$ , teniendo en cuenta las intensidades potenciales,  $I$ , de los eventos en un periodo de tiempo  $t$ ; y el segundo depende de las fragilidades sociales,  $\gamma F_i$ , y de aspectos relacionados con la falta de resiliencia,  $\gamma R_i$ , del sistema socio-técnico o contexto propenso a desastres. Usando los metaconceptos de la teoría del control y la dinámica de sistemas complejos, para reducir el riesgo es necesario intervenir en forma correctiva y prospectiva los factores de vulnerabilidad y, cuando es posible, las amenazas en forma directa (Cardona, 2001; Carreño, et al., 2004).

Basado en este enfoque holístico, para gestionar el riesgo de desastres se debe contar con: 1) un sistema de actuación, el cual está representado por un conjunto de intervenciones correctivas (o compensatorias sobre el riesgo existente) y prospectivas (para evitar la configuración de nuevos riesgos) las cuales están estructuradas en cuatro políticas públicas específicas: a) La identificación del riesgo; b) La reducción del riesgo; c) La transferencia del riesgo y d) El manejo de desastres. Las tres primeras representan acciones que se deben realizar antes de la ocurrencia de un desastre (ex ante) y la última, se corresponde con las acciones, que en su mayoría, son implementadas luego de ocurrido el suceso (ex post). 2) Y un sistema de control, que puede denominarse sistema de gestión del riesgo, representado por la estructura institucional y comunitaria, el cual debe orientar y regular el proceso de



identificación y ejecución de dichas medidas. La presente investigación se basa, principalmente, en las dos primeras políticas públicas señaladas (a y b).

Estos enfoques actualmente han sido adoptados por los informes más recientes del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC en su sigla en inglés). Tanto en el informe SREX (2012) (Special Report on Managing the Risk of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaption) (2012) como el AR5 (2014) (Informe de evaluación) incluyen en su marco conceptual y su glosario básicamente los mismos conceptos antes descritos.



**Figura 4. Conceptos básicos SREX. Fuente: IPCC AR5, 2012**

La Figura 4 ilustra de manera general estos conceptos. El riesgo de desastres depende de las amenazas (eventos extremos en el IPCC SREX, 2012) la vulnerabilidad y la presencia de elementos expuestos (exposición).

## **2.2. La identificación del riesgo de desastres**

Según Cardona (2002) es indispensable para la gestión del riesgo empezar por identificarlo, para esto es necesario dimensionar y medir el riesgo y lograr con esta información representarlo de una manera apropiada con la finalidad de servir como herramienta para los tomadores de decisiones por intermedio de modelos, mapas, índices, etc.

Por lo anterior, se hace necesario estimar las pérdidas que pueden presentarse en un área, debido a la ocurrencia de un desastre, con la finalidad de definir dentro de los planes de desarrollo y los planes de ordenamiento territorial, con sus respectivos planes de inversión, cuáles serán las políticas en caso de ser posible de mitigar la amenaza ó intervenciones preventivas enfocadas en la reducción de la vulnerabilidad.

Uno de los primeros pasos a seguir es la estimación de la amenaza. Esto significa, implícitamente, la evaluación del potencial de ocurrencia del fenómeno que caracteriza la amenaza, entendiendo que el fenómeno no es la amenaza. Aun cuando es común que en la literatura de los desastres se haga mención al fenómeno como si fuera la amenaza misma, en rigor existe una diferencia fundamental que está relacionada con la factibilidad de que ocurra el evento y su grado de severidad (Carreño et al, 2007).

El nivel o grado de amenaza que representa el fenómeno para una comunidad expuesta, se define por la intensidad y la frecuencia con que se puedan presentar los eventos que la caracterizan. En otras palabras, los fenómenos en cada sitio pueden presentarse con diferentes intensidades que pueden tener una mayor o menor frecuencia de ocurrencia; es decir, un período de retorno o tiempo promedio de recurrencia en el cual se iguala o se supera la intensidad de cada evento. Esto usualmente se expresa por una curva de probabilidad de excedencia de la intensidad de los eventos factibles que indica la tasa anual de ocurrencia o el período de retorno de los diferentes niveles de intensidad que pueden presentarse en el sitio (Mendes, 2013).

La Figura 5 ilustra la curva de probabilidad de excedencia o curva de amenaza en un sitio (punto de una malla que cubre toda el área de una ciudad, una región o un país). Utilizando el valor de intensidad para un período de retorno (e.g. 100 años) o una tasa anual de excedencia específica (que es el inverso; e.g.  $0.01=1/100$ ) en todos los puntos de la malla es posible elaborar un mapa de amenaza para el mismo período de retorno o la misma tasa. La figura ilustra tres mapas de amenaza para 100, 500 y 1000 años, obtenidos de las curvas de excedencia de la intensidad del fenómeno.

## Representación de la amenaza sísmica

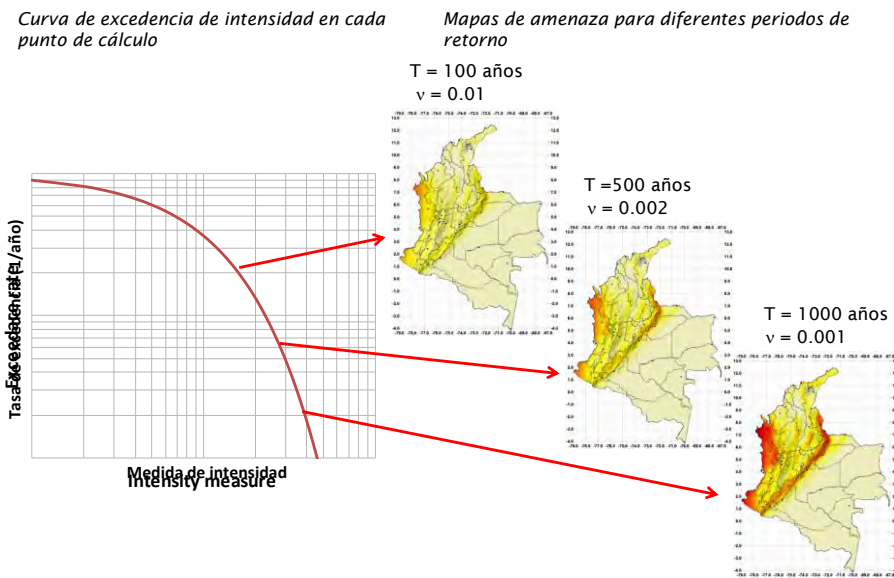
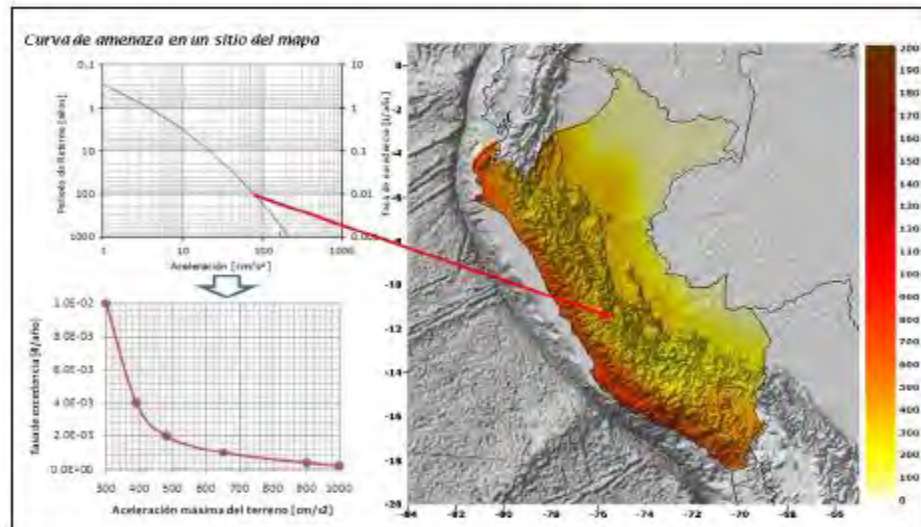


Figura 5. Curva de tasa de excedencia del parámetro de intensidad para cada ubicación y mapas de amenaza de igual período de retorno para Colombia. Fuente: ERN-AL (2009)

Por su parte, la Figura 6 ilustra el mapa de amenaza de los 100 años de período de retorno (tasa de excedencia de 0.01 veces al año) y la curva de excedencia para un punto del mapa en formato log-log y en formato aritmético. Esta curva en cada punto del territorio expresa de manera completa la amenaza en el sitio, ya que en ella están todos los valores factibles de intensidad que pueden presentarse y su frecuencia de ocurrencia.



**Figura 6. Curvas de amenaza en formato log-log y aritmético para una ubicación y mapa de amenaza del Perú para un período de retorno de 100 años. Fuente: ERN-AL (2009)**

Según Chivata (2006) los fenómenos naturales se deben entender como eventos complejos y en consecuencia no permanentes en el tiempo, esencialmente no lineales, inciertos, difusos. De igual manera su interpretación, modelación y el proceso de toma de decisiones y comunicación son actividades también complejas. Por lo anterior aún la ciencia no ha logrado estimar determinísticamente los fenómenos naturales. Por esto los enfoques probabilistas se considera representan de manera aproximada pero con cierta certeza los sistemas físicos involucrados en un fenómeno natural y analiza la información de los eventos ya ocurridos (Carreño, 2007).

En cuanto a la evaluación de la vulnerabilidad esta depende del grado de susceptibilidad y predisposición al daño que tiene un elemento ó grupo de elementos expuestos a una amenaza en particular. Los elementos expuestos ó en riesgo se podrían definir como aquellos elementos con los que habitualmente interactúa el ser humano (casas, edificios públicos y privados, infraestructura vial, etc.) ó de los que tiene algún grado de dependencia (Reservas hídricas, reservas forestales, hidroeléctricas, etc (Cardona, 2002).

El riesgo por su parte es el resultado analítico entre la amenaza y la vulnerabilidad como se explicó anteriormente. Este se expresa como el potencial de consecuencias o pérdidas. Semejante a lo expuesto en la amenaza, el riesgo se muestra mediante una curva de probabilidad de excedencia de pérdidas, para esto es necesario tener conocimiento de la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, esto habitualmente para eventos grandes, sin embargo en el caso de los eventos menores se utiliza la información histórica

de pérdidas; esto se representa en el primer segmento de la curva ó segmento empírico, el cual puede ser estimado mediante un análisis retrospectivo (INGENIAR, 2006).

En la Figura 7 se observa como para pérdidas muy grandes se modelan los fenómenos con metodologías probabilistas y así de manera analítica concluir el segundo segmento de la curva de excedencia de pérdidas con base en un análisis prospectivo.

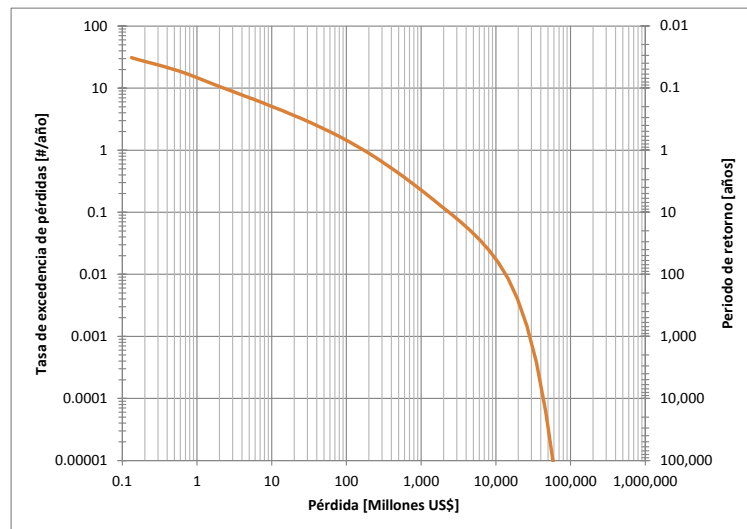


Figura 7. Segmentos de la curva de excedencia de pérdidas o curva de riesgo. Fuente (Velásquez et al, 2011)

A la unión de los dos segmentos expuestos en la Figura 8 se ha denominado “curva híbrida” de excedencia de pérdidas ó curva de riesgo. Esta curva es la envolvente de la curva histórica ó empírica y de la curva analítica, el primer segmento estima las pérdidas los pequeños desastres y el segundo estima los eventos catastróficos, esta curva ha sido expuesta en diferentes escenarios internacionales como en el *Global Assessment Report, GAR 2011* (UNISR 2011)

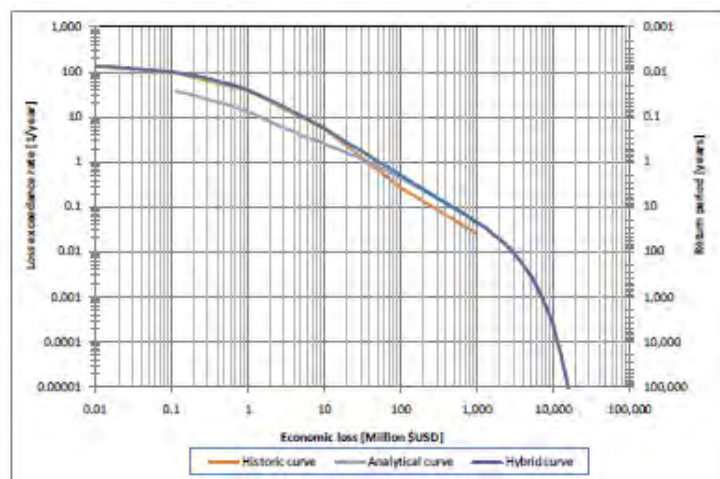


Figura 8. Ejemplo de una curva “híbrida” de excedencia de pérdidas. Fuente: ( Velásquez et al, 2011)

### **2.3. La reducción del riesgo de desastres**

La mirada en esta temática del riesgo a desastres ha ido variando en el transcurso de los años, ya es aceptado el centrar esfuerzos en la construcción del riesgo, lo que implica que el desastre es un problema derivado, ósea, un producto. Para lo anterior es necesario tener políticas que respalden estas visiones con la finalidad de reducir el riesgo y por ende tratar de impedir la construcción del riesgo por usos indebidos del suelo, desempleo, hambre, construcciones precarias etc. Estas políticas involucran medidas a) prospectivas, estas se adoptan con antelación para evitar la construcción de nuevos riesgos, b) correctivas, se aplican en caso de riesgos ya existentes (construcciones en suelos no aptos para asentamientos humanos) c) prescriptivas, son requisitos mínimos con la finalidad de tener una seguridad aceptable que permite convivir con una amenaza determinada por ejemplo las normas sismoresistentes – NSR de 1998 y su actualización realizada en el año 2010

En general las acciones se derivan en estructurales y no estructurales, siendo las estructurales intervenciones directas en la amenaza ó vulnerabilidad, por intermedio de refuerzos estructurales, estabilidad de taludes, construcciones de diques u otras intervenciones ingenieriles. Las no estructurales pueden ser activas o pasivas, las activas generalmente se enfocan a la intervención social, socio-económica y educativa de las comunidades y las pasivas son equivalentes las medidas prescriptivas antes mencionadas, los códigos y normas de construcción, la incorporación del riesgo y la gestión del riesgo en la planificación territorial y planes de desarrollo (INGENIAR,2006).

Como se mencionó anteriormente no todas los niveles del riesgo deben ser tratados por igual, debido a que existen algunos niveles de riesgo muy probables otros muy poco probables y otros con casi cero de probabilidad ocurrencia (e.g Caída de meteorito). La visión anterior es muy útil en estimaciones financieras de los diferentes niveles de riesgo existentes en un lugar determinado (trasferencia del riesgo). Por esto la Figura 9 muestra la curva de excedencia de pérdida estratificada en 4 estratos con la finalidad de mostrar las diferentes medidas de reducción de riesgo y su conveniencia según sea el nivel de riesgo (INGENIAR, 2006).

## ESTRATIFICACIÓN DEL RIESGO

La CEP representa la frecuencia anual con que determinada pérdida económica será excedida.

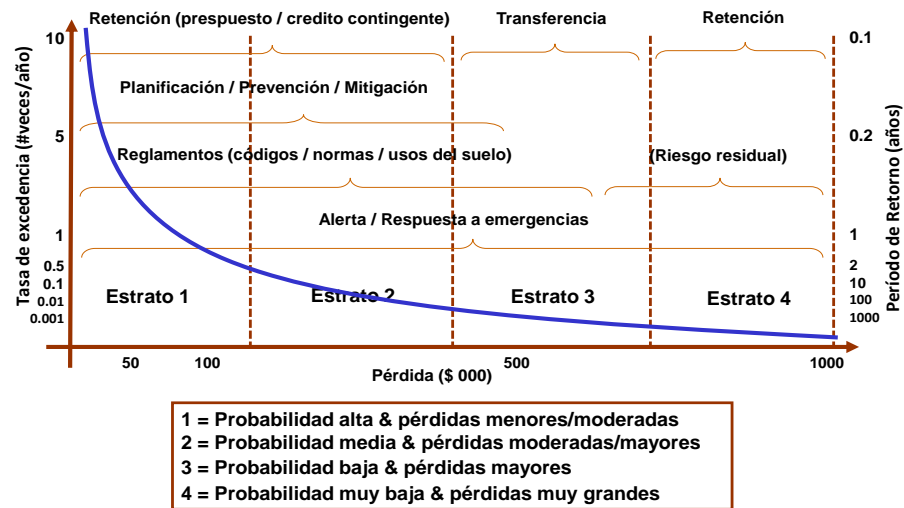


Figura 9. Adaptación de figura sobre estratificación del riesgo. ERN-AL, 2011

El estrato 1 representa eventos muy frecuentes (alta probabilidad de ocurrencia) y pérdidas pequeñas; llamado riesgo extensivo; a pesar de generar pequeñas pérdidas debido a su alta frecuencia en conjunto en una ventana de tiempo sus costos son elevados por ejemplo en un período gubernamental de cuatro años. En el estrato 2 la probabilidad de ocurrencia es moderada pero con pérdidas estimadas entre moderada y alta. En los anteriores estratos se recomienda aplicar medidas como: a) prescriptivas normas sismoresistentes, usos del suelo en los planes de ordenamiento territorial; b) correctivas, en los casos estimados por expertos intervenir zonas susceptibles a diferentes amenazas, reubicaciones de ser necesario; c) Tener estrategias financieras de retención del riesgo como por ejemplo, fondos de reservas, créditos contingentes, etc; d) la aplicación de medidas de preparación como la elaboración de los planes de emergencia (INGENIAR, 2006).

Los estratos 3 y 4 pertenecen al riesgo intensivo, cuyos impactos provienen de eventos extremos, los cuales se presentan con una baja frecuencia, sin embargo, cuando ocurren afectan muchos elementos expuestos, generando grandes pérdidas humanas y económicas, desestabilizando regiones enteras e incluso dependiendo de la magnitud del evento una nación completa. Para el caso del estrato 3 se recomienda tomar medidas financieras que permitan ante un evento de estas características tener alternativas que permitan atender la emergencia con todas las herramientas posibles en tecnología, además de tener alternativas para el post desastre es decir, la reconstrucción de los elementos expuestos destruidos. Estas medidas se logran básicamente con seguros y reaseguros. Esto no significa que dichos riesgos no puedan ser considerados en los planes urbanos y que no se puedan elaborar normas que los incluyan, sino que el costo en el que se llega a incurrir termina siendo mucho mayor que el beneficio que se pudiera llegar a obtener. Las regulaciones en los usos del suelo en el ordenamiento territorial, por citar un ejemplo, se vuelven más restrictivas y

poco factibles de aplicar a medida que el periodo de retorno de un evento aumenta, ya que las áreas de afectación del mismo aumentan también. Es en estos escenarios donde cobra más fuerza el tema del riesgo aceptable (INGENIAR, 2006).

Los riesgos que corresponden al estrato 4, en el cual la probabilidad de ocurrencia de los eventos es muy baja y el valor de las pérdidas económicas puede llegar a ser muy grande, se consideran residual. Son los que persisten luego de haber considerado prácticamente todos los mecanismos de reducción posibles, esto debido a que el nivel de afectación del evento es tan grande y el valor de las pérdidas asociadas a él también lo es (INGENIAR, 2006).

#### **2.4. *El riesgo en el ordenamiento territorial***

Entendiendo el territorio como una relación entre el hombre y la naturaleza y el ordenamiento como un lugar para cada cosa y cada cosa en su lugar, se puede lograr una interacción entre las dos definiciones, sin embargo el ordenamiento del territorio no es un proceso estático, debido a que las relaciones entre la sociedad y la naturaleza no tienen una temporalidad constante (PREDECAN, 2008).

Según el proyecto PREDECAN el ordenamiento territorial es: “*Un proceso político técnico a través del cual se organiza el uso y ocupación del territorio en función de sus características biofísicas. Socio-económicas, culturales, político-institucionales, sus potencialidades y limitaciones a efectos de generar procesos de desarrollo sostenible*”. Lo anterior indica que el ordenamiento territorial es un proceso que debe ser abordado por los entes gubernamentales de manera integral, con una visión objetivo que contribuya con el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes, es decir, el ordenamiento del territorio no es otra cosa que una oportunidad de desarrollo (PREDECAN, 2008).

En relación con lo anterior los estados han creado herramientas jurídicas de obligatoriedad a las entidades locales y regionales de realizar los planes de ordenamiento territorial (POT), que no es más que un instrumento de gestión pública que permite hacer una interacción entre el diagnóstico realizado para el ordenamiento territorial y su aplicación real en los diferentes niveles territoriales, político-administrativos (PREDECAN, 2008).

La finalidad del ordenamiento territorial no debe ser otro que el de proporcionar una mejor calidad de vida a los habitantes del territorio, es decir, un desarrollo sostenible, entendiendo por desarrollo sostenible según Brundtland como “*el proceso capaz de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas*”

La incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial, evita *per se* futuras inversiones en desastres ocurridos por el indebido uso del suelo, debido a los asentamientos humanos ubicados en zonas expuestas a altas amenazas. Ayudando a los municipios a incrementar su competitividad direccionando sus inversiones no a la atención de

emergencias sino a inversiones preventivas del riesgo de desastres traducidas en políticas de gestión de riesgo.

En el marco del proyecto de Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina -PREDEACAN proponen una metodología para la inclusión de la gestión de riesgo de desastres naturales en la planificación territorial la cual se ilustra en la tabla 1, esta metodología es indicativa que ha servido como orientación para las metodologías cuantitativas que se expondrán en el transcurso de este trabajo.

**Tabla 1. Incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial. PREDECAN.2006**

<b>Incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial (Metodología propuesta)</b>	
<b>Diagnostico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capacidad municipal para le gestión de riesgo de desastre.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Organización institucional</li> <li>▪ Marco normativo</li> <li>▪ Políticas</li> <li>▪ Mecanismos de financiamiento de la gestión del riesgo.</li> </ul> </li> <li>✓ Diagnóstico de los aspectos específicos de cada uno de los riesgos existentes.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Identificación de la amenazas</li> <li>▪ Evaluación y caracterización de las amenazas</li> <li>▪ Análisis de vulnerabilidad y riesgo</li> </ul> </li> </ul>
<b>Formulación del POT; Políticas y objetivos estratégicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Gestión del riesgo desde una perspectiva del desarrollo                             <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Incorporación de la zonificación de amenazas en forma estructurante</li> <li>▪ Definición del manejo de sistemas estructurantes considerando las amenazas y riesgos</li> <li>▪ Establecimiento de limitaciones al patrón de crecimiento por amenazas de riesgos.</li> <li>▪ Establecimiento de clases de suelos en zonas seguras.</li> <li>▪ Utilización de las zonificaciones de amenaza para restringir y/o condicionar el uso del suelo en las diferentes clases de suelo.</li> <li>▪ Utilización del análisis del riesgo</li> </ul> </li> <li>✓ Integración y coordinación con otros niveles territoriales</li> </ul>
<b>Restricciones y condicionamientos para la localización segura, construcción segura y actividades seguras por fenómeno.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Instrumentos de planeación, gestión y financiación, previstos en la Ley de desarrollo territorial.</li> </ul>
<b>Identificación de programas y proyectos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Identificación segura</li> <li>✓ Construcción segura</li> <li>✓ Actividades seguras</li> </ul>

Tomando como principio y base fundamental el diagnóstico y la identificación del riesgo que permiten la estimación del grado de las amenazas en el territorio para lo cual es necesario utilizar metodologías para dicha evaluación, las cuales deben variar según las características de la zona, y la información disponible. Dependiendo del nivel de análisis escogido exigirá más o menos variables para el cálculo, como se verá más adelante.



Estos métodos deben ser contextualizados, y su uso dependerá como se ha dicho reiteradamente de la disponibilidad de información, sin embargo, se debe tener en cuenta que la incertidumbre juega un papel preponderante en el cálculo de la amenaza y su posible afectación en un espacio determinado. Si bien el método determinista sería el ideal, en todos los casos no se cuenta con la información de todos los eventos del pasado e incluso tampoco se tiene información en tiempo real de los eventos presentes. Por lo anterior se considera que dada la alta incertidumbre, la amenaza, debe ser evaluada de manera probabilista, que permita de una manera aproximada ilustrar los posibles escenarios que podrían ocurrir en el territorio en una ventana de tiempo.

Se ha encontrado como una dificultad acentuada el acceso a la información debido a que son varias instituciones las que poseen dicha información técnica, y en muchos casos no existe una interacción constante entre ellas, además existe una acentuada burocracia que en muchos casos no permite el avance de los proyectos.

Continuando con las metodologías apropiadas según sea el caso por citar un ejemplo los municipios de bajos recursos y poca importancia geopolítica, no cuentan con la capacidad para adquirir la información necesaria para una oportuna identificación del riesgo y menos con personal calificado para este fin. Esto repercute en obstaculizar una eua toma de decisiones sobre el territorio tomando como base las amenazas como determinante en su planificación.

Lo anterior expone un vacío en la forma como se ha orientado la evaluación del riesgo y su inclusión en la planificación territorial. No existe una interacción entre las administraciones municipales, las instituciones regionales y de orden nacional. Esto sin duda se debe a que no hay metodologías estratificadas según las capacidades de cada territorio sean municipios o departamentos en el caso colombiano. Como ya se expresó esto se deriva a que con frecuencia se han establecido zonas clasificadas en alto, medio y bajo grado de amenaza sin estimar frecuencias e intensidades de los fenómenos naturales como se cree debe hacerse un diagnóstico y por ende la identificación del riesgo como primer paso.

Metodologías probabilistas que estimen frecuencia e intensidad de los fenómenos existen de tiempo atrás, sin embargo, actualmente en Colombia apenas se han visto pocas aplicaciones de la incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial. Tan solo hasta años recientes se han establecido nuevas normas como la ley 19 de 2012 que en su artículo 189 establece la incorporación de la gestión del riesgo en la revisión de los planes de ordenamiento territorial, y la ley 1523 de 2012 de gestión de riesgo de desastres que dicta las directrices a seguir en el ordenamiento territorial y la gestión de riesgo. De igual manera, se han desarrollado iniciativas como el Plan de Manejo Ambiental de la Cuenca del Río Chinchiná-POMCA como proyecto piloto, allí como novedad se tuvo un componente de gestión de riesgo el cual ha servido como determinante para la toma de decisiones. También se han hecho esfuerzos desde el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial.

### 2.4.1. Seguridad territorial

Según Cardona (INGENIAR, 2006):

*“La “seguridad territorial” es el resultado de la interacción entre una serie de factores que le permiten a un territorio ofrecerle “estabilidad” a quienes lo habitan, entendida la estabilidad como la permanencia en el espacio y en el tiempo de las condiciones que posibilitan la vida. Simplificando al máximo sistemas y procesos que en la realidad son más complejos, se puede decir que los principales factores (naturales o antrópicos) de los cuales depende la capacidad del territorio para ofrecerles estabilidad y seguridad a sus habitantes, son la seguridad y la soberanía alimentaria, la seguridad ecológica, la seguridad social, la seguridad económica y la seguridad jurídica institucional”.*

A continuación se describen dichos factores básicos para garantizar a las comunidades humanas la “seguridad territorial” que requieren para desarrollar sus vidas con calidad y dignidad; atributo de doble vía, que beneficia tanto a las comunidades como a la naturaleza.

- a) Seguridad alimentaria: se refiere a la capacidad que tiene un territorio para garantizar a sus habitantes los alimentos básicos que requieren para disfrutar del derecho a la vida con calidad y dignidad. Teóricamente, la seguridad alimentaria de una región depende de su conectividad con los mercados globales, de manera que en cualquier momento puedan adquirirse, en cualquier parte del mundo, los productos necesarios para la adecuada alimentación de sus habitantes. Una región determinada, entonces, tendría su seguridad alimentaria garantizada si lograra generar los recursos económicos necesarios para acceder a esos mercados, y no importaría que esa región abandonara la producción de alimentos en favor de la actividad industrial urbana o se dedicara al monocultivo. La realidad está demostrando que, por el contrario, la verdadera seguridad alimentaria no puede depender de las fluctuaciones de los mercados globales y que (como sucede en las zonas cocaleras o amapoleras) la mera plata no garantiza que la gente tenga qué comer.

La producción de alimentos debe tener en cuenta el potencial del suelo en el territorio para determinadas actividades agropecuarias, involucrando tanto prácticas tradicionales como los nuevos estudios en agricultura orgánica, sistemas agroforestales y agrosilvopastoriles, y desarrollo rural entre otros. De esta forma la diversidad en la producción de alimentos se puede potencializar, ya que ambientalmente permite la sostenibilidad en el uso del suelo, y socialmente una mejor alimentación (proteínas, carbohidratos, vitaminas, etc.). Por eso el concepto de “seguridad alimentaria” se amplía al de “soberanía alimentaria”, lo cual, en la práctica tiene que ver con el derecho a comer aquello a lo cual se está acostumbrado culturalmente, preparado de una manera que forma parte de la identidad. De allí que “la cocina” forme parte del patrimonio cultural de los pueblos.

- b) Seguridad Ecológica: es esa posibilidad de evitar que la dinámica de la naturaleza se convierta en una amenaza contra las comunidades, y que la dinámica de ésta se convierta en una amenaza contra los ecosistemas. También es la capacidad de la naturaleza de ofrecer a la comunidad, de manera sostenible, los bienes y servicios ambientales que ésta requiere para disfrutar del derecho a la vida con calidad. Uno de esos servicios es la capacidad de absorber sin traumatismos o de amortiguar los efectos de los cambios ambientales extremos que se originen en procesos globales, regionales o locales, de manera que esos cambios no excedan la capacidad de adaptación de la sociedad. En concreto, un servicio ambiental que el territorio debería estar en capacidad de prestar es el de amortiguar las expresiones destructivas de la variabilidad y cambio climático global. En general es importante garantizar que se mantengan las relaciones dentro de los ecosistemas y que mantengan su equilibrio y resiliencia para hacerlos menos vulnerables ante los eventos intensos que se presenten y los puedan afectar.
- c) Seguridad social: hace referencia a la capacidad de un territorio para ofrecer a sus habitantes oportunidades para generar, mediante un trabajo digno, los recursos necesarios para garantizar calidad de vida. También está relacionada con la capacidad de convivencia, tolerancia y sobre la habilidad para llevar a cabo proyectos comunitarios, así como las características y condiciones para la participación comunitaria y ciudadana. Así mismo, hace referencia a la existencia de las condiciones necesarias para que exista salud, en el sentido integral con que Antonio Gramsci entendía esa palabra: la posibilidad de gozar de buenas relaciones con uno mismo (cuerpo y espíritu), con el ambiente y con la comunidad. La seguridad social, entonces, abarca los temas de empleo y de la oferta institucional de atención médica preventiva y curativa, pero va más allá. Dentro de esta dimensión de la seguridad territorial entran las relaciones entre los miembros de una comunidad, la solidaridad, la reciprocidad, y los sentidos de pertenencia e identidad.
- d) Seguridad económica: hace referencia a la capacidad del territorio, del Estado y de la sociedad, para ofrecer acceso a sus habitantes, en condiciones de equidad (o sea: de igualdad de oportunidades), a la producción y a la distribución de riqueza y de bienes y servicios para la satisfacción de sus necesidades. Lo anterior incluye la existencia de distintas opciones para la producción de esa riqueza y la generación de esos recursos; la existencia de alternativas de intercambio, como el trueque, y distintas formas de economía solidaria para producir, ofrecer y acceder a los bienes y servicios que requiere la comunidad. A este eje pertenecen también los ejes de la productividad y la competitividad de una región. Dentro de la seguridad económica es importante tener en cuenta la diversidad en la producción y la revisión de las potencialidades del territorio, de educación y de gestión ecosistémicas, para enfocar las actividades económicas y poder fortalecerlas. De esta forma se incrementa el grado de autoasbatecimiento o autosostenimiento del territorio.

- e) Seguridad jurídica-institucional: hace referencia a la capacidad de un territorio para ofrecer a sus habitantes un Estado que posea el carácter de servicio público, al cual puedan acceder todas las personas en condiciones de igualdad y equidad. No porque todas las personas sean “iguales” en la vida real, sino porque el Estado mismo se encarga de reconocer las diferencias y de adecuarse a los requerimientos especiales de cada sector de la sociedad. Hace referencia también a la existencia de “reglas de juego” claras, que no cambien dependiendo de los intereses particulares y circunstanciales de los sectores dominantes. Se puede entender también esta dimensión de la seguridad, como la certeza que puede tener un individuo o un grupo humano, de que la sociedad posee mecanismos eficaces para garantizar el respeto a sus derechos humanos, empezando por el derecho a la vida con calidad y dignidad (que incluye los derechos económicos, sociales y culturales), y el derecho a la gestión del riesgo como herramienta concreta para defender el derecho a la vida ante determinadas amenazas de origen antrópico o natural.<sup>1</sup>



Figura 10. Esquema sobre Seguridad Territorial

Para efectos de simplificar el diagrama no se incluyeron otras “seguridades”, como la *cultural* y la *energética*. En el primer caso, aunque no exclusivamente, en todo cuanto hace referencia a la conservación de las condiciones que garantizan la diversidad étnica y cultural de la nación colombiana, de lo cual forman parte la conservación de los territorios

<sup>1</sup> Wilches-Chaux, G. (2004): “¿Qu-ENOS pasa?” - Guía de La Red para la gestión local de riesgos asociados al fenómeno ENOS” (Bogotá, 2006), basado en el texto “Cuy-dados Intensivos”, del mismo autor. Publicación ENDA-UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogotá.

étnicos y la soberanía alimentaria. Y en el caso de la seguridad energética, todo lo relacionado por una parte con mantener las condiciones que garantizan la oferta energética y por otra con evitar que el impacto de actividades como la minería y la generación hidroeléctrica se convierta en amenazas contra los ecosistemas, que redundarán en amenazas contra las comunidades.

No menos importante es el papel de la gestión ambiental frente a la *seguridad económica*, lo cual ha dado lugar, entre otras muchas actividades, a procesos como la “Agenda Conjunta de Trabajo” entre los Ministerio de Ambiente, y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo planteada para explorar y apoyar actividades de desarrollo económico estrechamente vinculadas con una gestión adecuada de la oferta ambiental del país.

La seguridad territorial es uno de los principios fundamentales para al final llegar a una gestión de riesgo de desastre. Una sociedad con seguridad territorial es una sociedad estable económicamente, con estándares de calidad de vida deseables y gobiernos democráticos. Estas situaciones generan estados ó sociedades con capacidades elevadas de recuperación ante los desastres, es decir resiliencia. Dicha seguridad contribuye a evitar la anarquía lo que permite a los gobiernos establecer una planificación territorial a corto, mediano y largo plazo con políticas como la mitigación de la amenaza y reducción de la vulnerabilidad esto se trasluce en gestión del riesgo de desastres como determinante para la planificación territorial.



### **3. MARCO JURÍDICO**

#### **3.1. Evaluación de la normativa**

Sobre el ordenamiento del territorio en Colombia se habla desde la década de 1970 específicamente en el decreto 2811 de 1974 y su decreto reglamentario 2857 de 1974 que en su artículo 4 describe lo siguiente:

*[...]la ordenación de una cuenca tiene por objeto principal el planeamiento del uso y manejo de recursos y la orientación y regulación de las actividades de los usuarios, de manejo que consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la preservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente de los recursos hídricos[...]constituye el marco para plantear el desarrollo integral de la cuenca y programar la ejecución de proyectos específicos de aprovechamiento hidráulico*

En la década de 1980, comienza un proceso de descentralización ayudado con leyes como la Ley 14 de 1983 o las leyes 11 y 12 de 1986, para luego ser complementadas en la Ley 9 de 1989 y el decreto 919 de 1989 que permitieron dar ciertas autonomías sobre el manejo del territorio a nivel regional, incluso teniendo en cuenta el riesgo como actor en el territorio, esto debido a la ley 9 de 1989 que en su artículo 56 determina que a las autoridades municipales les corresponde la seguridad de los habitantes de las zonas urbanas ante los peligros naturales, estableciendo, la obligatoriedad a los municipios con la asistencia de las oficinas de planeación de levantar el inventario de las zonas que presentan altos riesgos para la localización de asentamientos humanos y adelantar programas de reubicación de los habitantes o proceder a desarrollar las operaciones necesarias para eliminar el riesgo en los asentamientos localizados en dichas zonas (González, 2012).

En 1988 se aprobó la Ley 46 de 1988 por medio del cual se crea el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres-SNPAD, un año después en 1989 llega la ley 9 de 1989 (reforma urbana) que define la responsabilidad de las autoridades municipales en cuanto a la seguridad de los habitantes de las zonas urbanas ante los peligros naturales y dictamina parámetros para la realización de planes de desarrollos municipales. Estas leyes ayudaron a orientar una mejor planificación del territorio y una concatenación de los entes territoriales tanto municipales como Nacionales. La Ley 9 de 1989 se puede considerar como el principio de una política de planificación territorial en nuestro país. Luego se vio la necesidad de integrar la prevención y atención de desastres a la nueva legislación sobre el territorio, generándose el Decreto Ley 919 de 1989.

Años después la reforma urbana (Ley 9 de 1989) fue modificada por intermedio de la Ley 02 de 1991, esta ley establece que los municipios no solo deben levantar sino tener actualizados los inventarios de las zonas que presenten altos riesgos para la localización de asentamientos humanos y que los alcaldes contarán con la colaboración de las entidades pertenecientes al SNPAD, para desarrollar las operaciones necesarias y para eliminar el riesgo en los asentamientos humanos (González, 2012).

Luego de este proceso legislativo que era regido por la constitución política de 1886 fue debidamente respaldado por la reforma constitucional realizada en 1991 pero siempre salvaguardando la autoridad del estado. Por citar un ejemplo el artículo 2 de la constitución de 1991 expresa como uno de los fines esenciales del estado es garantizar la seguridad y bienestar de la sociedad colombiana, sin quitarle importancia a los artículos 8 y 80 enfocados principalmente al derecho que tenemos los ciudadanos y del deber del estado de proporcionar calidad de vida protegiendo entre otras tradiciones culturales, medio ambientales, recurso hídrico y demás.

Entrando al ordenamiento territorial, este siempre ha sido del interés del estado, interpretado en un principio como seguridad territorial, desarrollo sostenible y otros conceptos ligados a la planificación y a la prevención y atención de desastres. Conceptos que el estado integró en los planes de desarrollo en épocas pasadas y más adelante en los planes de ordenamiento territorial. Hablando de los planes de desarrollo en la Ley 152 de 1994 se establecen los procedimientos y mecanismos para su elaboración, aprobación, ejecución, seguimiento, evaluación y control, tanto para la Nación como para las entidades territoriales. Esta situación ilustra que el estado cuenta con herramientas para involucrar la planificación en el territorio con planes a corto, mediano y largo plazo, además, teniendo en cuenta que se deben identificar la amenazas de cada territorio como determinantes de un adecuado uso del suelo. Cabe mencionar que se complementó el SNPAD con el Plan Nacional de Prevención y Atención de Desastres – PNPAD, con el Decreto 93 de 1998, que define los objetivos, principios, estrategias y programas de la política Nacional. Posteriormente vinieron otras legislaciones como el Consejo Nacional de Política Económica y Social-CONPES (CONPES 3146 de 2001 y CONPES 3318 de 2004) que permitieron fortalecer los planes de prevención y atención de desastres, además de proporcionar protección financiera en caso un desastre para el país.

Finalizando la década de 1990 luego de un largo camino recorrido en materia de seguridad territorial, se aprueba la Ley 388 de 1997 “Ley de Desarrollo Territorial”. Ley que modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 3 de 1991 citadas anteriormente, cuyo objetivo expresado en su artículo 1 es: *“Establecer mecanismos que permitan al municipio, en el ejercicio de su autonomía promover el ordenamiento territorial, el uso equitativo y racional del suelo, la prevención de desastres del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo; así como la ejecución de acciones urbanistas eficientes”*. Esta Ley genera una obligatoriedad para los municipios de Colombia no solo realizar su plan de desarrollo sino de igual manera a realizar un plan de ordenamiento territorial- POT que establezca cuales son las estrategias a corto, mediano y largo plazo en el uso del suelo de cada municipalidad.

Teniendo en cuenta que la seguridad de los colombianos es de vital importancia para el estado colombiano, y sabiendo que la amenaza sísmica es uno de los fenómenos naturales más agresivos y frecuentes, los cuales *per se* no causan la pérdida de las vidas de las personas, sino debido a las construcciones vulnerables causado por malos hábitos constructivos. Este problema es de vieja data, viene desde la llegada de los españoles quienes planificaron las ciudades con base en sus estilos constructivos los cuales no tenían la capacidad de responder eficientemente las solicitudes sísmicas. Por esto con el



## *Enfoque Metodológico para la Evaluación e Incorporación del Riesgo de Desastres en los Instrumentos de Ordenamiento Territorial*

transcurrir de los años se presentaron múltiples daños en diferentes poblaciones del territorio colombiano durante más de 500 años. Debido a esta situación y observando la importancia de tener construcciones seguras que protejan el patrimonio público, privado y cultural se aprobó el primer código Colombiano de construcciones sismo-resistentes con el Decreto Ley 1400 de 1984 y años después se aprobó la Ley 400 de 1997. Estas normas tienen como filosofía proporcionar los requisitos mínimos que garanticen que se cumpla el fin primordial de salvaguardar las vidas humanas ante la ocurrencia de un sismo fuerte.

El país ha seguido fortaleciendo sus políticas territoriales, por ejemplo los decretos 879 de 1998, 2015 de 2001 (Licencias de urbanismo) y el 4002 de 2004; este último estimando los casos especiales en los que el Plan de Ordenamiento Territorial-POT podría ser modificado por las autoridades municipales, sin dejar de mencionar la ley 1454 de 2011 “*Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y de modifican otras disposiciones*”.

Entrando en los años más recientes, se observa una evolución en la inclusión de la Gestión de Riesgo en el ordenamiento territorial, esto se ve plasmado en el decreto de ley 019 de 2012 y en la Ley 1523 de 2012; Se destaca del decreto de Ley el artículo 189 que manifiesta:

*ARTÍCULO 189. INCORPORACION DE LA GESTION DEL RIESGO EN LA REVISION DE LOS PLANES DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL. Con el fin de promover medidas para la sostenibilidad ambiental del territorio, sólo procederá la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo del plan de ordenamiento territorial o la expedición del nuevo plan de ordenamiento territorial cuando se garantice la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y la delimitación y zonificación de las áreas con condiciones de riesgo además de la determinación de las medidas específicas para su mitigación, la cual deberá incluirse en la cartografía correspondiente. El Gobierno Nacional reglamentará las condiciones y escalas de detalle teniendo en cuenta la denominación de los planes de ordenamiento territorial establecida en el artículo 9 de la Ley 388 de 1997.*

De la Ley 1523 de abril de 2012 en el cual se adopta la política nacional de gestión de riesgos de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres, los cuales se exponen en los siguientes tres artículos :

*ARTÍCULO 39. INTEGRACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y DEL DESARROLLO. Los planes de ordenamiento territorial, de manejo de cuencas hidrográficas y de planificación del desarrollo en los diferentes niveles de gobierno, deberán integrar el análisis del riesgo en el diagnóstico biofísico, económico y socioambiental y, considerar, el riesgo de desastres, como un condicionante para el uso y la ocupación del territorio, procurando de esta forma evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo.*

*PARÁGRAFO. Las entidades territoriales en un plazo no mayor a un (1) año, posterior a la fecha en que se sancione la presente ley, deberán revisar y ajustar los planes de ordenamiento territorial y de desarrollo municipal y departamental que, estando vigentes, no haya incluido en su proceso de formulación de la gestión del riesgo.*

*ARTÍCULO 40. INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN. Los distritos, áreas metropolitanas y municipios en un plazo no mayor a un (1) año, posterior a la fecha en que se sancione la presente ley, deberán incorporar en sus respectivos planes de desarrollo y de ordenamiento territorial las consideraciones sobre desarrollo seguro y sostenible derivadas de la gestión*

*del riesgo, y por consiguiente, los programas y proyectos prioritarios para estos fines, de conformidad con los principios de la presente ley. En particular, incluirán las previsiones de la Ley 9ª de 1989 y de la Ley 388 de 1997, o normas que la sustituyan, tales como los mecanismos para el inventario de asentamientos en riesgo, señalamiento, delimitación y tratamiento de las zonas expuestas a amenaza derivada de fenómenos naturales, socio naturales o antropogénicas no intencionales, incluidos los mecanismos de reubicación de asentamientos; la transformación del uso asignado a tales zonas para evitar reasentamientos en alto riesgo; la constitución de reservas de tierras para hacer posible tales reasentamientos y la utilización de los instrumentos jurídicos de adquisición y expropiación de inmuebles que sean necesarios para reubicación de poblaciones en alto riesgo, entre otros.*

**ARTÍCULO 41. ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y PLANIFICACIÓN DEL DESARROLLO.**  
*Los organismos de planificación nacionales, regionales, departamentales, distritales y municipales, seguirán las orientaciones y directrices señalados en el plan nacional de gestión del riesgo y contemplarán las disposiciones y recomendaciones específicas sobre la materia, en especial, en lo relativo a la incorporación efectiva del riesgo de desastre como un determinante ambiental que debe ser considerado en los planes de desarrollo y de ordenamiento territorial, de tal forma que se aseguren las asignaciones y apropiaciones de fondos que sean indispensables para la ejecución de los programas y proyectos prioritarios de gestión del riesgo de desastres en cada unidad territorial.*

Siguiendo con la Ley 1523 de 2012 se hará una comparación en la Tabla 2 sobre las definiciones utilizadas en la Ley 388 de 1997 aplicadas en los planes de ordenamiento territorial, tomando como caso de ejemplo el POT realizado para la ciudad de Manizales y la Ley mencionada.

**Tabla 2. Comparación de conceptos POT de la ciudad de Manizales de 2001 y la Ley 1523 de 2012**

Definición	Componente general del POT de Manizales (2001)	Ley 1523 de 2012
Amenaza	Es la probabilidad de ocurrencia de un evento catastrófico de origen natural o tecnológico, en un periodo de tiempo y un área determinada.	Peligro latente de que un evento físico de origen natural o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vida, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdida en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.
Vulnerabilidad	<p>Es la predisposición o susceptibilidad que tiene un elemento a ser afectado o a sufrir una pérdida, es decir, determina el carácter selectivo de la severidad de los efectos de un evento extremo sobre los mismos.</p> <p>La vulnerabilidad puede clasificarse como de carácter técnico o de carácter social, siendo la primera más factible en términos físicos o funcionales, como daños o interrupción de los servicios, aspecto considerado para el presente y en forma relativa e ideológicos, etc</p> <p>Propiedades y efectos sobre la actividad económica, debido a la ocurrencia de un evento desastroso, siendo el producto de la amenaza por la vulnerabilidad. En el caso de Manizales se establece un riesgo preliminar, debido a que no se cuentan con los insumos suficientes (costos de edificaciones, número de habitantes, entre otros) para obtener el riesgo total</p>	Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por j. eventos físicos peligrosos.
Riesgo de desastres	<p>Se define como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica, debido a la ocurrencia de un evento desastroso, siendo el producto de la amenaza por la vulnerabilidad. En el caso de</p> <p>Manizales se establece un riesgo preliminar, debido a que no se cuentan con los insumos suficientes (costos de edificaciones, número de habitantes, entre otros) para obtener el riesgo total.</p>	Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un periodo de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Los conceptos son básicamente los mismos, sin embargo hay una mayor depuración y refinamiento en los más recientes, lo que puede influir en los enfoques metodológicos adoptados para la evaluación del riesgo y su incorporación en el ordenamiento territorial.

### **3.2. Otros aspectos relevantes**

El ordenamiento territorial según la Ley 388 de 1997, se define como un conjunto de *“acciones político-administrativas y de planificación física concertadas”* llevadas a cabo por: *“los municipios o distritos y áreas metropolitanas [...]”* los cuales tienen el deber de disponer de: *“instrumentos eficientes para orientar el desarrollo del territorio bajo su jurisdicción y regular la utilización, transformación y ocupación del espacio, de acuerdo con las estrategias de desarrollo socioeconómico y en armonía con el medio ambiente y las tradiciones históricas y culturales.”*(Ley 388 de 1997).

El ordenamiento territorial en la Ley 1454 de 2011 en su Artículo 2º, define que este es: *“un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal [...]”*, con el objeto de alcanzar una organización político administrativa apropiada del Estado en el territorio, la cual facilite: *“el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial”*, interpretado como un: *“desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia”*, estos alcances se enmarcan dentro de los principios del desarrollo sostenible (WECD, 1987), entendido como el que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades y satisfacer las necesidades de una región de forma que no comprometa el desarrollo de otras regiones; lo cual se ve reflejado en el Artículo 6 bajo la premisa:

*“El ordenamiento del territorio municipal y distrital se hará tomando en consideración las relaciones intermunicipales, metropolitanas y regionales [...]; e incorporará instrumentos que permitan regular las dinámicas de transformación territorial de manera que se optimice la utilización de los recursos naturales y humanos para el logro de condiciones de vida dignas para la población actual y las generaciones futuras”.*

El Decreto 93 de 1998, hace referencia sobre el ordenamiento territorial descritas en el Artículo 3 titulado: *“La reducción de riesgos y prevención de desastres. [...] formular las medidas para prevenir o mitigar sus efectos mediante el fortalecimiento institucional y a través de las acciones de mediano y corto plazo que se deben establecer en los procesos de planificación del desarrollo a nivel sectorial, territorial y de ordenamiento a nivel municipal”*. Actualmente está en proceso la aprobación de un nuevo Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres que igualmente invoca la incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial como uno de los objetivos estratégicos del plan en su componente general.

La sostenibilidad en la normativa es considerada como uno de los pilares del ordenamiento territorial<sup>2</sup> bajo el concepto que:

*“El ordenamiento territorial conciliará el crecimiento económico, la sostenibilidad fiscal, la equidad social y la sostenibilidad ambiental, para garantizar adecuadas condiciones de vida de la población” y así mismo son competencias del municipio: formular y adoptar los planes de ordenamiento del territorio; reglamentar de manera específica los usos del suelo, en las áreas urbanas, de expansión y rurales, de acuerdo con las leyes; y optimizar los usos de las tierras disponibles y coordinar los planes sectoriales, en armonía con las políticas nacionales y los planes departamentales y metropolitanos.”*

En la gestión de riesgo, la normativa se refiere a la sostenibilidad como uno de sus pilares fundamentales. La Ley 1523 de 2012 en el capítulo I denominado “La gestión del riesgo, responsabilidades, principios, definiciones y sistema nacional en gestión del riesgo de desastres” en su Artículo 1o como un proceso orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.

Adicionalmente, el párrafo 1 dice que:

*“La gestión del riesgo se constituye en una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está relacionado con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población”.*

Como se referenció anteriormente la gestión del riesgo de acuerdo a la normativa, se ha venido incorporando en el ordenamiento territorial, desde la aplicación de la Ley 9ª de 1989 por la cual se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, desde diferentes artículos como se ha definido en el Artículo 2, sobre los aspectos que debe tener un plan de desarrollo<sup>3</sup> : “[...]1. Un plan y un reglamento de usos del suelo [...], así como normas urbanísticas específicas [...]”; 4. La reserva de tierras urbanizables necesarias [...] para reubicar aquellos asentamientos humanos que presentan graves riesgos para la salud e integridad personal de sus habitantes”; Más adelante habla acerca de “5. La asignación en las áreas urbanas de actividades, tratamientos y prioridades para desarrollar los terrenos no urbanizados, construir los inmuebles no construidos, conservar edificaciones y zonas de interés histórico, arquitectónico y ambiental, reservar zonas para la protección del medio ambiente y de la ecología, delimitar las zonas de desarrollo diferido, progresivo,

---

<sup>2</sup> Artículo 3º de la Ley 1454 de 2011.

<sup>3</sup> Modificado Ley 2 de 1991 y posteriormente derogado Artículo 138 Ley 388 de 1997

*restringido y concertado, renovar y redesarrollar zonas afectadas con procesos de deterioro económico, social y físico y rehabilitar las zonas de desarrollo incompleto o inadecuado”.*

En el Artículo 10 se habla acerca de la expropiación destinada para diferentes fines, entre los cuales se destacan: la constitución de zonas de reserva para la protección del medio ambiente y de los recursos hídricos, y la reubicación de asentamientos humanos ubicados en sectores de alto riesgo y rehabilitación de inquilinatos<sup>4</sup>. A partir de esta normativa se observa por primera vez la obligatoriedad de incluir en los Planes de Desarrollo, acciones concretas para la intervención del territorio, y la definición de responsabilidades y competencias con respecto a la visión de futuro de los municipios.

Aunque ya ha sido actualizada, modernizada y armonizada la legislación de la gestión del riesgo, es importante destacar de la legislación anterior expedida mediante la Ley 46 de 1988, que creó y organizó el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres varios aspectos fundamentales. El Capítulo I, Artículo 5. Sobre aspectos de planeación regional, departamental y municipal señalaba lo siguiente:

*“Los organismos de planeación del orden territorial, tendrán en cuenta las orientaciones y directrices señaladas en el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y contemplarán las disposiciones y recomendaciones específicas sobre la materia, en especial en lo que hace relación a los planes de desarrollo regional de que trata la Ley 76 de 1985, los planes y programas de desarrollo departamental de que trata el Decreto 1527 de 1981 y los planes de desarrollo municipal regulados por el Decreto 1306 de 1980 y las demás disposiciones que las reglamentan o complementan”.*

Por otro lado, el Decreto ley 919 de 1989, reglamentario de la Ley 46 de 1988, desde su Artículo 3 determinó entre las políticas, acciones y programas, tanto de carácter sectorial como del orden nacional, regional; “[...] *La coordinación interinstitucional e intersectorial. Los sistemas y procedimientos de control y evaluación de los procesos de prevención y atención.*”<sup>5</sup> Así mismo en su Artículo 5, titulado: “Planeación regional, departamental y municipal”. En el que se definió que: “los organismos de planeación del orden territorial, tendrán en cuenta las orientaciones y directrices señaladas en el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, y contemplarán las disposiciones y recomendaciones específicas sobre la materia, en especial en lo que hace relación a los planes de desarrollo regional de que trata la Ley 76 de 1985, los planes y programas de desarrollo departamental de que trata el Decreto 1222 de 1986 y los planes de desarrollo municipal regulados por el Decreto 1333 de 1986 y las demás disposiciones que las reglamentan o complementan (Cardona, Mendes et al, 2013).

Dicha legislación, más adelante, en el Artículo 6 señalaba:

---

<sup>4</sup> Modificado Artículo 58 Ley 388 de 1997.

<sup>5</sup> Por el cual se organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres Derogado por el art. 96, Ley 1523 de 2012. Reglamentado por los Decretos Nacionales 976 de 1997 , y 2015 de 2001; y Reglamentado Parcialmente por el Decreto Nacional 4550 de 2009.

*“Todas las entidades territoriales tendrán en cuenta en sus planes de desarrollo, el componente de prevención de desastres y, especialmente, disposiciones relacionadas con el ordenamiento urbano, las zonas de riesgo y los asentamientos humanos, así como las apropiaciones que sean indispensables para el efecto en los presupuestos anuales. Cuando sobre estas materias se hayan previsto normas en los planes de contingencia, de orientación para la atención inmediata de emergencias y en los planes preventivos del orden nacional, regional o local, se entenderá que forman parte de los planes de desarrollo y que modifican o adicionan su contenido.”<sup>6</sup>*

En relación con el ordenamiento territorial el Artículo 12 señalaba los “Elementos del planeamiento de operaciones en caso de situaciones de desastre”: “[...] d) *Identificación de la amenaza, es decir de la probabilidad de que ocurra un desastre en un momento y en un lugar determinados.* e) *Análisis de la vulnerabilidad de la población, los bienes y el medio ambiente amenazados, o sea la determinación de la magnitud en que son susceptibles de ser afectados por las amenazas.* i) *Inclusión de la dimensión de prevención en los planes de desarrollo.* k) *Lugares utilizables durante el desastre y formas de utilización.*” Significa lo anterior que desde la legislación que entonces se expidió bajo la denominación de prevención de desastres y que hoy es el antecedente de la legislación sobre gestión del riesgo de desastres (Lay 1523 de 2012), ya se tenía total claridad del vínculo de la planificación con la reducción del riesgo y la necesidad de considerarlo como elemento fundamental y determinante para la ocupación segura del territorio.

Por su parte, la Ley 99 de 1993. En el Artículo 5 define el Ministerio de Medio Ambiente como órgano articulador entre la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial, mediante sus funciones: Realizar actividades de análisis, seguimiento, prevención y control de desastres, en coordinación con las demás autoridades competentes, y asistirles en los aspectos medioambientales en la prevención y atención de emergencias y desastres; adelantar con las administraciones municipales o distritales programas de adecuación de áreas urbanas en zonas de alto riesgo, tales como control de erosión, manejo de cauces y reforestación; en el Parágrafo 3 se menciona como objeto principal de la Corporación Autónoma Regional “*la defensa y protección del medio ambiente urbano*”, la cual podrá adelantar con las administraciones municipales o distritales programas de adecuación de áreas urbanas en zonas de alto riesgo, tales como control de erosión, manejo de cauces y reforestación; así mismo podrá administrar, manejar, operar y mantener las obras ejecutadas o aquellas que le aporten o entreguen los municipios o distritos para esos efectos.<sup>7</sup>

El Artículo 31, Funciones. Adicionado por el Artículo 9, Decreto Nacional 141 de 2011 señala que son:

---

<sup>6</sup> Artículo 6°. El componente de prevención de desastres en los planes de desarrollo de las entidades territoriales.

<sup>7</sup> Reglamentado por el Decreto Nacional 1713 de 2002, Reglamentada por el Decreto Nacional 4688 de 2005, Reglamentada parcialmente por el Decreto Nacional 3600 de 2007, Reglamentada por el Decreto Nacional 2372 de 2010.

*“Funciones de las Corporaciones Autónomas Regionales: Participar con los demás organismos y entes competentes en el ámbito de su jurisdicción, en los procesos de planificación y ordenamiento territorial a fin de que el factor ambiental sea tenido en cuenta en las decisiones que se adopten; Participar con los demás organismos y entes competentes en el ámbito de su jurisdicción, en los procesos de planificación y ordenamiento territorial a fin de que el factor ambiental sea tenido en cuenta en las decisiones que se adopten.”*<sup>8</sup>

En el Artículo 56: *“El Diagnóstico Ambiental de Alternativas incluirá información sobre la localización y características del entorno geográfico, ambiental y social de las alternativas del proyecto, además de un análisis comparativo de los efectos y riesgos inherentes a la obra o actividad y de las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas.”*<sup>9</sup>. Y en el Artículo 65. En materia ambiental a los municipios y a los distritos con régimen constitucional especial, corresponden las siguientes atribuciones especiales: *“Dictar, dentro de los límites establecidos por la ley, los reglamentos y las disposiciones superiores, las normas de ordenamiento territorial del municipio y las regulaciones sobre usos del suelo”*<sup>10</sup>(PRICC, 2013).”

En la Ley 388 de 1997. Capítulo I. Artículo 1. Se establecen los mecanismos que permitan al municipio, “[...] en ejercicio de su autonomía, promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes. El Artículo 3 define el ordenamiento del territorio como una función pública para el cumplimiento de algunos fines entre los que se destacan: *“Atender los procesos de cambio en el uso del suelo y adecuarlo en aras del interés común, procurando su utilización racional en armonía con la función social de la propiedad a la cual le es inherente una función ecológica, buscando el desarrollo sostenible; Mejorar la seguridad de los asentamientos humanos ante los riesgos naturales.”* Luego el Artículo 8. Define la función pública del ordenamiento del territorio local, la cual se realiza mediante: *“la acción urbanística de las entidades distritales y municipales, referida a las decisiones administrativas y a las actuaciones urbanísticas que les son propias, relacionadas con el ordenamiento del territorio y la intervención en los usos del suelo.”* Y “[...] *Determina las zonas no urbanizables que presenten riesgos para la localización de asentamientos humanos, por amenazas naturales, o que de otra forma presenten condiciones insalubres para la vivienda.”* Más adelante el Artículo 10. Define las determinantes de los planes de ordenamiento territorial, entre las cuales se destacan<sup>11</sup>: Las relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales, la prevención de amenazas y riesgos naturales: *“Las políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales.”* En el Artículo 12 se señala que: *“La determinación y*

---

8 Artículo 31° de la Ley 99 de 1993. Funciones de las Corporaciones autónomas Regionales.

9 Del Diagnóstico Ambiental de Alternativas. Reglamentado por el Decreto Nacional 1753 de 1994.

10 Funciones de los Municipios, de los Distritos y del Distrito Capital de Santafé de Bogotá.

11 Reglamentado por el Decreto Nacional 2201 de 2003.



*ubicación en planos de las zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos, por amenazas o riesgos naturales o por condiciones de insalubridad”<sup>12</sup>. El Artículo 13, el cual integra “políticas de mediano y corto plazo, procedimientos e instrumentos de gestión y normas urbanísticas.”; La delimitación, en suelo urbano y de expansión urbana, de las áreas de conservación y protección de los recursos naturales, paisajísticos y de conjuntos urbanos, históricos y culturales, de conformidad con la legislación general aplicable a cada caso y las normas específicas que los complementan en la presente Ley; así como de las áreas expuestas a amenazas y riesgos naturales. [...] el señalamiento de los correspondientes instrumentos de gestión; así como los mecanismos para la reubicación de los asentamientos humanos localizados en zonas de alto riesgo para la salud e integridad de sus habitantes, incluyendo la estrategia para su transformación para evitar su nueva ocupación.”<sup>13</sup> El Artículo 14, entre los contenidos del componente rural del plan de ordenamiento territorial: “*La delimitación de las áreas de conservación y protección de los recursos naturales paisajísticos, geográficos y ambientales, incluyendo las áreas de amenazas y riesgos, o que formen parte de los sistemas de provisión de los servicios públicos domiciliarios o de disposición final de desechos sólidos o líquidos.*”<sup>14</sup> El Artículo 15, el cual define las normas urbanísticas que regulan el uso, la ocupación y el aprovechamiento del suelo y definen la naturaleza y las consecuencias de las actuaciones urbanísticas. Entre esas normas urbanísticas en relación con el riesgo se tienen: “*Las que definan las áreas de protección y conservación de los recursos naturales y paisajísticos, las que delimitan zonas de riesgo [...]; la localización de terrenos cuyo uso es el de vivienda de interés social y la reubicación de asentamientos humanos localizados en zonas de alto riesgo.*” Y en el Artículo 16, se establecen las áreas de reserva y las regulaciones para la protección del medio ambiente, conservación de los recursos naturales y defensa del paisaje, así como para las áreas de conservación y protección del patrimonio histórico, cultural y arquitectónico; así mismo, el inventario de las zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos, por amenazas naturales o por condiciones de insalubridad<sup>15</sup>.*

En el componente urbano de estos planes la Ley en mención define: “*La delimitación de las áreas de conservación y protección de los recursos naturales, paisajísticos y de conjuntos urbanos, históricos y culturales [...] y las normas urbanísticas que los complementan, así como de las áreas expuestas a amenazas y riesgos naturales.*”. Así mismo, determina que: “[...] *La estrategia de mediano plazo para el desarrollo de programas de vivienda de interés social, incluyendo los de mejoramiento integral, [...] incluirá las directrices y parámetros para la definición de usos para vivienda de interés social, tanto en suelos urbanos como de expansión urbana, y el señalamiento de los correspondientes instrumentos de gestión; [...] mecanismos para la reubicación de los asentamientos humanos localizados en zonas de alto riesgo para la salud e integridad de sus habitantes, incluyendo lo relacionado con la transformación de las zonas reubicadas*

---

<sup>12</sup> Artículo 12° de la Ley 388 de 1997. Describe el contenido del componente general del plan de ordenamiento territorial.

<sup>13</sup> El Artículo 13° de la Ley 388 de 1997, describe los contenidos del componente urbano del plan de ordenamiento territorial.

<sup>14</sup> El Artículo 14° de la Ley 388 de 1997, define el contenido del componente rural del plan de ordenamiento territorial.

<sup>15</sup> En el Artículo 16° de la Ley 388 de 1997, se determina el contenido de los planes básicos de ordenamiento territorial.

*para evitar su nueva ocupación.”. El componente rural para los Planes básicos de ordenamiento territorial está determinado por lo que se indica en el caso de los planes de ordenamiento territorial.*

En el caso de los Esquemas de ordenamiento territorial, su contenido está definido por el Artículo 17 de dicha Ley. Los municipios que por su clasificación (Ley 1551 de 2012) deban acogerse a este tipo de ordenamiento, deberán incluir en el mismo, los objetivos, estrategias y políticas de largo y mediano plazo para la ocupación y aprovechamiento del suelo, en especial cabe resaltar: “[...] *la determinación de las zonas de amenazas y riesgos naturales y las medidas de protección, las zonas de conservación y protección de recursos naturales y ambientales y las normas urbanísticas requeridas para las actuaciones de parcelación, urbanización y construcción.*”

Ahora bien, la Ley 1523 de 2012 determina la gestión de riesgo de desastres como: “[...] *un proceso orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.*”<sup>16</sup> En el parágrafo 1 se señala que la gestión del riesgo se constituye en: “[...] *una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, [...] mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está relacionado con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población.*” El Artículo 7 habla acerca de los cuatro componentes del sistema nacional, entre los que se destacan los instrumentos de planificación. Y en el Artículo 12 se especifica que los Alcaldes son conductores del sistema nacional de gestión del riesgo de desastres “[...] *en su nivel territorial y están investidos con las competencias necesarias para conservar la seguridad, la tranquilidad y la salubridad en el ámbito de su jurisdicción.*”<sup>17</sup> pues son ellos como jefes de la administración local quienes “[...] *representan al Sistema Nacional en el Distrito y el municipio [...]*”. Como conductores “[...] *del desarrollo local, es el responsable directo de la implementación de los procesos de gestión del riesgo [...] incluyendo el conocimiento y la reducción del riesgo y el manejo de desastres en el área de su jurisdicción.*”<sup>18</sup>

Adicionalmente se señala que: “[...] *Los alcaldes y la administración municipal o distrital, deberán integrar en la planificación del desarrollo local, acciones estratégicas y prioritarias en materia de gestión del riesgo de desastres, especialmente, a través de los planes de ordenamiento territorial, de desarrollo municipal o distrital y demás instrumentos de gestión pública*”. Específicamente desde el capítulo III de la Ley en mención, se tienen previstos “[...] *Los tres niveles de gobierno formularán e implementarán planes de gestión del riesgo para priorizar, programar y ejecutar acciones por parte de las entidades del sistema nacional, en el marco de los procesos de conocimiento del riesgo,*

---

<sup>16</sup> Artículo 1º, Capítulo I de la Ley 1523 de 2012.

<sup>17</sup> Artículo 12. Los Gobernadores y Alcaldes.

<sup>18</sup> Artículo 14º de la Ley 1523 de 2012. Los Alcaldes en el sistema nacional.

*reducción del riesgo y de manejo del desastre, como parte del ordenamiento territorial y del desarrollo, así como para realizar su seguimiento y evaluación.”*<sup>19</sup> Más adelante en el Parágrafo 2 del Artículo 37 de los planes departamentales, distritales y municipales de gestión del riesgo y estrategias de respuesta dice: *“Los programas y proyectos de estos planes se integrarán en los planes de ordenamiento territorial, de manejo de cuencas y de desarrollo departamental, distrital o municipal y demás herramientas de planificación del desarrollo [...]”* En el Artículo 39 titulado explícitamente: Integración de la gestión del riesgo en la planificación territorial y del desarrollo. El cual determina que: *“Los planes de ordenamiento territorial, de manejo de cuencas hidrográficas y de planificación del desarrollo en los diferentes niveles de gobierno, deberán integrar el análisis del riesgo en el diagnóstico biofísico, económico y socioambiental y, considerar, el riesgo de desastres, como un condicionante para el uso y la ocupación del territorio, procurando de esta forma evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo.”* En el mismo sentido, el Artículo 40 sobre la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación, dice que: *“Los distritos, áreas metropolitanas y municipios en un plazo no mayor a un (1) año, posterior a la fecha en que se sancione la presente ley, deberán incorporar en sus respectivos planes de desarrollo y de ordenamiento territorial las consideraciones sobre desarrollo seguro y sostenible derivadas de la gestión del riesgo [...]”*. Y finalmente, el Artículo 41 de la misma Ley, el cual habla sobre el ordenamiento territorial y planificación del desarrollo, define que: *“Los organismos de planificación nacionales, regionales, departamentales, distritales y municipales, seguirán las orientaciones y directrices señalados en el plan nacional de gestión del riesgo y contemplarán las disposiciones y recomendaciones específicas sobre la materia, en especial, en lo relativo a la incorporación efectiva del riesgo de desastre como un determinante ambiental que debe ser considerado en los planes de desarrollo y de ordenamiento territorial, de tal forma que se aseguren las asignaciones y apropiaciones de fondos que sean indispensables para la ejecución de los programas y proyectos prioritarios de gestión del riesgo de desastres en cada unidad territorial.”*

Por otra parte y en relación con el fortalecimiento de los organismos locales, desde el Decreto 93 de 1998, se menciona que se debe trabajar en la elaboración de metodologías e instructivos para el desarrollo de planes de emergencia y contingencia para escenarios potenciales de desastre que tengan en cuenta las características físicas, económicas y sociales de cada región y se deben fortalecer los organismos operativos locales. En el Artículo 3 se mencionan: *“[...] La recuperación rápida de zonas afectadas [...]”* y al respecto se reconoce que se debe: *“fortalecer la capacidad técnica, administrativa y financiera necesaria para agilizar los procesos de recuperación rápida de las zonas afectadas”*. Para llegar a superar la situación de desastre se requiere: *“[...] una gran coordinación interinstitucional que evite la duplicidad de funciones y disminuya los tiempos transcurridos entre la formulación de proyectos, su estudio y aprobación y finalmente su ejecución para la rehabilitación y reconstrucción.”* Y así mismo ese fortalecimiento se debe reflejar en: *“[...] la capacidad técnica a nivel local en la identificación y formulación de proyectos [...], mediante la capacitación de funcionarios locales [...]”*<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Artículo 32 de la Ley 1523 de 2012, el cual se titula instrumentos de planificación. Planes de gestión del riesgo.

<sup>20</sup> Artículo 3º del Decreto 93 de 1998, por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.

Se ha observado como la normativa en el país en el transcurso de los años ha ido integrando de manera progresiva el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo y se ha ido reconociendo la necesidad de integrarlas con la finalidad de alcanzar un desarrollo sostenible del territorio y por ende una mejor calidad de vida de la sociedad.

A continuación se enunciarán algunos documentos existentes orientadores de la incorporación del riesgo en el OT en Colombia; a modo ilustrativo se exponen algunas caratulas de dichos documentos (ver Figura 11).

- ✓ Circular externa 7000-2-041773 de 2012.
- ✓ Serie Ambiente y Ordenamiento Territorial, Guía Metodológica 1.
- ✓ Serie Ambiente y Ordenamiento Territorial, Guía Metodológica 2.
- ✓ Serie Ambiente y Ordenamiento Territorial, Guía Metodológica No. 3.  
Guía ambiental para evitar, corregir y compensar los Impactos de las acciones de Reducción y prevención de Riesgos en el nivel municipal.
- ✓ Guía para la Formulación del Plan Municipal de Gestión del Riesgo.



Caratulas principales de los documentos orientadores del riesgo en el OT

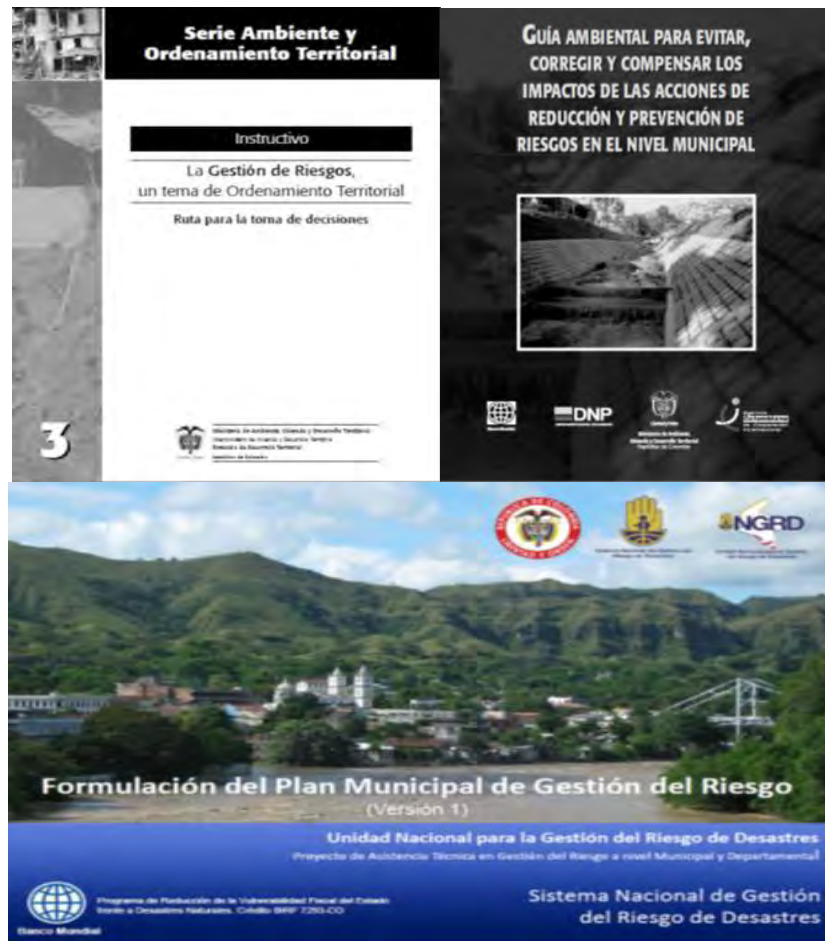


Figura 11. Caratulas principales de los documentos orientadores del riesgo en el OT

La incorporación del riesgo de desastres en la planificación del territorio y los planes de ordenamiento territorial contribuye en la implementación de medidas enfocadas a la reducción del riesgo existente y evitar la generación de nuevos riesgos en el futuro. Lo anterior basado en medidas correctivas, prescriptivas y prospectivas, las cuales se referenciaron anteriormente. Estas estrategias permiten orientar la planificación del territorio y estimar las acciones a corto, mediano y largo plazo con la finalidad de lograr una reducción del potencial de pérdidas de vidas y daños económicos en las zonas determinadas como de alto riesgo (MAVDT, 2005). Es importante para el tomador de decisiones y todo su grupo técnico reconocer que ambos procesos, tanto la gestión del riesgo como el ordenamiento territorial son procesos de adaptación que tienen relación directa el uno con el otro, pues están basados en el conocimiento del territorio, sus posibilidades y sus restricciones; dando orientación a cómo debe ser el desarrollo y la posibilidad de mantenerse en el futuro. Lograr tener encadenados ambos procesos sirve para que el municipio opte por un mejor crecimiento, disminuyan sus emergencias o desastres y realmente pueda encaminarse hacia la inversión social y la competitividad (Cardona, Mendes et al, 2013).

A nivel local, municipios en el caso de Colombia que integren adecuadamente el riesgo en su proceso de planificación territorial, serán municipios con un conocimiento integral de su territorio, tendrán identificadas las amenazas y sus posibles áreas de afectación en áreas ocupadas y no ocupadas, esto mediante la zonificación de la aptitud del suelo. Lo anterior debe trascender a herramientas como reglamentaciones que eviten ocupaciones que generen riesgo ó a intervenciones físicas que reduzcan la amenaza y la vulnerabilidad; también en algunos casos estimar reubicaciones de asentamientos humanos de ser necesarios. Impedir la ocupación de terrenos no apropiados para la urbanización debido a la existencia de amenazas naturales o socio-naturales no es una simple restricción sino una oportunidad para el desarrollo local, que evita costosas inversiones que de una u otra manera los municipios deben incurrir en el momento de presentarse un desastre. Identificar y zonificar de forma anticipada las zonas donde se puede generar riesgo es fundamental para determinar correctamente las áreas de expansión del municipio a fin de evitar desastres futuros (MAVDT, 2005). Sin embargo, el poder determinar las zonas de amenaza y riesgo, establecer los usos de suelo adecuado para el crecimiento e identificar los proyectos prioritarios del municipio, no son el único resultado de la gestión del riesgo en el territorio y la adaptación, también hay otros aspectos que hacen que sea atractivo para una administración aplicar todo el conjunto de estrategias que existen y que conducen a un mejor desarrollo. Al ejecutar, realizar y trabajar sobre las acciones encaminadas al control, disminución y preparación frente al riesgo, se están reduciendo a su vez los impactos potenciales devastadores de eventos ambientales peligrosos y las emergencias que de ellos se derivan en la localidad, lo cual a su vez esta expresado en (Cardona, Mendes et al, 2013):

- ✓ Minimizar la pérdida de vidas humanas como premisa fundamental del estado, igualmente se disminuyen las pérdidas económicas, sociales y culturales en la sociedad.
- ✓ Particularmente en la administración se merman las inversiones en atención (humanitaria y materiales), ya que no se tendrán las mismas afectaciones recurrentes e históricas.
- ✓ La destinación de recursos podrá ser realmente priorizada en los programas sociales, culturales y comunitarios con una visión de oportunidad y necesidad de la población, y no se verán disminuidos u orientados a atender las consecuencias de eventos atípicos que desequilibren el erario municipal
- ✓ Además llevará al municipio a un mejor escenario de competitividad.

Este tipo da planificación tiene una visión de balance entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental, bajo parámetros de inversión estratégica que se traduzcan en oportunidades para que el municipio avance y progrese. La inclusión de la gestión del riesgo, no sólo en el ordenamiento territorial sino también en toda la planificación local, se convierte en una estrategia y un instrumento idóneo que permite actuar sobre el territorio para prevenir desastres y reducir riesgos, y conduce al municipio a un desarrollo continuo, orientado a mejorar las condiciones de vida de la población.

Es importante anotar la importancia del suelo del uso y su clasificación en la normatividad colombiana, en este caso se tomará como base el Artículo 30 de la Ley 388 de 1997, la cual se expondrá en la Tabla 3, en donde se describe el suelo urbano, rural,

suburbano, de expansión urbana y de Protección. En cuanto al suelo rural los usos del suelo de acuerdo con el Artículo 33 de la Ley 388 de 1997, artículo 3,4 y 7 del Decreto 3600 de 2007 son: Agrícola, Pecuario, Forestal, Agroforestal, Minero y Actividades análogas compatibles con uso suelo rural (ecoturismo, etnoturismo, entre otras). En el caso de suelo urbano se han utilizado en el país las siguientes clasificaciones:

- ✓ Residencial: abarca todo tipo de viviendas, edificios de apartamentos.
- ✓ Comercio: agrupa todas las actividades comerciales de tipo minorista y mayorista.
- ✓ Industrial: Está relacionado con todas las actividades industriales y se clasifica en liviana, mediana y pesada.
- ✓ Institucional: son aquellos usos necesarios para la vida urbana destinados a la prestación de servicios de orden educativo, de salud, de seguridad, de cultura, de culto y administrativo, requeridos por la comunidad.
- ✓ Servicios: destinados a los servicios profesionales, empresariales, administrativos, bancarios, de esparcimiento, técnicos especializados, actividades económicas e inmobiliarias, en general y/o similares.
- ✓ Protección: se trata de las zonas clasificadas por la Ley 388 de 1997 bajo el mismo nombre.
- ✓ Actividades análogas compatibles con uso suelo rural, definidas por la Ley 388 de 1997 (ecoturismo, etnoturismo, entre otras).

También recientemente se ha propuesto utilizar el concepto de suelo de uso transitorio. Esta clasificación provisional permitirá que tanto las zonas sujetas a intervención prospectiva como las zonas de intervención prescriptiva puedan realizar las obras pertinentes para habilitar el suelo para futuros desarrollos urbanos (Mendes, 2013). En el caso de Manizales este tipo de clasificación de la aptitud del suelo se ha considerado como áreas de desarrollo urbano condicionado, con el fin de no utilizar la clasificación del suelo de protección por riesgo que señala la Ley 388 de 1997, para evitar vetar suelos donde todavía hace falta evaluar el grado de mitigabilidad de la amenaza y el riesgo. Este proceso de evaluación detallada se propone realizar en el componente programático del POT de la ciudad; es decir en el plazo de los doce años de vigencia del plan. Cada administración tiene al menos un alcance en cuanto a definir el grado de mitigabilidad, diseñar las obras de mitigación y construirlas para clasificar el suelo definitivamente como apto o no para el desarrollo urbano.

**Tabla 3. Clasificación del suelo según el Artículo 30, Ley 388 de 1997.**

Urbano	<p>Áreas del territorio distrital o municipal destinadas a usos urbanos por el plan de ordenamiento, que cuenten con infraestructura vial y redes primarias de energía, acueducto y alcantarillado, factibles de ser urbanizadas y edificadas, según sea el caso. Podrán pertenecer a esta categoría, las zonas con procesos de urbanización incompletos, comprendidos en áreas consolidadas con edificación, que se definan como áreas de mejoramiento integral en los planes de ordenamiento territorial.</p> <p>Las áreas clasificadas dentro de este tipo de suelo estarán delimitadas por perímetros y podrán incluir los centros poblados de los corregimientos. En ningún caso el perímetro urbano podrá ser mayor que el denominado perímetro de servicios públicos o sanitarios. Ver Decreto Nacional 1337 de 2002.</p>	
Rural	<p>Constituido por los terrenos no aptos para el uso urbano, por razones de oportunidad, o por su destinación a usos agrícolas, ganaderos, forestales, de explotación de recursos naturales y actividades análogas. Ver Decreto Nacional 1337 de 2002, Ver el art. 21, Ley 1469 de 2011.</p>	<p><b>Suburbano</b></p> <p>Áreas ubicadas dentro del suelo rural, en las que se mezclan los usos del suelo y las formas de vida del campo y la ciudad, diferentes a las clasificadas como áreas de expansión urbana, que pueden ser objeto de desarrollo con restricciones de uso, de intensidad y de densidad, garantizando el autoabastecimiento en servicios públicos domiciliarios, de conformidad con lo establecido en la Ley 99 de 1993 y en la Ley 142 de 1994. Podrán formar parte de esta categoría los suelos correspondientes a los corredores urbanos interregionales. Los municipios y distritos deberán establecer las regulaciones complementarias tendientes a impedir el desarrollo de actividades y usos urbanos en estas áreas, sin que previamente se surta el proceso de incorporación al suelo urbano, para lo cual deberán contar con la infraestructura de espacio público, de infraestructura vial y redes de energía, acueducto y alcantarillado requerida para este tipo de suelo. Ver Decreto Nacional 1337 de 2002.</p>
Expansión urbana	<p>Reglamentado parcialmente por el Decreto Nacional 2181 de 2006. Constituido por la porción del territorio municipal destinada a la expansión urbana, que se habilitará para el uso urbano durante la vigencia del plan de ordenamiento, según lo determinen los Programas de Ejecución. La determinación de este suelo se ajustará a las previsiones de crecimiento de la ciudad y a la posibilidad de dotación con infraestructura para el sistema vial, de transporte, de servicios públicos domiciliarios, áreas libres, y parques y equipamiento colectivo de interés público o social. Dentro de esta categoría podrán incluirse áreas de desarrollo concertado, a través de procesos que definen la conveniencia y las condiciones para su desarrollo mediante su adecuación y habilitación urbanística a cargo de sus propietarios, pero cuyo desarrollo estará condicionado a la adecuación previa de las áreas programadas. Ver Decreto Nacional 1337 de 2002.</p>	
Protección	<p>Constituido por las zonas y áreas de terreno localizados dentro de cualquiera de las anteriores clases, que por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras para la provisión de servicios públicos domiciliarios o de las áreas de amenazas y riesgo no mitigable para la localización de asentamientos humanos, tiene restringida la posibilidad de urbanizarse.</p>	



## **4. EL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

### **4.1. Cálculo del riesgo desde una perspectiva probabilística**

Se ha ilustrado la importancia de los procesos de ordenamiento del territorio tanto a nivel macro (Estado) como a nivel micro (regional y local), este procedimiento es entendido como un proceso determinado por políticas a corto, mediano y largo plazo. Internacionalmente se ha tenido consenso en definir el ordenamiento territorial como una oportunidad para evitar la generación de nuevas vulnerabilidades y para la reducción del riesgo de desastres existente. Por esto la importancia de integrar los resultados de los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en los procesos e instrumentos de ordenamiento territorial. Esta interacción debe estar enfocada en dar herramientas a los entes y funcionarios encargados de la toma de decisiones para que logren tomarlas de la manera más acertada posible. Los POT de las principales ciudades de Colombia y sus planes estratégicos de gestión de riesgo han aplicado este concepto y se puede afirmar que hay un buen conocimiento de las amenazas que han afectado y que podrían afectar. Entendiendo estos problemas no solo desde la perspectiva técnica sino también políticos, sociales y económicos (González, 2012).

Los POT basados en la Ley 388 de 1997 presenta mapas multiamenazas y multiriesgos en categorías (alta, moderada y baja) utilizando un sistema de información geográfica que integra diferentes mapas temáticos que se cruzan entre sí; como se observa en el anexo I; pero estas interpretaciones deben ser contextualizados socio culturalmente asociadas a diferentes períodos de retorno lo que no se ha hecho en los POT de Colombia. En algunos casos, se rescata que estas interpretaciones del riesgo adoptan disposiciones de carácter restrictivo, condicionante o correctivo (PREDECAN, 2009; González, 2012).

Si entendemos el ordenamiento del territorio como un amplio y complejo proceso multidimensional de intervención del territorio que busca inducir formas de uso y ocupación consecuentes con escenarios proyectados (prevención) y deseables del desarrollo territorial; es necesario tener varios escenarios probabilísticos basados en las diferentes amenazas según sea su frecuencia e intensidad y en la vulnerabilidad existente que ayuden a la toma de decisiones. En la actualidad los planes de ordenamiento en Colombia no han evaluado el riesgo lo que podría generar un análisis conservador o incluso en algunos casos estimaciones incorrectas. Según Cardona el riesgo debe ser cuantificado, no hacerlo “*limita el proceso de toma de decisiones desde la planificación física, la reducción y la financiación del riesgo, si las perdidas futuras no son un componente del proceso de planificación e inversión del país, es casi imposible mantener recursos presupuestarios para reducir dichas pérdidas potenciales*” (PREDECAN, 2009; INGENIAR, 2006).

No se puede dejar de lado la incertidumbre asociada a los eventos pasados y al pronóstico de los eventos futuros y es indudablemente inherente al manejo adecuado del riesgo. Los fenómenos naturales tienen relaciones de causalidad, de ocurrencia de eventos

secundarios a partir de un evento inicial o primario (PREDECAN, 2009). Según Chivata (2006) debemos entender los fenómenos naturales como “[...] *complejos y en consecuencia no permanentes en el tiempo, esencialmente no lineales, inciertos, difusos, de igual manera su interpretación, modelación y el proceso de toma de decisiones y comunicación son actividades también complejas*”.

Para la zonificación de las amenazas es importante utilizar metodologías según el nivel de detalle y escalas de trabajo a la que se tenga acceso, las cuatro clasificaciones principales son: ocurrencia histórica, métodos heurísticos, métodos estadísticos y métodos determinísticos. Las principales urbes de nuestro país cuentan con suficientes estudios especializados de las diferentes amenazas naturales, además, se tiene un registro histórico completo de los fenómenos naturales ya ocurridos, incluso existen trabajos académicos sobre la evaluación del riesgo con las diferentes metodologías mencionadas. Por lo anterior, están dadas las condiciones para evaluar el riesgo con estimaciones probabilistas, no hacerlo según Cardona (2006) *“implica no tener planificado el costo de las futuras reconstrucciones asociados a probables desastres futuros además se pierde el principal incentivo para promover la mitigación y prevención del riesgo”* (gestión del riesgo) (INGENIAR, 2006; González, 2012).

Actualmente el cálculo de las amenazas, vulnerabilidades y riesgos en el país según Cardona *“se basan en aproximaciones de todas las variables en correlaciones estadísticas y en supuestos que pueden considerarse aceptables solo a nivel global con fines ilustrativos de la problemática para sustentar la necesidad de que hay que reducir el riesgo pero que no son apropiados cuando el objetivo es definir acciones pragmáticas y sustentadas de reducción del riesgo en el marco de la realidad de los países”*. No tener en cuenta las probabilidades implica estar por debajo del estado del arte en modelación de riesgos y el resultado final de este análisis tiende a ser tan solo una medida comparativa o relativa con fines de clasificación y no una medida de riesgo de carácter objetivo que es la más adecuada para tomar acciones de intervención. Los indicadores que resultan de estos análisis solo son útiles para efectos comparativos con otras regiones o países, si son utilizados para priorizar posibles intervenciones según Cardona *“es poco factible establecer políticas, alternativas y prioridades de mitigación del riesgo bien definidas, lo que limita garantizar pronósticos o predicciones futuras del riesgo”* (INGENIAR, 2006).

Se ha manifestado reiteradamente la falencia en el cálculo probabilístico del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial en Colombia, teniendo en cuenta que en 1986 se entendía la amenaza sísmica como una probabilidad de que la intensidad sea excedida en un período determinado, conceptos que estaban implícitos en el decreto 1400 de 1984. No se explica como 30 años después estos conceptos no han sido replicados a las diferentes amenazas en Colombia, incluso en ciudades que han sido pioneras como Manizales y Bogotá. En el estado del arte existen muchas metodologías que han sido aplicadas en el mundo académico y práctico, para el caso específico de los POT se propone una metodología de evaluación que es escalable espacialmente y permite hacer evaluaciones a nivel macro, (escala regional o nacional) y a nivel micro (escala subnacional y local) donde lo que cambia es la resolución de la información (INGENIAR, 2006).

Para la evaluación de los pequeños desastres a nivel local se desarrolló una curva de excedencia de pérdidas “híbrida” la cual representa el riesgo, en la cual su primer segmento de pérdidas menores y moderado corresponde a un análisis deductivo y predictivo, en prospectiva, del potencial de pérdidas mayores y extremas, los resultados de esta metodología permiten hacer un planteamiento acerca de las diferentes formas de reducción del riesgo ilustrando que es posible hacer una estratificación del mismo, en el sentido de que la manera de enfrentarla, mediante reglamentación, transparencia y aceptabilidad del riesgo a la vez de justificaciones técnicas, financieras y sociales (INGENIAR, 2006).

Con esta curva es posible cuantificar el riesgo que señale cual es la frecuencia de cada valor de posibles pérdidas para una región, la curva captura de manera bastante confiable el riesgo catastrófico lo que da un estimación de pérdidas muy notable resultado de la correlación de eventos mayores, que usualmente son de interés para efectos de negociaciones entre tomadores y cedentes del riesgo financiero (transferencia del riesgo). Esto ayuda a el ente gubernamental a tener estrategias de financiación de futuros desastres con aseguradoras, como también a estimar cuales serían las más eficientes políticas de inversión pública para la mitigación de los riesgos existentes (INGENIAR, 2006).

Esta curva de excedencia de pérdidas obtenida, analíticamente suele realizarse sólo para eventos como terremotos, huracanes ó fenómenos que pueden causar grandes consecuencias por la correlación o simultaneidad de los efectos sobre el portafolio expuesto (e.g Volcánica, Terremotos). Es relevante y confiable sólo a partir de una pérdida en algún grado importante, que se considera pueda definir un valor apropiado para el tomador de decisiones a partir del cual empieza la transferencia. Esto significa que las consecuencias causadas por eventos que difícilmente puedan correlacionar pérdidas (e.g deslizamientos, inundaciones de poca extensión) deben ser asumidas por el cedente (INGENIAR, 2006).

Tal vez una de las fortalezas de esta curva híbrida es que permite ilustrar en el primer segmento de la curva de excedencia de pérdidas el riesgo por eventos menores puede obtenerse en forma inductiva ó empíricamente, utilizando herramientas como el DesInventar<sup>21</sup> y que hay manera de empalmarlo con el segundo segmento que debe ser obtenido analíticamente con el enfoque deductivo y predictivo del cálculo probabilista del riesgo catastrófico, los pequeños desastres han tenido una alta frecuencia en Colombia, lo que representa un alto riesgo financiero, estas situaciones deben ser observadas y cuantificadas con técnicas como la curva híbrida (INGENIAR, 2006).

Para el caso de los eventos menores por ejemplo los deslizamientos, la metodología propuesta por la curva híbrida (primer segmento) propone (INGENIAR, 2006):

- a) Selección de la base de datos DesInventar
- b) Análisis estadístico general de la base de datos
- c) Selección de los parámetros para la agrupación por eventos

---

<sup>21</sup> <http://www.desinventar.org/es/>

- d) Unificación de los efectos mediante la agrupación por evento
- e) Análisis estadístico general de los eventos
- f) Definición de los parámetros para la evaluación de pérdidas por evento
- g) Cálculo de las pérdidas por evento
- h) Análisis estadístico de las pérdidas por evento
- i) Verificación de resultados con eventos cuyas pérdidas estén reportadas
- j) Ajuste del modelo completo hasta que haya consistencia y se logre una buena estimación con la información existente.
- k) Clasificación de los eventos según el tipo de evento (categoría)
- l) Desarrollo de las curvas de excedencia de pérdidas (número de eventos por año con pérdidas mayores o iguales a cada una de las pérdidas definidas) para cada uno de los tipos de evento y para la totalidad de los eventos

#### **4.2. Una plataforma de evaluación del riesgo al alcance de los interesados**

A nivel del estado del arte existen metodologías que han sido aplicadas ampliamente en el mundo académico y en la consultoría de la ingeniería y los seguros. Para el caso específico del POT se podría utilizar una plataforma, de código abierto, como el CAPRA (*Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment*)<sup>22</sup>. Se trata de un sistema, sin costo para el usuario, promovido por el Banco Mundial y el Banco Inteamericano de Desarrollo. CAPRA es una técnica de evaluación del riesgo, escalable espacialmente, que permite hacer evaluaciones a nivel macro, (escala regional o nacional) y a nivel micro (escala subnacional y local) donde lo que cambia es la resolución de la información.

CAPRA es una plataforma que permite evaluar el riesgo derivado de múltiples amenazas y visualizar espacialmente los daños y pérdidas que podrían ocurrir. El CAPRA es un software que tiene un módulo para cada una de las amenazas, tiene en cuenta los elementos expuestos que se le configuren, sus vulnerabilidades, para luego estimar las pérdidas probables y así medir el riesgo en un territorio (INGENIAR, 2006; González, 2012).

El CAPRA provee información acerca del riesgo catastrófico lo que permite además estimaciones para las negociaciones entre tomadores y cedentes del riesgo financiero (transferencia del riesgo). Esto permite a los gobiernos diseñar estrategias de financiación frente a futuros desastres con la industria de seguros/reaseguros, así como también estimar cuales serían las más eficientes políticas de inversión pública para la reducción del riesgo.

Estimaciones probabilistas con este tipo de plataformas permiten visualizar las amenazas y el riesgo en las diferentes zonas ya urbanizadas o de expansión del territorio (espacialmente). Además permite obtener mapas para varios períodos de retorno para que las autoridades gubernamentales cuenten con evaluaciones que les permita tomar decisiones de tipo prescriptivo, correctivo y prospectivo sobre el territorio (González, 2012).

---

<sup>22</sup> <http://www.ecapra.org/es/>

### **4.3. Elementos importantes para el cálculo probabilista del riesgo**

#### **4.3.1. Caracterización de la exposición.**

Se refiere principalmente a los componentes de infraestructura o a la población expuesta que puede verse afectada por un evento determinado, para esto es necesario identificar los diferentes componentes individuales incluyendo su ubicación geográfica, sus características geométricas, físicas e ingenieriles principales, su vulnerabilidad ante el evento peligroso, su valoración económica y el nivel de ocupación humana que puede llegar a tener en un escenario de análisis determinado, en Colombia se tiene un registro catastral muy confiable, especialmente en las principales ciudades, además se tiene en algunos casos una estimación bastante buena y juiciosa de la edad de sus construcciones, incluso de sus valores catastrales y comerciales lo que facilita el proceso estadístico que exige la identificación de la exposición en el territorio, existen casos como la ciudad de Manizales que tiene un seguro colectivo lo que indica que ya se tienen estudios muy completos sobre las edificaciones, el nivel económico de las familias, los edificios públicos y sus estados actuales, además de un estimativo de los costos de todos los elementos públicos y privados (INGENIAR,2006).

#### **4.3.2. Caracterización de la vulnerabilidad.**

Esta caracterización se realiza generando funciones que relacionan el nivel daño de cada componente con la intensidad del fenómeno que caracteriza la amenaza, cada función de vulnerabilidad está definida por un valor medio de daño y su varianza, con lo cual es posible estimar su función de probabilidad respectiva. La varianza da cuenta de la incertidumbre asociada en este proceso del cálculo de riesgo catastrófico. La estimación de los efectos o del daño se mide en términos de la relación media de daño, RMD, que corresponde a la relación entre el costo esperado de reparación del elemento afectado y el costo de reposición del mismo. Por esto cada elemento expuesto tendrá asignado un valor de vulnerabilidad diferente, en términos probabilistas, para cada uno de los eventos a los que estará sometido (INGENIAR, 2006).

Este proceso es muy diferente al utilizado en los POT actualmente, en donde solo se tiene en cuenta la ubicación de la infraestructura (exposición) con respecto al área de influencia de las diferentes amenazas identificadas, esto solo genera un indicador de la vulnerabilidad en una zona determinada por un mapa, más no a los diferentes períodos de retorno de cada una de las amenazas que implica intensidades diferentes por ende escenarios de daños diferentes, como se mencionó anteriormente se debe representar en curvas, cada elemento expuesto tiene una diferente y no un mapa para todas (INGENIAR, 2006).

#### **4.3.3. Estimación de pérdidas potenciales.**

Con base en los modelos de amenaza probabilistas propuestos y en el inventario y valoración de los elementos expuestos con sus funciones de vulnerabilidad

correspondientes se desarrolla la modelación de pérdidas probabilística para la zona de análisis (INGENIAR, 2006).

Para calcular las pérdidas asociadas a un evento determinado, la relación media de daño, RMD obtenida de la función de vulnerabilidad, se convierte en pérdida económica multiplicándola por el valor de reposición del componente. Esta operación se repite para cada uno de los activos (elementos) expuestos en el inventario de elementos expuestos para cada uno de los eventos analizados. Durante este proceso de evaluación para los eventos factibles y el grado de vulnerabilidad de cada componente del portafolio las pérdidas se van agregando siguiendo una aritmética apropiada para el tratamiento de las funciones de densidad de probabilidad asociadas a los eventos y a la vulnerabilidad, lo que permite desarrollar la curva de probabilidad de excedencia de pérdidas respectivas (INGENIAR, 2006).

Los POT en Colombia no estiman las pérdidas, debido a que no se tiene noción del daño que causaría una amenaza determinada relacionada con una vulnerabilidad existente. La metodología que se utiliza en el POT no permite realizar un análisis de riesgo que determine una pérdida probable, muy lamentable porque se pierde uno de los objetivos principales de los planes de ordenamiento y es el dar herramientas para la toma de decisiones que contribuyan a guiar la intervención pública en políticas preventivas, además de transferir el riesgo teniendo un conocimiento de cuánto podría ser el costo de un desastre probable y estar preparado financieramente para ese escenario, desastres siempre van a ocurrir, las amenazas siempre estarán allí pero debemos tener políticas que contribuyan a reducir la vulnerabilidad además de definir cuál es el riesgo aceptable y para cual se debe empezar a preparar financieramente entendiendo las limitaciones financieras que posee el territorio (González, 2012).

#### ***4.4. Aplicaciones de la evaluación del riesgo en el ordenamiento territorial y sus intervenciones derivadas***

En Colombia no existe una legislación que establezca con qué metodologías se deben hacer los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de desastres para incorporarlos en el ordenamiento territorial. Tampoco se han definido referentes específicos y orientaciones para determinar, por ejemplo, retiros en los causes de los ríos, factores de seguridad o estabilidad de laderas. A diferencia de las normas sísmicas que establecen un sismo de 475 años de período de retorno (e.g. una probabilidad del 10% de excedencia en 50 años) para el diseño de edificaciones nuevas, para los POT y los POMCA no se han definido criterios específicos de seguridad y protección frente a lluvias, inundaciones y deslizamientos (González, 2012).

No es debido considerar todas las amenazas con la misma relevancia en los diferentes usos del suelo, esto significa que no todos los fenómenos tienen la misma incidencia en la posibilidad de que ciertas áreas deban ser ocupadas o que se puedan realizar actividades que signifiquen la exposición permanente de activos, bienes o servicios y sobre todo, de

personas que puedan permanecer en dichas áreas consideradas como propensas a ser afectadas por fenómenos peligrosos. Lo anterior se puede asociar a amenazas producto de fenómenos como los deslizamientos, los flujos de lodo, las avalanchas, las inundaciones de alta pendiente, entre otros cuya magnitud e intensidad es tan alta que cualquier elemento expuesto sufriría un daño total o casi total en caso de presentarse un evento peligroso, es decir, estar expuesto en las áreas propensas a este tipo de fenómenos implica un alto potencial de consecuencias ó una situación de “riesgo implícito”. Por esta razón, la zonificación de amenazas de este tipo se traduce en términos prácticos en una zonificación del riesgo, sea porque ya exista algo expuesto o porque algo pueda estar expuesto en ese sitio en el futuro. Esta es la razón fundamental por la cual en la Ley 388 de 1997, de desarrollo territorial, se refiere a que es necesario identificar las zonas de amenaza y riesgo como determinante o estructurante del ordenamiento territorial y con fines de prevención de desastres (hoy entendida como gestión del riesgo de desastres de acuerdo con la Ley 1523 de 2012 y en la cual se definen claramente conceptos como amenaza, vulnerabilidad, riesgo, intervención correctiva e intervención prospectiva que son relevantes para el diagnóstico) (Cardona, Mendes et al, 2013; Mendes, 2013).

De acuerdo con lo anterior, es importante señalar que el concepto de vulnerabilidad de los elementos expuestos, que media entre la amenaza y el riesgo, no tiene en este caso la misma pertinencia que cuando se trata de fenómenos cuya amenaza es de un amplio espectro de intensidades (desde valores muy pequeños a valores muy altos) y para las cuales se establecen en forma prescriptiva las exigencias de seguridad que se deben cumplir. Es el caso de la actividad sísmica, la acción del viento, la caída de nieve/granizo, la caída de cenizas de origen volcánico, las inundaciones lentas e incluso los incendios forestales, entre otros fenómenos. Claramente en estos casos existe una gradación de la vulnerabilidad que da cuenta del grado de fragilidad de los elementos expuestos ante la severidad de los fenómenos y es fundamental evaluarla para poder estimar el nivel de riesgo físico frente a las intensidades de los eventos factibles. La diferencia fundamental es que en este caso la vulnerabilidad es variable y sólo se satura o es total cuando se trata de un evento extremadamente severo, mientras que en los casos de las amenazas previamente descritas la vulnerabilidad del elemento expuesto es total o se satura ante el fenómeno y por eso la identificación de las zonas de amenaza, que usualmente están asociadas más a la frecuencia de los fenómenos que a su intensidad, es en la práctica la identificación de las zonas de riesgo implícito: es decir, tácito o sobreentendido (Cardona, Mendes et al, 2013).

En la Tabla 4 se ilustra cómo definir y utilizar los niveles de amenaza, usando criterios de probabilidad relativa, y como se derivan los niveles de riesgo implícito con fines de orientación de la imagen objetivo de la planificación del territorio.

**Tabla 4. Niveles de amenaza relativa y riesgo implícito para el caso de inundaciones y deslizamientos.**

Amenaza en el área	Probabilidad relativa	Inundaciones*	Deslizamientos	Deslizamientos (Factor de seguridad)	Riesgo implícito
Muy alta	90% – 100 %	Mancha de inundación para $Tr = 10$ años	Inestabilidad muy factible	$F_s < 1.00$	Afectación muy factible
Alta	66 % – 100 %	Mancha de inundación $11 < Tr < 25$ años	Inestabilidad factible	$1.00 \leq F_s < 1.10$	Afectación factible
Moderada	33% – 66 %	Mancha de inundación $25 < Tr < 50$ años	Inestabilidad poco factible	$1.10 \leq F_s < 1.50$	Afectación poco factible
Baja	0% – 33 %	Mancha de inundación $50 < Tr < 100$ años	Inestabilidad remota	$1.50 \leq F_s < 2.00$	Afectación remota
Muy baja	0% – 10 %	Mancha de inundación $Tr > 100$ años	Inestabilidad muy remota	$F_s > 2.00$	Afectación muy remota

Fuente: Propuesta metodológica de (Cardona, Mendes et al, 2013; Mendes, 2013)

\*En el caso de las inundaciones podrían definirse otros criterios según las características de la cuenca

En todos los casos es necesario que cada territorio tenga su imagen objetivo en un plazo determinado, esto debe ir asociado con la caracterización del riesgo implícito en un área para lograr una planificación del territorio integral. Los niveles de amenaza y riesgo son en cualquier caso relativos y que la definición de si un riesgo es mitigable o no, también es una definición relativa que depende no sólo del grado de mitigabilidad de la amenaza y del riesgo sino de la factibilidad o decisión de llevar a cabo las intervenciones que implique la reducción o el control del nivel de amenaza existente, lo que sólo es posible de definir si se realizan estudios detallados y cuidadosos en cada caso. De esto dependerá si la vocación del suelo o la imagen objetivo de su uso (y sus restricciones o condicionamientos) puedan llegar a cambiar en el futuro por la modificación de nivel de amenaza o riesgo del área en consideración durante el tiempo previsto de implementación del instrumento de planificación.

En otras palabras, existe una relación directa entre la definición de los resultados de amenaza y riesgo y la propuesta o decisión en términos de restricción o condicionamientos, e incluso de exigencias o planteamientos de lo que se puede hacer en el área, razón por la cual la definición de los niveles de amenaza y riesgo no debe realizarse en forma desconectada, como lamentablemente se ha venido haciendo hasta ahora en forma convencional con calificaciones arbitrarias de alto, medio y bajo por juicios técnicos que no han tenido en consideración lo que eso implica para la planificación y el desarrollo. En cualquier caso, la definición del grado de amenaza y riesgo implica un *trade-off* y no debe establecerse sin considerar las opciones que, por ejemplo, aunque puedan implicar costos altos de mitigación pueden ser factibles y justificables teniendo en cuenta otras consideraciones técnicas, sociales, ambientales, culturales y económicas. Aunque la realización de medidas estructurales de mitigación o prevención como obras de protección, programas de reforestación, sistemas de alerta, etc. debe ser planteada con especial cuidado para no beneficiar unas áreas pero y al mismo tiempo desfavorecer a otras, estas medidas



deben hacer parte de las opciones que determinan la viabilidad o no de ocupar o seguir ocupando áreas propensas en algún grado de ser afectadas.

Por lo anterior, se considera fundamental no sólo establecer los niveles de riesgo implícito antes mencionados sino las acciones que se derivan de la calificación de las áreas respectivas. Se propone aquí tres tipos de intervenciones asociadas a cada nivel de riesgo implícito (ver definiciones de la Ley 1523 de 2012). La intervención prospectiva en zonas aún no ocupadas por asentamientos humanos, la intervención correctiva en zonas ya ocupadas y, por lo tanto, donde ocurren actividades que están en riesgo, y una intervención prescriptiva que plantea el tipo de análisis y exigencias que se deben cumplir con el fin de reducir o controlar (asegurarse de no dejar aumentar) la amenaza y si es del caso la exposición en las áreas propensas a los fenómenos peligrosos. Dichas exigencias deben obedecer a una normativa propia de requisitos mínimos de idoneidad y seguridad que no serían más que las reglas del juego para establecer la posible mitigabilidad de la amenaza y el riesgo. La Tabla 5 presenta el tipo de intervenciones en las áreas identificadas con los diferentes niveles de riesgo implícito (Mendes, 2013).

**Tabla 5. Intervenciones prospectivas, correctivas y prescriptivas indicativas, asociadas a los niveles de riesgo implícito.**

<b>Riesgo implícito</b>	<b>Intervención Prospectiva (área no ocupada) A</b>	<b>Intervención Correctiva(área ocupada) B</b>	<b>Intervención Prescriptiva (Exigencias)</b>
Afectación muy factible	Prohibición de asentamientos e infraestructura	Reubicación de asentamientos e infraestructura	Explorar reducir la amenaza al nivel de moderada
Afectación factible	Prohibición de asentamientos e infraestructura	Reducción de la amenaza + sistema de alerta	Reducir la amenaza al nivel de moderada
Afectación poco factible	Control del aumento de la amenaza + sistema de alerta	Protección del área + sistema de alerta	Controlar aumento de la amenaza (A) y proteger el área (B)
Afectación remota	Control del aumento de la amenaza	Sin condicionantes	Controlar el aumento de la amenaza (A)
Afectación muy remota	Sin condicionantes	Sin condicionantes	Sin requisitos

Fuente: Metodológica propuesta (Cardona, Mendes et al, 2013; Mendes, 2013)

En síntesis, no basta con sólo evaluar la amenaza ante estos fenómenos y el riesgo implícito que ella implica con fines de ordenamiento territorial, sino que se necesita asociar los niveles de amenaza a intervenciones correctivas, prospectivas y prescriptivas, para finalmente definir las restricciones, los condicionamientos y las exigencias que se deben cumplir en las zonas propensas a la ocurrencia de eventos peligrosos. Al respecto se propone utilizar en los instrumentos de planificación un enfoque metodológico que permita desarrollar lo indicado en la Tabla 4 y Tabla 5 con lo cual se puede incluir la variable riesgo como determinante en el ordenamiento territorial.

Por otra parte, es fundamental no sólo establecer los niveles de riesgo implícito antes mencionados sino las acciones que se derivan de la calificación de las áreas respectivas. Se propone aquí tres tipos de intervenciones asociadas a cada nivel de riesgo implícito. La intervención prospectiva en zonas aún no ocupadas por asentamientos humanos, la intervención correctiva en zonas ya ocupadas y, por lo tanto, donde ya existen elementos o actividades que están en riesgo, y una intervención prescriptiva que plantea el tipo de análisis y de exigencias que se deben cumplir con el fin de reducir o controlar la amenaza (e.g. asegurarse de que no aumente) y, si es el caso, que debe cumplir la exposición en las áreas propensas a los fenómenos peligrosos.

En relación con los tipos de intervención (en el marco de la gestión del riesgo de desastres) la Ley 1523 de 2012 presenta las siguientes definiciones:

Intervención: Corresponde al tratamiento del riesgo mediante la modificación intencional de las características de un fenómeno con el fin de reducir la amenaza que representa o de modificar las características intrínsecas de un elemento expuesto con el fin de reducir su vulnerabilidad.

Intervención correctiva: Proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Intervención prospectiva: Proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevas situaciones de riesgo a través de acciones de prevención, impidiendo que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos ante posibles eventos peligrosos. Su objetivo último es evitar un nuevo riesgo y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro. La intervención prospectiva se realiza primordialmente a través de la planificación ambiental sostenible, el ordenamiento territorial, la planificación sectorial, la regulación y las especificaciones técnicas, los estudios de prefactibilidad y diseño adecuados, el control y seguimiento y en general todos aquellos mecanismos que contribuyan de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la infraestructura, los bienes y la población.

En el caso de la Intervención prescriptiva equivale a lo que en la Ley 1523 de 2012 define como reglamentación prescriptiva, que corresponde a las disposiciones cuyo objetivo es determinar en forma explícita exigencias mínimas de seguridad en elementos que están o van a estar expuestos en áreas propensas a eventos peligrosos con el fin de preestablecer el nivel de riesgo aceptable en dichas áreas.

De esta forma se determinan los tres tipos de intervención que corresponden a las acciones para desarrollar con fines de gestión del riesgo. En un instrumento de planificación territorial, por lo tanto, la zonificación de la amenaza y del riesgo implícito deriva en intervenciones según el nivel de riesgo implícito, si el área está ocupada o no y el tipo de suelo; lo que a su vez se traduce en usos del suelo que se podrían permitir o que es factible considerar. A modo de ejemplo de lineamientos de ordenamiento territorial se presentan los Cuadro- 1,2 y 3

**Cuadro- 1. Lineamiento a modo de ejemplo para la gestión de riesgo implícito en áreas urbanas**

- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas virtualmente afectadas son: protección.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas virtualmente afectadas son: servicios (de esparcimiento-recreación pasiva: senderos, miradores).
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva (exigencias) en áreas virtualmente afectadas son: condicional para desarrollo, comercio (minorista, como apoyo a los usos de servicio e institucional permitidos); servicios (de esparcimiento, de transporte que no requieran permanencia); institucional (equipamientos de bajo impacto y tamaño pequeño-casetas, kioscos, bodegas, depósitos); industrial, siempre y cuando se reduzca la amenaza.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas de afectación muy factible: condicional para desarrollo.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas de afectación muy factible son: vivienda (se restringirá el uso de vivienda, y se permitirá la existente, siempre y cuando se hagan las obras de reducción y protección y se tenga un sistema de alerta); comercio (no se incentivará el uso comercial, pero se podría permitir el existente siempre y cuando se hagan las obras de reducción y protección y se tenga un sistema de alerta); institucional (de estancia transitoria se podría permitir siempre y cuando se hagan las obras de reducción y protección y se tenga un sistema de alerta) ; industrial.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas de afectación muy factible son: servicios (de esparcimiento, de transporte); Comercio; institucional, e industrial; siempre y cuando se controle la amenaza y se proteja el área.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas de afectación factible son: servicios, institucional, e industrial; siempre y cuando se hagan unas obras de control de la amenaza y se tenga un sistema de alerta.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas de afectación factible son: vivienda, comercio, servicios, institucional e industria; siempre y cuando se hagan unas obras de protección y se tenga un sistema de alerta.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas de afectación factible son: servicios, comercio, institucional e industrial; siempre y cuando se controle la amenaza y se proteja el área.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas de afectación poco factible son: vivienda, comercio, servicios, institucional, e industria; siempre y cuando se hagan unas obras de control de la amenaza.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas de afectación poco factible son: vivienda, comercio, servicios, institucional, e industria.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas de afectación poco factible son: vivienda, comercio, servicios, institucional, e industrial; siempre y cuando se controle la amenaza.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas virtualmente no afectables son: vivienda, comercio, servicios, institucional, e industrial.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas virtualmente no afectables son: vivienda, comercio, servicios, institucional, e industrial.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas virtualmente no afectables son: vivienda, comercio, servicios, institucional, e industrial.

Fuente: (Cardona, Mendes et al, 2013)

**Cuadro- 2. Lineamientos a modo de ejemplo para la gestión de riesgo implícito n áreas rurales**

- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas virtualmente afectadas: de protección.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas virtualmente afectadas son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, y actividades análogas compatibles con el suelo rural.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas virtualmente afectadas son: agrícola, pecuario, y forestal; siempre y cuando se reduzca la amenaza.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas de afectación muy factible son: de protección.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas de afectación muy factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural; siempre y cuando se controle la amenaza y se proteja el área.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas de afectación muy factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural; siempre y cuando se reduzca la amenaza y se proteja el área.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas de afectación factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural; siempre y cuando se hagan unas obras de control de la amenaza y se tenga un sistema de alerta.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas de afectación factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural; siempre y cuando se hagan unas obras de protección y se tenga un sistema de alerta.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas de afectación factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural; siempre y cuando se controle la amenaza y se proteja el área.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva (áreas no ocupadas) en áreas de afectación poco factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural; siempre y cuando se hagan obras de control de la amenaza.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva (áreas ocupadas) en áreas de afectación poco factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas de afectación poco factible son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prospectiva en áreas virtualmente no afectables son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención correctiva en áreas virtualmente no afectables son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural.
- ✓ Los usos del suelo permitidos mediante intervención prescriptiva en áreas virtualmente no afectables son: agrícola, pecuario, forestal, agroforestal, minero, y actividades análogas compatibles con uso suelo rural.

Fuente:(Cardona, Mendes et al, 2013)

**Cuadro- 3. Matriz resumen a modo de ejemplo de usos permitidos en el ordenamiento territorial**

Tipo de riesgo implícito	Intervención Prospectiva (área no ocupada)	Uso del suelo permitido		Intervención Correctiva (área ocupada)	Uso del suelo permitido		Intervención Prescriptiva (Exigencias)
		Urbano	Rural		Urbano	Rural	
<b>Área virtualmente afectada</b>	Prohibición de asentamientos e infraestructura	Protección	Protección	Reubicación de asentamientos e infraestructura	Servicios*	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural***	Explorar reducir la amenaza
<b>Afectación muy factible</b>	Prohibición de asentamientos e infraestructura	* <u>Transitorio</u>	Protección	Obras de reducción y protección + sistema de alerta	Residencial Comercio Servicios* Institucional** Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural***	Reducir la amenaza y proteger el área
<b>Afectación factible</b>	Obras de control de la amenaza + sistema de alerta	Servicios* Institucional** Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural***	Obras de protección + sistema de alerta	Residencial Comercio Servicios* Institucional** Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Actividades análogas compatibles con uso suelo rural***	Controlar la amenaza y proteger el área
<b>Afectación poco factible</b>	Obras de control de la amenaza	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Minero Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Sin condicionantes	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Minero Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Controlar la amenaza
<b>Área virtualmente no afectable</b>	Sin condicionantes	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Minero Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Sin condicionantes	Residencial Comercio Servicios Institucional Industrial	Agrícola Pecuario Forestal Agroforestal Minero Actividades análogas compatibles con uso suelo rural	Sin requisitos

**Fuente: (Cardona, Mendes et al, 2013)**

\* No todos los servicios \*\* No todos los institucionales \*\*\* No todas las actividades análogas

Como se expuso, una forma de abordar el riesgo y su inclusión en la planificación del territorio es por intermedio del riesgo implícito, el cual tiene en cuenta la frecuencia y la intensidad de los fenómenos naturales y con base en esto discriminar áreas y sus posibles usos del suelo según, sin embargo esta es una metodología intermedia teniendo en cuenta que en la actualidad no se ha evaluado el riesgo en los POT en Colombia como se ha indicado teniendo las amenazas con su respectiva frecuencia e intensidad como determinantes en la planificación. En realidad el riesgo debe ser estimado basado en las pérdidas potenciales, es decir un paso más adelante de lo expuesto anteriormente, por intermedio de la curva de excedencia de pérdidas. Dicha curva debe ser quien realmente oriente la toma de decisiones según el riesgo que cada sociedad dese asumir.

Las amenazas muy frecuentes están generan pequeños desastres que en una ventana de tiempo prolongada genera grandes pérdidas, esto da una idea de áreas que deben ser intervenidas sea en mitigación de la amenaza ó reducción de la vulnerabilidad por ejemplo con reubicaciones. También los grandes desastres generados por fenómenos intensos pero poco frecuentes serán desastres que van a generar muchas pérdidas tanto humanas como económicas, esto orienta al tomador de decisiones sobre qué área está dispuesto a intervenir y que usos de suelo se considera pertinente según las diferentes condiciones del territorio; pero también le da una idea de cómo realizar estrategias a mediano y largo plazo que contribuyan a mitigar el impacto y generar políticas preventivas como las de protección financiera. Lo anterior está orientado a la capacidad de superar el desastres es decir ser un territorio resiliente.

#### **4.5. Propuesta sobre la zonificación de la amenaza en el ordenamiento territorial en Colombia**

El Ordenamiento territorial en Colombia básicamente se ha determinado por cuencas y municipios; en el caso de las cuencas por los planes de manejo y ordenación de cuencas hidrográficas -POMCA y para los municipios según su categoría por planes de ordenamiento territorial (POT), esquemas (EOT) o planes básicos de ordenamiento del territorio (PBOT). La caracterización del ordenamiento territorial en Colombia se ha dado hasta el momento basado en el decreto 879 de 1998 y el artículo 9 del capítulo III de la Ley 388 de 1997, allí se estimó que según su población se debe hacer un POT un PBOT o EOT como se expone en la siguiente tabla:

**Tabla 6. Clasificación actual del ordenamiento territorial en Colombia**

<b>Ordenamiento Territorial</b>	<b>Nº Habitantes</b>
Plan de ordenamiento territorial -POT	Mayor a 100.000
Plan Básico de ordenamiento territorial -PBOT	30.000 a 100.000
Esquema de ordenamiento territorial- EOT	Menor a 30.000

Se observa cómo hay una diferenciación entre los municipios dependiendo de su población, entendiendo que no todos tienen la misma capacidad, sin embargo aunque los requisitos de los EOT y los PBOT son más laxos que los exigidos al POT en temas específicos como la evaluación de amenazas y su zonificación, la legislación colombiana no ilustra que metodologías se deben aplicar, e incluso genera ambigüedades y confusiones con los alcances de otras planificaciones territoriales como los POMCA.

Indudablemente en muchos casos se presentan dualidades o confusiones sobre los alcances de los POMCA y como se pueden articular con los POT; se considera que los POMCA deben utilizar una escala intermedia o nivel II de resolución como se ilustrará más adelante en la Tabla 10 y la Tabla 11

. Lo anterior indica que los POMCA deben ser más indicativos que determinantes, estos deben ayudar a localizar zonas de especial interés por ejemplo las amenazas por fenómenos naturales. Los POMCA deben proporcionar cuales son las zonas en las que se debe profundizar en la identificación del riesgo y que requiere estudios a una escala de detalle o nivel I. Dependiendo del municipio a la que pertenece la zona se podrá determinar el nivel o escala que se debe utilizar. En algunos casos un municipio de categoría 4 a 6 (ver Tabla 8) sin tener condiciones que el estado considere de especial importancia se considerará suficiente el nivel III, incluso se podría pensar que la evaluación de un POMCA podría ser el determinante para la zonificación en este caso del EOT.

Los niveles de resolución para el cálculo de las amenazas naturales y su posterior zonificación en el territorio han sido escogidos arbitrariamente en el país. No se tiene claro que nivel de resolución usar y en qué casos. Por esto es necesario tener presente que el nivel de resolución depende del alcance del estudio, de la región a estudiar, de sus objetivos y de las capacidades económicas del municipio. Por lo anterior se hace necesario que la normatividad incluya algunas exigencias mínimas metodológicas para cada una de las diferentes clasificaciones existentes en el ordenamiento territorial.

No es igual realizar un plan de ordenamiento territorial a escala nacional que uno a escala local. Otro factor importante es la disponibilidad de la información, por esto, no es lo mismo un municipio pequeño que un municipio de mayor envergadura económica y geopolítica. En el caso de Colombia existen seis categorías de municipios. Esta categorización depende de la densidad poblacional, los recursos fiscales, la importancia económica y su ubicación geográfica. La categorización de los municipios en Colombia está determinada por el Artículo 320 de la Constitución Política, el cual faculta al legislador para adelantar dicha labor. El desarrollo de este precepto constitucional se dio inicialmente con la Ley 136 de 1994, Artículo 6, pero fue modificado por el Artículo 7 de la Ley 1551 de 2012. Manifestando: “*Los distritos y municipios se clasificarán atendiendo su población, ingresos corrientes de libre destinación, importancia económica y situación geográfica. Para efectos de lo previsto en la ley y las demás normas que expresamente lo dispongan*”. Las categorías se describen en la Tabla 7.

**Tabla 7. Categorización de los municipios en Colombia según la Ley 1551 de 2012**

<b>CATEGORIZACIÓN DE MUNICIPIOS (de acuerdo a la Ley 1551 de 2012)</b>			
<b>Categorías</b>	<b>N<sup>o</sup> de Habitantes</b>	<b>Ingresos corrientes libre destinación anual</b>	<b>Importancia económica</b>
Especial	Superior ó igual a 500.000	Superior a 400.000 smlv	Grado 1
Primera	100.001-500.000	Superior a 100.000 y hasta 400.000 smlv	Grado 2
Segunda	50.001-100.000	Superior a 50.000 y hasta 100.000 smlv	Grado 3
Tercera	30.001-50.000	Superior a 30.000 y hasta 50.000 smlv	Grado 4
Cuarta	20.001-30.001	Superior a 25.000 y hasta 30.000 smlv	Grado 5
Quinta	10.001-20.000	Superior a 15.000 y hasta 25.000 smlv	Grado 6
Sexta	Igual ó inferior a 10.000	No superior a 15.000 smlv	Grado 7

A partir de esta categorización y la clasificación del ordenamiento territorial de la Ley 388 de 1997 se puede concluir lo consignado en la Tabla 8. En dicha tabla se cruza la información de la clasificación de ordenamiento territorial y la categorización de municipios y se observa que la mayor cantidad de municipios en Colombia se encuentran en la sexta categoría, correspondiente a los municipios cuya población es igual o inferior a 10.000 habitantes, sus ingresos corrientes de libre destinación anual no son superiores a 15.000 SMLV y, así mismo, su importancia económica en el país es de Grado 7. Mientras que en los municipios clasificados en categoría especial, los cuales tienen una población superior o igual a 500.000 habitantes, sus ingresos corrientes de libre destinación anual son superiores a 400.000 SMLV y su importancia económica es de Grado 1. En conclusión el nivel de resolución depende de la disponibilidad de información, capacidad económica y del alcance de la planificación del territorio.

No todos los municipios deben ser medidos con la misma vara, pues, no es igual Bogotá que Anapoima ó Manizales que Salamina, como tampoco todos los municipios pequeños son del mismo nivel; por citar un ejemplo algunas zonas pueden tener una importancia minera de grandes proporciones ó alguna otra actividad de interés prioritario para la nación.



**Tabla 8. Categorización de municipios haciendo un cruce con la Ley 388 de 1997**

Según la Ley 388 de 1997	CATEGORIZACIÓN DE MUNICIPIOS (de acuerdo a la Ley 1551 de 2012)				Categorización de municipios-Contaduría general de la nación. Vigencia 2013-Resolución 696 de noviembre de 2012
	Categorías	Número de habitantes	Ingresos corrientes libre destinación anual	Importancia económica	Cantidad de municipios en cada categoría
Municipios con población superior a 100.000 hab. (POT)	Especial	Superior o igual a 500.000	Superior a 400.000 smlv	Grado 1	6
	Primera	100.001-500.000	Superior a 100.000 y hasta 400.000 smlv	Grado 2	18
Municipios con población entre 30.000 y 100.000 hab. (PBOT)	Segunda	50.001-100.000	Superior a 50.000 y hasta 100.000 smlv	Grado 3	17
	Tercera	30.001-50.000	Superior a 30.000 y hasta 50.000 smlv	Grado 4	22
Municipios con población inferior a 30.000 hab. (EOT)	Cuarta	20.001-30.000	Superior a 25.000 y hasta 30.000 smlv	Grado 5	27
	Quinta	10.001-20.000	Superior a 15.000 y hasta 25.000 smlv	Grado 6	33
	Sexta	Igual o inferior a 10.000	No superior a 15.000 smlv	Grado 7	976
	no categorizada	Se refiere a dos municipios que no están categorizados en la normativa			2

La normativa (Ley 1551 de 2012) clasifica los municipios en orden de importancia de acuerdo a criterios como: número de habitantes, ingresos corrientes, e importancia económica para el desarrollo de este instructivo y la definición de máximo tres grupos de municipios para aplicar las metodologías aquí propuestas se concluye el criterio establecido en la Ley 388 de 1997 es suficiente y apropiado. La Tabla 9 presenta un resumen teniendo en cuenta también la categorización de municipios realizada por la Contaduría General de la Nación (Vigencia 2013-Resolución 696 de noviembre de 2012).

**Tabla 9. Categorización en tres grupos y número de municipios**

Grupo (Nivel)	Categorías (Ley 1551 de 2012)	Clasificación de tipo de ordenamiento territorial (Ley 388 de 1997)	Número total de municipios
1	Quarta, quinta y sexta	EOT	1036
2	Segunda y tercera	PBOT	39
3	Especial y primera	POT	24

Si se observa la Tabla 9 se puede analizar que el 95% de los municipios de nuestro país pertenecen a las categoría 4 a 6, lo que indica que el 95% de los municipios en Colombia son municipios de bajos ingresos, y baja densidad poblacional. Por lo anterior es necesario que el estado por intermedio de herramientas como las normativas orienten metodológicamente el cómo se deben evaluar las amenazas naturales y como deben ser determinantes en la planificación territorial. De igual manera en la normativa debe estar claro cómo los municipios especialmente los de categoría 4 a 6 pueden tener acceso a la información técnica que permita realizar la evaluación de las amenazas.

En el caso que los municipios no cuenten con los recursos para contratar personal técnico externo que realice la evaluación de la amenaza e incluirlas en los planes de ordenamiento territorial, la normatividad debe dar opciones de como delegar ciertas responsabilidades a las corporaciones ambientales CAR quienes cuentan con la suficiente información y capacidad para ayudar en la identificación del riesgo y orientarlo como determinante en la planificación territorial.

Según sea la categoría de los municipios en el caso de Colombia se propone los siguientes niveles de resolución y escala para orientar la evaluación del riesgo y su inclusión en la planificación del territorio como se expone en la Tabla 10 y la Tabla 11.

**Tabla 10. Nivel de resolución para la evaluación de amenazas en la planificación territorial. PREDECAN. 2006**

<b>Escala</b>	<b>Municipios por categoría</b>
Escala General (1:25000 -1:10000)	4 a 6
Escala intermedia (1:10000 -1:5000)	2 y 3
Escala de detalle (1:2000 y mayores)	Especial y 1

**Tabla 11. Nivel de resolución para la evaluación de amenazas en la planificación territorial.**

<b>Nivel</b>	<b>Descripción</b>	<b>Municipios por categoría</b>	<b>Ejemplo de aplicación</b>
Nivel I. Información suficiente	Se cuenta con información de detalle y buena resolución tanto rural como urbana. Se utiliza información en escala de 1:2.000 ó 1:5.000.	Especial , 1 y 2	Pla Intermedio de planificación (PIP); Planes de ordenamiento Territorial(POT)-si se cuenta con la información
Nivel II. Información insuficiente	Este nivel de información se aplica en suelos suburbanos y rurales donde hay una mediana presión por el uso y ocupación de los suelos. Escala requerida 1:25.000	2 y 3	Plan de Ordenamiento Territorial-POT
Nivel III. Información escasa	Se aplica suelos rurales y municipios de baja densidad poblacional y fiscal (categorías 4 a 6; ver Tabla 7. Escala 1:25.000 o mayor	4 a 6	Plan de Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas;

Fuente: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín (2012)

#### **4.6. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza por deslizamiento en diferentes niveles territoriales**

Como se ha manifestado a lo largo del documento es necesario discriminar las metodologías según sea la categoría de los municipios como se ha propuesto en este trabajo. Por lo anterior se expondrá una metodología propuesta para el Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital Bogotá-Cundinamarca, que fue desarrollado por el experto Juan Pablo Londoño.

En la literatura técnica pueden encontrarse varios enfoques para el análisis de la susceptibilidad y amenaza frente a deslizamientos; heurísticos, basados en mapeo experto, estadísticos; de tipo cualitativo y cuantitativo. Las posibilidades de modelización están determinadas básicamente por los datos de entrada disponibles; los métodos dependen básicamente de la calidad e idoneidad de los datos.

La propuesta consiste en tres niveles de trabajo según el grupo al cual pertenece el municipio y cinco métodos (Tabla 12) para valorar la amenaza por deslizamiento, según los requerimientos de información y la complejidad de los procedimientos de cálculo.

**Tabla 12. Niveles de cálculo de amenaza por deslizamiento**

<b>Nivel (Grupo)</b>	<b>Métodos</b>	<b>Requerimientos de información</b>
Nivel 1	Observación directa	Bajos (visitas de campo)
	Zonificación heurística basada en criterio experto	Bajos
Nivel 2	Métodos heurísticos basados en datos	Medios
	Métodos Geotécnicos asociados a Factores de Seguridad	Medios
Nivel 3	Análisis Discriminante	Altos
	Redes Neuronales Artificiales	Altos

**4.6.1. Nivel 1. Métodos de zonificación con bajos niveles de información**

Los métodos clasificados en este nivel permiten la zonificación relativa de la amenaza por deslizamiento mediante la aplicación de calificaciones o pesos a partir de ciertos criterios de carácter general.

Requerimientos de información: La información requerida es mínima, e incluso puede obtenerse de una visita de campo a la zona por parte de un experto calificado.

**4.6.1.1. Método 1. Observación directa**

De manera empírica, cuando no exista información detallada, pueden establecerse grados de susceptibilidad de manera directa, mediante la observación del terreno y la valoración de un profesional en ciencias de la tierra. Como apoyo, la Tabla 13 muestra algunos criterios generales que permiten establecer grados subjetivos de susceptibilidad mediante observación.

**Tabla 13. Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a deslizamientos (Kanungo, 1993)**

<b>Grado de susceptibilidad</b>	<b>Criterio</b>
Muy Alta	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurran
Alta	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran
Moderada	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos pero no existe completa seguridad de que no ocurran
Baja	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados no saturados con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos
Muy baja	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos

Estas clases de susceptibilidad deben plasmarse en un mapa aproximado de zonas con iguales características. Tal zonificación puede lograrse mediante mapas base obtenidos de fuentes oficiales, o bien mediante levantamientos aproximados de contornos con la ayuda de GPS.

#### **4.6.1.2. Método 2: Zonificación heurística basada en criterio experto.**

Es un método heurístico, es decir, basado en pesos asignados con criterio experto. Por lo tanto, para la calificación de los diferentes parámetros se requiere la intervención de geólogos y geotecnistas con conocimientos sobre el comportamiento de los materiales del área de estudio.

El procedimiento de cálculo se basa en la valoración de la influencia relativa de seis factores que resumen las condiciones geológicas y topográficas-ambientales del terreno: litología, estructura y discontinuidades, morfometría de los taludes, relieve relativo, uso de la tierra y cobertura vegetal, y condiciones de aguas subterráneas. El método puede aplicarse mediante la realización de visitas de campo, siempre que las dimensiones del área de estudio lo permitan. En áreas extensas, se requiere como insumo los mapas aproximados de los factores. Los pesos sugeridos para la combinación de los factores se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14. Factores de inestabilidad y pesos correspondientes (Ambalagan, 1992)**

<b>Factor</b>	<b>Peso en el análisis</b>	<b>Sigla</b>
Litología	2	LIT
Estructura y discontinuidades	2	EST
Morfometría del talud	2	MRF
Relieve relativo	1	RRE
Uso de la tierra y cobertura vegetal	2	USO
Condiciones de aguas subterráneas	1	ASU
Total	10	

Tabla. Peso de los diferentes factores de acuerdo con Ambalagan (1992)

Como orientación se describen los pasos básicos para el desarrollo del método.

### **Paso 1. Elaboración de mapas por cada factor de inestabilidad**

Como paso inicial se divide el terreno, según cada uno de los seis factores, en sub-áreas que tengan características similares, y en lo posible se elabora un mapa por cada factor. Esta tarea se puede facilitar enormemente con el uso de sistemas de información geográfica y el formato ráster, sin embargo no es requisito indispensable y puede hacerse manualmente.

### **Paso 2. Valoración de la influencia de los factores de inestabilidad**

La valoración de cada factor individual sigue una métrica similar: se debe ponderar ciertas características para obtener un índice de influencia. En el sentido práctico, debe asignarse a cada subárea de cada mapa su peso correspondiente; una breve descripción de los criterios para asignar pesos se presentan en la Tabla 15.

**Tabla 15. Pesos de los diferentes factores a considerar en la evaluación de amenazas a deslizamientos (Ambalagan, 1992)**

FACTORES GEOLOGICOS				
Factor	Descripción	Categoría	Peso	Observaciones
Litología	Tipo de material	Tipo I		Muy meteorizada
		Cuarcita y Caliza	0.2	multiplicar por 4.
		Granito y Gaugo	0.3	Algo meteorizada
		Neiss	0.4	multiplicar por 3.
				Poco meteorizada
				multiplicar por 2.
		Tipo II		Muy meteorizada
		Areniscas	1.0	multiplicar por 1.5
		Areniscas con algo de lutitas	1.3	Algo meteorizada
				multiplicar por 1.25.
		Poco meteorizada		
		multiplicar por 1.1		
		Tipo III		
		Pizarra y Filita	1.2	
		Esquisto	1.3	
		Lutitas no arcillosas	1.8	
		Lutitas, esquistos o filitas muy meteorizadas.	2.0	
		Materiales aluviales antiguos muy bien consolidados	0.8	
		Suelos arcillosos	1.0	
		Suelos arenosos, blandos	1.4	
		Coluviones antiguos	1.2	
Coluviones jóvenes	2.0			
Estructura	Relación de paralelismo entre el talud y las discontinuidades	Más de 30°	0.20	Se mide el ángulo que forman la dirección del talud y la dirección de las discontinuidades más representativas.
		21° a 30°	0.25	
		11° a 20°	0.30	
		6° a 10°	0.40	
		Menos de 5°	0.50	
	Relación entre el buzamiento de las discontinuidades y la inclinación del talud	Más de 10°	0.3	Si el del buzamiento es mayor que el del talud el ángulo es positivo y si es menor que el del talud el ángulo es negativo.
		0° a 10°	0.5	
		0°	0.7	
		0° a -10°	0.8	
		Más de -10°	1.0	
	Buzamiento de la discontinuidad	Menos de 15°	0.20	
		16° a 25°	0.25	
		26° a 35°	0.30	
		36° a 45°	0.40	
		Más de 45°	0.50	
Espesor de la capa de suelo	Menos de 5 metros	0.65		
	6 a 10 metros	0.85		
	11 a 15 metros	1.30		
	16 a 20 metros	2.00		
	Más de 20 metros	1.20		

FACTORES TOPOGRAFICOS Y AMBIENTALES		
Factor	Categoría	Peso
Morfometría Pendiente de los taludes	Más de 45°	2.0
	36° a 45°	1.7
	26° a 35°	1.2
	16° a 25°	0.8
	Menos de 15°	0.5
Relieve relativo Diferencia de altura entre la divisoria de aguas y el valle	Menos de 100 metros	0.3
	101 a 300 metros	0.6
	Más de 300 metros	1.0
Uso de la Tierra	Area Urbana	2.00
	Cultivos anuales	2.00
	Vegetación intensa	0.80
	Vegetación moderada	1.20
	Vegetación escasa	1.50
	Terrenos áridos	2.00
Aguas subterráneas	Inundable	1.0
	Pantanosos	0.8
	Muy húmedo	0.5
	Húmedo	0.2
	Seco	0.0

### Paso 3. Ponderación de los factores

Una vez valorados los factores individuales, deben combinarse para obtener un mapa final de amenaza por deslizamientos.

El procedimiento se basa en la siguiente ecuación, derivada de la Tabla 14:

$$Amenaza = 2 * LIT + 2 * EST + 2 * MRF + RRE + 2 * USO + ASU$$

La aplicación es directa si se está utilizando un SIG y formatos ráster, mediante el "álgebra de mapas". En caso de hacerse manualmente, basta una superposición de mapas para obtener un mapa final ponderado.

A partir del resultado obtenido, debe clasificarse el área en una de las cinco clases de amenaza sugeridas en la Tabla 16.

Tabla 16. Asignación de categorías de amenaza según la suma de pesos

Amenaza Total	Descripción	Amenaza (suma de los pesos)
I	Amenaza muy baja	<3.5
II	Amenaza baja	3.5 - 5.0
III	Amenaza moderada	5.1 - 6.0
IV	Amenaza alta	6.1 - 7.5
V	Amenaza muy alta	>7.5



#### **4.6.2. Nivel 2. Método de zonificación con niveles medios de información**

En este apartado se han agrupado dos tipos de análisis diferentes: Metodologías heurísticas basadas en datos disponibles a escalas intermedias y asignación de coeficientes de importancia mediante juicio experto, y Métodos geotécnicos simplificados, basados en el cálculo de Factores de Seguridad.

##### **4.6.2.1. Método 3. Métodos heurísticos basados en datos**

Requerimientos de información

- ✓ Modelo digital de elevación del terreno
- ✓ Datos geotécnicos, o mapa de litología, o inspección en campo del área de estudio
- ✓ Precipitación promedio mensual o datos de evapotranspiración de la zona
- ✓ Mapa de distribución de intensidades sísmicas (opcional)
- ✓ Serie histórica de precipitaciones diarias

Se trata de metodologías que permiten a partir de información disponible, efectuar estimaciones de susceptibilidad y amenaza de una manera rápida, sencilla y poco costosa. De esta manera, es posible obtener datos cartográficos extensivos que indiquen las áreas con mayor tendencia a generar la amenaza de inestabilidad de laderas; podrán identificarse sectores con mayores problemas, dónde posteriormente, según las características del sitio y los recursos económicos disponibles, puedan aplicarse metodologías geotécnicas detalladas.

Como ejemplo de este tipo de metodologías se presenta el método de Mora y Vahrson (1993, 1994), en el cual, para determinar la amenaza frente a inestabilidad de laderas se utilizan cinco indicadores morfodinámicos, diferenciados en dos categorías principales:

Categoría 1: Factores de susceptibilidad

Son factores intrínsecos del terreno y constituyen elementos pasivos. Se trata del relieve del terreno, su constitución litológica y las condiciones de humedad natural.

Categoría 2: Factores de disparo

Son los factores externos que inducen los deslizamientos, tales como sismos o lluvias.

Para cada parámetro es posible definir un peso relativo que identifique su grado de influencia. La combinación de los factores puede llevarse a cabo mediante una ecuación sencilla:

$$Ad = Susc \cdot Disp$$

Ad: Amenaza de deslizamientos

Susc: parámetros de susceptibilidad (relieve, litología, humedad)

Disp: parámetros de disparo: intensidad sísmica y pluviométrica

$$Susc = R_r \cdot L \cdot H$$

Rr: índice de influencia del relieve relativo

L: índice de influencia de las condiciones litológicas

H: índice de influencia de la humedad usual del suelo

El parámetro de disparo Disp es la combinación de los índices de lluvias y de la sismicidad

$$Disp = S + Ll$$

S: índice de influencia de la intensidad sísmica máxima

Ll: índice de influencia de la intensidad de las lluvias

$$Ad = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (S + Ll)$$

Según las particularidades tectónicas y climáticas de determinada región, puede dársele prioridad a la consideración de determinado factor de disparo.

En el caso de las lluvias, el potencial generador de deslizamientos de la intensidad de las lluvias puede obtenerse de:

$$PDL = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (Ll)$$

Para el caso sísmico, el potencial generador de deslizamientos por la sismicidad puede obtenerse de:

$$PDS = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (S)$$

La escala de trabajo y resolución utilizada estará en función de los objetivos perseguidos y de la precisión de la cartografía disponible.

En cuanto se definan las condiciones y limitaciones de trabajo, podrá aplicarse la metodología ya sea mediante la combinación manual de los datos o utilizando un Sistema

de Información Geográfica para facilitar la combinación de información cartográfica y los cálculos correspondientes. A continuación se presentan los pasos detallados de cálculo.

**Paso 1: Cálculo del Índice de Relieve Relativo (Rr)**

Está basado en la rugosidad natural del terreno. Para el centro de cada unidad de área se calcula la diferencia de elevación según el mapa topográfico que se esté utilizando:

$$R_r = \frac{dh_{max}}{A}$$

Generalmente se expresa en m/km<sup>2</sup>; dh<sub>max</sub> es la mayor diferencia de elevación en el área A. La Tabla 17 sugiere los calificativos del parámetro Rr a utilizar según los valores de relieve relativo obtenidos.

**Tabla 17. Estimación del parámetro de relieve relativo Rr en el método de Mora y Vahrson**

Relieve Relativo m/km <sup>2</sup>	Calificativo	Valor del parámetro Rr
0 - 75	muy bajo	0
75 - 175	bajo	1
175 - 300	moderado	2
300 - 500	mediano	3
500 - 800	alto	4
>800	muy alto	5

**Paso 2: Estimación de la Influencia de la litología**

Este factor es uno de los más relevantes y a su vez, de los más difíciles de evaluar. La ausencia de datos geotécnicos cuantitativos debe sustituirse con la aplicación de calificativos subjetivos, basados en las descripciones sumarias de que se disponga. De manera ideal, tendría que disponerse de datos asociados a:

- Resistencia al corte del material (cohesión, fricción interna, grados de meteorización)
- Pesos volumétricos
- Disposición espacial, geometría, discontinuidades, orientación (diaclasas, esquistosidad, estratificación fallas, cuñas, diedros) tipos de relleno en las discontinuidades (calcita, ceolita, arcilla, fisuras limpias), rugosidad.

- Capacidad de drenaje, disipación rápida o no de la presión de poros, posición del nivel freático y zonas de saturación total o parcial; flujos hidrodinámicos

La Tabla 18 muestra un ejemplo de las condiciones litológicas típicas. Los calificativos e índices de influencia se definen subjetivamente a partir de la experiencia. Para cada región en particular deben revisarse las litologías existentes y definir los índices correspondientes

**Tabla 18. Estimación del parámetro asociado a litología en el método de Mora y Vahrson**

<p>✓ Valor L=1; calificativo BAJA SUSCEPTIBILIDAD</p> <p>Litologías: Aluvión grueso, permeable, compacto, nivel freático bajo.</p> <p>Calizas duras, permeables. Rocas intrusivas poco fisuradas, bajo nivel freático. Basaltos, andesitas y otras rocas efusivas, sanas, permeables y poco fisuradas. Rocas metamórficas sanas, poco fisuradas, nivel freático bajo. Características físico mecánicas: materiales sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia al corte elevada, fisuras sanas, sin relleno.</p>
<p>✓ Valor L=2; Calificativo MODERADA SUSCEPTIBILIDAD</p> <p>Litologías: Rocas sedimentarias no o muy poco alteradas, estratificación maciza (decimétrica o métrica), poco fisuradas, nivel freático bajo.</p> <p>Rocas intrusivas, calizas duras, lavas, inimbritas, rocas metamórficas medianamente alteradas y fisuradas. Aluviones con compactaciones leves, con proporciones considerables de finos, drenaje moderado, nivel freático a profundidades intermedias. Características físico mecánicas: Resistencia al corte media a elevada, fracturas cizallables.</p>
<p>✓ Valor L=3; Calificativo: MEDIANA SUSCEPTIBILIDAD</p> <p>Litologías: Rocas sedimentarias, intrusivas, lavas, ignimbritas, tobas poco soldadas, rocas metamórficas mediana a fuertemente alteradas, coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados, drenaje poco desarrollado, niveles freáticos relativamente altos.</p> <p>Características físico mecánicas: resistencia al corte moderada a media, fracturación importante.</p>
<p>✓ Valor L=4; Calificativo: ALTA SUSCEPTIBILIDAD</p> <p>Litologías: Aluviones fluvio lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y fracturadas con estratificaciones y foliaciones a favor de la pendiente y con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.</p> <p>Características físico mecánicas: resistencia al corte moderada a baja, con la presencia frecuente de arcillas.</p>
<p>✓ Valor L=5; Calificativo: MUY ALTA SUSCEPTIBILIDAD</p> <p>Litologías: Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados.</p> <p>Características físico mecánicas: resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.</p>

### **Paso 3. Estimación de la Humedad del suelo**

La mejor manera de determinar la humedad del suelo es por medio de mediciones directas en campo. En ausencia de estas mediciones, la humedad puede determinarse mediante

balances hídricos estimativos. A continuación se presenta una forma simplificada de balance que solo requiere como dato de entrada de la precipitación promedio mensual.

Como primer paso, se categorizan los promedios mensuales (sobre todos los datos de registro) según la clasificación de la Tabla 19

**Tabla 19. Clasificación de los promedios mensuales máximos de precipitación**

Promedios mensuales máximos	Susceptibilidad
< 125	0
125 – 250	1
>250	2

Se suman los doce valores asignados a cada mes en una estación y se llega a un valor acumulado entre 0 y 24, el cual se clasifica en cinco grupos según la Tabla 20

**Tabla 20. Determinación del parámetro de humedad en el método de Mora y Vahrson**

Promedios mensuales máximos	Calificativo	Susceptibilidad
0 – 4	muy bajo	1
5 – 9	bajo	2
10 – 14	medio	3
15 – 19	alto	4
20 - 24	muy alto	5

Si se dispone de más y mejores datos, puede sustituirse el límite de 125 en la tabla anterior, por la evapotranspiración promedio mensual en las zonas de estudio.

#### **Paso 4a. Influencia de la actividad sísmica**

La Tabla 21 muestra una correlación entre la intensidad (Mercalli Modificada) y los índices de influencia de la sismicidad, definiendo 10 clases para cada situación específica. Dado que la información más abundante y confiable es la de la intensidad MM, se recomienda utilizarlas bajo la forma de mapas de máximos históricos, corregidos de la intensidad relativa a un período de recurrencia de 100 años.

**Tabla 21. Estimación de la influencia de la actividad sísmica en el método de Mora y Vahrson**

<b>Intensidades (Mercalli Modificada)</b>	<b>Calificativo</b>	<b>Valor parámetro S</b>
III	leve	1
IV	muy bajo	2
V	bajo	3
VI	moderado	4
VII	medio	5
VIII	elevado	6
IX	fuerte	7
X	bastante fuerte	9
XI	extremadamente fuerte	10

#### **Paso 4b. Lluvias intensas**

Se utiliza un índice basado en la información de las lluvias máximas en 24 horas. Los pasos para obtener este índice son:

Determinar, para todas las estaciones disponibles, la serie de los valores máximos diarios anuales.

Para registros de menos de 10 años calcular el promedio aritmético. Para otros registros, calcular con el método de Gumbel, la precipitación máxima para un período de retorno de 100 años.

Asignar el valor del parámetro L1 según la Tabla 22

**Tabla 22. Determinación del parámetro LI de lluvias intensas en el método de Mora y Vahrson**

Lluvias máximas n > 10 años; Tr = 100 años (mm)	Lluvias máximas n < 10 años; promedio (mm)	Calificativo	Valor del parámetro LI
< 100	< 50	muy bajo	1
100 – 200	50 – 90	bajo	2
201 – 300	91 – 130	medio	3
301 – 400	131 – 175	alto	4
>400	>175	muy alto	5

**Paso 5. Determinación de la amenaza por deslizamientos**

Según las fórmulas utilizadas y los valores de parámetros sugeridos, se pueden obtener valores máximos de 1875 unidades al considerar todos los elementos intervinientes, mediante la fórmula

$$Ad = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (S + LI)$$

Si se determinan por separado las susceptibilidades, pueden obtenerse valores máximos de 625 para lluvias, utilizando la ecuación

$$PDL = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (LI)$$

y 1250 para el caso sísmico, mediante la formulación

$$PDS = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (S)$$

Estos valores deben clasificarse en rangos de amenaza. La Tabla 23 muestra una clasificación de niveles de amenaza particular. Ésta clasificación puede redefinirse según los valores obtenidos en cada área de estudio específica.



**Tabla 23. Rangos de amenaza por deslizamientos por el método de Mora y Vahrson**

Ad	Clase	Grado de amenaza
0 – 6	I	muy bajo
6 – 32	II	bajo
32 – 162	III	moderado
162 – 512	IV	mediano
513 – 1250	V	alto
>1250	VI	muy alto

#### **4.6.2.2. Método 4. Métodos Geotécnicos asociados a Factores de Seguridad**

Es común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El Factor de Seguridad es empleado en ingeniería geotécnica para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento. Cabe aclarar que el término “falla” usado en la práctica ingenieril, es referente a un comportamiento de un talud tal que las deformaciones son excesivas, o bien que se produce una rotura.

En términos generales, el factor de seguridad se define como:

$$FS = F_{res} / F_{act}$$

Es decir, como la relación entre las fuerzas resistentes  $F_{res}$  (que se oponen al deslizamiento) y las fuerzas actuantes  $F_{act}$  (que inducen el deslizamiento).

Y en términos de esfuerzos quedaría como:

$$FS = \tau_{res} / \tau_{act}$$

Donde  $\tau_{res}$  y  $\tau_{act}$  son los esfuerzos resistentes y actuantes, respectivamente.

Existen varios métodos que utilizan esta métrica de Factores de Seguridad mediante simplificaciones que permiten su utilización en áreas extensas con el apoyo de sistemas de información geográfica o software específico. Tal es el caso de la plataforma ERN-Deslizamientos, integrada en el sistema CAPRA; allí se integran tres métodos basados en factores de seguridad, que pueden aplicarse siempre que se disponga de datos suficientes.:

Análisis Regional de Newmark para deslizamientos inducidos por sismos, Mecanismo de falla traslacional o falla plana y Mecanismo de falla rotacional.

Se emplean en términos generales como datos de entrada el Modelo digital de Elevaciones y el Mapa de aceleración sísmica de la zona. Adicionalmente, se requiere para cada método la siguiente información específica:

Método de Newmark: Cohesión, Ángulo de fricción, Peso unitario del suelo potencialmente deslizable, Espesor del estrato deslizable, Desplazamientos permisibles (de Newmark).

Mecanismo de falla traslacional: Cohesión, Ángulo de fricción, Peso unitario del suelo, Espesor del estrato deslizable.

Mecanismo de falla rotacional: Cohesión de la roca o basamento, Cohesión del suelo, Ángulo de fricción del suelo, Ángulo de fricción de la roca o basamento, peso unitario del suelo y peso unitario de la roca o basamento.

El procedimiento para aplicar estos métodos está descrito minuciosamente en los archivos de ayuda del programa ERN-Deslizamientos y la plataforma CAPRA<sup>23</sup>. Los resultados finales de su aplicación son mapas de zonificación de susceptibilidad, obtenida como el inverso de los factores de seguridad calculados.

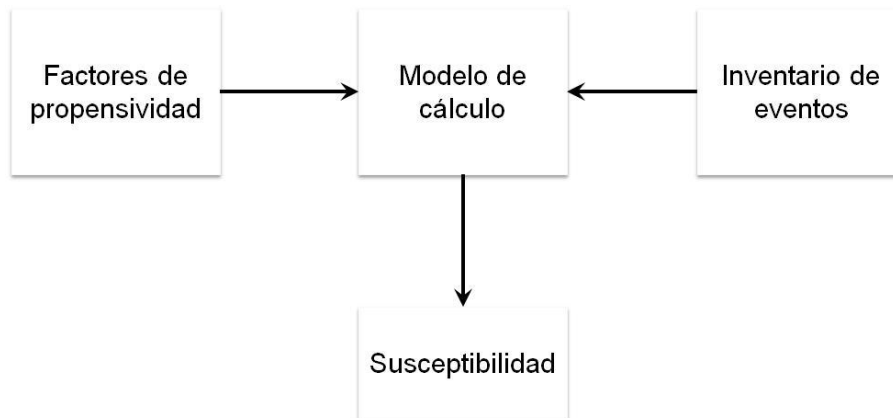
---

<sup>23</sup> [www.ecapra.org](http://www.ecapra.org)

#### **4.6.3. Nivel 3. Métodos de zonificación con niveles altos de información.**

En este nivel se agrupan dos métodos que requieren procedimientos de cálculo de mayor complejidad y mayor cantidad de datos de entrada: el Análisis Discriminante de la estadística clásica y las Redes Neuronales Artificiales. Al tratarse de modelos calibrados a partir de datos (data driven models) presentan la ventaja de representar mejor el fenómeno y obtener niveles de zonificación contrastados con la realidad.

El supuesto principal que se utiliza para el proceso de modelización es que los deslizamientos futuros tendrán lugar bajo condiciones similares a los deslizamientos pasados. El esquema general de estos métodos se presenta en la Figura 12. Se trata de obtener interrelaciones entre los factores de propensividad a la inestabilidad, conociendo las características de zonas donde han ocurrido eventos previamente. Adicionalmente, se supone que **todos** los factores de propensividad importantes son conocidos y están incluidos en la base de datos y **todos** los eventos de inestabilidad se encuentran debidamente registrados en el inventario.



**Figura 12. Esquema general de cálculo para los modelos de Nivel 3. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**

El esquema conceptual se presenta en la Figura 13. Los modelos de cálculo de Nivel 3 permiten obtener una susceptibilidad de inestabilidad, representada en una zonificación de la "probabilidad" espacial de inestabilidad de laderas, valorada numéricamente mediante una función acotada en el rango entre cero (0) o estable y uno (1) o inestable.

La incorporación del componente temporal (frecuencia) viene asociada al factor detonante, representado por la actividad sísmica o la pluviometría. Cuando existe disponibilidad de datos suficientes, es posible mediante análisis de precipitaciones, obtener mapas de factor detonante asociado a períodos de retorno, o bien mapas de intensidades sísmicas, para ser combinados con la susceptibilidad, obteniendo mapas de amenaza. Para áreas con

extensiones contenidas, la diferencia entre mapas de susceptibilidad y amenaza es mínima dada la poca variabilidad espacial de los factores detonantes.

La implementación de estos métodos requiere el uso de Sistemas de Información Geográfica y el formato de datos ráster para posibilitar las operaciones matemáticas necesarias.

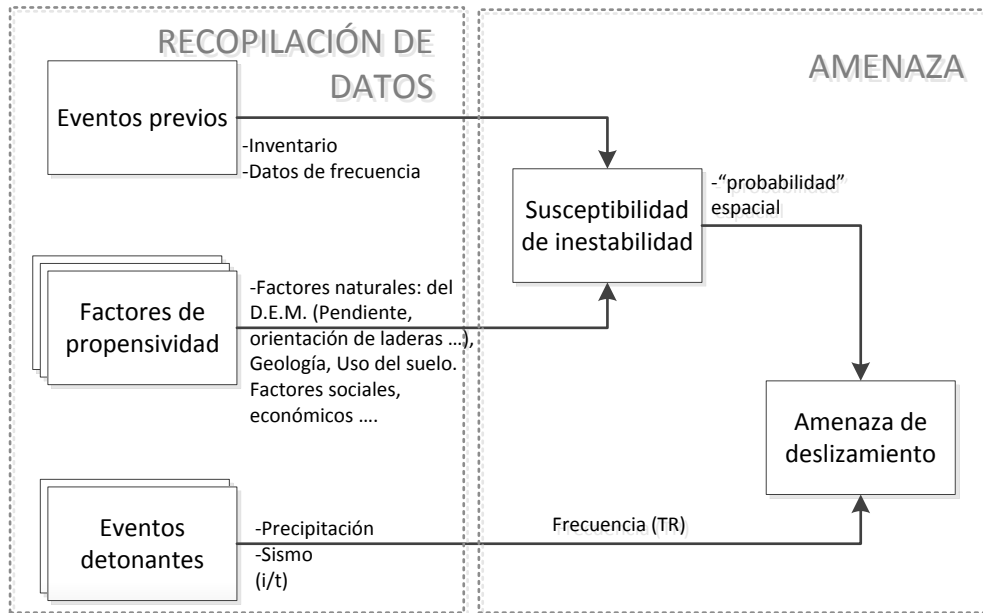


Figura 13. Esquema conceptual para el cálculo de la amenaza por deslizamientos en el nivel 3 (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

## Requerimientos de información

### a. Inventario de eventos previos:

Como información básica en estos métodos, se requiere un inventario de deslizamientos de la zona de estudio, que como mínimo, represente mediante puntos la ubicación exacta de los eventos previos ocurridos.

### b. Factores de propensividad:

Aquí se agrupan todos los factores intrínsecos que determinan que una zona sea propensa a sufrir inestabilidad y puedan cuantificarse y representarse en un mapa. La cantidad de factores dependerá de la información disponible en la zona. La

Tabla 24 sugiere algunos factores generales que son ampliamente conocidos y pueden estar disponibles en diversas zonas. En la medida en que se disponga de mayor información, puede extenderse el número de factores a utilizar.

**Tabla 24. Factores generales de propensividad a la inestabilidad de laderas**

	Factor Causal	Tipo	Descripción
dem	Modelo digital de elevaciones	Derivados de la topografía	Elevación del terreno en metros sobre el nivel del mar
slop	Pendiente	Derivados de la topografía	Pendiente de cada píxel de terreno en grados
aspe	Orientación de las laderas	Derivados de la topografía	Orientación de cada celda del terreno respecto al norte geográfico. La orientación de las laderas y la dinámica pluviométrica de la zona determina diferencias de humedad en el terreno
inso	Insolación incidente en el terreno	Derivados de la topografía	Es un mapa que esquematiza el patrón de radiación solar o insolación que llega a determinada zona. Influye en los niveles de humedad del terreno
dfal	Distancia a fallas y lineamientos	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta la falla geológica más cercana
dvia	Distancia a vías y carreteras	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta la vía más cercana
drio	Distancia a ríos y cauces	Distancia a elementos clave	Distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el cauce, quebrada o río más cercano
geol	Mapa geológico	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de Geología
usos	Mapa de coberturas o usos del suelo	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de cobertura del terreno
mpar	Material parental	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de material parental en la cuenca
geom	Procesos geomorfológicos	Suelos/Geología	Mapa reclasificado de procesos geomorfológicos en la cuenca

Uno de los factores básicos que merece especial atención es la topografía, plasmada en el modelo digital de elevaciones del terreno DEM, de cuya resolución dependerá la calidad de los resultados a obtener. Generalmente el DEM es un dato bastante frecuente en los diferentes municipios; no obstante, a falta de un mejor mapa (con mayor

resolución/precisión) elaborado por expertos locales, puede obtenerse uno de manera gratuita, con resolución de 30m x 30m a partir del proyecto NASA-GDEM, de la Agencia Espacial de los Estados Unidos en equipo con el Gobierno del Japón. El DEM es el primer paso para derivar mediante operaciones SIG otros mapas de interés como la Pendiente, Orientación de Laderas e Insolación.

El proceso para obtener un mapa de elevaciones es entrar a la web <http://reverb.echo.nasa.gov/> registrarse y acceder al conjunto de mapas denominado ASTER Global Digital Elevation Model V002 y desde allí, señalar el área de interés y solicitar los correspondientes mapas.

Los mapas de tipo categórico deben reclasificarse en categorías según el mayor o menor aporte de cada categoría a la susceptibilidad a deslizamientos y posteriormente deben convertirse en datos numéricos mediante la asignación de pesos a dichas categorías.

### **Extracción de la muestra de datos para los análisis**

La aplicación de estos métodos se hace a partir de una muestra de datos que debe extraerse conociendo principalmente la localización de los deslizamientos previos ocurridos en el área (inventario de deslizamientos). El número de puntos del inventario se utiliza para estimar el tamaño total de la muestra, que será el doble de los puntos con deslizamientos. El procedimiento para la configuración de la muestra es el siguiente:

- Dado el número de puntos del inventario se establece el tamaño de la muestra como el doble de este valor.
- Se crea un buffer de 50m alrededor de los puntos con deslizamiento.
- En el área de estudio restante (a excepción del buffer) se ubican aleatoriamente un número de puntos igual a la cantidad de puntos con deslizamientos previos. Se requiere tener en la muestra una porción de terreno estable (que en este caso se asume como cualquier punto del terreno donde no se tienen registrados deslizamientos previos).
- Se crea una capa (shape) con los puntos del inventario de deslizamientos (zona inestable) y los puntos estables, asignando un campo denominado SUSC, que en el primer caso será igual a 1 y en el segundo a 0. Este shape constituirá la muestra de análisis.
- Teniendo en un mismo proyecto de SIG todos los mapas ráster correspondientes a los factores causales de susceptibilidad y el shape correspondiente a la muestra de análisis, se extraen los valores correspondientes a cada uno de los factores causales en los puntos de la muestra de análisis.
- Los datos así obtenidos se exportan a una hoja de cálculo en forma de matriz, con un número de filas igual al número de datos de la muestra y un número de columnas



casos estables de los inestables. Esta combinación de variables es conocida como función discriminante y tiene la siguiente forma:

$$d_i = b_0 + b_1x_{j1} + \dots + b_px_{jp}$$

Donde

- $d_i$  es el valor de la función discriminante para el caso  $i$   
 $P$  es el número de predictores  
 $b_j$  es el valor del  $j$ -ésimo coeficiente de la función  
 $x_{ij}$  es el valor del caso  $i$ -ésimo para el predictor  $j$

### **Paso 1. Selección de variables**

Descripciones completas del método pueden encontrarse en Baeza (1996) y Santacana (2001, 2003). En términos generales un primer paso es hacer un análisis de correlaciones para remover las variables redundantes (altamente correlacionadas) que existan. La matriz de correlaciones ofrece una visión de la interrelación entre los factores de entrada. Se debe prestar especial atención a las variables con coeficientes de correlación mayores a 0.5. Debe tomarse nota de los pares de variables que presentan alta correlación.

El test de igualdad de medias entre grupos mide el potencial de cada variable independiente antes de crear el modelo. Este test debe elaborarse utilizando como variable de agrupación la variable binaria correspondiente a presencia/ausencia de deslizamientos. Si el valor de significancia estadística es mayor a 0.10, la variable en cuestión probablemente no contribuya al modelo. Los valores lambda de Wilks son otra medida del potencial de la variable, así como los coeficientes F de Fisher; valores de Wilks pequeños y F altos son deseables.

Las variables cuya significancia estadística esté por encima de 0.10 deben descartarse del análisis, pues su influencia en la discriminación de zonas estables e inestables es mínima.

La correlación de los predictores o colinealidad se evalúa calculando la matriz de covarianza entre grupos. Las variables con correlaciones altas deben resaltarse para su posterior análisis.

Las variables correlacionadas pueden incluirse juntas en un primer modelo para posteriormente ir probando diferentes modelos quitando algunas de ellas. Finalmente, el modelo con mejor ajuste a los datos (mayor capacidad predictiva) será el indicador de qué variables conservar.



## **Paso 2. Estimación de funciones de susceptibilidad**

Con las variables finales obtenidas después de descartar aquellas con menor influencia, es posible empezar a obtener funciones mediante el análisis discriminante. El resultado de este tipo de métodos son unos coeficientes asociados a cada factor, que permiten ensamblar una ecuación lineal de la forma

$$\text{FunciónSusceptibilidad} = b_{0k} + b_{1k}x_{j1} + \dots + b_{pk}x_{ip}$$

Mediante un SIG puede calcularse un mapa correspondiente a la función así obtenida para toda el área de estudio. Este proceso puede repetirse tantas veces como modelos deseen probarse.

## **Paso 3. Estimación del rendimiento de los modelos**

Para establecer una medida del ajuste de cada modelo se sigue el siguiente procedimiento:

A partir de la muestra de datos inicial, se extraen los valores de susceptibilidad correspondientes a cada modelo. Valores superiores a 0.5 corresponden a terreno con susceptibilidad y valores menores, a terreno estable. Con estos datos es posible establecer matrices que den cuenta de los grados de ajuste del modelo en cuanto a clasificación correcta de deslizamientos (sensibilidad), de zonas estables (rendimiento) y al total de ajuste del modelo (precisión). Con estos tres criterios es posible analizar cuál de los modelos probados es el mejor. Es preferible obtener un modelo con mayor sensibilidad que clasifique correctamente la mayor cantidad de deslizamientos.

El mejor modelo así obtenido constituye el mapa de susceptibilidad a deslizamientos de la zona de estudio.

### **4.6.3.2. Método 6. Redes Neuronales Artificiales**

Un modelo de caja negra, basado en Redes Neuronales Artificiales (RNAs) ofrece un rendimiento satisfactorio para modelar problemas multivariados no lineales.

La arquitectura de red neuronal artificial a utilizar debe ser un perceptrón multicapa, con dos capas intermedias, la capa de entrada corresponde a los factores causales y la capa de salida a los valores de susceptibilidad a deslizamientos, que estarán acotados en el intervalo [0, 1].

El algoritmo para el tratamiento del error en el modelo a utilizar es el de propagación de error hacia atrás (backpropagation).

La RNA debe entrenarse para identificar patrones de correlación entre los factores de propensividad que producen una salida deseada (deslizamientos o estabilidad). El modelo ajusta los pesos de las conexiones entre nodos mediante el aprendizaje de cada patrón de entrenamiento compuesto por las variables de entrada y salida correspondiente. Los factores de entrada corresponden a todos los factores causales descritos anteriormente, la presencia/ausencia de deslizamientos (inventario) corresponde a la capa de salida, y se tienen dos capas intermedias para calibrar los pesos.

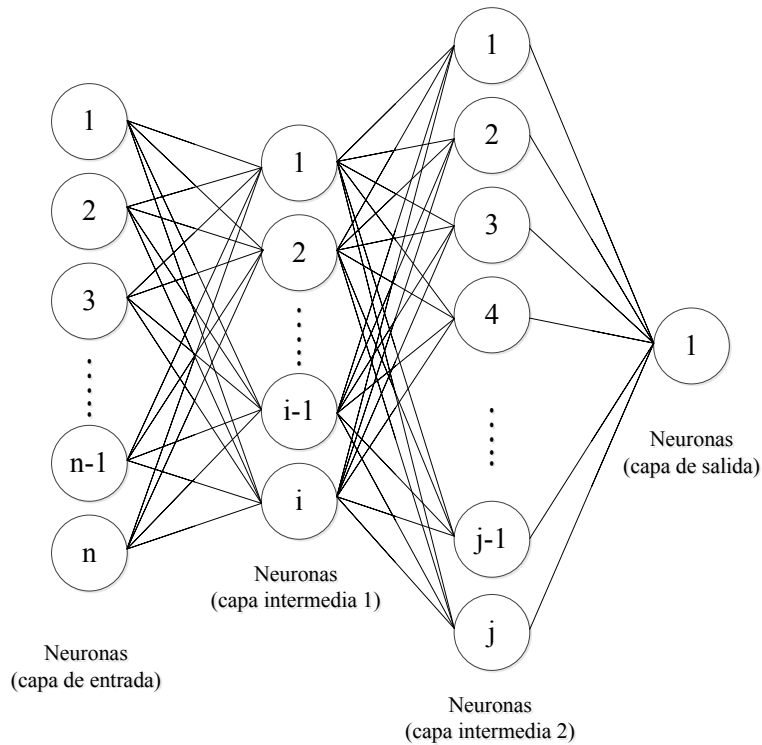


Figura 15. Topología de la RNA para susceptibilidad a deslizamientos (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II).

### Paso 1: Selección de datos de entrenamiento, validación y test

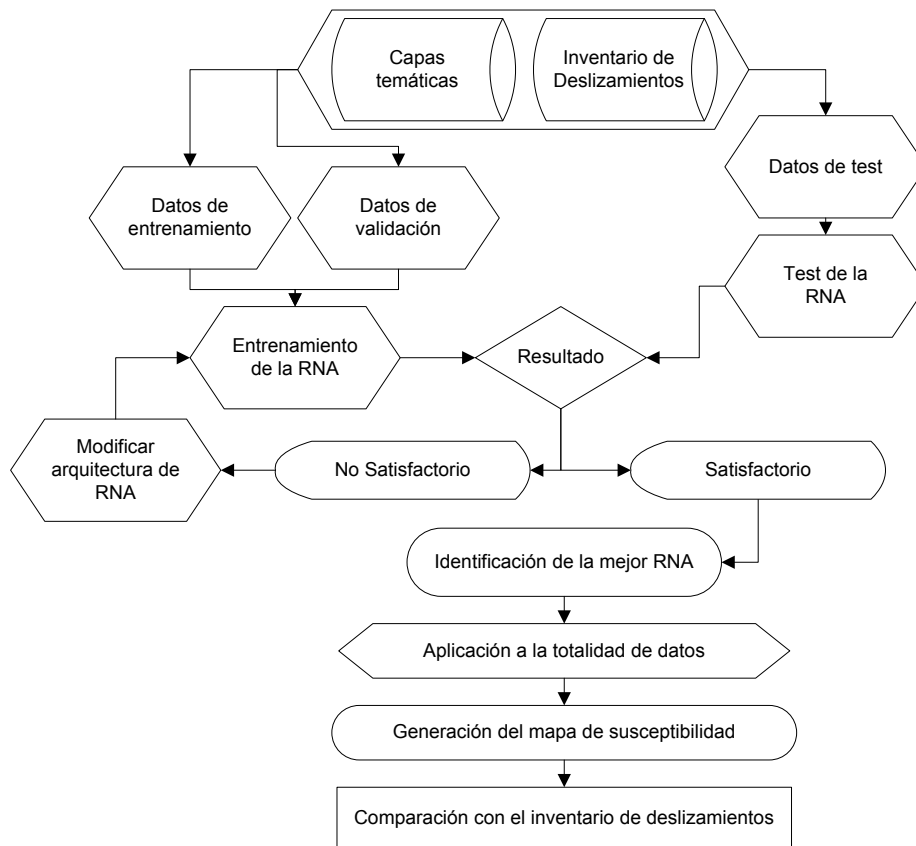
El proceso de cálculo sigue el diagrama mostrado en la Figura 16. Los datos disponibles son divididos en tres grupos: entrenamiento, validación cruzada y test. Los datos de entrenamiento son utilizados para ajustar los pesos del modelo; los datos de validación cruzada se utilizan para detener el proceso de entrenamiento y evitar el efecto de memorización; y los datos de test se utilizan para medir el rendimiento en cuanto a capacidad de clasificación del modelo. La proporción de datos en los grupos es: 60% para entrenamiento, 20% para validación cruzada, y 20% para test.

En casos de insuficiencia de datos, el modelo obtenido puede presentar sensibilidad a la distribución de los grupos de datos mencionados. Para prevenir esta situación se deben evaluar como mínimo cinco modelos diferentes, cambiando la asignación de grupos como se muestra en la

Tabla 25. Dependiendo la longitud de la muestra de datos, este número de modelos puede incrementarse, manteniendo una distribución de datos proporcional.

**Tabla 25. Distribución de datos en grupos para configurar modelos de RNA**

	<b>RNA01</b>	<b>RNA02</b>	<b>RNA03</b>	<b>RNA04</b>	<b>RNA05</b>
20%	Entrenamiento	Test	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento
20%	Entrenamiento	Entrenamiento	Test	Validación	Entrenamiento
20%	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento	Test	Validación
20%	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento	Test
20%	Test	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento



**Figura 16. Proceso de modelización mediante RNAs (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**

## **Paso 2: Implementación de diferentes modelos y estimación del valor medio de susceptibilidad**

A partir de la distribución de datos sugerida en la

Tabla 25 se deben elaborar y entrenar diferentes modelos de redes neuronales. Cada modelo neuronal debe aplicarse al área de estudio completa para obtener un modelo/mapa de susceptibilidad en cada caso.

Una vez obtenidos los modelos, se debe obtener un modelo medio que los agrupe mediante un promedio aritmético y estimar la desviación estándar correspondiente. Este modelo medio constituye el mapa de susceptibilidad a deslizamiento por este método.

El anexo II ilustra varios ejemplos con diferentes métodos para evaluar la susceptibilidad por deslizamiento; trabajo realizado por el experto Juan Pablo Londoño.

### **4.7. Propuesta metodológica para la evaluación de la amenaza por inundaciones con diferentes niveles de complejidad.**

Esta propuesta da lineamientos para la construcción de modelos de inundación que permitan generar zonas de amenaza en el territorio de análisis, propuesta que fue realizado para el Plan Regional Integral de Cambio Climático (PRICC) en la región capital por el experto Gabriel Andrés Bernal

En el desarrollo de evaluaciones de amenaza por inundación, es posible seleccionar modelos o metodologías diferentes a las aquí consignadas, siempre y cuando se garantice que se obtienen resultados del mismo tipo.

#### **Alcance**

La Biblioteca Virtual Andina para la Prevención y Atención de Desastres (BiVa-PaD) define las siguientes clases de inundación típicas del territorio colombiano:

##### *1. Inundación de tipo aluvial (inundación lenta)*

Se produce cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una gran cuenca, generando un incremento paulatino de los caudales de los grandes ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento; se produce entonces el desbordamiento y la inundación de las áreas planas aledañas al cauce principal. Las crecientes así producidas son inicialmente lentas y tienen una gran duración.

##### *2. Inundación de tipo torrencial (inundación súbita):*

Producida en ríos de montaña y originada por lluvias intensas. El área de la cuenca aportante es reducida y tiene fuertes pendientes. El aumento de los caudales se produce cuando la cuenca recibe la acción de las tormentas durante determinadas épocas del año, por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración.

### 3. *Encharcamiento:*

Fenómeno a causa de la saturación del suelo, caracterizado por la presencia de láminas delgadas de agua sobre la superficie del suelo en pequeñas extensiones y por lo general, presente en zonas moderadamente onduladas a planas. El fenómeno puede durar desde pocas horas hasta unos pocos días.

Los modelos acá consignados se dividen en dos grandes grupos, en función del tipo de inundación que atienden. El primer grupo permite modelar inundaciones aluviales o torrenciales y el segundo inundaciones por encharcamiento. Todos los modelos propuestos en este instructivo son abstracciones de la realidad física de los fenómenos hidrológicos e hidráulicos que tienen lugar en el desarrollo de una inundación. Se trata de un conjunto de modelos que pueden ser interconectados para obtener un resultado específico, y cuya selección depende en gran medida de las características del sistema bajo análisis, así como del criterio del profesional o profesionales a cargo de la modelación.

#### **Acerca de los modelos**

La modelación de la amenaza por inundaciones puede realizarse de diversas maneras. En términos generales, los modelos pueden clasificarse en *físicos* y *abstractos*. Los modelos físicos se subdividen en *modelos a escala* y *modelos análogos*. Los modelos a escala son representaciones de laboratorio de las condiciones físicas de un sistema, mientras que los modelos análogos emplean otros sistemas dinámicos (circuitos eléctricos, por ejemplo) para establecer simulaciones del comportamiento del sistema bajo análisis.

Los modelos abstractos están constituidos por relaciones matemáticas que transforman una información de entrada en datos de salida que corresponden a características de potenciales inundaciones. Pueden estar basados en características físicas del sistema, o simplemente contener funciones de transformación calibradas con datos observados de entrada y salida en un sistema hidrológico. Las variables de entrada y salida de los modelos abstractos pueden tener representación espacial y temporal, y pueden ser escalares o aleatorias.

Cuando las variables de entrada y salida son valores escalares, el modelo es *determinista*, lo cual implica que ante una misma entrada, el modelo genera siempre la misma salida. Por otra parte, un modelo es *estocástico* cuando las variables de entrada y salida, o algún subconjunto de ellas, son variables aleatorias definidas por una distribución de probabilidad conocida.

Las clases presentadas anteriormente aplican en términos generales a todos los modelos de amenaza por inundaciones. No obstante, se define una clasificación adicional, de primer

nivel, con el fin de darle mayor cobertura y aplicabilidad a lo propuesto en este instructivo. En ese sentido, los modelos pueden clasificarse como de *susceptibilidad* o de *amenaza*. Los modelos de susceptibilidad son modelos abstractos que toman características morfológicas, geológicas e hidrológicas del territorio para establecer zonas en donde es posible que se presenten inundaciones. Por otra parte, los modelos de amenaza se basan en modelos abstractos para pronosticar inundaciones a partir de la transformación de datos de entrada (lluvias) en variables físicas de la severidad del fenómeno (extensión, profundidad, velocidad o duración). Adicionalmente, los modelos de amenaza tienen representación en el dominio de la frecuencia, entregando resultados en términos de periodos de retorno.

#### **4.7.1. Parámetros para la selección de los modelos**

Los modelos acá consignados se agrupan en 3 niveles en función de la cantidad y calidad de la información que requieren, así como de la necesidad de aplicar procedimientos especializados. Estos tres niveles corresponden a los tres grupos de municipios definidos en la anteriormente.

La selección del modelo adecuado debe hacerse en función de las características del sistema que se esté analizando, el tipo de inundación predominante y la clasificación de municipios en los tres grupos antes mencionados.

En general, para los 6 tipos de municipios, y dependiendo del tipo de inundación, deben seleccionarse, como mínimo, modelos con el nivel de complejidad indicado a continuación (ver tabla Tabla 26).

**Tabla 26 Relación entre la categoría del municipio y el nivel de complejidad**

<b>Categoría del municipio</b>	<b>Nivel de complejidad</b>
1	3
2	3
3	2
4	2
5	1
6	1

##### **4.7.1.1. Nivel 1:**

Corresponde a un nivel de complejidad bajo, en el cual se aplican modelos de *susceptibilidad* con información general básica. Los modelos incluidos en este nivel son:

*Para inundaciones aluviales o torrenciales:* Delimitación de la ronda hídrica.

*Para inundaciones por encharcamiento:* Susceptibilidad topográfica.

#### **4.7.1.2. Nivel 2:**

Corresponde a un nivel de complejidad intermedio, en el cual se aplican modelos de *amenaza* con un nivel de información general más refinado. Los modelos incluidos en este nivel son:

*Para inundaciones aluviales o torrenciales:*

- Precipitación: tormentas estocásticas
- Volúmenes de flujo: Factores de escurrimiento
- Lluvia-escorrentía: Hidrograma triangular
- Inundación: 1D para aluvial o torrencial

*Para inundaciones por encharcamiento:*

- Precipitación: tormentas estocásticas con distribución espacial
- Volúmenes de flujo: Factores de escurrimiento
- Susceptibilidad topográfica

#### **4.7.1.3. Nivel 3:**

Corresponde a un nivel de complejidad alto, en el cual se aplican modelos de *amenaza* con un nivel de información detallado. Los modelos incluidos en este nivel son:

*Para inundaciones aluviales o torrenciales:*

- Precipitación: tormentas estocásticas con distribución temporal
- Volúmenes de flujo: Factores de escurrimiento
- Lluvia-escorrentía: Clark modificado
- Inundación: 2D para aluvial, 1D para torrencial

*Para inundaciones por encharcamiento:*

- Precipitación: tormentas estocásticas con distribución espacial
- Volúmenes de flujo: Factores de escurrimiento
- Susceptibilidad topográfica

#### **4.7.1.4. Requerimientos de información**

En el caso de los procedimientos de nivel de complejidad 1, los cuales son exclusivamente para determinar la susceptibilidad a inundaciones, se requiere únicamente de un modelo digital de elevaciones.

En el caso de los procedimientos de nivel de complejidad 2, los cuales se emplean para calcular amenaza, se requieren las siguientes capas de información:

- Modelo Digital de Elevación.
- Registros de precipitación diaria. Es deseable contar con registros intra-diarios.
- Cobertura vegetal.
- Usos del suelo.
- Zonificación geotécnica.

### **Modelo digital de elevación**

El modelo digital de elevación es una representación raster de la topografía del terreno, mediante una malla de valores en la cual el valor en cada pixel corresponde a la elevación topográfica del sitio. Esta información puede obtenerse de las siguientes fuentes:

- Cartografía IGAC. En corredores aluviales con bajo nivel de confinamiento, las estrategias de análisis geoespacial basadas en MDE deben apoyarse en la representación vectorial de redes de drenaje como las disponibles en la bases de datos de Instituto Geográfico Agustín Codazzi, o producto de planes de actualización de redes hídricas por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales.
- Bases de datos internacionales. Las principales fuentes de información digital corresponden a la misión satelital ASTER<sup>24</sup>, cuyos productos cuentan con una resolución espacial de aproximadamente 30m. Adicionalmente, la misión satelital SRTM<sup>25</sup>, provee información con resolución espacial de 90m, los cuales son relativamente adecuados para la delimitación de rondas geomorfológicas en tramos con anchos superiores a 30m. Asimismo, la misión SRTM provee, con mayor restricción, modelos de elevación con resolución de 30 m que dependiendo de la región pueden tener mejor calidad que la de aquellos correspondientes a la misión ASTER.

### **Registros de precipitación diaria o intra-diaria**

Los registros de precipitación deben ser completos y concurrentes para un periodo de no menos de 15 años, y para por lo menos 5 estaciones dentro de la cuenca o zona de análisis. Esta información puede obtenerse de las siguientes fuentes:

---

<sup>24</sup> <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>

<sup>25</sup> <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>



- Registros pluviométricos de precipitación en la región de análisis. Para obtener esta información deben consultarse localmente las entidades que sean propietarias de estaciones pluviométricas. Particularmente debe consultarse con la Corporación Autónoma Regional correspondiente.
- Precipitación derivada de sensores remotos. En caso que no esté disponible o no exista la información pluviométrica requerida para la zona de análisis, puede usarse la información de precipitación obtenida por la misión satelital TRMM<sup>26</sup>. Esta información se presenta en mallas de resolución de 0.25° (aproximadamente 27 Km en el trópico). Contiene información de precipitación desde finales de la década de los años 90, hasta la fecha. Esta información debe calibrarse mediante comparación con las condiciones de precipitación dadas por mapas regionales de precipitación media multianual.

### **Cobertura vegetal, usos del suelo y zonificación geotécnica**

Esta información es un insumo importante para el cálculo de los volúmenes de flujo de escurrimiento. Debe procurarse obtenerla de fuentes oficiales (IGAC) a la mejor resolución disponible. La capa de zonificación geotécnica puede derivarse por medio de la opinión de un experto geólogo a partir de una capa de formaciones geológicas superficiales.

#### **4.7.1.5. Procedimiento general para la evaluación de inundaciones**

En caso de realizarse la evaluación por medio de un modelo de susceptibilidad, deben seguirse los pasos indicados en el procedimiento del método y llegar a los niveles de amenaza propuestos. Esto aplica entonces para los métodos de:

- Delimitación de rondas de ríos (sección 3)
- Susceptibilidad topográfica (sección 4)

En caso que el modelo aplicado sea de amenaza, el procedimiento general de análisis es el siguiente, para inundaciones aluviales o torrenciales; cada uno de los ítems será especificado en el transcurso del texto:

1. Construcción de las curvas PADF y generación de un conjunto de tormentas estocásticas a partir de los registros históricos de precipitación para la cuenca de análisis como se verá más adelante. En función del tipo de modelo de lluvia-escorrentía que se seleccione, deberá o no incluirse la distribución temporal de la precipitación. Cada tormenta del conjunto constituye un *escenario* de análisis.
2. Con la información de precipitación neta para cada escenario de lluvia se obtienen los volúmenes de escurrimiento dentro de la cuenca.

---

<sup>26</sup> <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

3. Para determinar el hidrograma a la salida, se emplea el método del hidrograma unitario triangular o el método de Clark modificado, en función del nivel de complejidad seleccionado.
4. Se selecciona un punto a partir del cual se llevará a cabo el análisis hidráulico de la inundación. Este debe corresponder a un punto del cauce cercano a alguna población de interés o a la desembocadura de la cuenca de análisis.
5. Con la topografía detallada y el hidrograma de cada escenario, se aplica el procedimiento de cálculo de flujo unidimensional o bidimensional, según sea el caso.
6. Se almacenan los valores de inundación máxima para cada escenario, con lo que se crea una malla de inundación por escenario. Esto implica que el resultado final de la evaluación es un conjunto de escenarios de inundación.
7. Se aplica el procedimiento de zonificación de la amenaza para establecer niveles de amenaza por zonas del territorio.

Para inundaciones por encharcamiento, el procedimiento es el siguiente:

1. Construcción de las curvas PADF y generación de un conjunto de tormentas estocásticas a partir de los registros históricos de precipitación para la cuenca de análisis. Cada tormenta del conjunto constituye un *escenario* de análisis.
2. Con la información de precipitación neta para cada escenario de lluvia se obtienen los volúmenes de escurrimiento dentro de la cuenca.
3. Cálculo de la susceptibilidad topográfica, con el fin de determinar las zonas bajas de la topografía.
4. Cálculo de la inundación por encharcamiento, para cada escenario.
5. Se almacenan los valores de inundación máxima para cada escenario, con lo que se crea una malla de inundación por escenario. Esto implica que el resultado final de la evaluación es un conjunto de escenarios de inundación.
6. Se aplica el procedimiento de zonificación de la amenaza para establecer niveles de amenaza por zonas del territorio.

#### **4.7.2. Delimitación de rondas hídricas**

Las rondas hídricas corresponden a una franja alrededor de los cauces naturales, que en el contexto de esta guía, puede interpretarse como una zona potencialmente inundable. En términos reglamentarios, las rondas hídricas son “la franja paralela a los cuerpos de agua a que se refiere el literal d) del artículo 83 del decreto ley 2811 de 1974 y el área de protección o conservación aferente.” Están reglamentadas a nivel nacional por DL 2811/74 Art. 83 Literal d); D. 1449/77 Art. 3; D. 1541/78 Art. 11; Ley 1450 de 2011 PND 2010 – 2014 ART. 206. El método de delimitación de rondas hídricas presentado ha sido tomado en su totalidad del documento “Metodología para el acotamiento de las Rondas Hídricas” (Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, 2012).

Según lo establecido en el documento de referencia, para establecer las rondas hídricas se deben emplear tres componentes complementarios: geomorfológico, hidrológico y

ecosistémico. Por cada componente se determina una ronda hídrica diferente. La ronda hídrica final se define como la envolvente de las tres anteriores. Dentro del alcance de este instructivo, se propone el uso exclusivo del componente geomorfológico, dado que el componente hidrológico debe ser calculado mediante modelaciones hidrológicas e hidráulicas como las consignadas en las secciones siguientes, y el componente ecosistémico está asociado a la protección ambiental de los cauces con el fin de garantizar la funcionalidad de los corredores biológicos, mas no está directamente relacionado con una zonificación por susceptibilidad a inundaciones.

#### **4.7.2.1. Clasificación geomorfológica**

La clasificación geomorfológica permite definir el ancho de las rondas hídricas de manera cualitativa, a partir de la observación de las características del cauce.

La clasificación geomorfológica es un proceso de tres pasos:

1. Procesamiento del modelo digital de elevación (MDE) disponible, con el fin de determinar la red hidrológica rasterizada.
2. Realizar una preclasificación morfológica de la red de drenaje de la región, o del corredor aluvial estudiado, con base al procesamiento realizado en el paso 1. El objetivo es determinar la mejor relación de geometría hidráulica que permita la estimación del ancho medio del cauce.
3. Definición de la franja de terreno correspondiente al componente geomorfológico, a partir de la correlación del ancho medio del cauce con procesos migratorios. No obstante, dado que los procesos migratorios son exclusivos de ciertos tipos de morfología, este paso tiene en cuenta la elevación relativa de las laderas adyacentes a cada corriente para prevenir la delimitación del componente geomorfológico donde, debido al grado de confinamiento, no podrían presentarse procesos migratorios.

Estos pasos son descritos con mayor detalle en las siguientes secciones.

#### **Paso 1: Procesamiento del MDE**

A partir del MDE es posible obtener un modelo de direcciones superficiales de flujo, asumiendo que el agua fluye hacia aguas abajo sin posibilidad de estancamiento. Para esto se recomienda el uso de sistemas de información geográfica (SIG), en los cuales se encuentran implementadas metodologías del estado del arte en el procesamiento de un MDE. Una vez el modelo de direcciones de flujo es obtenido, se deben construir las siguientes capas raster:

- Áreas acumuladas: Representa para cada píxel el área de la cuenca tributaria aguas arriba.
- Red de drenaje rasterizada: Representa para cada píxel aquellas celdas que efectivamente corresponden a un canal de flujo. Así, el mapa tendrá valores de 1

para celdas que representan la red de drenaje y 0 para celdas que representan laderas o llanuras inundables.

## **Paso 2: Clasificación morfológica y dimensionamiento de canales.**

### **Separación de tramos.**

Los cauces representados por la red de drenaje rasterizada son transformados en tramos a partir de la definición de nodos. Los nodos corresponden a los puntos sobre el cauce que marcan el inicio o final de un tramo. Se diferencian dos tipos de nodos: hidrológicos y topográficos. Los nodos hidrológicos son aquellos en los que confluyen dos o más corrientes. Por su parte, los nodos topográficos son puntos donde se presentan cambios abruptos en la pendiente longitudinal.

### **Clasificación morfológica**

La clasificación morfológica se basa en el método propuesto por Flores et. al. (2006), en el cual se establece la potencia específica,  $\omega$ , como medida de la energía local del flujo, la cual se define como

$$\omega = \frac{\gamma Q S_0}{W} \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde  $\gamma$  es el peso específico del agua,  $Q$  el caudal,  $S_0$  la pendiente y  $W$  el ancho superficial.

En condiciones de banca llena, las cuales son responsables de las formas de lecho y cauce de un tramo, es posible asumir una relación potencial entre el caudal y el área de la cuenca tributaria aguas arriba del tramo,  $A$ , de la forma

$$Q = aA^b \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde  $a$  y  $b$  son coeficientes que dependen de la morfología. Ahora bien, también es posible establecer una relación potencial entre el ancho superficial y el área de la cuenca tributaria aguas arriba del tramo

$$W = cA^d \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde  $c$  y  $d$  son coeficientes que dependen de la morfología. Reemplazando las ecuaciones 2 y 3 en la ecuación 1, se obtiene que la potencia específica es proporcional a una potencia del área tributaria aguas arriba del tramo.

$$\omega \propto S_0 A^{(b-d)} \quad (\text{Ec. 4})$$

Flores et al. (2006) emplearon un valor para  $(b-d)$  de 0.4 con el fin de establecer un índice de potencia específica ( $S_0A^{0.4}$ ). La clasificación morfológica se realiza entonces en función de este índice, según lo indicado en la Figura 17.

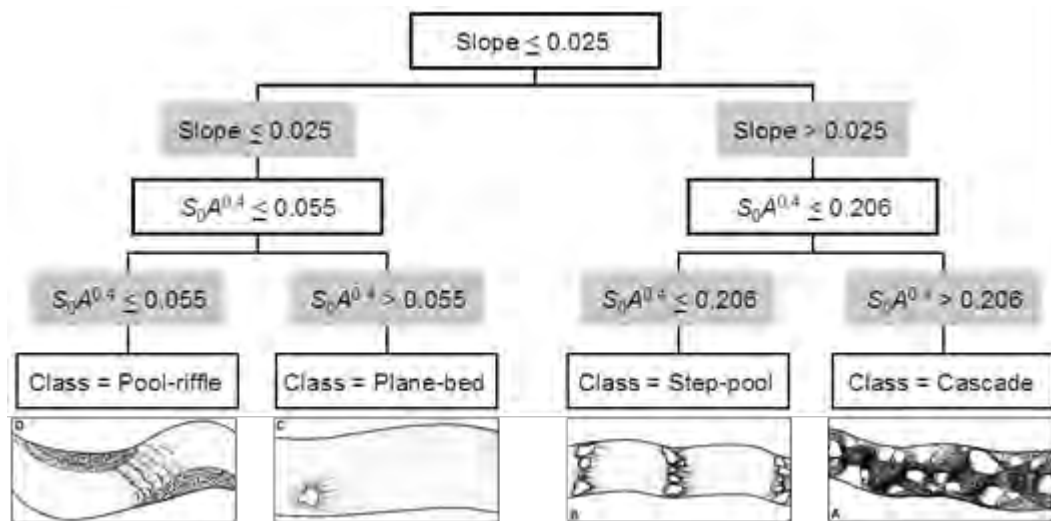


Figura 17 Esquema de clasificación morfológica basada en información geoespacial  
(Fuente: Flores et al., 2006)

### Dimensionamiento de canales

El ancho promedio de cada tramo se determina como función de su caracterización morfológica y del área de cuenca tributaria aguas arriba, de la siguiente manera:

- *Tramos clasificados como escalón-piscina (step-pool) o cascada (cascade):*

$$W = 7.58A^{0.203} \quad (\text{Ec. 5})$$

- *Tramos clasificados como lecho plano (plane-bed) o piscina-cruce (pool-riffle):*

$$W = 1.87A^{0.443} \quad (\text{Ec. 6})$$

### Paso 3: Delimitación del componente geomorfológico

El componente geomorfológico se delimita siguiendo la metodología propuesta por Dodov y Foufoula-Georgiou (2005) y empleando relaciones de escala para el radio de curvatura de ríos colombianos. La delimitación se realiza de la siguiente manera:

1. Para cada tramo morfológicamente homogéneo, se estima su radio de curvatura  $R_c$  de acuerdo con

$$R_c = 4.73W^{1.018} \quad (\text{Ec. 7})$$

2. Para cada uno de los pixeles que conforman el tramo homogéneo, se seleccionan los pixeles ubicados a una distancia  $D = W + R_c$ , como se ilustra en la Figura 18.

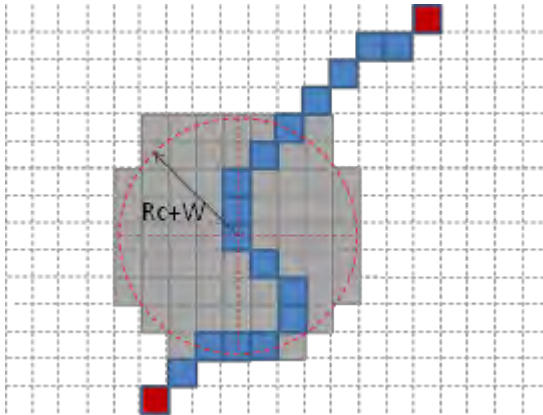


Figura 18. Esquema de selección de celdas pertenecientes a ronda geomorfológica (Fuente: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2012)

3. Para el conjunto de píxeles seleccionados, se estima la elevación media  $Z^*$ , de manera que los píxeles con elevación  $z$  menor que  $Z^*$  son considerados como parte del corredor o componente geomorfológico.

El resultado de la metodología presentada es la ronda hídrica asociada a procesos migratorios, la cual, dentro del alcance y objetivo de este instructivo, puede definirse como zona de susceptibilidad a inundaciones para un periodo de retorno de 100 años.

La asignación del nivel de amenaza se hace de acuerdo a la Tabla 27.

Tabla 27 .Asignación de niveles de amenaza para el método de la ronda geomorfológica

Franja de terreno	Nivel de amenaza
Ancho medio del cauce	Alta
Ronda geomorfológica	Media
Todo lo demás	Baja

### 4.7.3. Susceptibilidad topográfica

#### 4.7.3.1. Información requerida

- Modelo digital de elevación (MDE) para la región de estudio.

#### 4.7.3.2. Delimitación de las zonas bajas de la topografía

Para cada punto de la malla del modelo digital de elevación, dado por su posición (X,Y) se calcula para las cuatro direcciones cardinales (norte, sur, este y oeste, ver siguiente figura), su exposición al flujo de viento. El valor de exposición al flujo de viento representado en la malla de resultados final, corresponde al máximo valor numérico de los cuatro analizados.

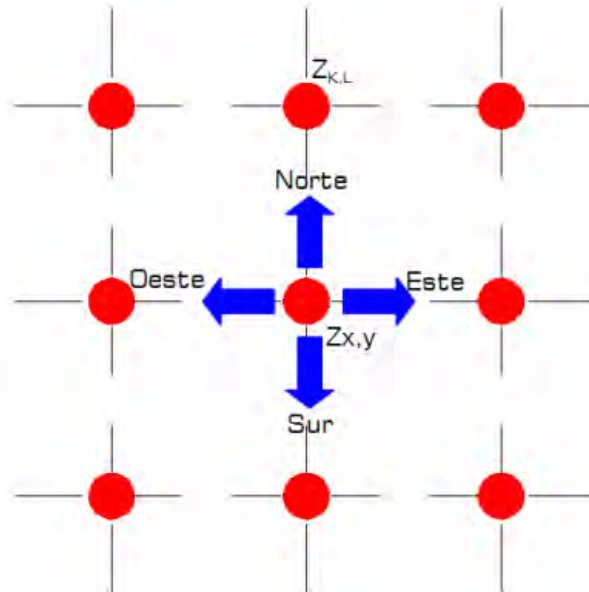


Figura 19. Procedimiento para estimar áreas de exposición por viento. En esta figura se ejemplifica el caso de analizar el punto  $Z_{x,y}$  en la dirección norte,  $Z_{K,L}$

### Variables

$N_{max}$ . Distancia horizontal máxima a la que se evaluará la variación de la topografía respecto a un punto fijo.

$m$ . Referencia de pendiente del terreno, para calcular la variación de la topografía del sitio evaluado con respecto al terreno circundante.

### Cálculo de factores de exposición por viento

Para cada punto (X,Y) de la malla de topografía, se busca en cuatro direcciones cardinales (norte, sur, este, oeste; Ver Figura 19. que se cumpla la siguiente condición:

$$Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim} \quad (\text{Ec. 8})$$

Dónde:

$Z_{lim}$  es el desnivel del terreno entre el punto (X,Y) y (K,L) que se requiere para una pendiente  $m=5\%$ .

La búsqueda del punto (K,L) que cumpla con la ecuación anterior, cuenta con un par de excepciones:

- a. que el número de pasos en la dirección de análisis ( $Nk$ ), exceda o sea igual al número de pasos que cumplen con la distancia horizontal máxima ( $Nmax$ ).
- b. se llega a los límites de la malla.

Identificado el punto (K,L) que cumpla con la ecuación anterior, o sus dos excepciones, se lee su altitud en el modelo digital de elevación ( $Z_{K,L}$ ), comparándola con la altitud del punto de análisis ( $Z_{x,y}$ ), si:

- a.  $Z_{K,L} \geq Z_{x,y} + Z_{Lim}$  Se trata de un sitio protegido, en el que para la dirección analizada la altitud del punto de comparación (K,L) es mayor a la altitud del punto de origen ( $Z_{x,y}$ ) más la altura límite ( $Z_{lim}$ ) que permite contar con una pendiente de por lo menos 5%. Esto es un sitio que se clasifica como zona baja.
- b. Si la condición anterior no se cumple, se calcula la pendiente media del terreno entre el punto en que se desean conocer los efectos topográficos (X,Y) y el punto en que se cumplen las condiciones analizadas (K,L).

La pendiente media del terreno se representa por medio de la siguiente expresión:

$$\bar{m}_e = \frac{Z_{x,y} - Z_{K,L}}{D} \quad (\text{Ec. 9})$$

Si  $|\bar{m}_e| < m$ , se trata de un sitio con terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, es decir, **zona plana**. En caso contrario, se trata de **cimas de promontorios**, colinas o montañas, islas, terrenos con pendientes inclinadas.

La asignación del nivel de amenaza se hace de acuerdo a la Tabla 28

**Tabla 28 Asignación de niveles de amenaza para el método de la ronda geomorfológica**

<b>Clasificación topográfica</b>	<b>Nivel de amenaza</b>
Zonas bajas	Alta
Zonas planas	Media
Cimas de promontorios o colinas	Baja

#### **4.7.4. Curvas PADF y tormentas estocásticas**

##### **4.7.4.1. Análisis espacial con curvas PADF**

El objetivo del modelo es establecer las relaciones entre la profundidad máxima de precipitación promedio ( $P$ ), el área ( $A$ ) sobre la cual cae esta profundidad, la duración ( $D$ ) durante la cual se produce esa precipitación y la frecuencia ( $F$ ) con la cual se presenta ese evento con esas características de profundidad, cobertura espacial y duración. Esto corresponde a las curvas profundidad – área – duración – frecuencia (PADF). El análisis PAD determina las cantidades máximas de precipitación sobre áreas de diferentes tamaños



y para varias duraciones de precipitación. Estas curvas deben ser características de las áreas homogéneas mencionadas anteriormente. Un aspecto adicional relacionado con esas curvas es el análisis y definición de patrones geométricos (e.g de distribución espacial de la precipitación, los cuales se hacen a partir del estudio de mapas de curvas isoyetas de eventos de tormentas considerados, identificando centros de tormentas y zonas asociadas con hipocentros, es decir áreas consistentemente de menor precipitación). Otra consideración que debe tomarse en cuenta, es la distribución temporal de los eventos espacialmente distribuidos. Criterios para el análisis espacial de precipitaciones máximas se describen a continuación:

- 1 Definición de área mínima por debajo de la cual la precipitación se considera como puntual y definición adicional de área máxima (en razón a que el número de tormentas de gran extensión puede ser escaso dentro de tormentas históricas disponibles y por lo tanto las series anuales correspondientes pueden resultar no suficientemente largas para realizar análisis de frecuencia de igual confiabilidad que para el resto de eventos disponibles de menor extensión).
- 2 Definición del número mínimo de estaciones pluviométricas y pluviográficas que registren un determinado aguacero para la generación de los mapas de isoyetas correspondientes (este número podría estar alrededor de 10 pero depende indudablemente de la densidad de estaciones en cada caso de estudio), de tal manera que éstos sean confiables para la descripción espacial del evento.
- 3 Definición de un valor umbral para la selección de un evento para ser considerado como significativo, es decir que, además que este evento esté registrado en el número mínimo de estaciones, la precipitación registrada en cada una de estas estaciones supere ese valor umbral (e.g. mayor que 10 mm en 24 horas).
- 4 Por razones de consistencia, se debe utilizar la misma distribución de probabilidad y el mismo método de estimación de parámetros que el definido para los análisis puntuales de frecuencia.
- 5 El análisis de la distribución espacial de la precipitación para los eventos considerados debe permitir establecer el o los patrones geométricos más representativos para su caracterización genérica (e.g. patrón circular, patrón elíptico, etc) con localizaciones preferenciales de hiper e hipocentros, además de alineamientos del patrón, al igual que relaciones funcionales entre parámetros del patrón (e.g relación entre eje mayor y eje menor en patrón elíptico entre 2 y 3).
- 6 La distribución temporal de los aguaceros con extensión espacial debe obtenerse del comportamiento temporal de las tormentas registradas en áreas extensas en conjunto con las estaciones pluviométricas y pluviográficas, y no exclusivamente de los registros de estas últimas de manera individual. Así se puede garantizar la consistencia de los patrones temporales y espaciales obtenidos del análisis de precipitaciones máximas en áreas extensas.

La metodología para la determinación de relaciones PAD y PADF debe basarse en procedimientos propuestos en la literatura, como por ejemplo el de la OMM (1969). El rango de variación de las áreas se debe establecer a partir de los mapas de isoyetas generados para cada uno de los eventos disponibles, desde el valor mínimo equivalente

puntual, hasta la mayor de las extensiones cubiertas por estos eventos. Eventualmente, puede ser necesario extrapolar curvas PAD Y PADF para valores mayores a este máximo histórico en el área. En relación con las duraciones, se considera que éstas pueden ir desde 1 hora hasta alrededor de 10 días, en razón a las precipitaciones asociadas a huracanes. Al igual que se considera adecuada la distribución Gumbel, con MPP para los análisis puntuales, ésta también se considera adecuada para los análisis espaciales.

Para la determinación de los datos de precipitación para los análisis de curvas PAD y PADF, se deben establecer las fechas para las cuales en alguna o algunas de las estaciones se registraron profundidades significativas, para luego completarlas con los registros de las demás estaciones. De esta manera se tiene, para cada fecha, el conjunto de valores de precipitación registrados en todas las estaciones de la zona homogénea, los cuales, graficados mediante isoyetas permiten establecer la distribución espacial de la precipitación en la fecha respectiva. Análisis adicionales similares permitirían desagregar la información diaria con duraciones menores, en la medida con que exista información pluviográfica, pudiéndose establecer distribuciones espaciales y temporales para cada uno de los sub-intervalos. De igual manera, la información diaria se puede agregar para duraciones mayores, pudiéndose identificar la distribución espacial y temporal en cada una de éstas. Como consecuencia de lo anterior, para todas las fechas históricas con eventos significativos se construyen las curvas PAD (una por cada evento y por cada duración) a partir de las cuales se realiza el análisis de frecuencia correspondiente para varios valores de área. El resultado de lo anterior es la curva PADF para la zona hidrológica homogénea.

Para construir una curva PAD en una zona hidrológicamente homogénea, se establece primero la duración considerada; a continuación se recopilan o generan los mapas de isoyetas de los eventos históricos para esta duración. En seguida, cada mapa se procesa para identificar el o los sitios de mayor pluviosidad, calculando la precipitación promedio correspondiente y midiendo el área cubierta respectiva. Esto se repite sucesivamente, extendiendo las áreas de cubrimiento de las isoyetas (progresivamente con valores mayores a menores), calculando la precipitación promedio sobre las isoyetas consideradas y midiendo las áreas respectivas. Así, en la medida en que se amplía la cobertura de isoyetas, la profundidad promedio disminuye progresivamente y el área aumenta, definiéndose así una relación inversa entre área y precipitación máxima promedio. El algoritmo del procedimiento se describe a continuación:

- 1 Para cada año seleccionar los eventos intensos de precipitación con extensión espacial. Los pasos 2 a 16 corresponden al análisis de eventos de cada año con información disponible.
- 2 Para cada evento elaborar mapas de isoyetas para una duración  $D$  utilizando herramientas computacionales. Deben involucrarse estaciones periféricas que no hayan registrado precipitación.
- 3 Identificar las isoyetas de mayor valor. Sea este mayor valor de precipitación  $p_1$ , y sea  $m_1$  el número de isoyetas con valor  $p_1$ .
- 4 Medir las áreas encerradas en las isoyetas con valor  $p_1$ , y denotar estas áreas como  $a_1$ , con  $i$  desde 1 hasta  $m_1$ .

5 Estimar el valor promedio de precipitación en  $a_1$  como  $h_1 = p_1 + (p_{max} - p_1)/3$ , donde  $p_{max}$  es el valor máximo puntual de precipitación dentro del área  $a_1$ .

6 Sumar las áreas  $a_1$ . Es decir  $A_1 = \sum_{i=1}^{m_1} a_{1i}$ .

7 Para el área agregada  $A_1$ , calcular la profundidad de precipitación promedio como:

$$H_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} h_{1i} a_{1i}}{A_1} \quad (\text{Ec. 10})$$

8 Identificar la(s) isoyeta(s) con valor inmediatamente inferior a  $p_1$ , y sea este valor  $p_2$ . Sea  $m_2$  el número de isoyetas con valor  $p_2$ .

9 Medir cada una de las áreas internas a las isoyetas con valor  $p_2$ . Sean estas áreas  $a_2$ .

10 Estimar el valor promedio de precipitación en  $a_2$  como:

$$h_{2i} = \frac{h_{1i} a_{1i} + 0.5[p_2 + p_1][a_{2i} - a_{1i}]}{a_{2i}} \quad (\text{Ec. 11})$$

11 Sumar las áreas  $a_2$ . Es decir  $A_2 = \sum_{i=1}^{m_2} a_{2i}$ .

12 Para el área agregada  $A_2$ , calcular la profundidad de precipitación promedio como:

$$H_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_2} h_{2i} a_{2i}}{A_2} \quad (\text{Ec. 12})$$

13 Continuar con las curvas isoyetas subsiguientes mediante un procedimiento similar. Para la isoyeta  $n$  con un valor de precipitación  $p_n$  y con áreas encerradas  $a_n$ , estimar  $h_n$  como:

$$h_{ni} = \frac{h_{1i} \cdot a_{1i} + \sum_{j=2}^n 0.5[p_j + p_{j-1}][a_{ji} - a_{(j-1)i}]}{a_n} \quad (\text{Ec. 13})$$

14 Sumar las áreas  $a_n$ . Es decir  $A_n = \sum_{i=1}^{m_n} a_{ni}$ .

15 Para el área agregada  $A_n$ , calcular la profundidad promedio como:

$$H_n = \frac{\sum_{i=1}^{m_n} h_{ni} a_{ni}}{A_n} \quad (\text{Ec. 14})$$

16 Graficar  $A_j$  vs.  $H_j$ .

17 Repetir el procedimiento descrito entre los pasos 2 a 16 para todos los eventos de precipitación de duración  $D$  disponibles en ese año.

18 Superponer las gráficas  $A_j$  vs.  $H_j$  del paso 16 para todos los eventos de ese año de duración  $D$ .

19 Establecer la envolvente superior de precipitación para la superposición del paso anterior. Esta envolvente representa la relación entre la precipitación máxima y la

extensión espacial para ese año y esa duración o curva PAD. En esta envoltente determinar los valores de precipitación máxima para valores predeterminados de área.

- 20 Repetir los pasos 2 a 19 para cada uno de los demás años disponibles.
- 21 Conformar las series anuales de precipitación máxima de duración  $D$  para cada una de las áreas predeterminadas del paso 19. Hacer análisis de frecuencia con esta serie usando la misma distribución de probabilidad y mismo método de estimación de parámetros aplicados en los análisis puntuales.
- 22 Repetir pasos 2 a 21 para otras duraciones  $D$ .
- 23 Con los resultados de los análisis de frecuencia de los pasos 21 y 22 conformar las curvas PADF.

Como resultado de los análisis anteriores se disponen de curvas PADF representativas de las zonas homogéneas correspondientes. Además, los análisis de curvas isoyetas históricas permiten establecer patrones típicos de distribución espacial de eventos de precipitación, que pueden ser diferenciados según su origen sea por huracanes o por lluvias intensas. De manera complementaria a lo anterior, se pueden determinar ubicaciones preferenciales de estos patrones dentro del área. Los tres ingredientes anteriores (e.g., curvas PADF, patrones típicos y ubicación preferencial), permiten establecer procedimientos para la generación sintética de eventos de precipitación. Para esto y de manera aleatoria controlada, se puede generar la ubicación de los eventos espaciales de precipitación con características, también aleatorias, controladas de tamaño y forma que cumplan con las relaciones contenidas en las curvas PADF. Así, el procedimiento es:

- 1 Seleccionar un determinado período de retorno  $T$
- 2 Determinar aleatoriamente una duración  $D$
- 3 Seleccionar valores de área,  $A_i$ , dentro del rango cubierto por la curva PADF correspondiente a la duración  $D$  y frecuencia  $T$  anteriores
- 4 Con base en la curva PADF determinar los respectivos valores de profundidad máxima promedio  $P_i$
- 5 Generar aleatoriamente la ubicación, forma y tamaño del patrón de precipitación;
- 6 Generar con el patrón típico las correspondientes curvas isoyetas que preserven para las anteriores áreas  $A_i$  las respectivas profundidades de precipitación  $P_i$

En la Tabla 29 se presentan las ecuaciones para confeccionar un patrón espacial circular o elíptico, pues una elipse está definida por los semiejes menor y mayor,  $a$  y  $b$  respectivamente, y se puede expresar el uno en función del otro como  $b = Ka$ . En la Tabla 29 las dos primeras columnas corresponden a los valores de áreas y precipitaciones máximas promedio adoptados de la curva PADF (pasos 3 y 4), con las áreas ordenadas de menor a mayor. La tercera columna muestra las ecuaciones para determinar el valor correspondiente de la isoyeta del patrón elíptico. Las columnas 4 y 5 permiten calcular los valores para cada isoyeta de los semiejes mayor y menor.

**Tabla 29 Determinación de patrones sintéticos espaciales**

$A_i$	$P_i$	Valor isoyeta, $h_i$	Semieje menor $a_i$	Semieje mayor $b_i$
$A_1$	$P_1$	$h_1 = P_1$	$a_1 = \left(\frac{A_1}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_1 = Ka_1$
$A_2$	$P_2$	$h_2 = \frac{2(P_2 A_2 - P_1 A_1)}{A_2 - A_1} - h_1$	$a_2 = \left(\frac{A_2}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_2 = Ka_2$
$A_3$	$P_3$	$h_3 = \frac{2(P_3 A_3 - P_2 A_2)}{A_3 - A_2} - h_2$	$a_3 = \left(\frac{A_3}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_3 = Ka_3$
...	...	...	...	...
$A_n$	$P_n$	$h_n = \frac{2(P_n A_n - P_{n-1} A_{n-1})}{A_n - A_{n-1}} - h_{n-1}$	$a_n = \left(\frac{A_n}{\pi K}\right)^{0.5}$	$b_n = Ka_n$

Para la generación sintética de eventos de precipitación máxima, es necesario definir tres elementos complementarios a lo anteriormente descrito: (1) la ubicación espacial del centro de la tormenta; (2) el valor de  $K$ , y (3) la dirección del eje mayor. En relación con la ubicación espacial del centro de tormenta, con base en los mapas históricos de isoyetas se debe identificar la o las zonas de mayor frecuencia de ubicación, las cuales se pueden representar mediante polígonos. Por lo tanto, es dentro de estos polígonos donde se deben generar centros aleatorios de tormentas. Con respecto al valor  $K$ , nuevamente del análisis de mapas históricos de isoyetas se pueden determinar rangos de valores de  $K$  más representativos, ajustando una distribución uniforme o triangular simétrica, por ejemplo. Para la dirección del eje mayor, los mapas históricos de isoyetas permiten establecer alineamientos preferenciales de los patrones de tormentas, a partir de los cuales se pueden definir rangos de valores de azimut del eje mayor, dentro de los cuales se deben generar valores aleatorios.

#### **4.7.4.2. Distribución temporal de la precipitación**

En algunos casos, es importante conocer la distribución de la precipitación en el tiempo, es decir el hietograma. Para este fin, se emplean curvas de distribución de precipitación, las cuales relacionan el volumen acumulado de la precipitación total a lo largo del tiempo de duración de las tormentas.

La obtención de las curvas de distribución de precipitación puede hacerse a partir de análisis estadísticos sobre datos de precipitación horaria, de manera que puedan determinarse los hietogramas de las tormentas más representativas y así determinar las curvas de distribución asociadas al percentil 95 del total de muestras.

En caso que la información histórica no sea suficiente, se recomienda la selección de alguna de las curvas de distribución propuestas por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos.

El valor de distribución de la precipitación se multiplica por la precipitación total para obtener la precipitación acumulada en el tiempo. Para cada momento en el tiempo se determina el incremento en la precipitación total como la diferencia entre los valores de precipitación acumulada en dos momentos contiguos del tiempo. La Tabla 30 presenta un ejemplo de transformación de la curva de distribución mostrada en la Figura 20 (columna 'Valor de distribución' en la Tabla 30) a el hietograma presentado en la Figura 21 (columna 'Precipitación' en la Tabla 30).

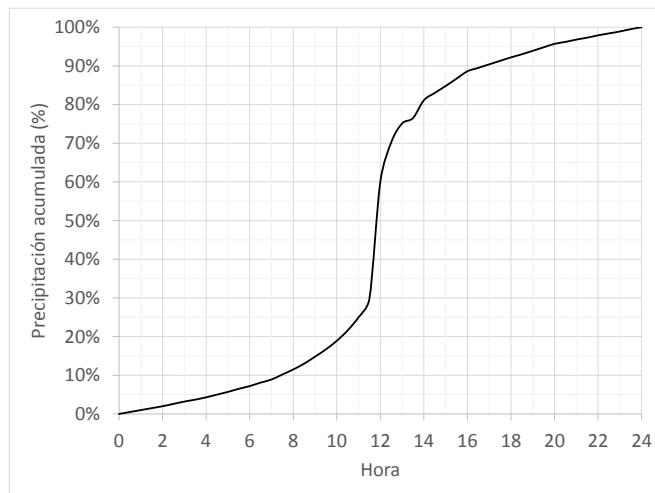
Empleando este procedimiento, es posible generar hietogramas sintéticos en cualquier ubicación dentro de la extensión de las tormentas estocásticas. La Figura 20 muestra de manera esquemática este resultado. El procedimiento se repite para todo el conjunto de tormentas generado, de manera que se obtiene una representación integral de la precipitación, con distribución espacial y temporal.

**Tabla 30. Ejemplo de generación de un hietograma a partir de su curva de distribución.**

**Precipitación total (P):** 100 mm  
**Duración (D):** 24 horas

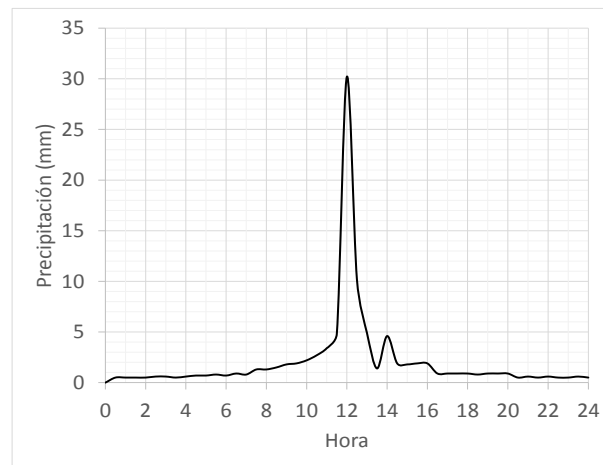
<b>Paso</b>	<b>Minuto</b>	<b>Hora</b>	<b>Valor de distribución</b>	<b>Profundidad acumulada</b>	<b>Precipitación</b>
0	0	0	0	0	0
1	30	0.5	0.005	0.5	0.5
2	60	1	0.01	1	0.5
3	90	1.5	0.015	1.5	0.5
4	120	2	0.02	2	0.5
5	150	2.5	0.026	2.6	0.6
6	180	3	0.032	3.2	0.6
7	210	3.5	0.037	3.7	0.5
8	240	4	0.043	4.3	0.6
9	270	4.5	0.05	5	0.7
10	300	5	0.057	5.7	0.7
11	330	5.5	0.065	6.5	0.8
12	360	6	0.072	7.2	0.7
13	390	6.5	0.081	8.1	0.9
14	420	7	0.089	8.9	0.8
15	450	7.5	0.102	10.2	1.3
16	480	8	0.115	11.5	1.3
17	510	8.5	0.13	13	1.5
18	540	9	0.148	14.8	1.8
19	570	9.5	0.167	16.7	1.9
20	600	10	0.189	18.9	2.2
21	630	10.5	0.216	21.6	2.7
22	660	11	0.25	25	3.4
23	690	11.5	0.298	29.8	4.8
24	720	12	0.6	60	30.2
25	750	12.5	0.702	70.2	10.2
26	780	13	0.751	75.1	4.9
27	810	13.5	0.765	76.5	1.4
28	840	14	0.811	81.1	4.6
29	870	14.5	0.83	83	1.9
30	900	15	0.848	84.8	1.8
31	930	15.5	0.867	86.7	1.9
32	960	16	0.886	88.6	1.9
33	990	16.5	0.895	89.5	0.9

Paso	Minuto	Hora	Valor de distribución	Profundidad acumulada	Precipitación
34	1020	17	0.904	90.4	0.9
35	1050	17.5	0.913	91.3	0.9
36	1080	18	0.922	92.2	0.9
37	1110	18.5	0.93	93	0.8
38	1140	19	0.939	93.9	0.9
39	1170	19.5	0.948	94.8	0.9
40	1200	20	0.957	95.7	0.9
41	1230	20.5	0.962	96.2	0.5
42	1260	21	0.968	96.8	0.6
43	1290	21.5	0.973	97.3	0.5
44	1320	22	0.979	97.9	0.6
45	1350	22.5	0.984	98.4	0.5
46	1380	23	0.989	98.9	0.5
47	1410	23.5	0.995	99.5	0.6
48	1440	24	1	100	0.5

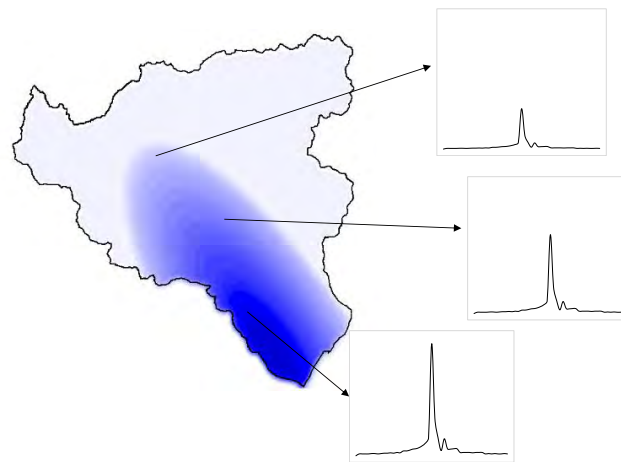


**Figura 20** Curva de distribución de precipitación tipo III del Soil Conservation Service (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)





**Figura 21-Hietograma derivado de la curva de distribución.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)



**Figura 22-Esquema de distribución de hietogramas en una tormenta estocástica.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)

#### **4.7.5. Volúmenes de flujo**

Como método para determinar los volúmenes de flujo se emplea el *número de curva* o *factor de escurrimiento* dado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos. Al definir los factores de escurrimiento, es posible determinar la *precipitación efectiva*.

La precipitación efectiva corresponde a la intensidad de lluvia remanente, luego que, de la profundidad total de precipitación aportada por la tormenta, se ha gastado una porción en procesos hidrológicos de infiltración, interceptación y evapotranspiración. Ésta escorrentía se calcula en función del valor total de precipitación y del factor de escurrimiento en determinado punto, de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\left[ P_m - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P_m + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad (\text{Ec. 15})$$

En donde  $P_e$  es la precipitación efectiva en cm,  $P_m$  es la precipitación de la tormenta en cm, y  $N$  es el factor de escurrimiento.

El factor de escurrimiento es un indicador global de la cantidad de agua que será absorbida o transpirada por los suelos superficiales. Se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial. En la Tabla 31 se presentan los valores de  $N$  para diferentes suelos y condiciones de uso.

El rango de aplicación de la ecuación 15, es para valores de:

$$P_m > \frac{508}{N} + 5.08 \quad (\text{Ec. 16})$$

Fuera de este intervalo se considera que la precipitación efectiva es igual a cero. También se debe garantizar que la precipitación efectiva no sea mayor que la precipitación de la tormenta.

**Tabla 31 Valores de N para diferentes tipos de suelo y usos de la tierra (cobertura)**

USO DE LA TIERRA O CUBIERTA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosques Naturales	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espeso, alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espeso, alta transpiración	15	44	54	61
Descanso (sin cultivo)	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivo de surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surcos en curvas de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surcos en curvas de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas (sembrada con maquinaria o al voleo) o potrero de rotación.	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surcos en curvas de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel, normal	25	59	75	83
	Curvas de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero (permanente)	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100
<b>CLASIFICACIÓN DE SUELOS (según afectan las características del material en el escurrimiento)</b>					
<b>Tipo A:</b> (Escorrimento mínimo). Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias, y mezclas de ambas.					
<b>Tipo B:</b> Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.					
<b>Tipo C:</b> Comprende arena muy fina, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.					
<b>Tipo D:</b> (Escorrimento máximo). Incluyendo principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie					

#### 4.7.6. Análisis lluvia-escorrentía

##### Hidrograma triangular

En éste procedimiento se ha seleccionado por simplicidad el método del hidrograma unitario triangular (Figura 23), para caracterizar los hidrogramas de entrada al cauce bajo análisis. Para aplicarlo se requiere conocer las características fisiográficas de la cuenca.

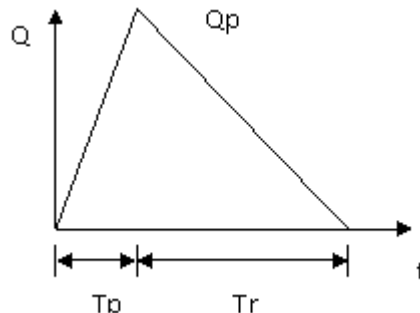


Figura 23 Modelo de hidrograma unitario triangular. (Cardona, Mendes, et al, 2013, parte III)

El caudal pico se estima como:

$$Q_p = 0.566 \frac{hpeA}{nTp} \quad (\text{Ec. 17})$$

donde,

$$Tp = \frac{Tc}{2} + 0.6Tc \quad \text{para cuencas pequeñas} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$Tp = \sqrt{Tc} + 0.6Tc \quad \text{para cuencas grandes} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$n = 2 + \frac{A - 250}{1583.3} \quad \text{para cuencas donde } A \leq 250 \text{ km}^2 \text{ entonces } n = 2.0 \quad (\text{Ec. 20})$$

$$Tb = n Tp \quad ; \quad Tb = Tp + Tr \quad (\text{Ec. 21})$$

En donde  $hpe$  es la lámina de lluvia efectiva en mm,  $A$  el área de la cuenca en  $\text{km}^2$ ,  $Tc$  el tiempo de concentración en horas,  $Tp$  el tiempo pico en horas,  $Tr$  el tiempo de retraso en horas,  $Tb$  el tiempo base en horas y  $n$  el factor de corrección por área.

El hidrograma de escurrimiento directo se calcula al multiplicar cada una de las ordenadas del hidrograma unitario triangular por la lluvia efectiva,  $hpe$ , expresada en mm.

El tiempo de concentración puede calcularse aplicando la ecuación de Kirpich, la cual se expresa como:

$$t_c = 0.0003245 \left[ \frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.77} \quad (\text{Ec. 22})$$

En donde  $t_c$  es el tiempo de concentración en horas,  $L$  es la longitud del cauce principal en m y  $S$  es la pendiente media del cauce principal.

Con la información del cauce y la topografía general se obtiene la pendiente media del cauce empleado el método de Taylor-Schwarz (Springal, 1970) la cual está dada por:

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (\text{Ec. 23})$$

En donde la longitud del cauce principal  $L$  se divide en  $n$  número de segmentos de longitud  $l$  y para cada uno de ellos se calcula su pendiente  $S$ .

### **Información requerida**

La siguiente es la información mínima requerida para la aplicación del método del hidrograma triangular.

- Conjunto de tormentas estocásticas con distribución espacial. No se requiere de hietogramas sintéticos para este método.
- Contorno de límite de la cuenca.
- Geometría del cauce principal.
- Modelo digital de elevación para toda la cuenca.
- Malla de factores de escurrimiento para toda la cuenca.

### **Método de Clark modificado**

Como método de análisis hidrológico para mayor nivel de complejidad, se emplea el método de Clark modificado, el cual da cuenta de dos procesos fundamentales en la transformación de lluvia en escorrentía:

- La **traslación** o movimiento del exceso de precipitación a lo largo de los drenajes de la cuenca.

- La **atenuación**, o disminución de la magnitud de descarga a medida que el exceso de precipitación es almacenado en la cuenca (en el suelo, superficie y canales).

### Traslación

El tiempo que le toma al agua llegar a la salida de la cuenca, se modela mediante una malla de tiempos de viaje. Para cada celda del territorio, se determina el tiempo a la salida de la siguiente manera:

$$t_{celda} = t_c \frac{d_{celda}}{d_{max}} \quad (\text{Ec. 24})$$

En donde  $t_{celda}$  es el tiempo de viaje del agua desde la celda en consideración,  $t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca (que puede obtenerse usando las ecuaciones 22 y 23)  $d_{celda}$  es la distancia de la celda en consideración a la salida de la cuenca, y  $d_{max}$  es la máxima distancia de alguna celda a la salida de la cuenca.

Del área de cada celda se determina el volumen de escurrimiento en cada momento del tiempo. Estos volúmenes son enrutados usando el modelo de reservorio lineal dentro del proceso de atenuación.

### Atenuación

El almacenamiento de corto plazo juega un papel muy importante en la transformación del exceso de precipitación en escorrentía. En el método de Clark, este almacenamiento se modela como un reservorio lineal. En un reservorio lineal aplica la ecuación de continuidad de la forma,

$$\frac{dS}{dt} = I_t - O_t \quad (\text{Ec. 25})$$

En donde  $dS/dt$  es la tasa de cambio del almacenamiento en la cuenca, en el tiempo  $t$ ,  $I_t$  es el caudal de entrada, y  $O_t$  es el caudal de salida. En el modelo de reservorio lineal, el caudal de salida está relacionado con el volumen almacenado de manera proporcional,

$$S_t = RO_t \quad (\text{Ec. 26})$$

En donde  $R$  es el parámetro de reservorio lineal. Al combinar y solucionar las ecuaciones anteriores mediante un enfoque sencillo de diferencias finitas, se obtiene:

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad (\text{Ec. 27})$$

En donde  $C_A$  y  $C_B$  son coeficientes de enrutamiento., que se calculan como:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad (\text{Ec. 28})$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (\text{Ec. 29})$$

El caudal de salida promedio para el tiempo  $t$  es entonces:

$$\bar{O}_t = \frac{O_{t-1} + O_t}{2} \quad (\text{Ec. 30})$$

Para cada celda de la malla de cálculo, se calcula un caudal de salida promedio, para cada momento del tiempo. Al final, la suma de los caudales promedio, en cada paso de tiempo, da el hidrograma de salida final ( $Q_t$ ).

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_{\text{celdas}}} \bar{O}_{i,t} \quad (\text{Ec. 31})$$

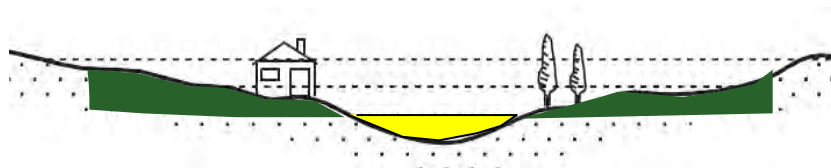
### **Información requerida**

La siguiente es la información mínima requerida para la aplicación del método Clark modificado.

- Conjunto de tormentas estocásticas con distribución espacial y temporal. Se requiere de hietogramas sintéticos para este método.
- Contorno de límite de la cuenca.
- Geometría del cauce principal.
- Modelo digital de elevación para toda la cuenca.
- Malla de factores de escurrimiento para toda la cuenca.

#### **4.7.7. Inundación por encharcamiento**

La profundidad de inundación se calcula a partir de la precipitación efectiva, y *factores de inundación* que dependen principalmente de las condiciones topográficas del área de estudio. Los factores de inundación califican el potencial de un punto particular de ser inundado. En la Figura 24 se ilustran los factores de inundación de una zona particular.



**Figura 24** Figura que ejemplifica las regiones de ampliación en zonas bajas.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)

Con las definiciones de estos factores se pueden diferenciar 4 zonas de interés:

- 1) Zonas bajas o rodeadas de montañas con mayor peligro de inundación que asemejan cauces de ríos. Estas zonas se resaltan en la Figura 24 con color amarillo. El tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva más un 50%.
- 2) Lugares cercanos a zonas bajas identificadas como cauces. El tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva más un 20%. Estas zonas se resaltan en la Figura 24 con color verde.
- 3) Lugares con pendiente topográfica baja o plana. Se considera que el tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva.
- 4) Lugares con pendiente topográfica alta. Se considera que no se presenta inundación.

A partir de la precipitación efectiva y los factores de inundación se estima aproximadamente el valor de la profundidad de inundación, considerando de manera general el tipo y uso del suelo y las condiciones topográficas.

#### 4.7.8. Inundación aluvial o torrencial – modelo 1D

El objetivo del análisis unidimensional es la solución de los perfiles de profundidad de agua en secciones transversales a lo largo del cauce de un río. Se asume flujo permanente, gradualmente variado y unidimensional.

La ecuación de energía, para dos secciones transversales adyacentes, ST1 y ST2, es

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (\text{Ec. 32})$$

En donde  $Y_1$  y  $Y_2$  son la profundidad del agua en las secciones ST1 y ST2 respectivamente,  $Z_1$  y  $Z_2$  son las elevaciones del canal en ST1 y ST2,  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades promedio del flujo (la descarga total dividida por el área total),  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son coeficientes de ponderación,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $h_e$  es la cabeza de pérdida de energía. El término de la cabeza de pérdida de energía se define como:

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (\text{Ec. 33})$$

En donde  $L$  es la distancia ponderada entre secciones transversales,  $S_f$  es la pendiente representativa de fricción entre las secciones transversales y  $C$  es un coeficiente de expansión o contracción. La distancia ponderada y la pendiente representativa de fricción se determinan como,

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (\text{Ec. 34})$$



$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (\text{Ec. 35})$$

En donde  $L_{lob}$ ,  $L_{ch}$  y  $L_{rob}$  son las distancias en la orilla izquierda, canal principal y orilla derecha, disponibles para el flujo entre las secciones, respectivamente.  $Q_{lob}$ ,  $Q_{ch}$  y  $Q_{rob}$  son los caudales promedio entre secciones para la a orilla izquierda, canal principal y orilla derecha, respectivamente,  $K_1$  y  $K_2$  son las conducciones de las secciones transversales.

El cálculo de la conducción y el caudal de una sección transversal, se realiza para cada subdivisión dentro de la sección (orilla izquierda, canal principal, orilla derecha), como:

$$Q = K \sqrt{S_f} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (\text{Ec. 37})$$

En donde  $K$  es la conducción para la subdivisión,  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $A$  es el área de flujo, y  $R$  el radio hidráulico.

El método presentado está implementado en el software HEC-RAS, desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos. HEC-RAS es un sistema integrado de software que realiza de una sola dimensión (1D) cálculos hidráulicos para una red completa de canales naturales y construidos. Actualmente HEC-RAS admite cálculos hidráulicos en condición de flujo permanente y no permanente.

#### **4.7.9. Inundación aluvial – modelo 2D**

El carácter dinámico de las inundaciones y la influencia del desplazamiento del agua hacia las zonas bajas, hacen necesario emplear modelos matemáticos que, por lo menos, incluyan ecuaciones de flujo en dos direcciones horizontales. El método propuesto considera un modelo numérico bidimensional con base en la ecuación de conservación de cantidad de movimiento y en la ecuación de continuidad; en ellas las velocidades corresponden a su valor promedio en la vertical. Se considera el flujo sobre una región con o sin agua.

Las ecuaciones dinámicas que describen la *conservación de cantidad de movimiento* son:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^{4/3}} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \quad (\text{Ec. 38})$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^{\frac{4}{3}}} = -\frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y} \quad (\text{Ec. 39})$$

En donde  $u$  y  $v$  son las componentes de la velocidad en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente,  $n$  es el coeficiente de rugosidad según la fórmula de Manning,  $h$  es el nivel de la superficie libre del agua con respecto al nivel del terreno natural y  $t$  es el tiempo.

El principio de la conservación de masa (*ecuación de continuidad*) en dos dimensiones horizontales establece que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} u h + \frac{\partial}{\partial y} v h = 0 \quad (\text{Ec. 40})$$

El área (en proyección horizontal) de la llanura a inundarse se divide en celdas de forma rectangular de largo  $\Delta x$  y ancho  $\Delta y$ . Para calcular el flujo de agua en una planicie de inundación se debe resolver el sistema de ecuaciones diferenciales conformado por las ecuaciones anteriores y considerando ciertas condiciones iniciales y de frontera.

Por las características detalladas de este método de análisis se recomienda revisar muy bien la información antes de su aplicación, ya que es un proceso que demanda un tiempo de cómputo considerable.

#### 4.7.10. Zonificación de la amenaza

Esta sección presenta un procedimiento para la generación de zonas de amenaza a partir de los resultados obtenidos para el conjunto de inundaciones. Los pasos para la definición de los niveles de amenaza son: 1) integración de la amenaza y 2) selección de los periodos de retorno.

##### **Paso 1: integración de la amenaza**

La amenaza se integra mediante un proceso matemático que permite definir las curvas de excedencia de intensidad en cada punto de la malla de cálculo. La tasa de excedencia es una cantidad que mide el número de veces al año que un valor de intensidad de inundación es igualado o excedido. Empleando los métodos consignados en este instructivo, es posible calcular la inundación en términos de dos medidas de intensidad: *profundidad de agua* y *velocidad media del flujo*.

Sea  $a$  la medida de intensidad calculada, su tasa de excedencia  $\nu(a)$ , para una ubicación en la malla de cálculo, se determina como

$$\nu(a) = \sum_{i=1}^N \Pr(A > a | E_i) \cdot F_i \quad (\text{Ec. 41})$$

En donde  $N$  es el número total de escenarios de inundación calculados,  $\Pr(A > a | E_i)$  es la probabilidad de exceder  $a$ , condicional a la ocurrencia del escenario  $i$  y  $F_i$  es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario  $i$ . La frecuencia anual es una característica que se asigna directamente de la tormenta que generó la inundación, y corresponde al inverso del periodo de retorno de dicha tormenta. Teniendo las tasas de excedencia de la medida de intensidad de la inundación en todos los puntos de la malla de cálculo, es posible generar mapas de igual periodo de retorno, por medio de la selección de una tasa de excedencia (que es inversa al periodo de retorno) y la lectura en cada curva del correspondiente valor de intensidad. Los valores leídos son entonces mapeados en una malla de inundación que tiene el mismo periodo de retorno.

## **Paso 2: Selección de los períodos de retorno**

Se deben seleccionar tantos periodos de retorno como niveles de amenaza se quiera definir. Los periodos de retorno cortos están asociados a amenaza de inundación alta, dado que corresponden a procesos que se repiten muy frecuentemente. Por otra parte los periodos de retorno largos están asociados a amenaza de inundación baja. Una propuesta de selección de periodos de retorno se presenta en la Tabla 32. En caso de duda puede usarse esta selección, sin embargo es importante conocer el territorio en el cual se está trabajando para definir estos periodos de manera correcta.

**Tabla 32. Ejemplo de relación entre el nivel de amenaza y el período de retorno con fines de zonificación**

<b>Periodo de retorno de las inundaciones</b>	<b>Amenaza en el área</b>
Tr = 10 años	Muy alta
11 < Tr < 25 años	Alta
25 < Tr < 50 años	Moderada
50 < Tr < 100 años	Baja
Tr > 100 años	Muy baja

El ANEXO III, ilustra un ejemplo de aplicación de metodología para evaluar la amenaza por inundaciones, basado en el trabajo realizado para el plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Chinchiná-POMCA.



## **5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN**

### **5.1. *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná-POMCA***

Para el caso del POMCA se consideró adecuado utilizar el nivel II de resolución (ver Tabla 11), por el tipo de información disponible en la cuenca, exceptuando la ciudad de Manizales que no se estimó debido a que el nivel de detalle que exige la ciudad es más riguroso, además, la información que dispone la ciudad de Manizales es muy detallada, por lo tanto se considera necesario hacer los estudios en un nivel I.

#### **5.1.1. *Antecedentes***

El POMCA nace por el convenio de contribución BOG0113303 suscrito entre el Estado de los Países Bajos y la Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible ASOCARS del 29 de noviembre de 2010, que tiene por objeto la Implementación y retroalimentación del componente de planificación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico - PNGIRH a través de la formulación del Plan Estratégico de la macrocuenca del río Magdalena – Cauca, la formulación del Programa de Priorización, Articulación y Coordinación de POMCAS a nivel de las 17 subáreas Hidrográficas, la formulación y/o ajuste de cuatro (4) Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas y la ejecución de medidas de administración del recurso hídrico como medidas de prevención contra los efectos del cambio climático.

Con base en el convenio anterior se escogió la cuenca del río Chinchiná como una de las cuencas prioritarias para su estudio, por esto se suscribió el Convenio de asociación para actividades de interés público CORPOCALDAS – ASOCARS – UNAL. -203 de 2011.

Aprovechando ser un proyecto piloto que servirá como base para próximas planificaciones territoriales en Colombia, para el caso de la cuenca del río Chinchiná se tuvo en cuenta la gestión de riesgo como determinante para la toma de decisiones. Por lo anterior en los términos de referencia de dicho proyecto se tuvo en cuenta requisitos como la caracterización y zonificación de la susceptibilidad, cálculo de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

#### **5.1.2. *Estructura para el desarrollo del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Chinchiná – POMCA***

**Tabla 33. Estructura del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Chinchiná**

Aprestamiento	
Diagnostico	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cálculo de las amenazas                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Amenazas prescriptivas</li> <li>• Amenazas determinantes</li> </ul> </li> <li>✓ Riesgo Implícito</li> <li>✓ Índice de Afectación</li> </ul>
Formulación	
Ejecución	
Seguimiento y evaluación	

En el presente capítulo se ilustrará la fase de diagnóstico y se exponen con ejemplos prácticos las diferentes metodologías y niveles los cuales se han explicado a lo largo del presente documento. Se podrá observar la identificación y evaluación de las amenazas por fenómenos naturales en la cuenca del río Chinchiná y su inclusión en la planificación territorial.

### **5.1.3. Fase de diagnóstico**

La finalidad de la fase de diagnóstico es identificar y evaluar las amenazas naturales en la cuenca del río Chinchiná, igualmente se expone la evaluación de la exposición que para este nivel se determinó conveniente un índice de afectación. El riesgo se evaluó bajo el concepto de riesgo implícito suficiente para el nivel II antes mencionado, y se determinó esta metodología como determinante en la planificación territorial para el POMCA.

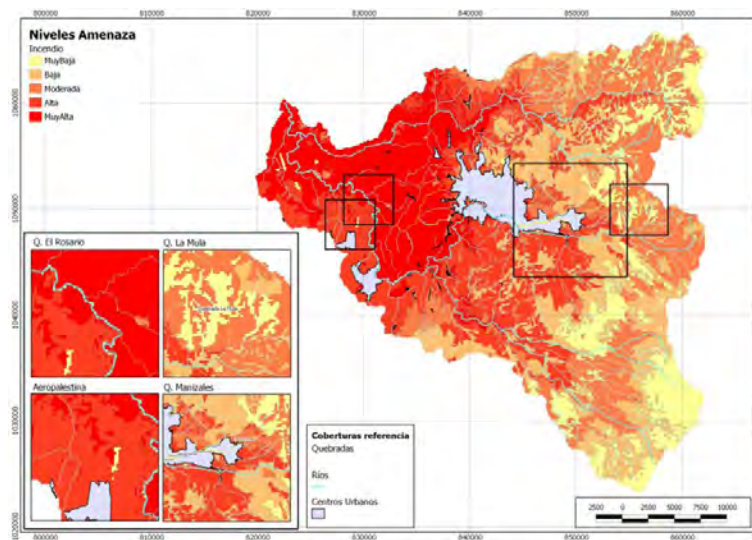
- ✓ Amenazas prescriptivas
  - ✓ Incendios forestales
  - ✓ Actividad sísmica
  - ✓ Cenizas volcánica
- ✓ Amenazas determinantes
  - ✓ Remoción en masa
  - ✓ Inundaciones
  - ✓ Flujos piroclásticos
- ✓ Riesgo implícito
- ✓ Índice de afectación

### 5.1.3.1. Amenazas prescriptivas

- **Incendios forestales**

Para el cálculo de la amenaza por incendios forestales se estimaron los factores climáticos, factores del relieve, la accesibilidad, factores históricos y la susceptibilidad de la vegetación a los incendios. Luego de estimadas estas variables se normalizan con la finalidad de correlacionarlas y ponderar las variables y factores que ayudado por una calculadora de mapas en un sistema de información geográfica se logra extraer el cálculo de la amenaza (Cardona, González, Mora et al, 2013).

Se utilizó la metodología propuesta por el IDEAM de acuerdo con el Protocolo para la Realización de Mapas de Zonificación de Riesgos a Incendios de la Cobertura Vegetal<sup>27</sup> Los resultados obtenidos de los niveles de amenaza permiten establecer medidas diferenciales de precaución o exigencias para evitar o reducir la posibilidad de incendios en la cuenca. La Figura 25 presenta los resultados de la evaluación en el área de la cuenca (Cardona, González, Mora et al, 2013).



**Figura 25. Distribución de niveles de amenaza por incendios forestales en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

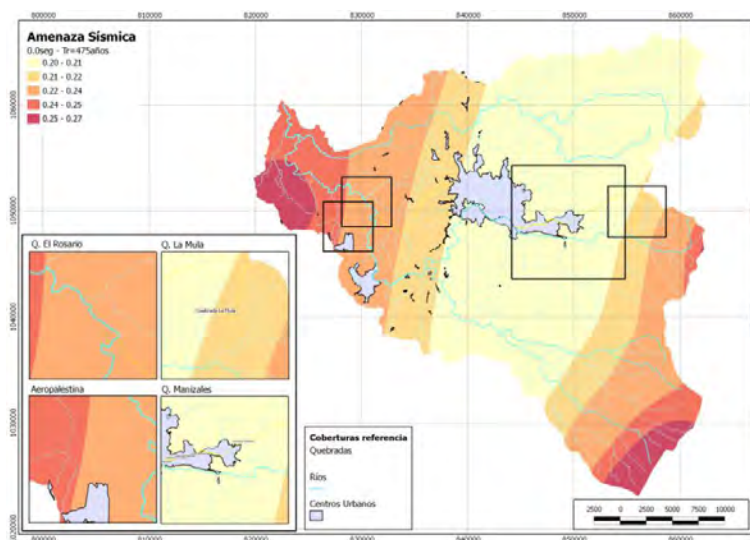
- **Actividad sísmica**

Los mapas de amenaza sísmica fueron estimados con base en el modelo de amenaza sísmica de la región, el cual se obtuvo utilizando la información histórica de eventos (catálogo de eventos) y el modelo tectónico de la zona de estudio. Para el presente análisis se consideraron dos condiciones de amenaza, una con y otra sin la fuente sísmica “Caldas

<sup>27</sup> IDEAM, Protocolo para la Realización de Mapas de Zonificación de Riesgos a Incendios de la Cobertura Vegetal. Escala 1:100.000. Bogotá, D.C., 2011. 109 pag

Tear”, que corresponde a una nueva interpretación geológica. Esta evaluación de amenaza se realizó con el programa CRISIS 2007<sup>28</sup> que hace parte de la plataforma CAPRA<sup>29</sup> (Cardona, González, Mora et al, 2013).

De la Figura 26 a la Figura 31 ilustran diferentes mapas de amenaza sísmica, utilizando la aceleración espectral para diferentes períodos de vibración estructural, para 475 años de período de retorno, con y sin considerar la existencia de la Caldas Tear (fractura o rasgadura en la placa de Nazca). Esta amenaza permite definir exigencias sismorresistentes para los elementos expuestos pero no se presenta como un determinante del ordenamiento territorial (Cardona, González, Mora et al, 2013).

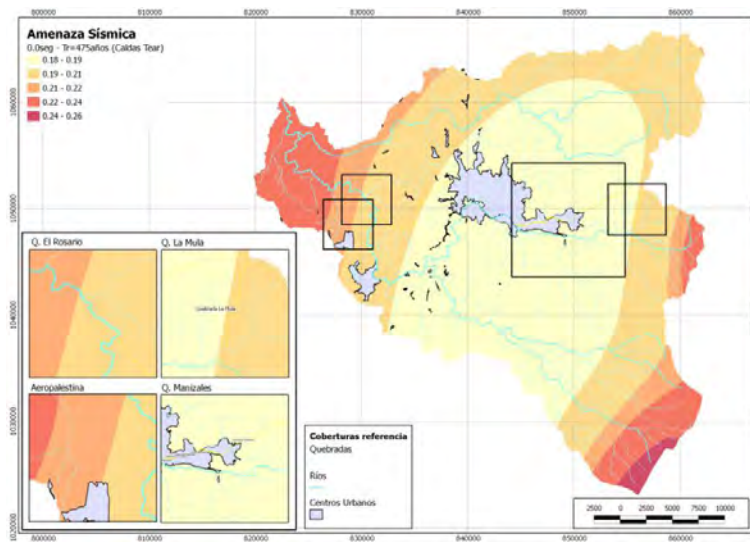


**Figura 26. Distribución de la aceleración máxima del terreno para 475 años de período de retorno en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

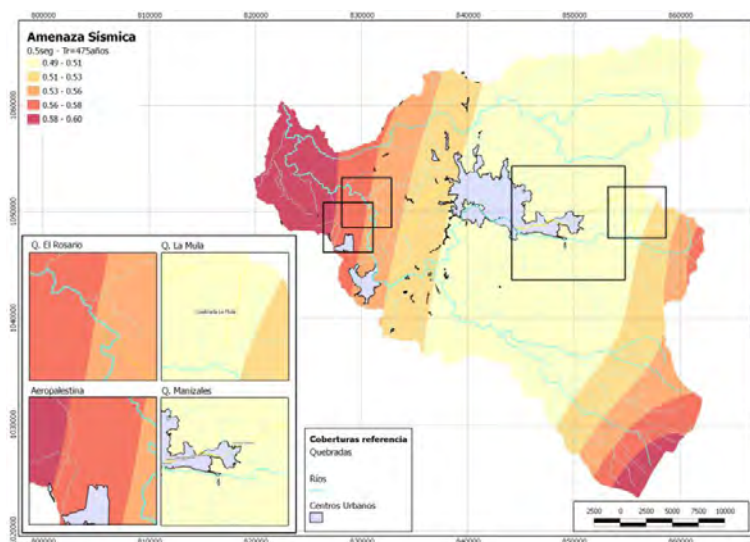
<sup>28</sup> CRISIS2007 fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional de México (UNAM), por M. Ordaz, A. Aguilar y J. Arboleda.

<sup>29</sup> [www.ecapra.org](http://www.ecapra.org)

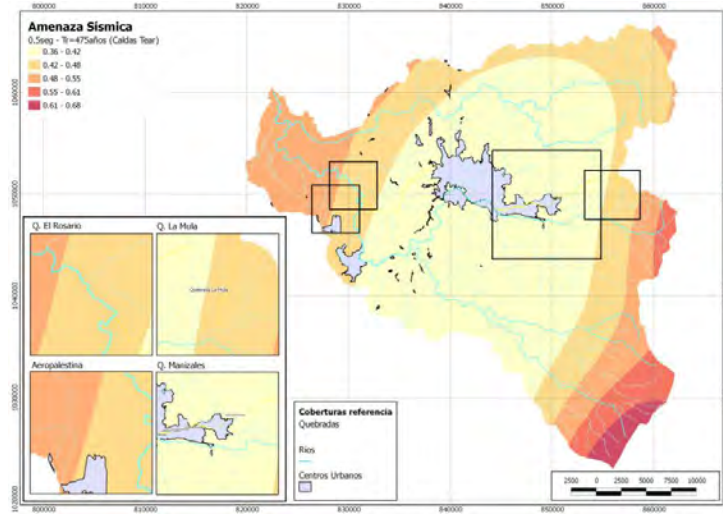




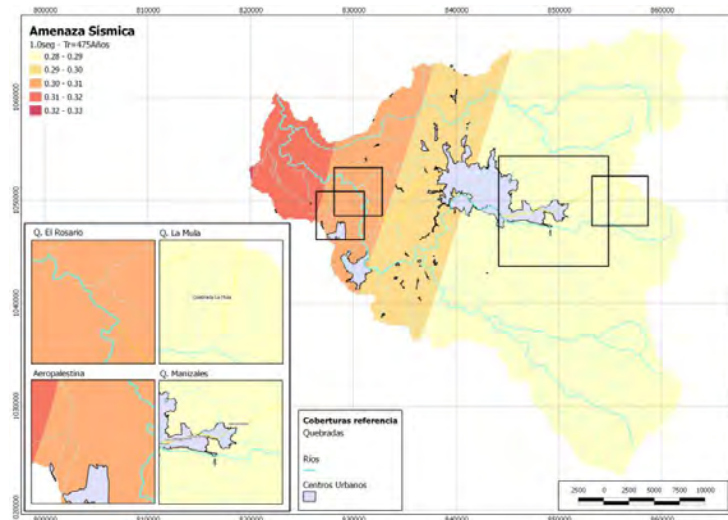
**Figura 27. Distribución de la aceleración máxima del terreno para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná incluyendo la influencia de la Caldas Tear (Cardona, González, Mora et al, 2013).**



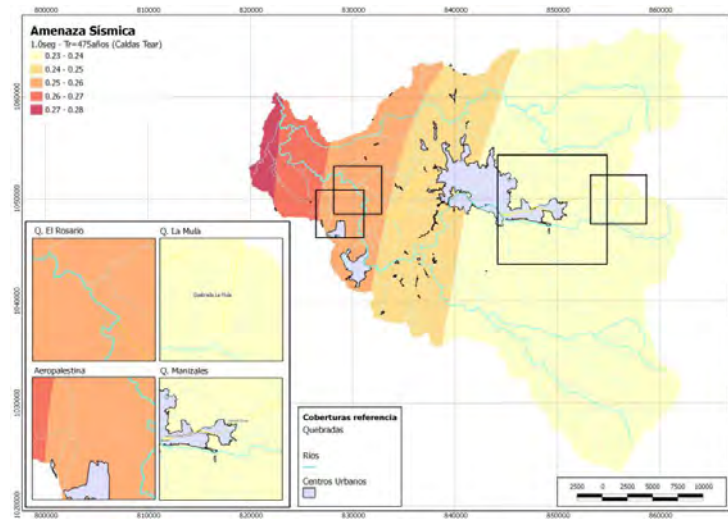
**Figura 28. Distribución de la aceleración espectral de 0.5seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).**



**Figura 29. Distribución de la aceleración espectral de 0.5seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná incluyendo la influencia de la Caldas Tear. (Cardona, González, Mora et al, 2013).**



**Figura 30. Distribución de la aceleración espectral de 1.0seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013).**



**Figura 31. Distribución de la aceleración espectral de 1.0seg para 475 años de periodo de retorno en la cuenca del río Chinchiná incluyendo la influencia de la Caldas Tear (Cardona, González, Mora et al, 2013).**

- **Caída de cenizas de origen volcánico**

Los niveles de amenaza para este tipo de producto volcánico se estimados a partir de un cálculo determinista utilizando el programa VHAST<sup>30</sup>. Este cálculo se basa en escoger un escenario, equivalente a la emisión de ceniza realizada por el volcán Nevado del Ruiz durante el año 2012. Los parámetros de intensidad que controlan el modelo son la altura máxima de la columna eruptiva y el volumen de “tephra” expulsado. Estos permiten definir la distribución de espesores de ceniza depositados luego de la erupción.

Los límites para cada uno de los niveles de amenaza por este producto volcánico se establecieron basados en un estudio realizado por el Ministerio del Interior y de Justicia sobre la vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos en el área de influencia del volcán Galeras, expuestos en la siguiente tabla (Ver Tabla 34 ).

**Tabla 34: Límites de intensidad para cada nivel de amenaza por caída de cenizas**

<b>Nivel de amenaza</b>	<b>Limite intensidad<sup>31*</sup></b>
<b>Moderada</b>	45 cm
<b>Baja</b>	23 cm
<b>Muy Baja</b>	< 23 cm

<sup>30</sup> www.vhast.org

<sup>31</sup> Límites establecidos según la Tabla 34: Límites de intensidad para cada nivel de amenaza por caída de cenizas (pag 26) del “Estudio de vulnerabilidad física y funcional a fenómenos volcánicos en el área de influencia del volcán Galeras.”, San Juan de Pasto, 26 de Febrero de 2009.

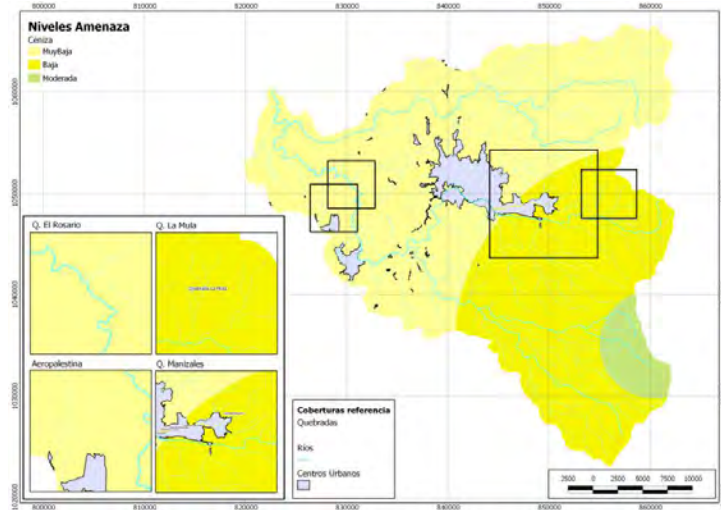


Figura 32. Distribución de niveles de amenaza por Caída de cenizas en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)

### 5.1.3.2. Amenazas determinantes

- Susceptibilidad de deslizamientos

Los niveles de amenaza fueron estimados a partir la curva de calibración del modelo de susceptibilidad. La susceptibilidad muy baja corresponde a áreas donde no es factible que se presenten deslizamientos que en general corresponden a zonas con una pendiente muy baja (menor igual al 10%). Los niveles (clases) de susceptibilidad restantes se establecen a partir de la curva de rendimiento o acierto en la ocurrencia previa de deslizamientos. El nivel de susceptibilidad moderada se establece con base en el criterio de que se dan condiciones en el sitio de interés equivalentes a lugares donde se ha acertado en un 85% de los deslizamientos que se han presentado. El nivel alto y muy alto se establece de manera proporcional en el segmento de pendiente constante de la curva donde la incertidumbre de acierto es la menor, como se muestra en la Figura 33

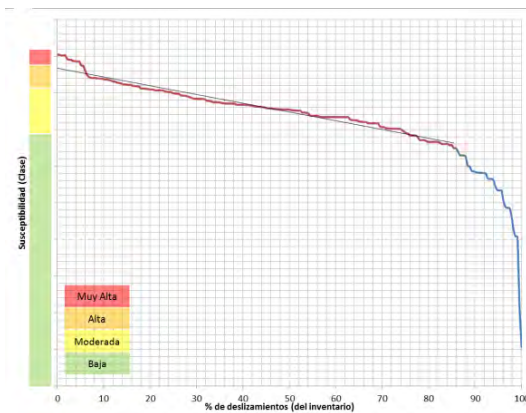
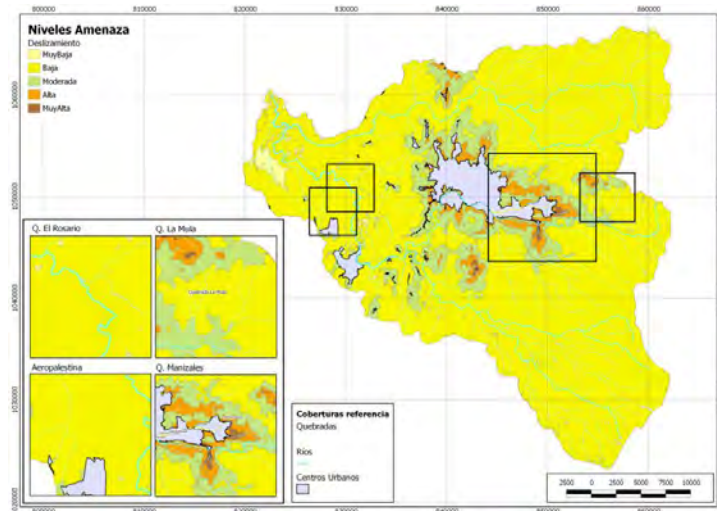


Figura 33. Categorización de la susceptibilidad a deslizamientos. (Cardona, González, Mora et al, 2013)

La distribución del grado de amenaza por niveles utilizando la susceptibilidad de inestabilidad como criterio para la categorización de contornos con condiciones similares en la cuenca se presenta en la Figura 34



**Figura 34. Distribución de niveles de amenaza por susceptibilidad de deslizamiento en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

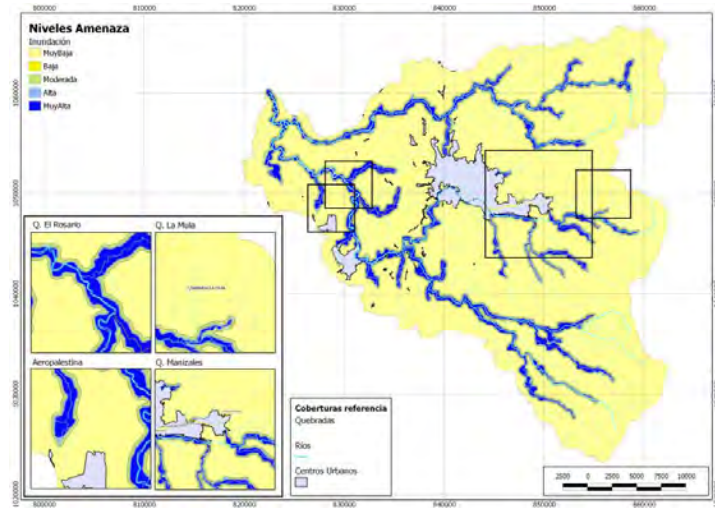
- **Inundaciones**

Los niveles de amenaza fueron estimados con el módulo de inundación de la plataforma CAPRA por medio del cual a partir del modelo digital del terreno, factores de escurrimiento (definidos en función de los usos del suelo y cobertura vegetal) y de información histórica de lluvias en la cuenca se estimaron las manchas de inundación para diferentes períodos de retorno, estableciendo los límites para cada uno de los niveles de amenaza de acuerdo con la siguiente tabla (Bernal, 2013; UNC, 2013).

**Tabla 35: Límites de intensidad para cada nivel de amenaza por inundación**

<b>Nivel de amenaza</b>	<b>Límite intensidad</b>
<b>Muy Alta</b>	Mancha de inundación Tr 10 años
<b>Alta</b>	Mancha de inundación Tr 10 - 25 años
<b>Moderada</b>	Mancha de inundación Tr 25 - 50 años
<b>Baja</b>	Mancha de inundación Tr 50 - 100 años
<b>Muy Baja</b>	Mancha de inundación >Tr 100 años

La distribución de niveles de amenaza en la cuenca se presenta en la Figura 35



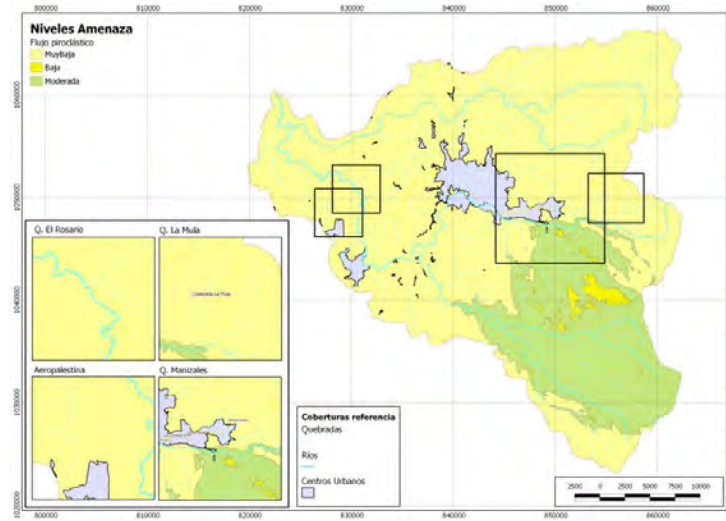
**Figura 35. Distribución de niveles de amenaza por inundación en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

- **Flujos piroclásticos**

Los niveles de amenaza fueron estimados utilizando los resultados obtenidos utilizando el programa de cálculo VHASt realizado originalmente en el marco de la plataforma CAPRA. El parámetro de intensidad que controla el modelo de flujos piroclásticos es la altura del vértice del cono de energía asociado al tamaño de las erupciones. Teniendo en cuenta la frecuencia relativa de los posibles fenómenos se establecieron los límites de los contornos de los grados o niveles de amenaza de acuerdo a la siguiente tabla (González, 2013; UNC, 2013).

**Tabla 36: Límites de intensidad para cada nivel de amenaza por flujos piroclásticos**

<b>Nivel de amenaza</b>	<b>Límite intensidad</b>
<b>Moderada</b>	Mancha de flujos piroclásticos
<b>Baja</b>	Áreas no afectables rodeadas por el nivel anterior
<b>Muy Baja</b>	Áreas fuera de la mancha de flujos piroclásticos



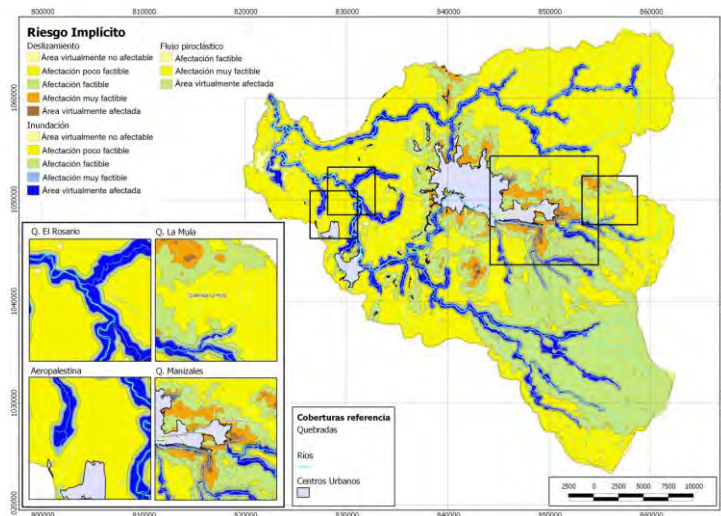
**Figura 36. Distribución de niveles de amenaza por flujos piroclásticos en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

### **5.1.3.3. Riesgo implícito**

Como se expuso en la sección 4.4 Desde el punto de vista del ordenamiento territorial no todas las amenazas son realmente relevantes en la definición de los usos del suelo; es decir, no todos los fenómenos tienen una alta incidencia en la posibilidad de que ciertas áreas deban ser ocupadas o que se puedan realizar actividades que signifiquen la exposición permanente de activos, bienes o servicios y, sobretodo, de personas que puedan permanecer en dichas áreas consideradas como propensas a ser afectadas por fenómenos peligrosos. A este tipo de amenazas se pueden asociar fenómenos como los deslizamientos o movimientos en masa, los flujos de lodo o de escombros, las avalanchas, las inundaciones de alta pendiente o comportamiento torrencial, entre otros, cuya energía es tan alta que su intensidad se considera lo suficientemente severa que cualquier elemento expuesto, en términos prácticos, esté sujeto a un daño total o casi total en caso de presentarse el evento. En otras palabras, estar expuesto en las áreas propensas a este tipo de fenómenos implica un alto potencial de consecuencias o una situación de riesgo implícito. Por esta razón, la zonificación de amenazas de este tipo se traduce en términos prácticos en una zonificación de riesgo, sea porque ya exista algo expuesto o porque algo pueda estar expuesto en ese sitio en el futuro (Cardona, Mendes et al, 2013, Parte I).

En el caso de la cuenca del río Chinchiná, en donde no se obtuvo información detallada de elementos expuestos en cada predio o sitio, el riesgo implícito es el que tiene o tendría cualquier edificación u obra de infraestructura o elemento expuesto, por estar real o tácitamente ubicado en zonas identificadas como de amenaza, resultado de una o múltiples fenómenos que tienen influencia en el área con determinado grado de intensidad y frecuencia. Figura 37 presenta el mapa de riesgo implícito de la cuenca del río Chinchiná teniendo en cuenta las amenazas hidrogeológicas extremas dominantes en la cuenca (deslizamiento, inundación/avalancha, flujos piro clásticos). Para el efecto se delimitan

contornos de riesgo teniendo en cuenta el nivel de amenaza de mayor grado en cada sitio; es decir, envolventes de la superposición de cada nivel de amenaza (Cardona, González, Mora et al, 2013, Parte I).



**Figura 37. Distribución del riesgo implícito por la combinación de los niveles (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

Desde el punto de vista del ordenamiento territorial la identificación de áreas con una calificación del grado de amenaza o riesgo es fundamentalmente un procedimiento normativo (*benchmark*) para orientar las decisiones y las acciones que se deben llevar a cabo. En el caso de las cuencas hidrográficas este tema es de especial importancia dado que las zonas de amenaza y riesgo identificadas no necesariamente son las mismas zonas donde se genera el peligro. Este es un aspecto particularmente relevante por ejemplo en el caso de las inundaciones. Por otra parte, si la resolución o detalle de los estudios no es en términos relativos demasiado gruesa, como es este caso, para efectos de los planes de ordenamiento territorial de los municipios, los estudios de amenaza y riesgo realizados para los POMCA son ya un insumo suficiente para el componente rural de los POT. Ahora bien, aun cuando los POMCA tienen un carácter vinculante desde el punto de vista de la zonificación ambiental, desde la amenaza y riesgo su resolución es muy gruesa y debe ser fundamentalmente indicativa de las áreas que deben estudiarse con mayor detalle (en los POT u otros instrumentos de planificación de mayor detalle). En el caso de este estudio se han realizado algunos ejemplos que ilustran este planteamiento. En la Tabla 4, se presenta la manera como se definieron y utilizaron los niveles de amenaza, usando criterios de probabilidad relativa, y como se derivaron los niveles de riesgo implícito con fines de orientación de la imagen objetivo de la planificación del territorio en forma indicativa. Esta propuesta se está utilizando actualmente para efectos de la legislación que se encuentra en curso de expedición para la incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial en el marco de la reglamentación del artículo 189 del decreto-ley 19 de 2012 y de los artículos 39, 40 y 41 de la ley 1523 de 2012 (Mendes, 2013).



Ahora bien, la sola caracterización del riesgo implícito en un área no es suficiente si no se deriva de dicha caracterización la imagen objetivo o vocación del territorio en un plazo determinado (la duración del POMCA) y el tratamiento correspondiente que debe platearse o se deriva. Se considera en este trabajo tener en cuenta que los niveles de amenaza y riesgo son inevitablemente relativos y que la definición de si un riesgo es mitigable o no también es una definición relativa que depende no sólo del grado de mitigabilidad de la amenaza y del riesgo sino de la factibilidad o decisión de llevar a cabo las intervenciones que implique la reducción o el control del nivel de amenaza existente, lo que sólo es posible de definir si se realizan estudios detallados y cuidadosos en cada caso. De esto dependerá si la vocación del suelo o la imagen objetivo de su uso (y sus restricciones o condicionamientos) puedan llegar a cambiar en el futuro por la modificación de nivel de amenaza o riesgo del área en consideración durante el tiempo previsto de implementación del POMCA o el instrumento de planificación (Cardona, González, Mora et al, 2013).

Basado en lo anterior las exigencias deben obedecer a una normativa propia de requisitos mínimos de idoneidad y seguridad que no serían más que las reglas del juego para establecer la posible mitigabilidad de la amenaza y el riesgo. La Tabla 4 presenta el tipo de intervenciones indicativas que el POMCA debe sugerir a los POT en las áreas identificadas con los diferentes niveles de riesgo implícito y que debido a la baja resolución relativa de estos estudios, son intervenciones que tendrían que definirse con el nivel de detalle apropiado a nivel municipal (nivel I).

#### **5.1.3.4. Índice de afectación**

Luego de estimar las diferentes amenazas y zonificarlas en el territorio, el POMCA el cual se determinó con un nivel de resolución II dependiendo de la información se podría en algunos casos y en algunas amenazas llegar hasta vulnerabilidad, pero en este caso específico debido a la ausencia de información solo se logró estimar un índice de evaluación que determine cuál es la afectación que un predio tiene según la amenaza o amenazas a las que este expuesto. Se expondrá a continuación una breve metodología la cual se aplicó en el POMCA del río Chinchiná desarrollada por el componente de gestión de riesgos y su equipo de trabajo (Cardona, González, González, Mora et al, 2013).

- **Determinación del índice de afectación por amenaza**

Con la información de los niveles de amenaza obtenidos y los predios rurales en la cuenca del río Chinchiná, se estimó el índice de afectación para cada amenaza por predio según las ecuaciones 1 y 2 que se indican a continuación (Cardona, González, Mora et al, 2013).

La ecuación 1 determina el índice de afectación para un predio particular por cada uno de los niveles de amenaza respecto del área total de terreno del predio (Cardona, González, Mora et al, 2013).

$$IA_{ai} = \frac{A_i}{A_T} \quad (1)$$

Dónde:

$IA_{ai}$  Índice de afectación de amenaza debido a la amenaza  $a$  por el nivel de amenaza  $i$   
 $A_i$  Área afectada por el nivel de amenaza  $i$   
 $A_T$  Área total de terreno

Estimados los índices de afectación para cada nivel de amenaza es necesario agregarlos para presentar un único índice de afectación para da una de las amenazas descritas, para el efecto se realiza una suma ponderada según la ecuación 2 (Cardona, González, Mora et al, 2013).

$$IA_a = \frac{\sum_{i=1} IA_{ai} \times P_i}{\max(P_i)} \quad (2)$$

Dónde:

$IA_a$  Índice de afectación total para el predio debido a la amenaza  $a$   
 $IA_{ai}$  Índice de afectación de amenaza  $a$  en nivel de amenaza  $i$   
 $P_i$  Peso asignado al nivel de amenaza  $i$

Los factores de ponderación asignados a los niveles de amenaza son como sigue:

Tabla 37. Pesos de ponderación de niveles de amenaza

Nivel de amenaza	Peso
Muy Baja	1
Baja	2
Moderada	3
Alta	4
Muy Alta	5

- **Determinación del índice de afectación combinado (múltiples amenazas)**

Con base a los índices de afectación ponderados obtenidos para cada predio por amenaza se realiza el cálculo del único índice de afectación, combinando las amenazas asociadas con la susceptibilidad de deslizamientos, las manchas de inundación y de flujos piroclásticos, de acuerdo a la siguiente ecuación (Cardona, González, Mora et al, 2013).

$$IA_T = \frac{IA_1}{\sum_{a=1}^n IA_a} IA_1 + \frac{IA_2}{\sum_{a=1}^n IA_a} IA_2 + \dots + \frac{IA_n}{\sum_{a=1}^n IA_a} IA_n$$

$$IA_T = \frac{\sum_{a=1}^n IA_a^2}{\sum_{a=1}^n IA_a} \quad (3)$$

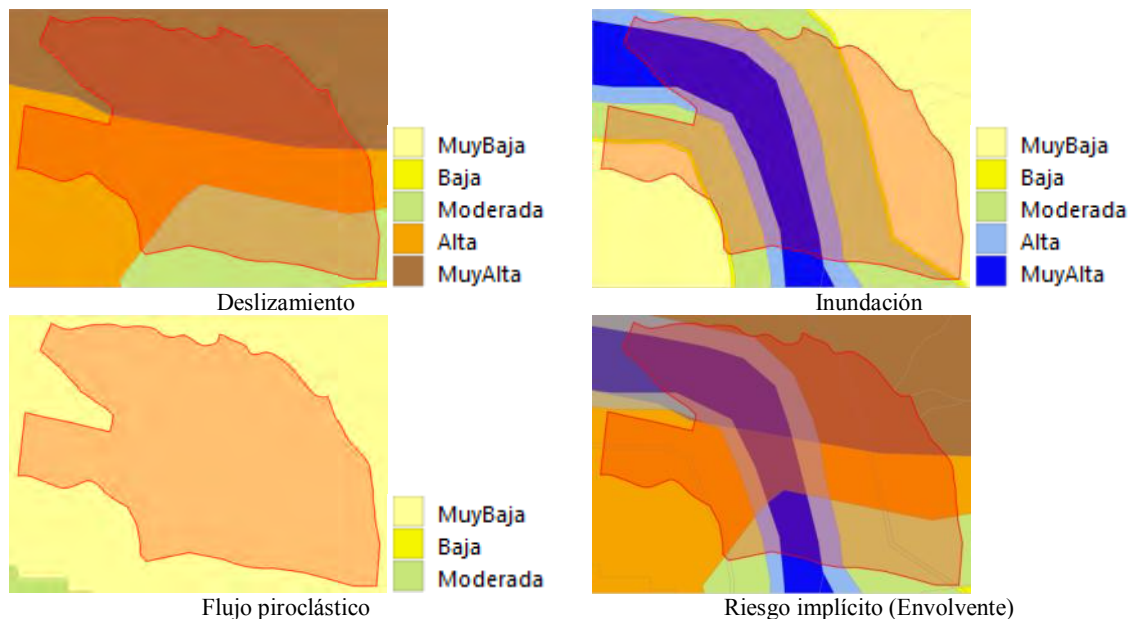
Dónde:

$IA_T$  Es el índice de afectación total (combinado)

$IA_a$  Índice de afectación para el predio debido a la amenaza  $a$

De la anterior ecuación se observa que el índice de afectación es normalizado con el subtotal de los índices de afectación en consideración ( $\sum IA_a$ ) y se realiza de nuevo una la suma ponderada de los índices de afectación por amenaza ponderados de acuerdo a la participación de cada índice en el total ( $IA_n$ ) (Cardona, González, Mora et al, 2013).

El cálculo de los índices de afectación (áreas afectadas por el nivel de amenaza) se realiza con el apoyo de una herramienta SIG y bases de datos geoespaciales. La Figura 37 presenta las áreas de afectación por cada nivel de amenaza para las amenazas de deslizamiento, inundación y flujos piroclásticos (Cardona, González, Mora et al, 2013).



**Figura 38. Áreas de afectación por amenaza para el predio rural. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

El valor de las áreas de afectación respecto del área total del predio urbano (índice de afectación,  $IA_{ai}$ ) del ejemplo se presentan en la Tabla 38 donde además se realiza el cálculo del índice de afectación ( $IA_a$ ) del predio para cada una de las amenazas de interés según la metodología presentada anteriormente (Cardona, González, Mora et al 2013).

**Tabla 38. Cálculo del índice de afectación por amenaza (Cardona, González, Mora et al, 2013)**

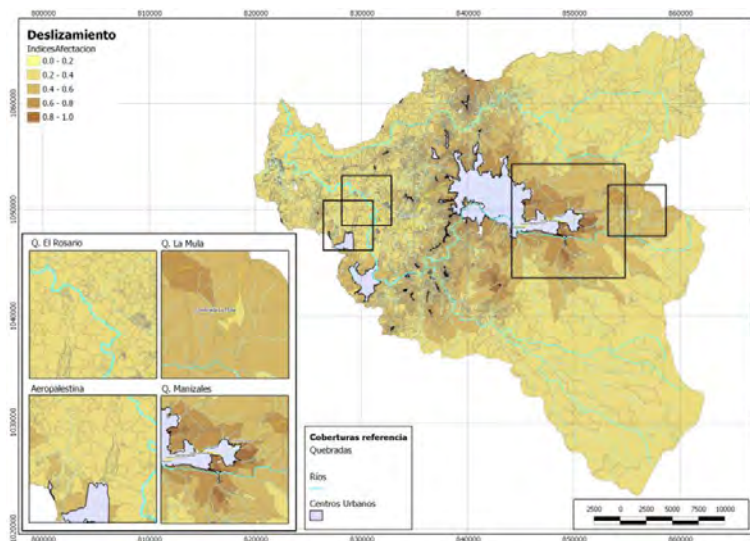
Amenaza	Nivel	$P_i$	$IA_{ai}$	$P_i \times IA_{ai}$	$\Sigma (P_i \times IA_{ai})$	$IA_a$
Susceptibilidad deslizamiento	MuyBaja	1	0.00	0.00	4.18	0.84
	Baja	2	0.00	0.00		
	Moderada	3	0.22	0.65		
	Alta	4	0.38	1.52		
	MuyAlta	5	0.40	2.01		
Inundación	MuyBaja	1	0.26	0.26	3.07	0.61
	Baja	2	0.03	0.06		
	Moderada	3	0.32	0.97		
	Alta	4	0.17	0.66		
	MuyAlta	5	0.23	1.13		
Flujo piroclástico	MuyBaja	1	1.00	1.00	1.00	0.33
	Baja	2	0.00	0.00		
	Moderada	3	0.00	0.00		

De igual manera que para los índices de afectación por amenaza para el predio, en la se presenta el cálculo del índice de afectación combinado.

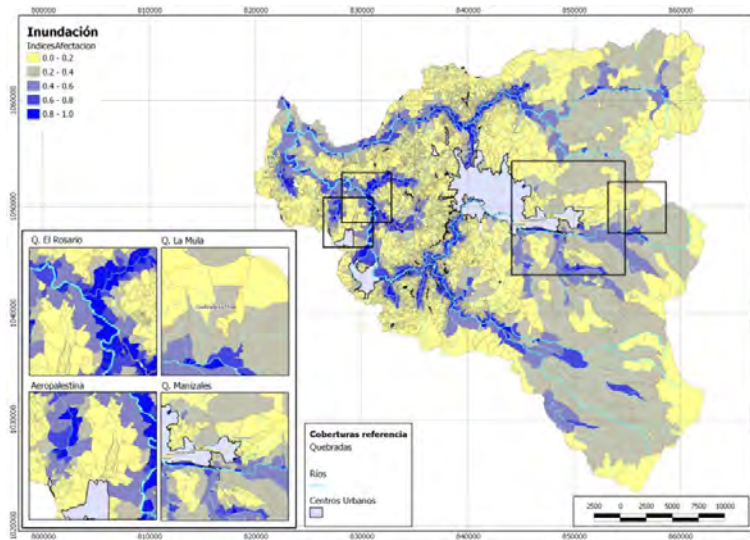
**Tabla 39.** Cálculo del índice de afectación combinado (múltiples amenazas). (Cardona, González, Mora et al, 2013)

Amenaza	$IA_a$	$IA_a/\Sigma IA_n$	$IA_T$
Susceptibilidad deslizamiento	0.84	0.47	0.67
Inundación	0.61	0.34	
Flujo piroclástico	0.33	0.19	

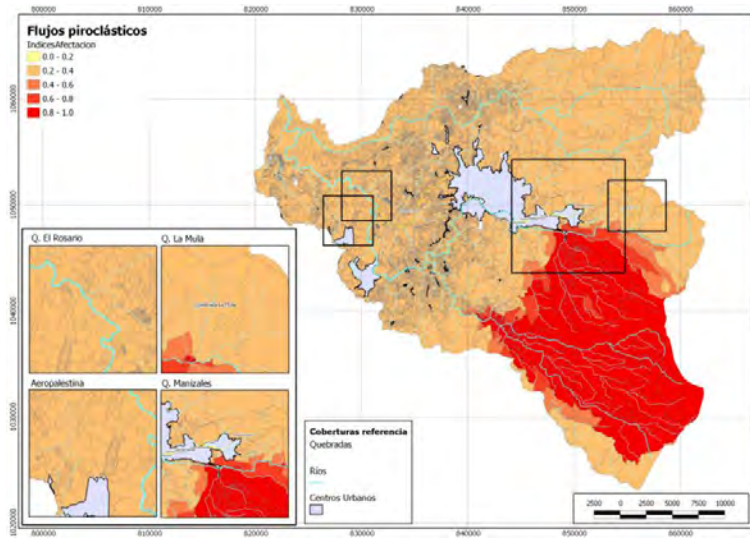
La Figura 39, Figura 40 y Figura 41 representan el índice de afectación a nivel predial para cada amenaza individual considerada en el análisis y la Figura 42 presenta el índice de afectación para el riesgo implícito a nivel predial. Esta evaluación es indicativa y puede ser especialmente útil para orientar las disposiciones de los POT a nivel rural en los municipios de la cuenca, no obstante debe tenerse especial cuidado debido a que el grado de resolución de estos estudios es bajo y la escala equivalente utilizada es amplia para efectos de decisiones específicas (Cardona, González, Mora et al, 2013).



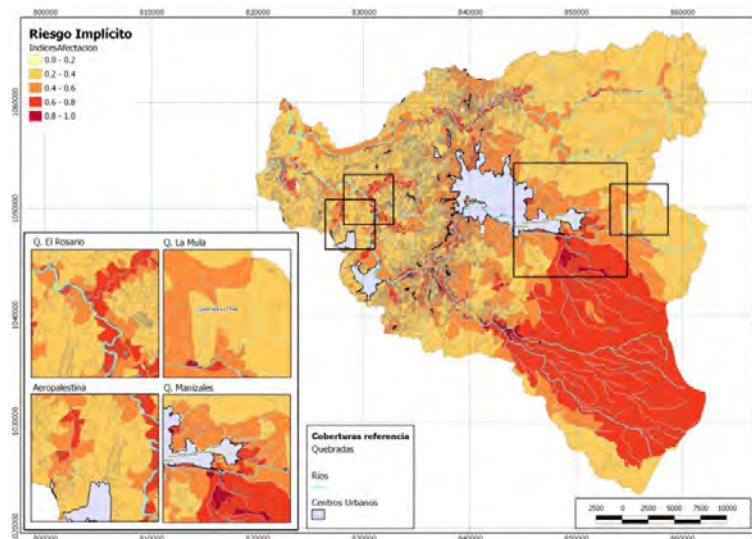
**Figura 39.** Distribución del índice de afectación por susceptibilidad de deslizamiento en los predios rurales de la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)



**Figura 40. Distribución del índice de afectación por inundación en los predios rurales de la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**



**Figura 41. Distribución del índice de afectación por flujos piroclásticos en los predios rurales de la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, González, Mora et al, 2013)**



**Figura 42.** Distribución del índice de afectación por amenazas combinadas (riesgo implícito) en los predios rurales de la cuenca del río Chinchiná (Cardona, González, Mora et al, 2013)

## **5.2. Pieza intermedia de planificación, zona de expansión urbana de Manizales, El Rosario**

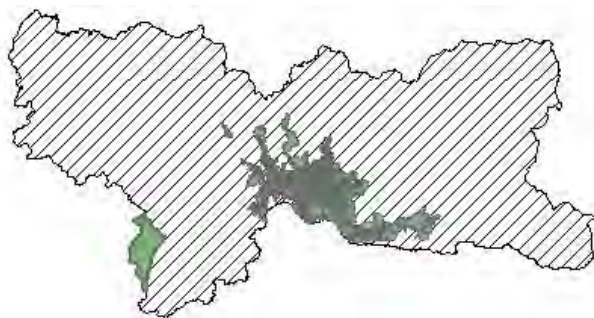
En el marco la elaboración del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Chinchiná (POMCA), el grupo técnico encargado del componente de gestión del riesgo de desastres en sus términos de referencia incluía el análisis de amenaza en sitios estratégicos en relación con proyectos de desarrollo. En este sentido, se consideró relevante incluir un análisis con la resolución que se ha utilizado para el POMCA de una zona de expansión importante para el municipio de Manizales. Teniendo en cuenta el interés de Corpocaldas y la Secretaría de Planeación Municipal de Manizales en contar con información útil para definir el retiro del cauce del río y la franja mínima que debe considerarse para efectos de seguridad y protección en los procesos de desarrollo urbano, se identificó el sector de El Rosario, en zona rural del municipio de Manizales, dado que se encuentra incluido en el Plan de Ordenamiento Territorial como zona de posible expansión urbana dentro de los límites de la cuenca del río Chinchiná (Cardona, González, Mora et al, 2013).

El diagnóstico de las condiciones de amenaza y riesgo de la cuenca determinó que en la zona de El Rosario las amenazas más relevantes son la inundación y la posibilidad de flujos de lodo debido a posibles erupciones del Volcán Nevado del Ruiz. Por esta razón, como complemento del estudio “Caracterización geológica, geomorfológica y zonificación de amenazas por fenómenos asociados a flujos de lodo, avalanchas y lahares para el plan parcial El Rosario”, elaborado por Correa e Hincapié en 2010, que tuvo como principal referencia para el efecto el flujo de lodo o lahar generado por la erupción volcánica de noviembre 13 de 1985, se evaluó cuál debe ser la dimensión de la ronda hídrica en el segmento respectivo del río. Dicha franja se determinó de acuerdo con la “Guía para el

acotamiento de las rondas hídricas de los cuerpos de agua de acuerdo con lo establecido en el artículo 216 de la Ley 1450 de 2011, Plan Nacional de Desarrollo”, elaborada por la Universidad Nacional de Colombia para el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; documento entregado en noviembre de 2012 que se encuentra en discusión. Dicha evaluación, que aquí se transcribe en sus aspectos fundamentales, esta descrita con mayor detalle en el “Estudio hidrológico considerando la fusión del glaciar para determinar las zonas inundables en el sector del plan parcial de la zona El Rosario del Municipio de Manizales” elaborado por A. Marulanda y O. Fonseca para el proyecto “Incorporación del Riesgo en la Planificación y Toma de Consciencia” dentro del Programa de Gestión Integral del Riesgo que realiza la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, para Corpocaldas. Dicho trabajo se terminó en agosto de 2013 por parte del Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental del Instituto de Estudios Ambientales-IDEA.

Una vez obtenida la ronda hídrica resultado de la envolvente de los tres componentes evaluados de acuerdo con la guía antes mencionada (e.g. el ecosistémico o biota, la geomorfología del río y la mancha de inundación o de flujo de lodo) se comparó con la propuesta urbanística del plan parcial de El Rosario, con lo cual se pudo establecer que aun cuando las evaluaciones son simplificadas y conservadoras (a nivel de un POMCA) la propuesta urbanística ha tenido en cuenta los retiros y fajas de protección necesarias con excepción de algunas áreas menores que con una evaluación detallada de estos tres componentes para el POT seguramente no significarán un conflicto de usos del suelo. En cualquier caso la protección de la vida frente a posibles amenazas naturales, a criterio de este grupo técnico, está garantizada puesto que no se permiten actividades permanentes en las zonas de peligro o riesgo implícito que se deriva de la utilización como referente del flujo de lodo que se presentó a causa de la erupción del Nevado del Ruiz en noviembre de 1985 y un retiro adicional.

### ***5.2.1. Localización geográfica del sector El Rosario***



**Figura 43. Localización zona de expansión urbana El Rosario. Mapa geográfico del municipio de Manizales**

### ***5.2.2. Clasificación de la amenaza como determinante para el ordenamiento territorial.***



Como se expuso anteriormente se han realizado varios estudios técnicos sobre identificación del riesgo en el sector el Rosario, identificándose como principales amenazas las inundaciones y los flujos de lodo. El objetivo de ilustrar el trabajo realizado en la Universidad Nacional, además de algunos consultores externos, es el de mostrar cómo a partir de la identificación de los riesgos se desarrolla un proyecto de planificación urbana con todas las precauciones que garanticen el derecho a la vida y proporcionar una óptima calidad de vida a sus habitantes.

### **5.2.3. Flujo de lodo**

Los flujos de lodo en la cuenca pueden presentarse por diferentes causas. Acumulación de cenizas o de otros productos volcánicos puede derivar en flujos de lodo en caso de presentarse lluvias o caudales importantes en las cuencas tributarias. Procesos de sedimentación o grandes deslizamientos pueden generar represamientos y posteriores flujos de escombros o avalanchas. Ahora bien, el deshielo de glaciares a causa de erupciones volcánicas son en este caso los eventos que podrían presentarse con mayor dimensión, tal como lo indican los registros geológicos de erupciones anteriores del Nevado del Ruiz.

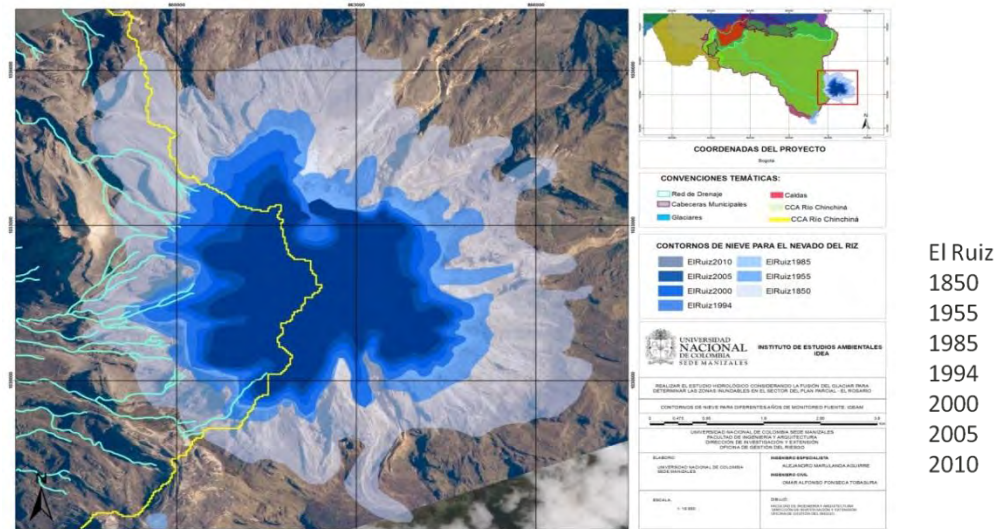
El volumen de un lahar depende de la superficie del glaciar que pudiera ser afectada por productos volcánicos a altas temperaturas (lavas, piroclastos, flujos piroclásticos), y por lo tanto el volumen de agua que puede bajar por el cauce del río depende, en el caso del Nevado del Ruiz, de la magnitud y extensión del flujo piroclástico y de su acción sobre el glaciar tributario de la cuenca. Este tipo de estimación, usualmente, se obtiene de hacer supuestos acerca del porcentaje del glaciar que podría fusionarse según el tipo y las características de un flujo piroclástico factible o probable; lo que involucra importantes incertidumbres. En todo caso suponer el total deshielo del glaciar es un escenario excesivo y difícilmente factible de acuerdo con el conocimiento existente. Esta circunstancia en casos de volcanes sin información sobre eventos anteriores recientes –porque no se han presentado– hace muy difícil las estimaciones probabilistas de los eventos factibles. Ahora bien, aunque se cuente con información histórica o con registros de los volúmenes y tipos de flujos de lodo que se han presentado –lo que ya es una situación muy favorable – asociar a dichos eventos una tasa de recurrencia o de excedencia (o su equivalente período de retorno) es una tarea difícil de realizar y de sustentar desde el punto de vista vulcanológico, hidrológico e hidráulico. Desde este punto de vista es importante señalar que, en la actualidad, es una situación claramente favorable contar con información acerca del flujo de lodo que se presentó en noviembre de 1985. Este flujo de lodo se puede considerar un buen referente, dadas las incertidumbres existentes, y aunque es difícil asociarle una tasa de excedencia con certeza, su utilización para caracterizar la amenaza es razonable en el sentido que ya una vez se presentó este evento y su dimensión fue considerable. Desde el punto de vista probabilista, con base en la información histórica, podría aceptarse que equivale a un período de retorno de múltiples décadas e incluso de cientos de años y, en todo caso, en la mayoría de los segmentos del río, es mayor a crecientes o inundaciones causadas por lluvias con períodos de retorno bastante amplios, como ya ha sido establecido

en los estudios para la estimación de las manchas de inundación realizados para el POMCA (Cardona, González, Mora et al, 2013)

#### ***5.2.4. Consideraciones acerca de la influencia del cambio climático***

Otro aspecto de relevancia en este caso es el retroceso del glaciar del Nevado del Ruiz en los últimos años, que ha sido un proceso especialmente notable, como también lo ha sido en otros glaciares tropicales andinos. Existe amplia literatura técnica acerca de las evidencias de este proceso, que ha venido ocurriendo en la Cordillera de los Andes y en algunos casos ha significado la desaparición de glaciares completos en las últimas décadas. De continuarse este proceso y de acuerdo con las tendencias existe en la práctica la certeza que otros glaciares van a desaparecer en las próximas décadas, entre los cuales se encuentra el Nevado del Ruiz. De ser esto cierto –y no hay razón para pensar que no vaya ser así– paulatinamente la posibilidad de tener lahares o flujos de lodo de gran tamaño por erupciones volcánicas es cada vez menos probable y en un lapso relativamente menor no podrán presentarse estos fenómenos en la cuenca como se han presentado en el pasado (Cardona, González, Mora et al, 2013).

Es importante señalar que el Nevado del Ruiz ha perdido mucho hielo (el 38% de 1989 a 2004), como lo ilustra la Figura 44, sin embargo dado que principalmente esto ha venido ocurriendo en las lenguas y partes más externas del glaciar, donde es menos probable que alcance a llegar un flujo piroclástico, dicho retroceso no implica la imposibilidad de tener un deshielo importante por erupción volcánica en el estado actual del glaciar. En otras palabras, el hielo que realmente podría contribuir a un nuevo flujo de lodo en caso de erupción volcánica con flujos piroclásticos u otros productos volcánicos a altas temperaturas sería el más cercano al cráter donde hay espesores de hielo importantes. Algunos creen que puede haber incluso espesores del orden de 200 metros de hielo en las cercanías al cráter Arenas. Ahora bien, tener dichos espesores tampoco significa que se pueda presentar su total fusión dado que al caer un flujo o corriente piroclástica de alta densidad sobre el hielo, al mismo tiempo que se fusiona la parte superior del glaciar, también el flujo mismo se enfría y solidifica, aislando el hielo de nuevos flujos piroclásticos que caigan encima posteriormente (Marulanda & Fonseca, 2013).



**Figura 44. Retracción del glaciar del Nevado del Ruiz (Marulanda & Fonseca, 2013).**

Existe amplia literatura técnica acerca del proceso de retroceso de los glaciares tanto por entidades técnicas como el IDEAM, el Servicio Geológico Colombiano - SGC, la Universidad Nacional de Colombia y diferentes investigadores colombianos y extranjeros. En particular, es conocido que la reducción de glaciares tropicales ha sido considerada una de las pruebas del calentamiento global, lo que ha sido tratado ampliamente por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC en inglés) en sus diferentes informes de evaluación. Una de las investigaciones que resulta especialmente relevante al respecto ha sido la realizada por Poveda y Pineda (2009): “*Reassessment of Colombia’s tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010–2020 decade?*”, en la cual se afirma que de seguirse la tendencia y la tasa de reducción de los últimos años, los glaciares de Colombia desaparecerían en el 2022; es decir en un lapso aproximadamente de 10 años a partir de ahora. Se estima que en el Nevado del Ruiz hay unos 8 km<sup>2</sup> de glaciar y que el retroceso es en promedio de unos 360,000 m<sup>2</sup> al año. De aceptarse la hipótesis de Poveda y Pineda implicaría que los flujos de lodo factibles de tamaño importante sólo se podrían presentar en caso de una erupción importante del volcán Nevado del Ruiz en el lapso que queda de la actualidad al 2022.

En 1985, de acuerdo con los cálculos realizados acerca del tamaño de los flujos de lodo debido a la erupción del volcán Nevado del Ruiz y del tamaño del glaciar en ese momento, se estima que el volumen de deshielo debió estar entre el 5% y el 8%. Actualmente no se podría descartar un volumen similar por lo que ya se mencionó previamente. La probabilidad de tener un flujo de lodo mayor al ocurrido en 1985 cada vez es menor y depende de la probabilidad de que se presente una fuerte erupción en las próximas décadas, pues de ocurrir posteriormente ya no tendría las mismas implicaciones para la cuenca del río Chinchiná. Por lo expuesto anteriormente, de acuerdo con el criterio de diversos expertos en vulcanología, glaciología e hidrología, usar como referentes el flujo de lodo de 1985 para definir la amenaza en la cuenca del río Chinchiná parece razonable, no obstante

las incertidumbres asociadas y los argumentos a favor y en contra de la posibilidad de que los flujos de lodo puedan ser mayores y que con el tiempo en pocos años ya no podrían presentarse.

#### **5.2.5. Enfoque metodológico adoptado para la estimación de la ronda hídrica**

La estimación preliminar de la ronda hídrica se realizó con base en el siguiente procedimiento metodológico:

1. Delimitación de las rondas hídricas mediante la metodología de clasificación geomorfológica.
2. Delimitación de las rondas hídricas con base en el estudio previo de caracterización geológica, geomorfológica y zonificación de amenazas por fenómenos asociados a flujos de lodo, avalanchas y lahares.
3. Delimitación de las rondas hídricas mediante la metodología que integra el componente ecológico.

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de estos procedimientos, los cuales están explicados en detalle en el estudio “Estudio hidrológico considerando la fusión del glaciar para determinar las zonas inundables en el sector del plan parcial de la zona El Rosario del Municipio de Manizales”, desarrollado por Marulanda, A. & Fonseca, O.A. (2013) en el Instituto de Estudios Ambientales-IDEA, Universidad Nacional de Colombia - UNC, sede Manizales. Este documento se considera un informe complementario de dicho estudio (Marulanda & Fonseca, 2013).

#### **5.2.6. Resultados de las rondas hídricas.**

Basado en la metodología expuesta en el numeral anterior, ilustraremos los resultados de las diferentes rondas hídricas en la zona de estudio El Rosario. Debido a la resolución gruesa del estudio se estimó conveniente escoger la envolvente de los tres resultados como determinante para identificar el riesgo por inundación y flujo de lodo, Esto se plasmará más adelante en donde se observará como a partir de la identificación de la amenaza y su riesgo potencial se estimaron las zonas aptas para urbanización y así desarrollar un proyecto urbanístico que garantice la vida, además, de la calidad de vida de las personas.

Se observa en la Figura 45 como el componente ecosistémico busca atender la funcionalidad de los corredores biológicos, por tanto, considera que éstos pueden medirse en función de la altura de los árboles dominantes de una asociación climática determinada, la cual varía y se hace más compleja a medida que aumentan la temperatura y la humedad disponible en el ecosistema, dado que la altura de los árboles dominantes es un referente genuino de la complejidad y la biomasa que permite al sistema las condiciones climáticas (Marulanda & Fonseca, 2013).

De las tres metodologías que se propusieron en el estudio mencionado se tomó como referencia la realizada con el componente ecosistémico, siendo esta la franja que domina (ocupa más área), esta ronda hídrica contiene implícitamente un posible flujo de lodo como el que se presentó en 1985. De la Figura 46 a la Figura 49 se ilustran las tres rondas hídricas y su respectiva envolvente, también se puede observar como el flujo de lodo está implícito en las franjas que exige la ronda hídrica. De igual manera se observa como el proyecto de planificación urbana que se piensa desarrollar está determinado a partir de un posible flujo de lodo que se pueda presentar por una eventual erupción del Volcán Nevado del Ruiz ó el Santa Isabel u otro factor que produzca esta amenaza.

El flujo de lodo está implícito en el resultado final de la identificación de la amenaza, esto porque la metodología de los componentes geomorfológico y geológico contienen las marcas de los flujos de lodo del pasado, especialmente los ocurridos en 1985 y 1845, teniendo solo registro documental del flujo de lodo de 1985 debido a que los relatos de los flujos de lodo anteriores solo se describe la zona perteneciente al departamento del Tolima.

A continuación se mostraran las figuras que representan las tres metodologías individualmente, la envolvente de las tres y el compilado de las tres metodologías

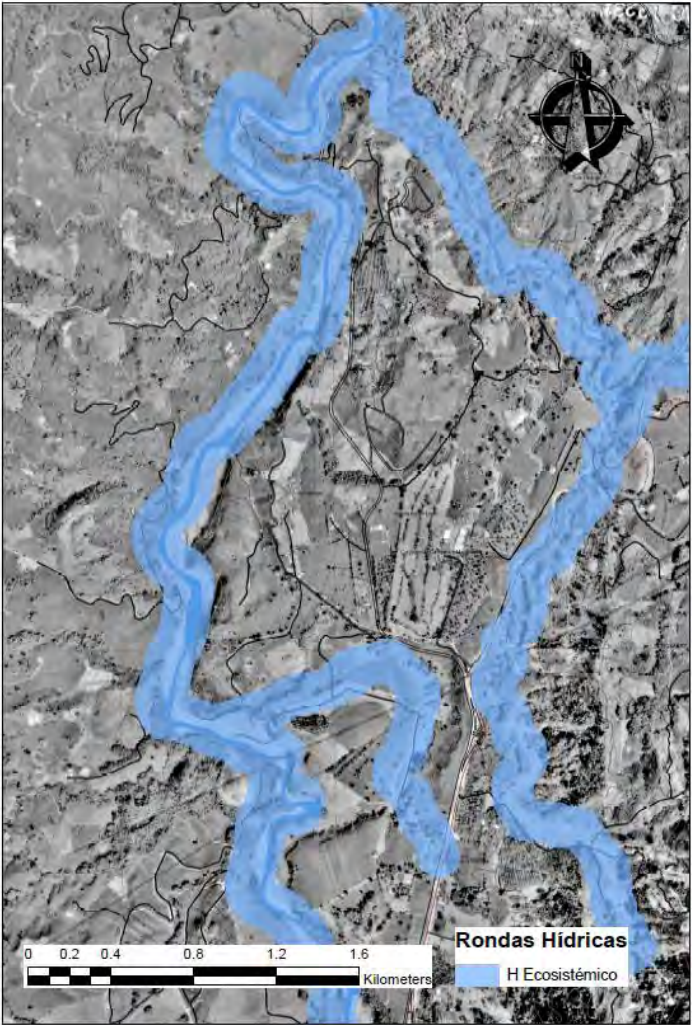
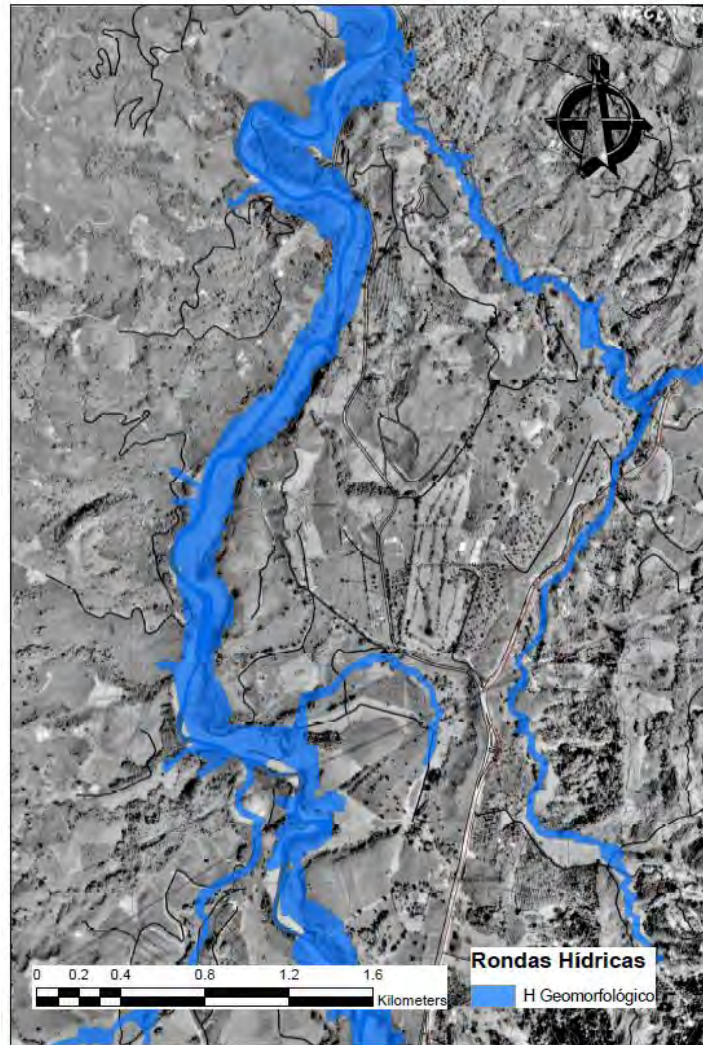


Figura 45. Resultados ronda hídrica mediante la metodología que integra el componente ecosistémico. (Marulanda & Fonseca, 2013)

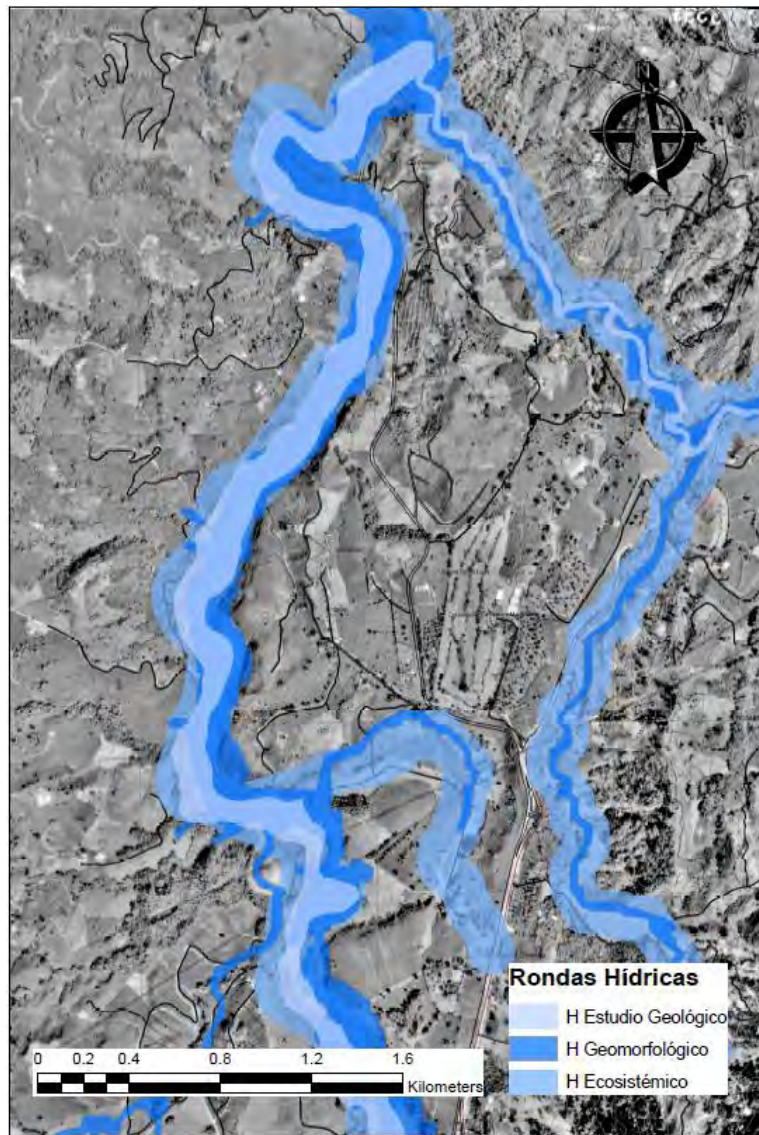


**Figura 46. Resultados ronda hídrica mediante metodología que integra el componente geomorfológico. (Marulanda & Fonseca, 2013)**



**Figura 47. Resultados ronda hídrica mediante metodología que integra el componente geológico (Marulanda & Fonseca, 2013)**





**Figura 48. Resultados compilados de las tres metodologías. (Marulanda & Fonseca, 2013)**

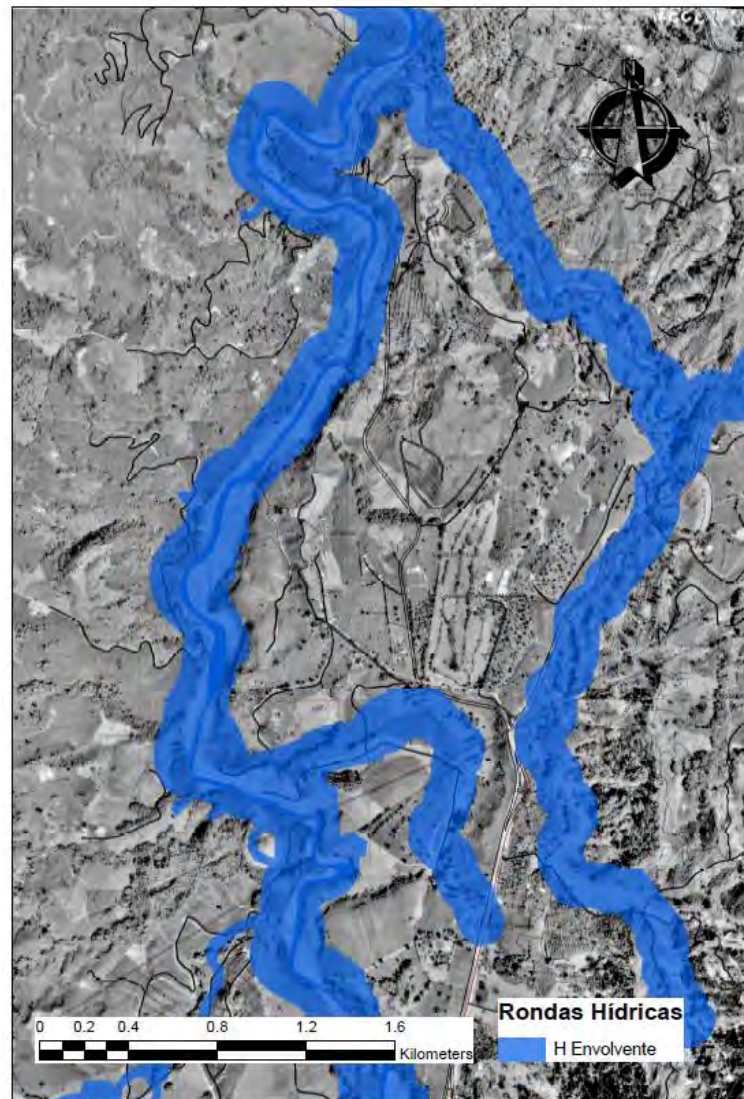


Figura 49. Envoltente de las rondas hídricas evaluadas. (Marulanda & Fonseca, 2013)

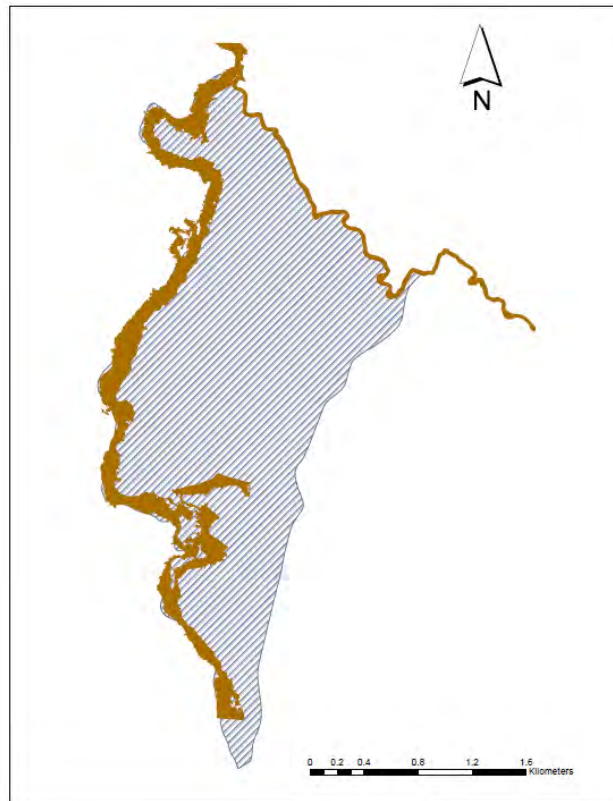
### 5.2.7. *Delimitación por fenómenos asociados a flujos de lodo, avalanchas y lahares.*

El informe realizado por las geólogas Isabel Cristina Correa Montaña y Luz Clemencia Hincapié Salazar se utilizó como insumo técnico de soporte. Su objetivo principal fue caracterizar, valorar y cuantificar los niveles de amenaza por fenómenos asociados a remoción en masa en el área del Plan Parcial de El Rosario y por fenómenos asociados a la actividad del Volcán Nevado del Ruíz (flujos de lodo, avalanchas y lahares), para el Río Chinchiná y zonas aledañas.

La caracterización se centró en la identificación de las formaciones dentro del marco geológico regional y local, la geología de la zona de estudio, el marco tectónico regional y

local, la geomorfología y formaciones superficiales. Esta información es de especial utilidad para establecer el régimen hidrológico, los usos del suelo, los procesos denudativos y la inspección de obras de infraestructura del sector. Finalmente se realizó la caracterización de la amenaza natural teniendo como referente los flujos de lodo o lahares en el sector de El Rosario.

Los resultados de la consideración de flujos de lodo, avalanchas y lahares se presentan en la Figura 50



**Figura 50.** Amenaza flujo de lodo en el sector El Rosario. (Correa & Hincapié, 2010)

La Figura 50 ilustra el resultado del estudio de Correa e Hincapié, este estudio se basó en el flujo de lodo de 1985 teniendo en cuenta los registros geológicos y geomorfológicos de otros flujos de lodo como el sucedido en 1845, se puede observar cómo queda un área lo suficientemente amplia como para desarrollar un proyecto residencial. Es de recalcar que la probabilidad de que se presente un flujo de lodo igual o superior al presentado en 1985 es muy baja, esto porque el volumen del glaciar que hoy existe es inferior al que existía en 1985 y mucho menor al de 1845. Lo anterior demuestra que el área estimada como amenaza alta por flujo de lodo determinada por Correa e Hincapié es un área razonable y eso se corrobora cuando se hace la comparación entre las rondas hídricas y el flujo de lodo Figura 51, siendo la ronda hídrica calculada por la metodología ecosistémica mayor en área que el mismo flujo de lodo, por ende la envolvente de las tres metodologías igual.

Existe una vasta zona apta para proyectos residenciales como uso de suelo escogido en el área a intervenir. En las zonas de amenaza alta, es decir, por donde pasa el flujo de lodo ó en su defecto la envolvente de las rondas hídricas serán zonas en las que los planificadores del territorio deberán realizar usos del suelo comunitario, recreativo u otros usos que no impliquen asentamientos humanos permanentes.

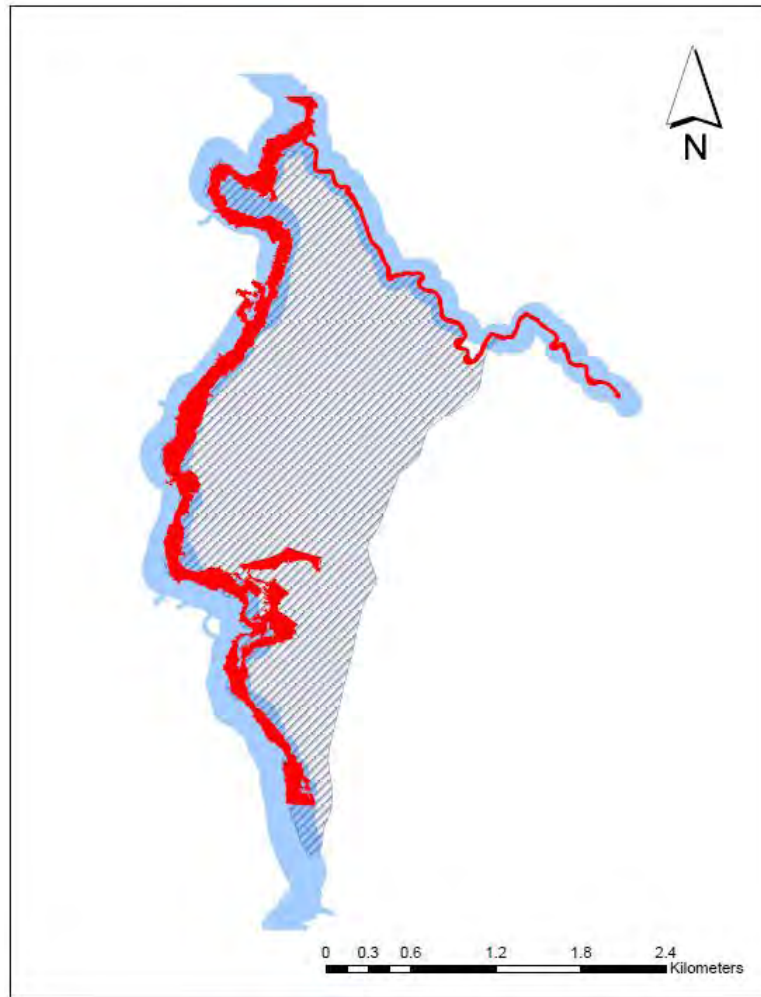


Figura 51. Comparación flujo de lodo (rojo) con envolvente de las rondas hídricas (azul)

#### 5.2.8. *Planificación urbana en el Rosario.*

En el numeral 5.2.5 se ilustraron dos metodologías para la identificación de las amenazas y riesgo, una con las rondas hídricas y la otra desde una perspectiva netamente geológica. Luego de determinar estas zonas se obtienen las áreas útiles para la ubicación de asentamientos humanos basados en un proyecto urbanístico. Lo anterior es un ejemplo claro y contundente de cómo se deben hacer los planes de ordenamiento territorial y así estimar los diferentes usos del suelo en la planificación urbana basados en la evaluación del riesgo como determinante.

En la Figura 52 se puede observar la superposición del plan parcial con la ronda hídrica envolvente obtenida para el POMCA con las metodologías antes descritas incluyendo el flujo de lodo (Rojo). La envolvente se superpone sobre los parques lineales y retiros establecidos en el plan parcial, excepto en algunas pequeñas áreas que seguramente al hacer un estudio más detallado con una mejor resolución no alcanzarán a ser afectadas por inundaciones o por flujos de lodo de proporciones mayores, que son las amenazas frente a las cuales se debe realizar la formulación prospectiva del plan parcial de El Rosario.

El plan parcial del Rosario es una intervención prospectiva debido a que es un área aún no ocupada. Las zonas determinadas por los estudios como área de posible afectación por un flujo de lodo ó inundación es un área discriminada como área virtualmente afectada. Según la Tabla 5 en dicha área se deben prohibir los asentamientos humanos y cualquier otra infraestructura. Por lo anterior se dejan zonas verdes como senderos ó parques recreacionales que impidan futuros asentamientos, es importante mantener como se ha hecho hasta ahora el sistema de alerta temprana preservando el principio de precaución y el derecho a la vida.

Para efectos de la planificación urbanística y estimar el uso del suelo se tomó como amenazas la envolvente de las rondas hídricas ,el flujo de lodo de 1985 y el cálculo de fusión 2 el cual fue una modelación del flujo no permanente que tuvo en cuenta que el tránsito del fluido es descrito mediante el frente de onda rompiente y se implementó la metodología propuesta por (Vélez Upegui, 1989), y con los desarrollos de (Cardona, Vélez, Montoya, et al, 2014) en la cual plantea la solución de la onda cinemática acoplada al frente de onda, esta metodología es apropiada utilizarla para este río dado la pendiente del canal principal.

Estos eventos serán los determinantes para definir el uso del suelo. Como se observa en la Figura 52 las áreas de color amarillo que son las residenciales están por fuera del área de afectación de las amenazas descritas. Basado en la amenaza se determinó que en el área de influencia tanto de la envolvente como del flujo de lodo y fusión 2 se harán parques, espacios verdes y vías de nivel nacional con sus respectivos retiros, esto permite ubicar las zonas residenciales en un área más segura donde existe menos probabilidad que el área sea afectada.

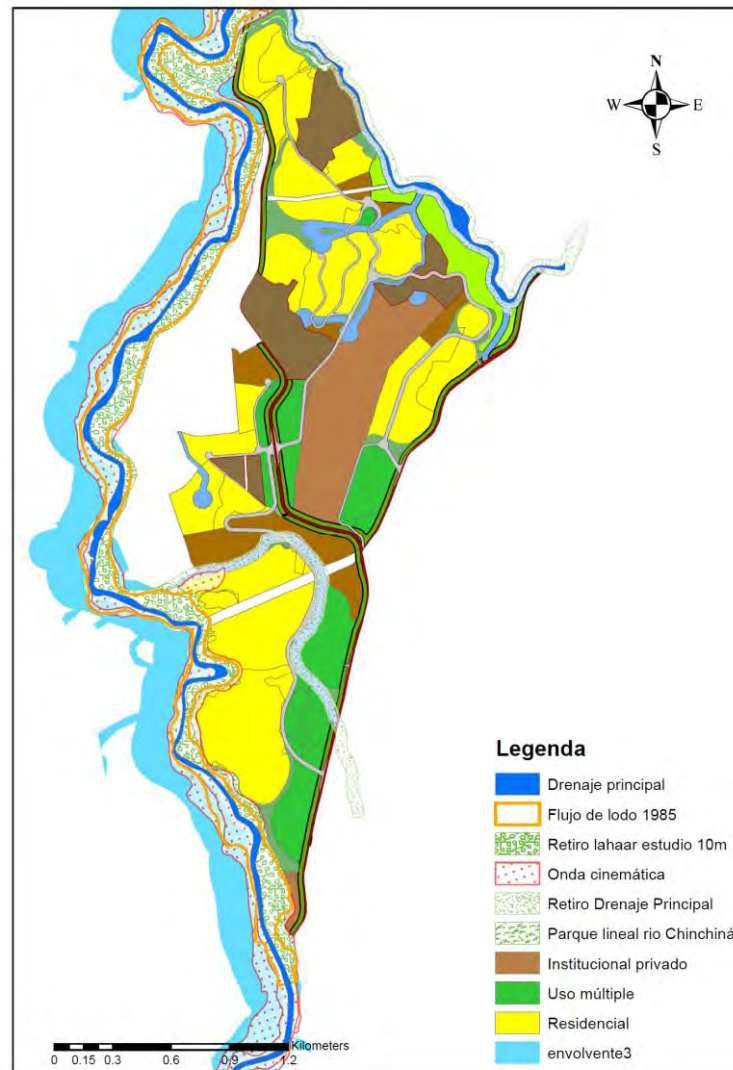


Figura 52. Superposición de la ronda hídrica envolvente, el flujo de 1985 y el plan parcial

Estudios posteriores en el marco del proyecto “Incorporación del Riesgo en la Planificación y Toma de Consciencia” dentro del Programa de Gestión Integral del Riesgo de Desastres que realiza la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, para Corpocaldas, permitirán delimitar con mayor detalle la ronda hídrica y en particular las zonas de mayor amenaza para el plan parcial de El Rosario. Estos estudios están previstos como insumos de la evaluación del riesgo para el Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales. Las franjas que se consideran actualmente y que se considerarán en el futuro como zonas de amenaza, debido a que en este caso la vulnerabilidad de hipotéticos elementos expuestos se saturaría o sería total, corresponderán a las zonas de riesgo implícito, en el supuesto que dichas zonas se llegaran a ocupar. Entre tanto, es importante reiterar, que la ronda hídrica obtenida con la resolución o detalle de los estudios realizados en el marco del POMCA (que son conservadores), no alcanzan a cubrir áreas de uso

residencial del plan parcial de El Rosario y posiblemente tampoco las lleguen a cubrir en el caso del estudio más detallado que se espera realizar.

### ***5.3. Zonificación de la susceptibilidad, amenaza por deslizamientos y umbrales de lluvia detonante para POT de la ciudad de Manizales.***

Para la elaboración de esta sección se tomaron apartes literales del trabajo realizado por el experto Juan Pablo Londoño (2014) quien calculó para la ciudad de Manizales la susceptibilidad y amenaza por deslizamiento para la actualización del Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales (2014). La finalidad de ilustrar este trabajo es el de difundir este tipo de metodologías las cuales en el transcurso de este documento se ha denominado de nivel III que implica tener información al detalle como es el caso de la ciudad de Manizales.

#### ***5.3.1. Susceptibilidad por deslizamiento***

Para obtener la susceptibilidad a deslizamientos de la ciudad de Manizales, considerando la disponibilidad de datos y las características del entorno, se han probado cuatro metodologías diferentes: 1. Análisis Discriminante; 2. Funciones de Favorabilidad o Relación de Frecuencias; 3. Conjuntos Difusos; y 4. Redes Neuronales Artificiales. El primer método utiliza la estadística clásica para generar una expresión que caracteriza la susceptibilidad a deslizamientos. El segundo es una técnica basada en análisis bivariado y relación de frecuencias relativas de áreas con y sin deslizamientos. El tercer método utiliza números difusos agregados mediante la función gamma de la teoría de conjuntos difusos. El cuarto método consiste en el entrenamiento de Redes Neuronales Artificiales para la clasificación de celdas estables/inestables. Una característica importante de los diferentes métodos es la posibilidad de aplicarse en ambientes con diferentes niveles de información. Se eligieron estas metodologías por ser robustas, flexibles y tener la particularidad de minimizar la subjetividad dada por el juicio de experto al asignar pesos en los modelos heurísticos.

Los resultados generales obtenidos por los diversos métodos, en términos de capacidad de clasificación de zonas susceptibles, se muestran en la Figura 53. De una inspección del gráfico, puede concluirse que el modelo de Redes Neuronales tiene mejor rendimiento y logra clasificar el 88% de los deslizamientos identificados, como zonas con susceptibilidad superior a 0.9, por lo tanto, se ha optado por elegir ésta como la técnica más adecuada para la ciudad, sin desconocer que los resultados de las otras técnicas muestran localizaciones similares de las zonas con mayor susceptibilidad como puede concluirse al examinar los

diferentes mapas resultado: La Figura 54 presenta los resultados obtenidos por el método de Redes Neuronales; la Figura 55, por el método de Análisis Discriminante; la Figura 56 por Conjuntos Difusos, con la aplicación de la función de agregación gamma, con un valor del parámetro gamma de 0.99, y la Figura 61 por el método de relación de frecuencias.

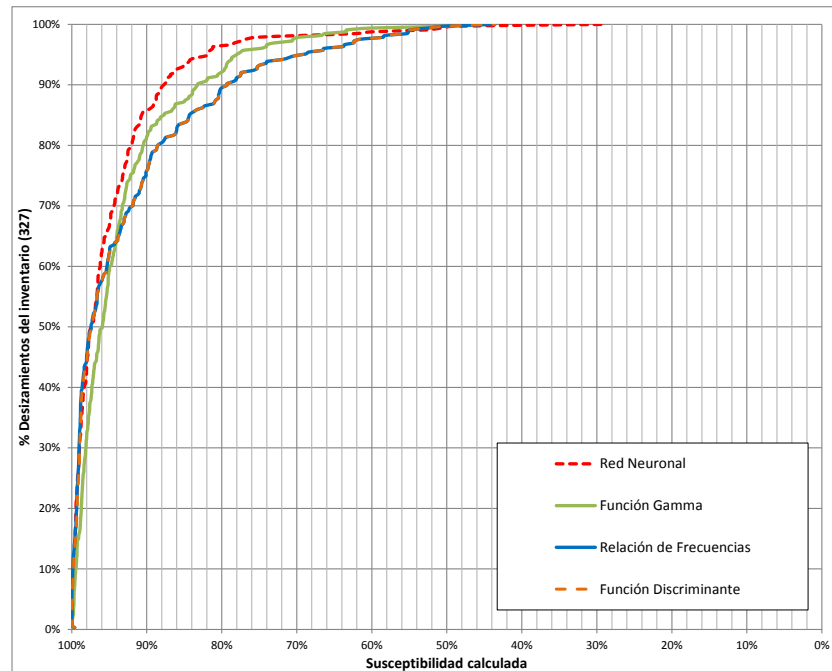


Figura 53. Comparativa de tres métodos de modelización de susceptibilidad. (Londoño, 2014)

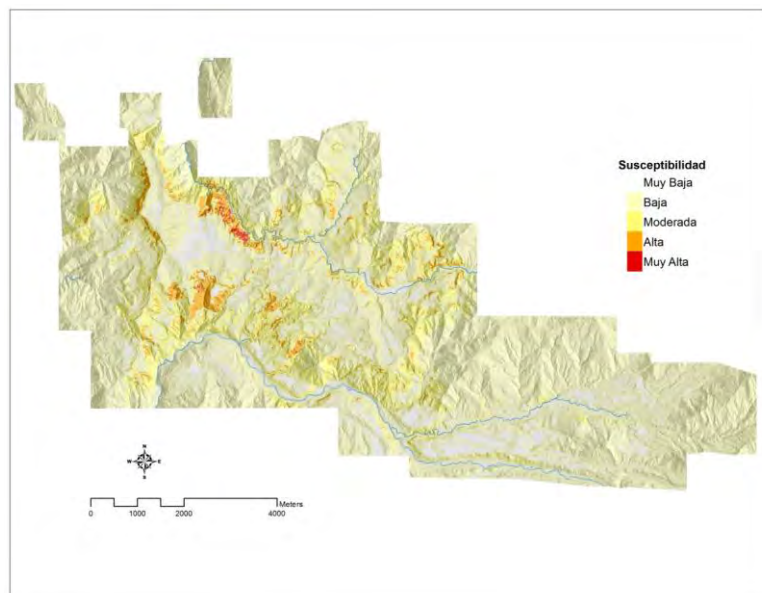
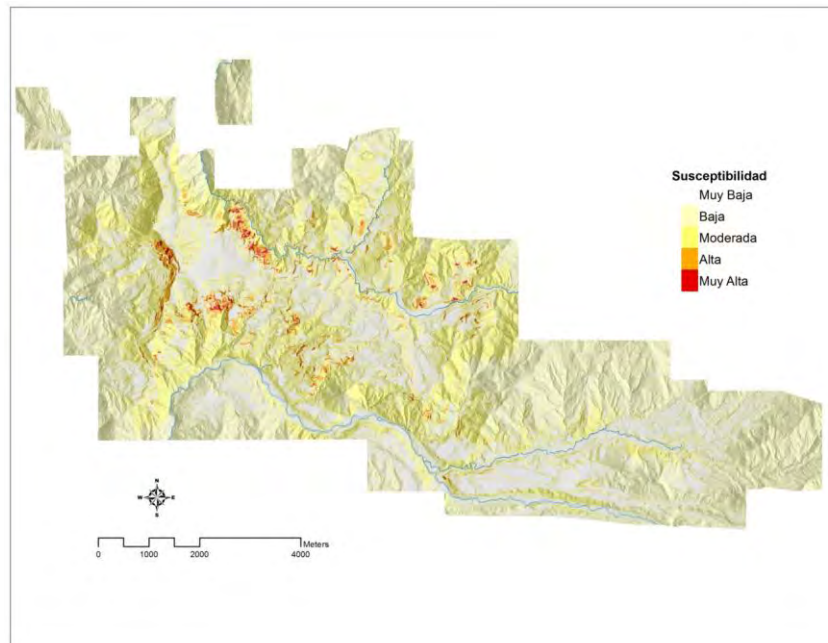
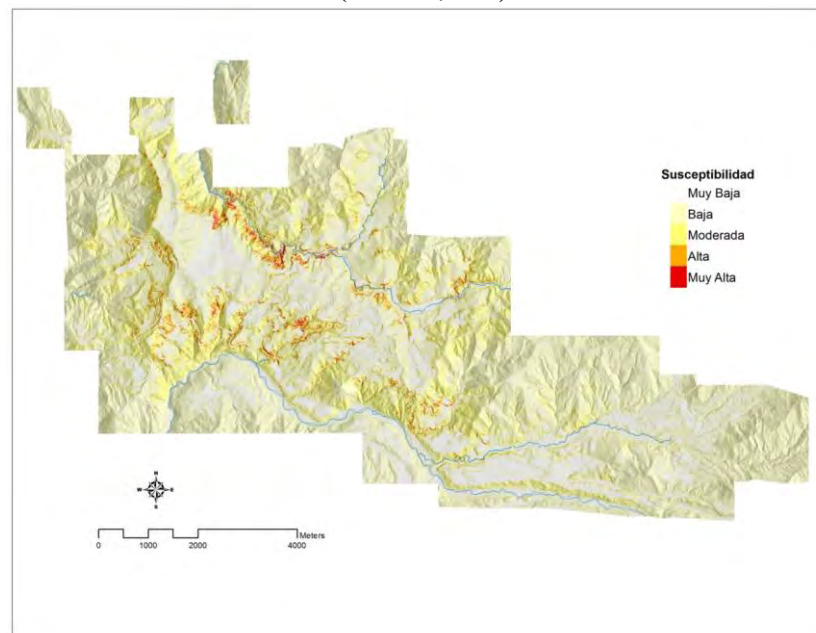


Figura 54. Mapa de susceptibilidad por el método de Redes Neuronales Artificiales. (Londoño, 2014)





**Figura 55. Mapa de susceptibilidad por el método multivariado de Análisis Discriminante. (Londoño, 2014)**



**Figura 56. Mapa de susceptibilidad mediante la aplicación de conjuntos difusos. (Londoño, 2014)**

### **Definición de categorías de susceptibilidad para el Ordenamiento Territorial**

A partir del modelo de susceptibilidad obtenido para la ciudad, cuya representación numérica es una función continua acotada entre cero y uno, deben establecerse una serie de

categorías descriptivas de los niveles obtenidos. Se ha optado por seguir los lineamientos de categorización de probabilidades relativas sugeridos por el IPCC (Tabla 40) y elegir como primer criterio de división de clases los tercios de la función y como segundo criterio los niveles más altos y más bajos, determinados por un límite de 0.1 (10%).

**Tabla 40. Valoración de probabilidades relativas según (IPCC 2013, p.36)**

Término	Rango de Probabilidad
<i>Virtualmente cierto</i>	99-100%
<i>Muy Probable</i>	90-100%
<i>Probable</i>	66-100%
<i>Tanto probable como no probable</i>	33-66%
<i>Improbable</i>	0-33%
<i>Muy Improbable</i>	0-10%
<i>Excepcionalmente improbable</i>	0-1%

De esta forma, los rangos quedan establecidos como aparece en la Tabla 41.

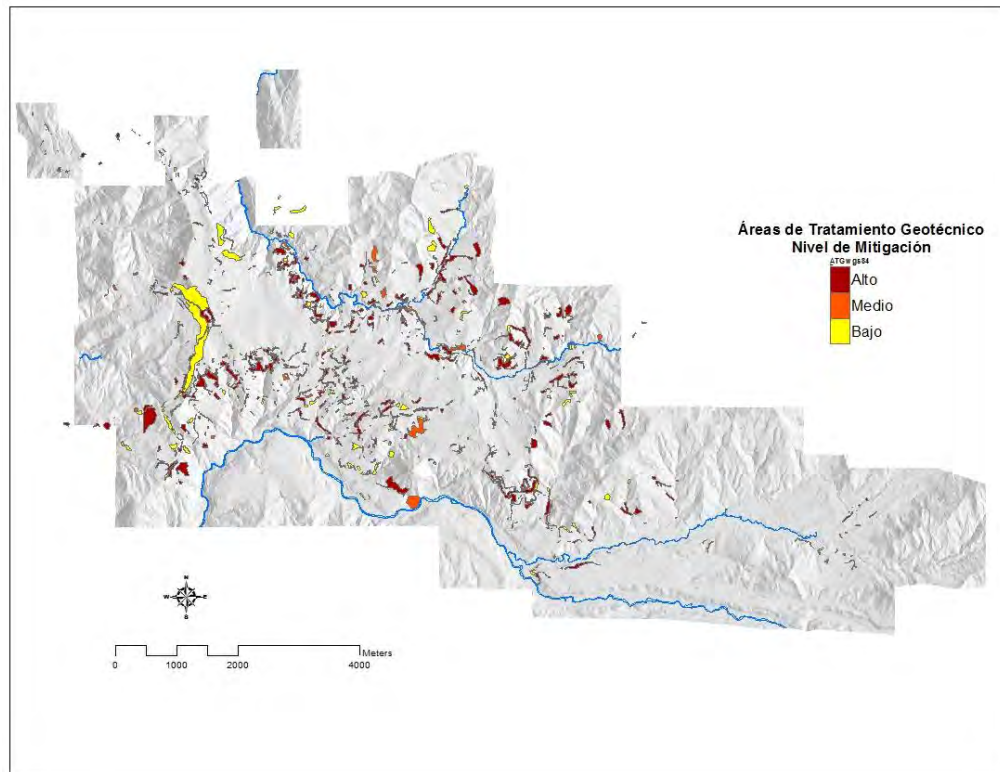
**Tabla 41. Criterios para categorizar la susceptibilidad**

Criterio	Rango	Descriptivo
Primer tercio	0 – 0.10	Muy Baja
10% más bajo	0.10 – 0.33	Baja
Segundo tercio	0.33 – 0.66	Moderada
Tercer tercio	0.66 – 0.90	Alta
10% más alto	0.90 - 1	Muy Alta

Con este criterio se han obtenido mapas de tipo contorno (shape) con los 5 rangos de susceptibilidad para cada método empleado.

### 5.3.2. Áreas con Tratamiento Geotécnico (ATG)

Las laderas estabilizadas mediante procedimientos de tratamiento geotécnico (Figura 57) se incorporan al modelo como polígonos que reducen los niveles de susceptibilidad. El monto de reducción de la susceptibilidad depende del grado de mitigación que ofrezca la obra de tratamiento geotécnico. La Alcaldía de Manizales ha suministrado el mapa de ATGs divididas en tres tipos, según el grado de mitigación que proporcionan: alto, medio y bajo (Figura 57).

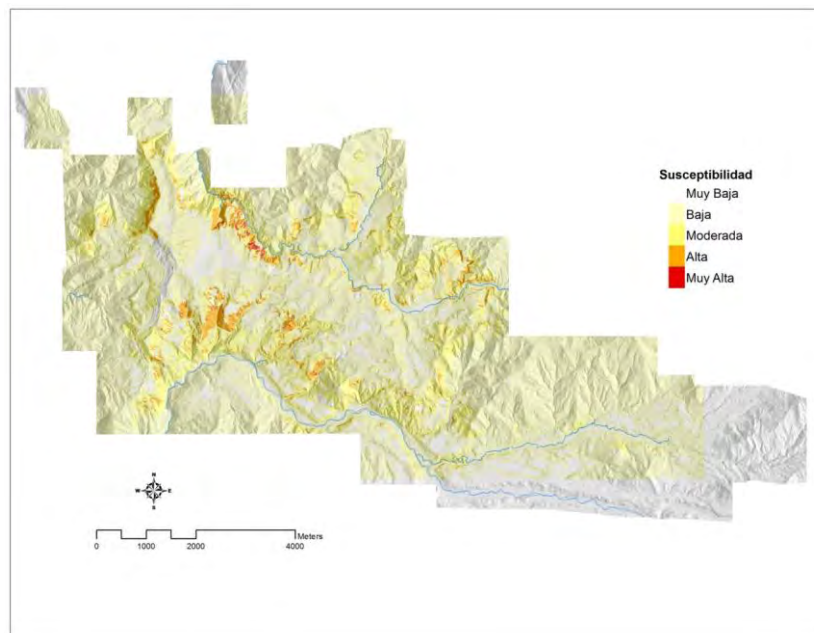


**Figura 57. Mapa de áreas de tratamiento geotécnico ATG. (Londoño, 2014)**

La reducción de susceptibilidad se da de acuerdo con la Tabla 42; dependiendo del tipo de ATG se puede reducir desde un nivel hasta tres niveles el grado de susceptibilidad en una escala de 5 clases

**Tabla 42. Tipos de obras de mitigación y reducción de la susceptibilidad**

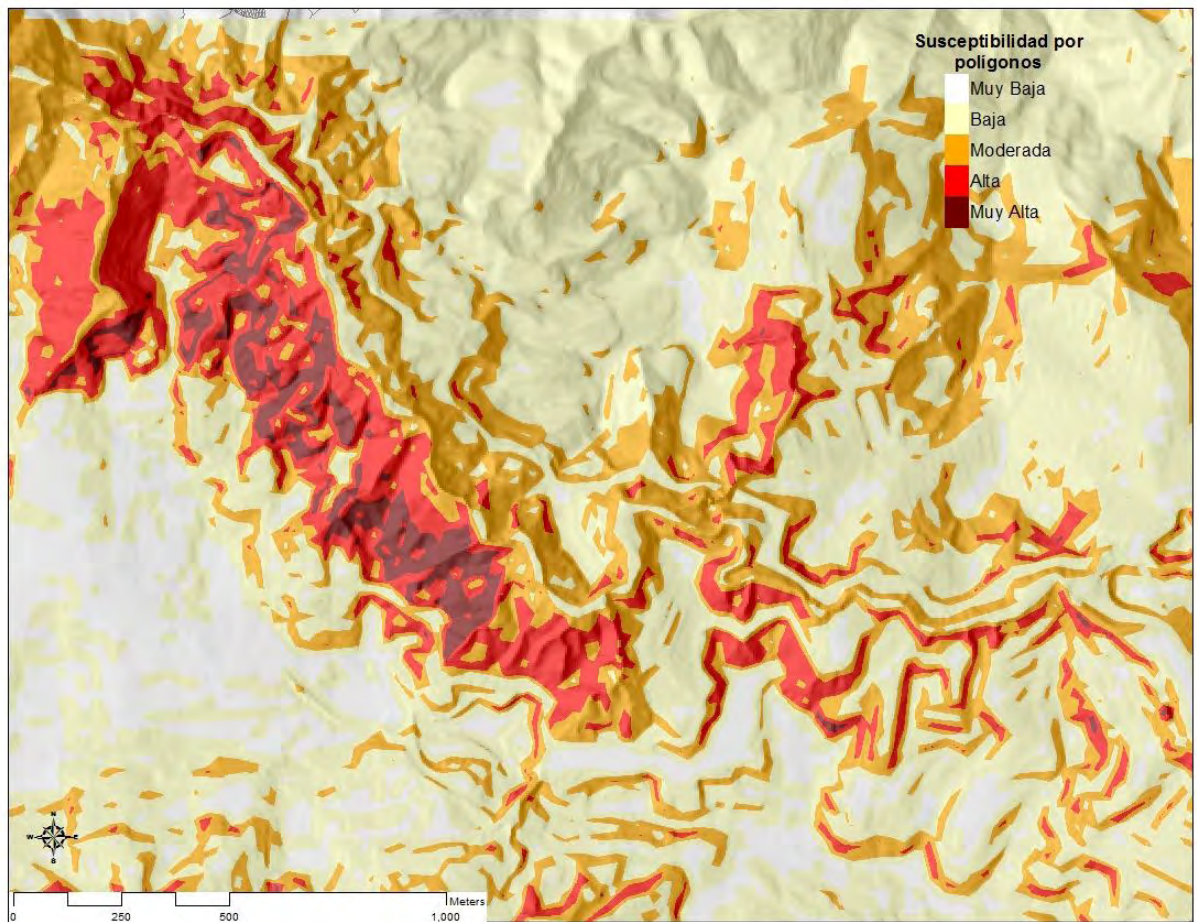
Tipo de ATG	Nivel de mitigación	Reducción de susceptibilidad
1	Alto	3 niveles
2	Medio	2 niveles
3	Bajo	1 nivel



**Figura 58. Mapa de susceptibilidad por el método RNA, considerando la influencia de las ATGs. (Londoño, 2014)**

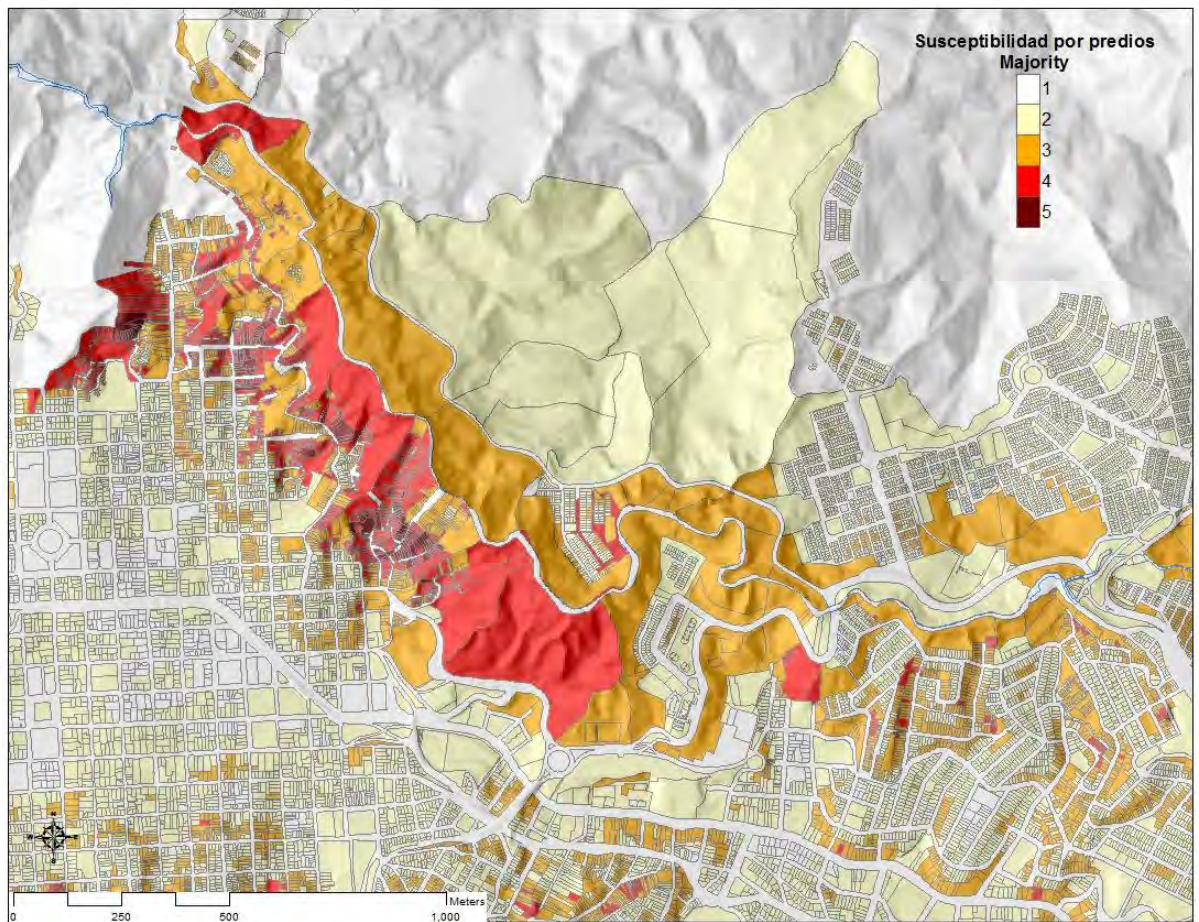
### 5.3.3. Áreas de Planificación

La salida del modelo neuronal para la susceptibilidad a deslizamientos es un mapa ráster con resolución de píxel de 5 metros; éste resultado puede convertirse en un mapa de contornos, que para facilitar su interpretación, presenta el resultado en 5 clases o niveles; un extracto del mapa correspondiente puede observarse en la Figura 59.



**Figura 59. Mapa de susceptibilidad en contornos. (Londoño, 2014)**

Otra posible forma de representar los resultados es a través de la agregación del mapa ráster en unidades limitadas por las áreas prediales. Para tal efecto se han probado diferentes métricas de agregación (estadísticas focales) para el conteo de celdas dentro de los polígonos prediales. Finalmente se ha elegido el método de agregación *Majority*, que toma el valor más frecuente de los píxeles inscritos dentro del polígono para reasignar un valor a la totalidad del polígono (Figura 60).



**Figura 60. Susceptibilidad agregada por predios. (Londoño, 2014)**

Mediante un trabajo conjunto con la Alcaldía de Manizales se decidió combinar los dos mapas (Ver figura 58) propuestos en uno solo tomando como criterio el área de los lotes del mapa predial. Para áreas menores a 400 metros cuadrados se optó por seleccionar la susceptibilidad agregada en lotes, lo cual corresponde aproximadamente con lotes construidos. Para áreas mayores a 400 metros cuadrados se seleccionó como área de agregación de susceptibilidad el mapa de contornos, lo cual corresponde aproximadamente con áreas no construidas.

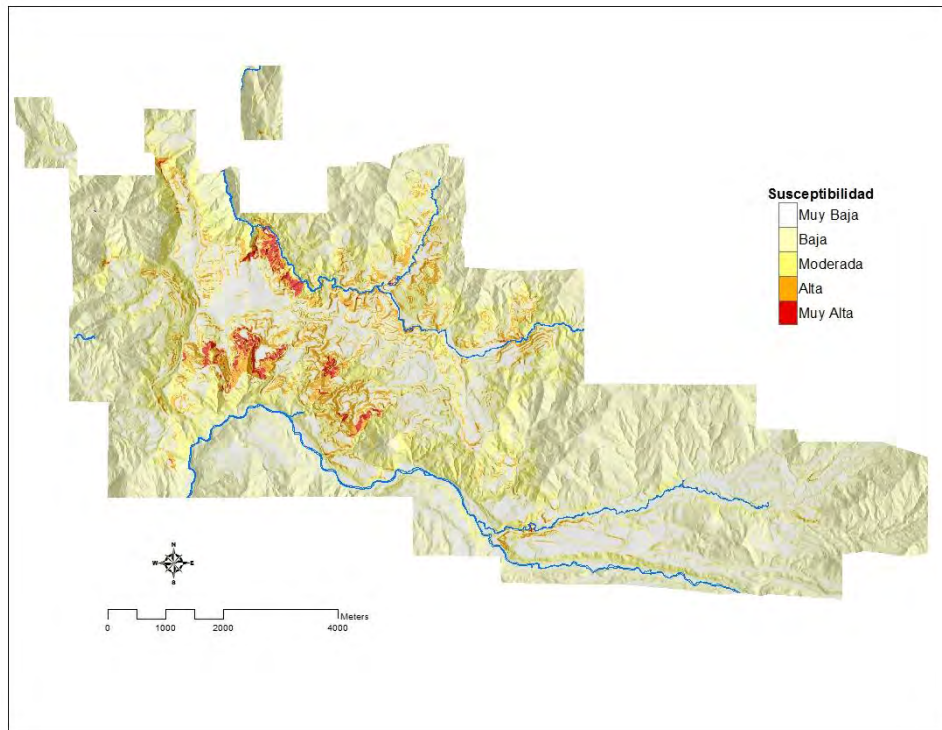


Figura 61. Mapa de Susceptibilidad mediante relación de frecuencias. (Londoño, 2014)

#### **5.3.4. Amenaza por deslizamiento.**

La amenaza se expresa en términos de la probabilidad anual de ocurrencia del evento de deslizamiento y la frecuencia de los eventos está dada por la frecuencia de los factores detonantes. A continuación se presenta la métrica utilizada para deslizamientos detonados por lluvias, pero el razonamiento es también aplicable en el caso sísmico, con la única diferencia de cambiar el umbral de lluvia por uno de aceleración crítica y el modelo de escenarios pluviométrico por uno sísmico.

##### **5.3.4.1. Tasa Anual de Ocurrencia de deslizamientos**

La probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento en un sitio particular está dada por la expresión

$$Pr_L = Pr_S \cdot Pr(U > u)$$

Donde  $Pr_S$  es la susceptibilidad y  $Pr(U > u)$  es la probabilidad de que el umbral detonante sea excedido.

Dado que el evento detonante está modelado como un conjunto de eventos estocásticos, la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos puede calcularse para cada uno de esos eventos, teniendo cada evento la probabilidad temporal o frecuencia anual de ocurrencia dada por el evento detonante. De esta manera, es posible construir un conjunto de escenarios de amenaza por deslizamiento, donde cada escenario tiene la misma frecuencia anual que el detonante y está definido por dos momentos estadísticos: la media y la varianza.

Este conjunto de escenarios se elabora con el paquete de software ERN-LluviaNH, a partir de un análisis histórico de la precipitación en la cuenca donde se inscriba el área de análisis y otras consideraciones adicionales. Para este trabajo se ha analizado la información pluviométrica disponible en la cuenca del río Chinchiná con una longitud histórica de 30 años. La Figura 62 presenta el mapa de precipitación anual multianual obtenido para la zona urbana de Manizales.

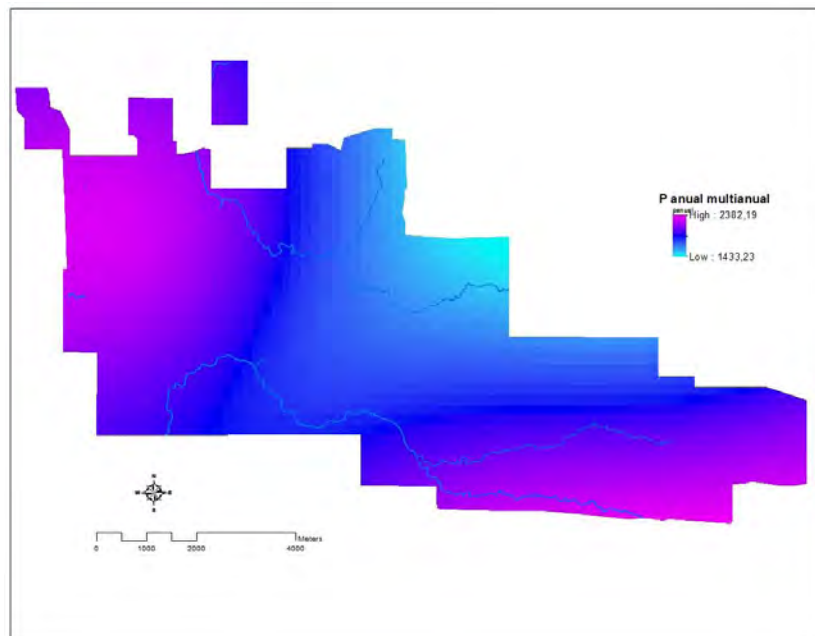


Figura 62. Precipitación anual multianual para la zona de estudio. (Londoño, 2014)

En términos de tasa anual de ocurrencia de deslizamiento, la expresión general puede escribirse como la suma para cada escenario de la probabilidad de deslizamiento, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del escenario.



$$vL = \sum_{i=1}^N \Pr(U > u|E_i) * F_i * Pr_S$$

Esta expresión proporciona una representación probabilista de la amenaza de deslizamiento en términos de tasa de ocurrencia. El período de retorno se puede obtener como el inverso de la tasa anual de ocurrencia. La Figura 63 , presenta la tasa anual de ocurrencia de deslizamientos obtenida para la ciudad de Manizales. En términos prácticos, el mapa está indicando cuantas veces por año, en promedio, ocurren deslizamientos en cada ubicación.

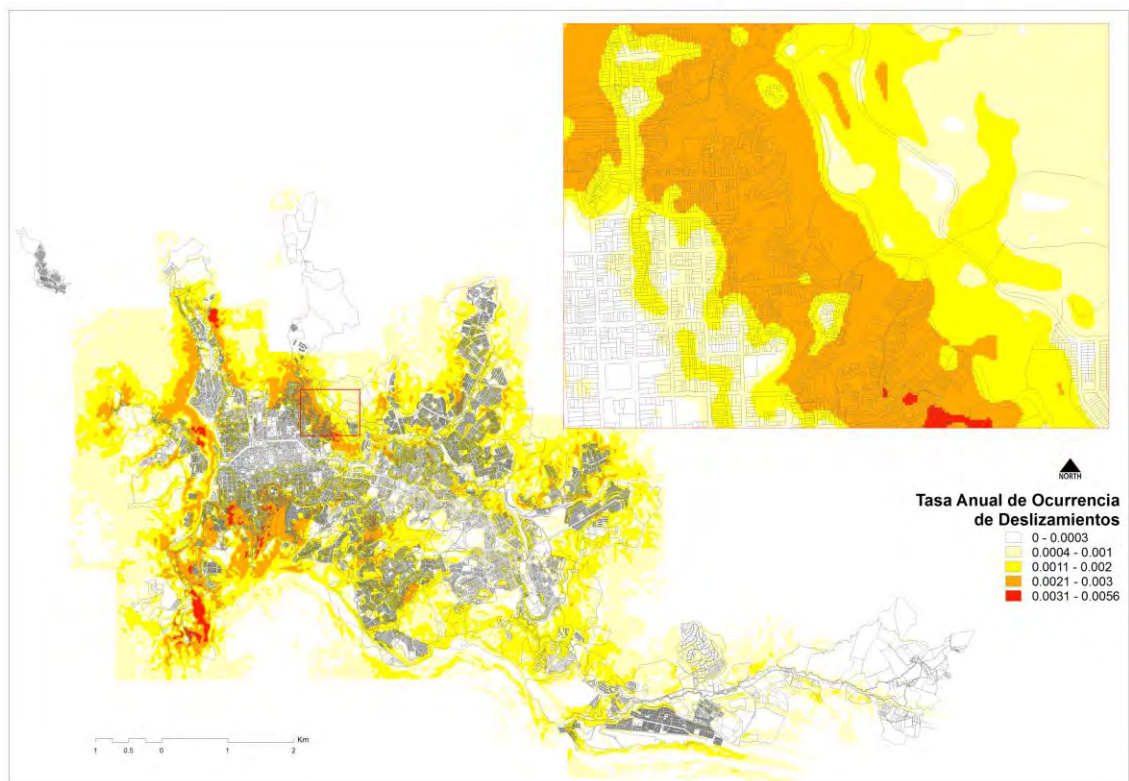


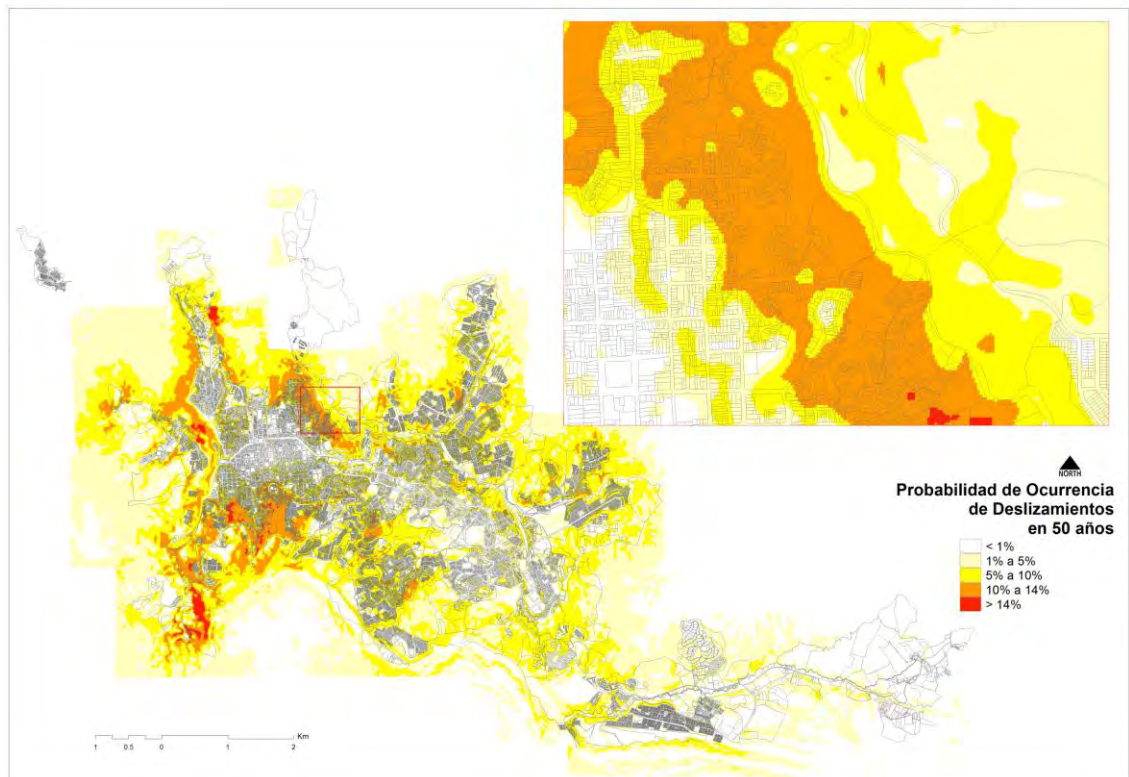
Figura 63. Tasa anual de excedencia (Amenaza) de deslizamientos para la ciudad de Manizales. (Londoño, 2014)

#### 5.3.4.2. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos

Otra representación posible es obtener la amenaza como probabilidad de ocurrencia, integrando la tasa anual de ocurrencia en una ventana de tiempo dada (tiempo de exposición), mediante la siguiente expresión:

$$P_{t_{exposición}} = 1 - e^{(-t_{exposición} * Tasa_{ocurrencia})}$$

Como ejemplo se presenta la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 50 años (Figura 64) y en 100 años (Figura 65), nótese que la escala ahora está dada en porcentaje o probabilidad. También se incluyen como anexos los modelos en formato GIS en los Mapas 07 y 08 respectivamente.



**Figura 64. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 50 años. (Londoño, 2014)**

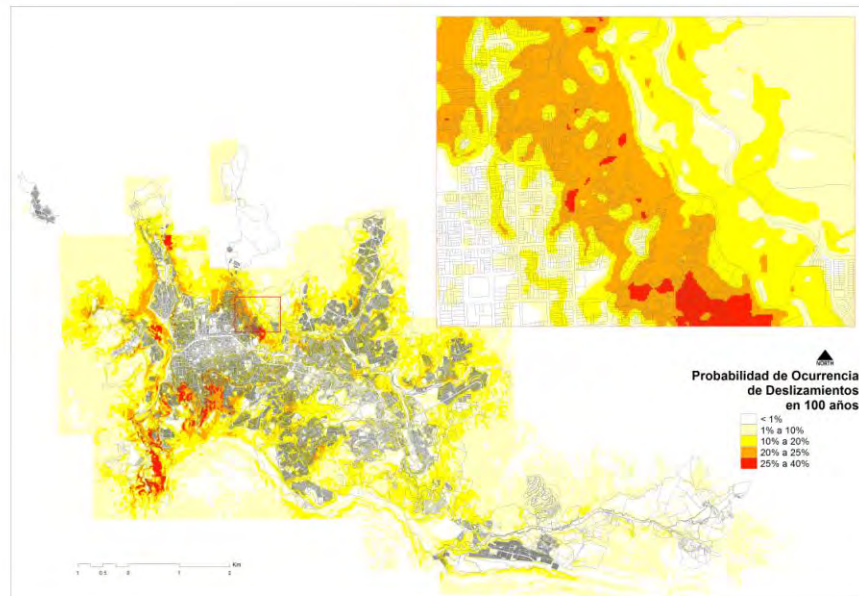


Figura 65. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en 100 años. (Londoño, 2014)

### 5.3.5. Riesgo Implícito por Deslizamiento

Una imagen más detallada del sector norte se presenta en

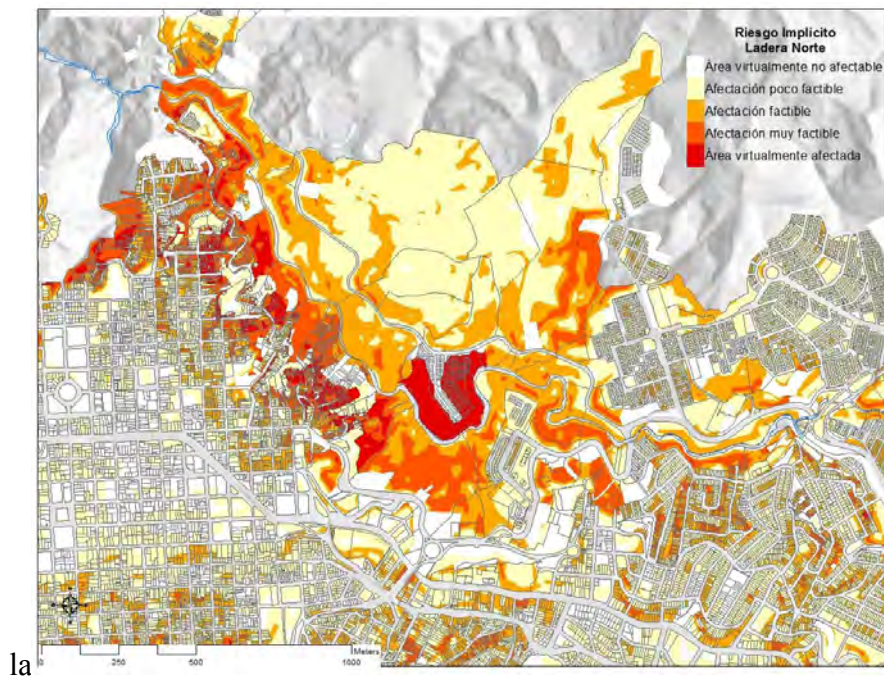


Figura 67 y para el sector sur en la Figura 68. El mapa de Riesgo Implícito por deslizamiento obtenido con los criterios descritos se presenta en la

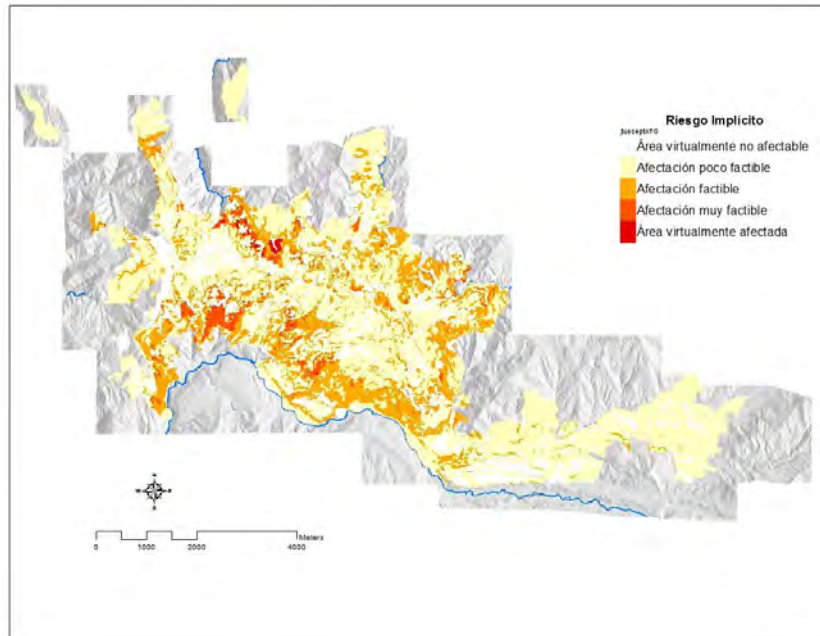


Figura 66. Mapa de riesgo implícito para la ciudad. (Londoño, 2014)

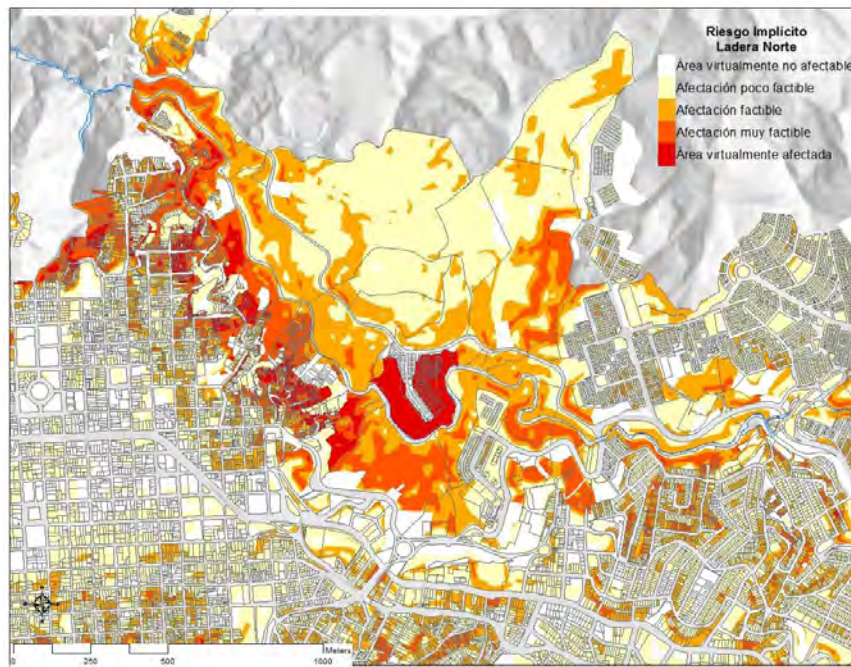


Figura 67. Riesgo Implícito sector norte. (Londoño, 2014)

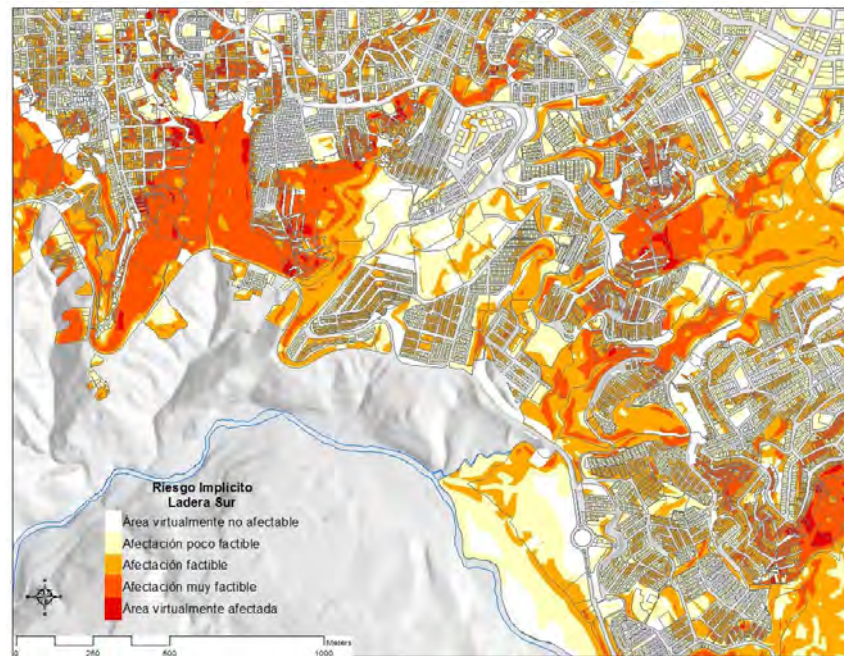


Figura 68. Riesgo implícito sector sur. (Londoño,2014)

### 5.3.6. Umbrales Intensidad – Duración

En la literatura se asume una curva umbral de la forma ((Caine 1980); (Guzzetti, Peruccacci et al. 2008);(Brunetti, Peruccacci et al. 2010))

$$I = \alpha D^{-\beta}$$

Donde I es la intensidad media de la lluvia en mm/h, D es la duración del evento en horas,  $\alpha$  es una constante de escalamiento (intercepto), y  $\beta$  es el parámetro de forma que define la pendiente de la curva de tipo potencial.

Es ampliamente aceptado que la selección de una curva como umbral es independiente de cualquier criterio físico (geología, geomorfología, hidrología, meteorología) y que pueden emplearse diferentes formas para la curva umbral.

El método empleado adopta un enfoque “frecuentista” para determinar el intercepto  $\alpha$  y la pendiente  $\beta$  de una curva seleccionada para representar el umbral de lluvias. Se basa en el análisis empírico de la frecuencia de ciertas características de aguaceros que han generado

deslizamientos conocidos. Información más detallada de la metodología para construir las curvas puede encontrarse en (Brunetti, Peruccacci et al. 2010).

Para evitar problemas asociados con el ajuste de datos en espacios logarítmicos (por ejemplo, el criterio de mínimos cuadrados no funciona), los datos empíricos se transforman en su logaritmo. Los datos empíricos de intensidad media y duración de lluvia se dibujan en un gráfico sencillo de dispersión (Figura 69). Las parejas de datos Intensidad-Duración en escala logarítmica se ajustan a un modelo lineal mediante el método de mínimos cuadrados, generando una ecuación del tipo

$$\log(I) = \log(\alpha) - \beta \log(D)$$

Que es totalmente equivalente a la ecuación inicial, pero en un espacio lineal.

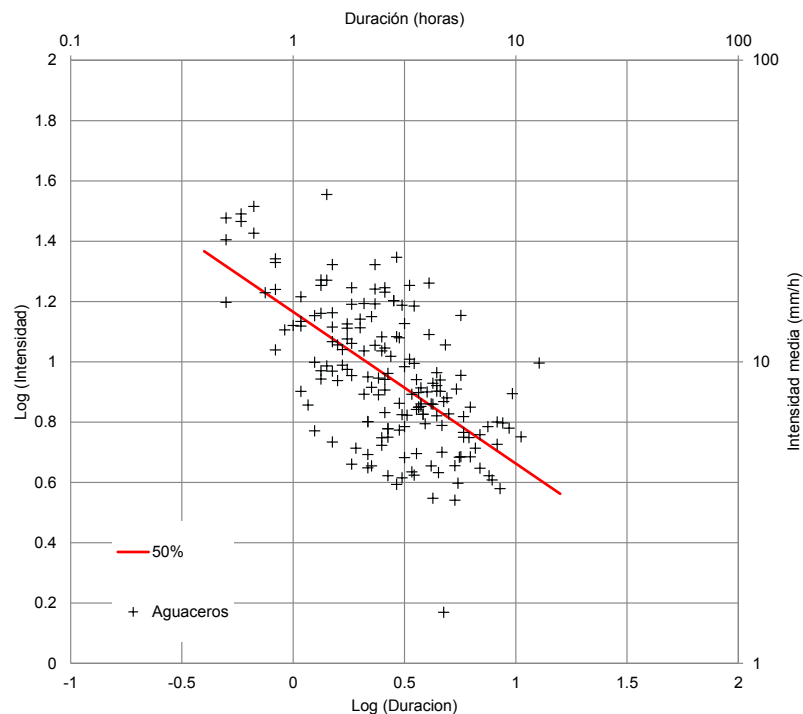
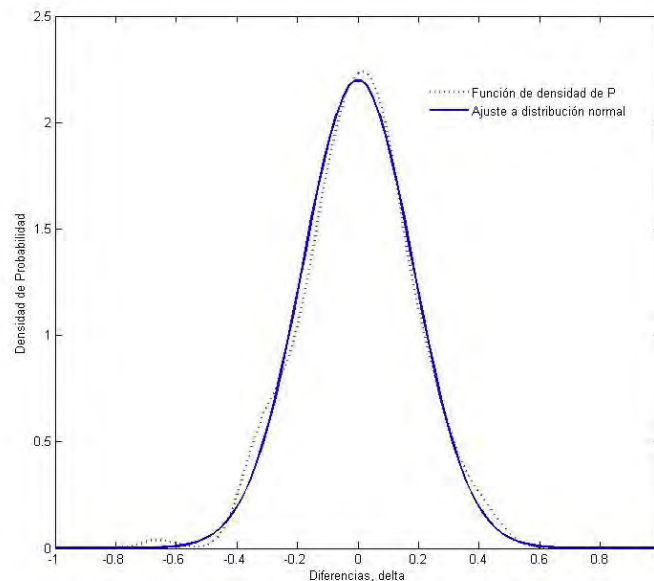


Figura 69. Eventos de lluvia que generaron deslizamientos

Como segundo paso, para cada evento de lluvia, se calcula la diferencia  $\delta(D)$ , entendida como la diferencia entre el logaritmo de la intensidad del evento  $I(D)$ , y el correspondiente logaritmo obtenido mediante la regresión  $I_r(D)$

$$\delta(D) = \log[I(D)] - \log[I_r(D)]$$

La función de densidad de probabilidad para la distribución de  $\delta$  puede estimarse mediante algún método (kernel density estimation) y al resultado puede asignarse un modelo Gaussiano mediante el método de los mínimos cuadrados. La Figura 70 muestra el ajuste a un modelo de distribución normal (línea continua) y la función de densidad de probabilidad de los datos (línea punteada).



**Figura 70. Estimación de la curva de densidad de probabilidad para las diferencias (Londoño, 2014) □**

Como último paso, pueden obtenerse umbrales para diferentes probabilidades de excedencia, a partir del modelo normal encontrado para las diferencias  $\delta$  (D).

Como ejemplo se han obtenido dos umbrales (Figura 71), correspondientes a una desviación estándar y dos desviaciones estándar. El primero (línea verde) implicaría una probabilidad de experimentar deslizamientos al exceder el umbral de 97.7% y el segundo (línea azul) de 84%. También se presenta en la línea negra el modelo de regresión calculado, que correspondería a un umbral de 50% de probabilidad de experimentar deslizamientos al ser excedido.

### Umbrales Intensidad - Duración

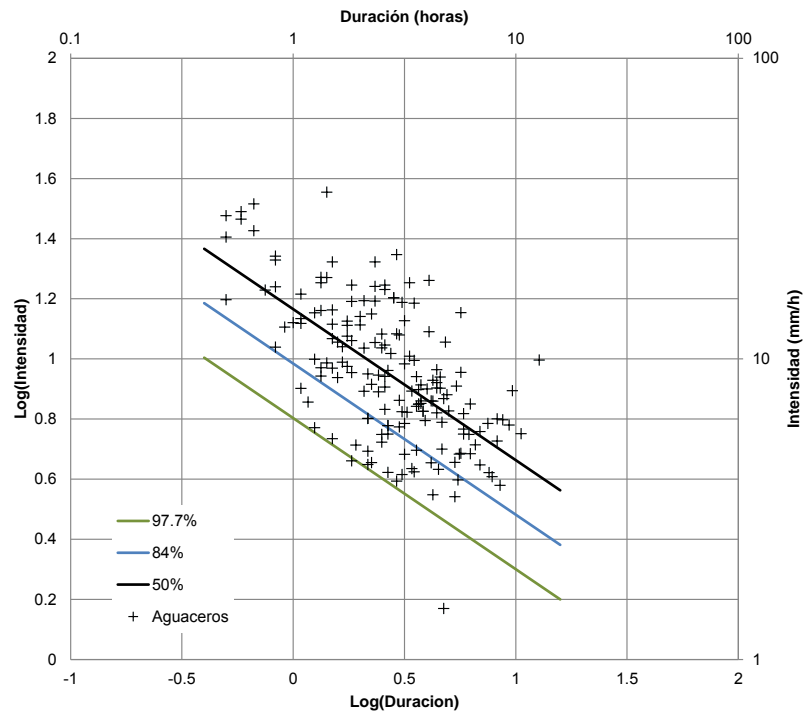


Figura 71. Estimación de umbrales Intensidad-Duración para la ciudad de Manizales

Las ecuaciones de los umbrales obtenidos se presentan a continuación y las curvas correspondientes aparecen en la Figura 72.

Umbral de 50%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 50%:

$$I = 14.642 D^{-0.5026}$$

Probabilidad de deslizamientos al exceder el umbral de 84%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 16%:

$$I = 9.6434 D^{-0.5026}$$

Probabilidad de deslizamientos al exceder el umbral de 98%, indica que la probabilidad de encontrar deslizamientos con lluvias por debajo de esta curva es del 2%:



$$I = 6.3513 D^{-0.5026}$$

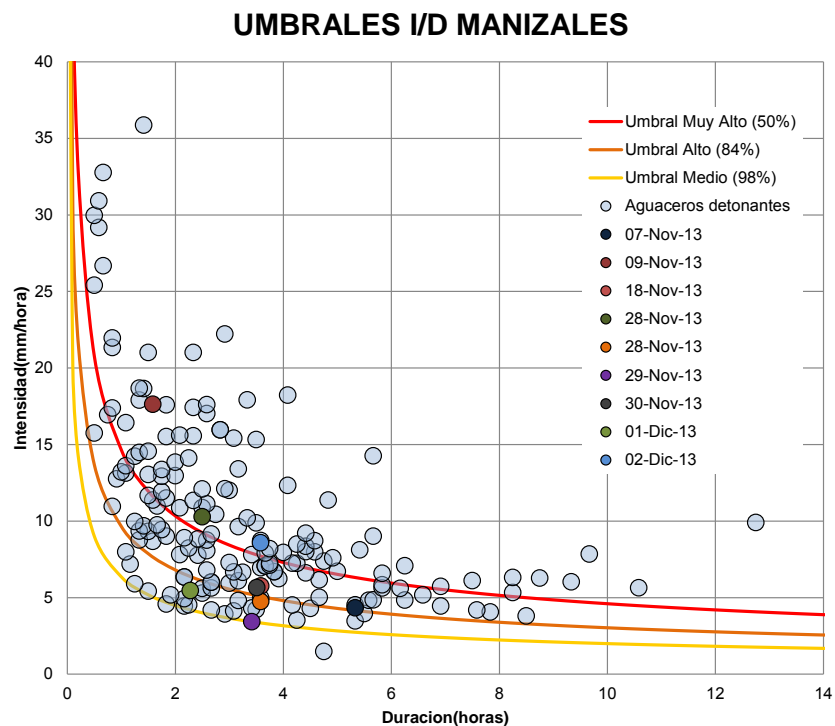


Figura 72. Umbrales ID propuestos para Manizales

### 5.3.7. *Riesgo Implícito por Inundación*

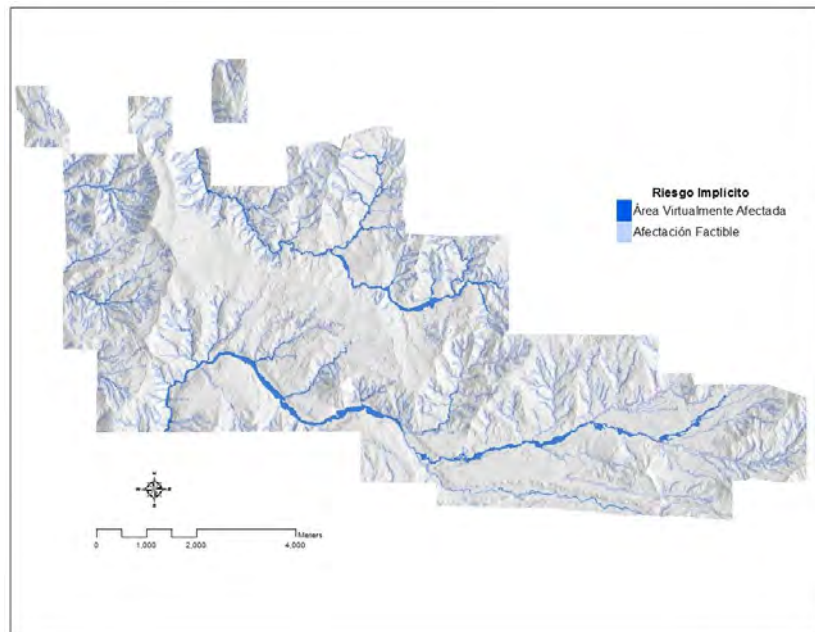
En el caso de Inundaciones se cuenta con los resultados del Contrato 272-2012 de Corpocaldas, titulado “Ajuste a las fajas forestales protectoras a escala de detalle (1:10000) de las corrientes de las cabeceras municipales del departamento de Caldas según la resolución 561 de 2012”, elaborado por el Ingeniero Víctor Mauricio Aristizábal M (Aristizábal, 2013).

En el mencionado estudio se delimita el retiro por amenaza de inundación y la torrencialidad a partir de información hidrológica secundaria y restitución aerofotogramétrica del año 2004. Se hace énfasis en la importancia de obtener información nueva y detallada, así como realizar campañas de monitoreo, muestreo de sedimentos en diferentes períodos del año con el fin de obtener una simulación que represente de una manera más acertada la dinámica de las corrientes urbanas.

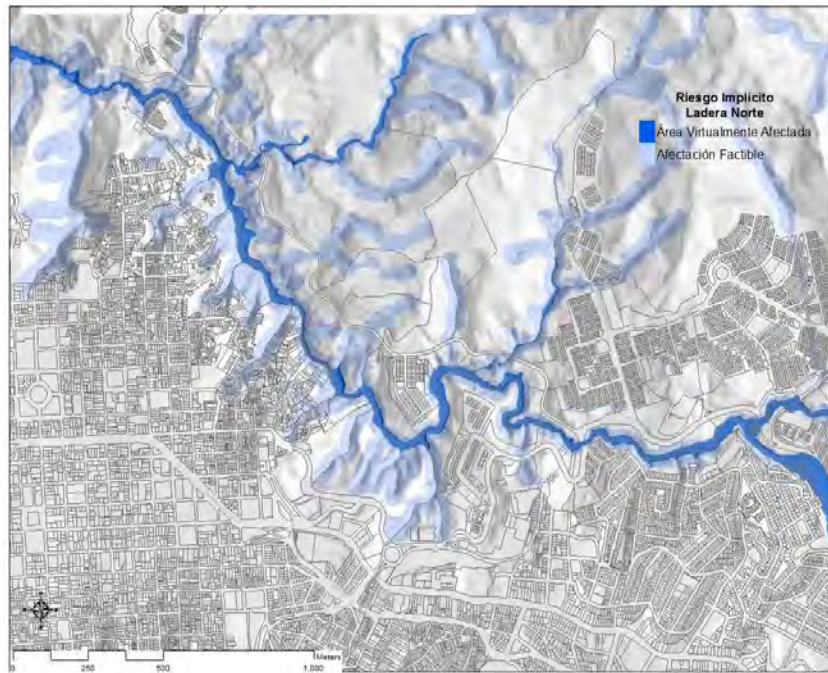
En cuanto a la calidad del ejercicio, se menciona que es muy inferior en Manizales que en los otros 24 municipios, dado que no se contaba con información suficiente para plantear diferentes escenarios de modelación. La sugerencia es incorporar imágenes LiDAR recientes y reevaluar los resultados para mejorar los modelos hidráulicos de la ciudad.

Para efectos del presente estudio se ha tomado la delimitación de la mancha inundable para un período de retorno de 100+40% años como el *Área Virtualmente Afectada* en términos de riesgo implícito, y el retiro geológico como el equivalente a un área de *Afectación Factible*.

La Figura 73 muestra el riesgo implícito por inundación obtenido para la ciudad, la Figura 74 Presenta un detalle de la zona norte, y la Figura 75 de la zona sur.



**Figura 73. Riesgo implícito por inundación para la ciudad. (Londoño, 2014)**



**Figura 74. Riesgo Implícito por Inundación Sector Norte. (Londoño, 2014)**



**Figura 75. Riesgo Implícito por Inundación Sector Sur. (Londoño, 2014)**

### 5.3.8. Valoración de pérdidas

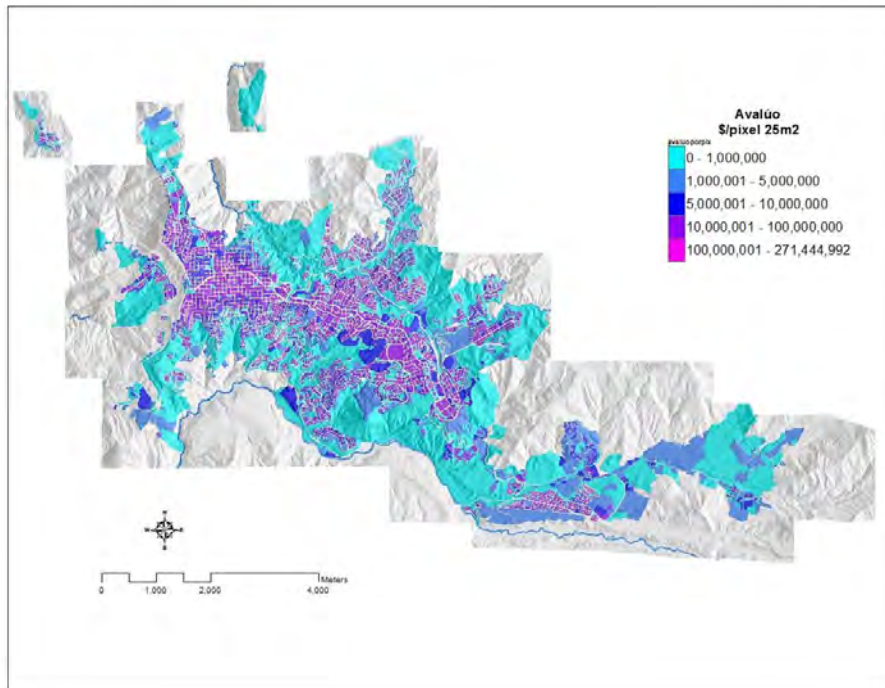
En el caso de deslizamientos, se parte del hecho que las áreas expuestas a los mayores niveles de amenaza presentarán a su vez los mayores niveles de daño. De esta manera, la vulnerabilidad de cualquier elemento expuesto puede considerarse total. En otros términos, cuando ocurre un deslizamiento en la ubicación de un activo, todo su valor de reposición se pierde, independiente del tipo de elemento expuesto en cuestión, y del tipo, magnitud, volumen o velocidad del deslizamiento. A partir de este supuesto, el riesgo por deslizamiento puede expresarse en términos probabilistas para cada escenario. Los momentos estadísticos para la pérdida total para cada escenario de deslizamiento puede obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$E(p) = \sum_{i=1}^{NE} Val \cdot Pr_L$$
$$Var(p) = \sum_{i=1}^{NE} (Val - E(p))^2 \cdot Pr_L$$

Donde Val es el valor expuesto, PrL es la probabilidad de ocurrencia de deslizamiento en la ubicación del elemento expuesto y NE es el número total de elementos expuestos.

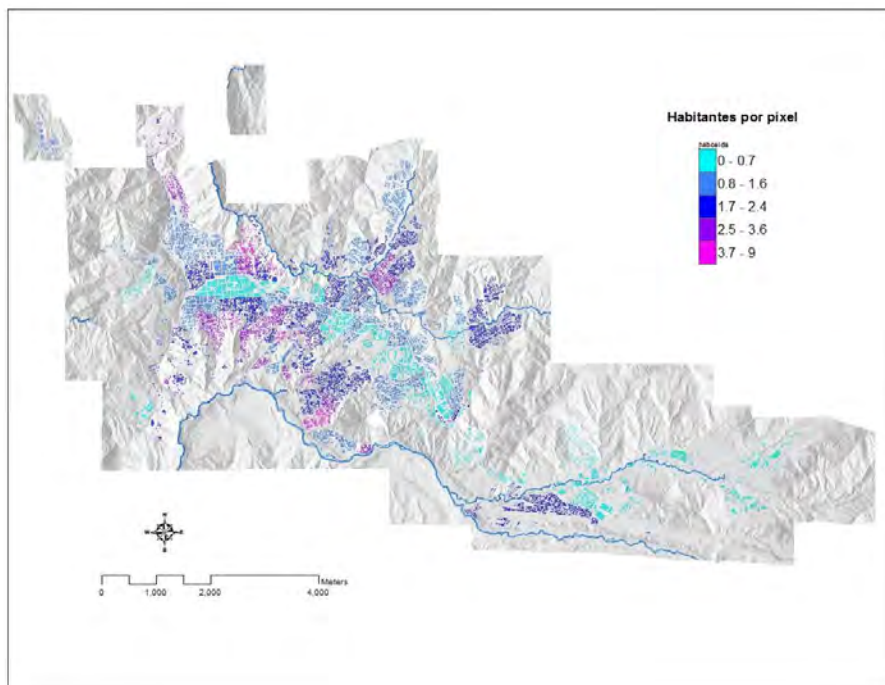
Dado que la pérdida está definida probabilísticamente para cada escenario de deslizamiento, el riesgo puede integrarse siguiendo las métricas probabilistas para obtener una curva de excedencia de pérdidas y de allí las métricas de riesgo usuales, como la Pérdida Máxima Probable, AAL o probabilidad de bancarrota, etc, comunes a los demás tipos de amenaza.

Puesto que se requiere un portafolio de elementos expuestos para cálculos de pérdida, se ha optado por utilizar el valor catastral de la base de datos predial disponible para el municipio. Con esta base de datos se ha elaborado un modelo de exposición (en términos monetarios) tipo ráster (de 5m x 5m) que expresa el valor expuesto para cada punto del terreno municipal, como se representa en la Figura 76.



**Figura 76. Modelo de exposición en términos monetarios. (Londoño, 2014)**

En el caso de habitantes expuestos, también es posible llegar a un modelo de exposición por píxel como el representado en la Figura 77.



**Figura 77. Modelo de exposición de habitantes. (Londoño, 2014)**

### 5.3.9. Pérdidas esperadas

La combinación de los modelos de probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y los modelos de exposición, proveen la probabilidad de pérdidas en las mismas ventanas de tiempo. De esta forma se han generado mapas de pérdidas económicas esperadas en 50 años (ver Figura 78) y 100 años (Figura 79) y de pérdidas humanas esperadas en 50 años (Figura 80) y 100 años (Figura 80).

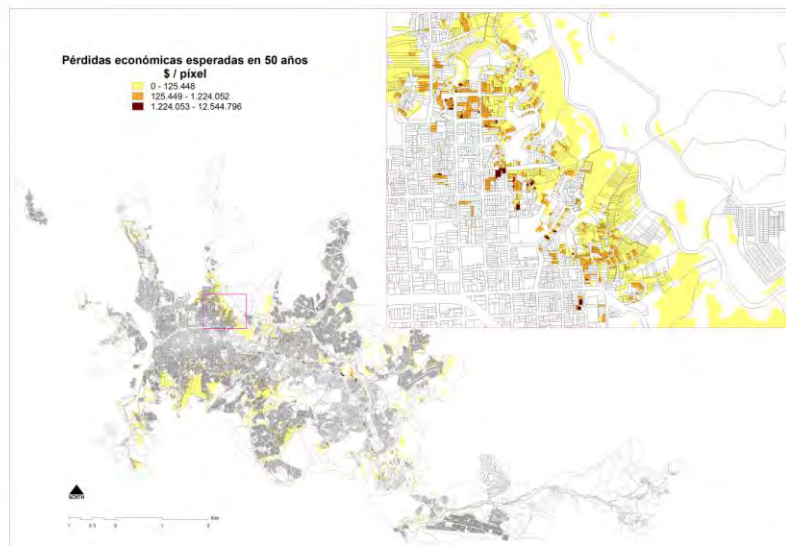


Figura 78. Pérdidas económicas 50 años. (Londoño, 2014)

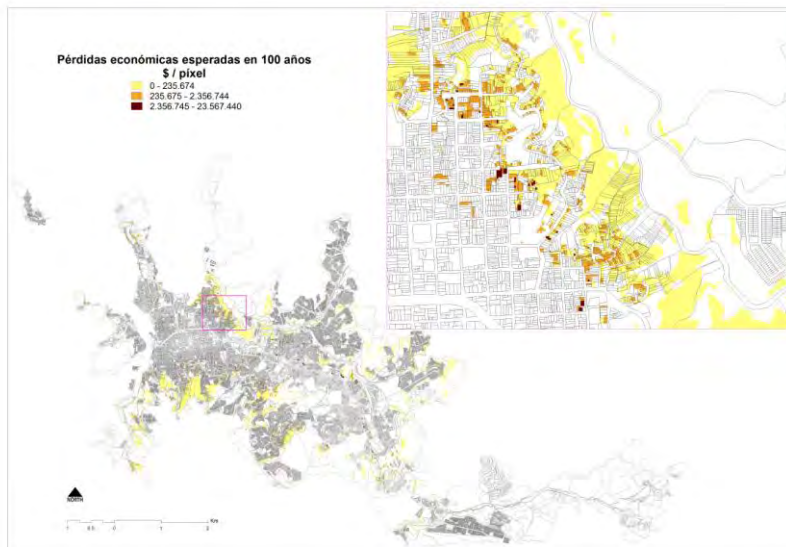
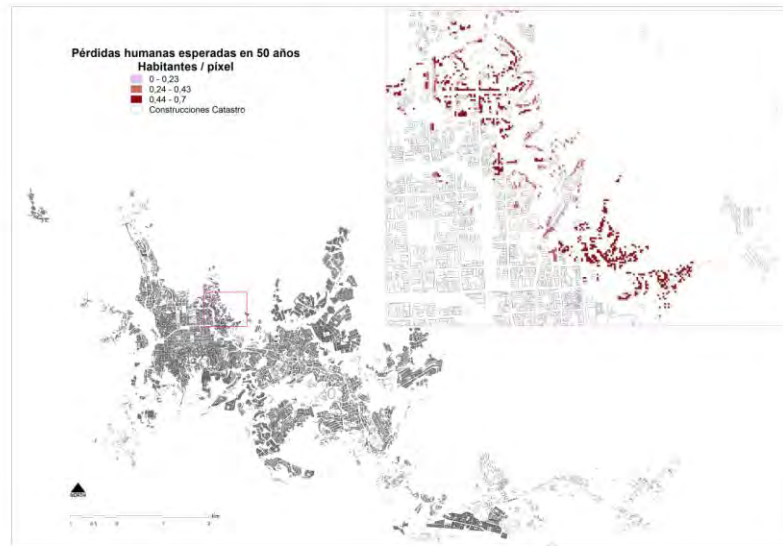
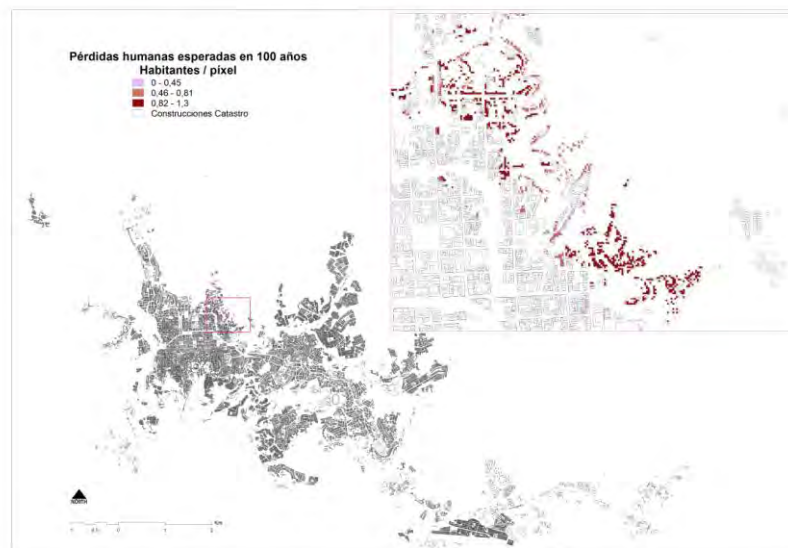


Figura 79. Pérdidas económicas en 100 años. (Londoño, 2014)



**Figura 80. Pérdidas humanas en 50 años. (Londoño, 2014)**



**Figura 81. Pérdidas humanas en 100 años**

La aplicación en evaluaciones de beneficio/costo de este tipo de enfoques resulta evidente: puede obtenerse el mapa de pérdida económica para una situación particular (actual, por ejemplo), luego puede evaluarse la construcción de determinadas obras de mitigación (que reducen los niveles de amenaza por deslizamiento) y asignar a ello un costo y recalcular las pérdidas esperadas bajo esta nueva configuración. Con lo anterior, y evaluando diferentes alternativas de mitigación, sería factible hacer análisis beneficio costo que permitieran establecer la viabilidad o no de la construcción de obras de mitigación, ya sea en términos económicos, o de protección de la vida de los habitantes de la ciudad.





## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

Si bien Colombia ha avanzado en gestión de riesgo de desastres y en los últimos años se han hecho esfuerzos en incorporarlo como determinante dentro del ordenamiento territorial, aún existe mucha confusión especialmente en la forma como se debe evaluar e incorporar, siendo esta situación más crítica en las poblaciones pequeñas. Esta situación en gran medida se debe a la falta de orientaciones metodológicas que permitan a los tomadores de decisiones establecer los condicionantes y restricciones exigibles para un adecuado ordenamiento territorial, teniendo el riesgo como determinante del uso del suelo. Lo anterior contribuiría a los tomadores de decisiones a generar los términos de referencia de lo que se necesita llevar a cabo en cada municipio y así orientar en el componente programático la gestión de riesgo. En la actualidad (Febrero 2014) se está tramitando un decreto en el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y otro en el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio con el objetivo de reglamentar el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 y la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres espera reglamentar los artículos 39, 40 y 41 de la Ley 1523 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Esta es sin duda una oportunidad para llenar el vacío de la falta de metodologías en la legislación en Colombia al respecto y lograr, como se manifestó anteriormente, una orientación a los tomadores de decisiones.

En Colombia la gran mayoría de los municipios son de las categorías 4 a 6 en la escala de 6 categorías que tiene el Departamento Nacional de Planeación, siendo el nivel 6 el de las condiciones de mayor debilidad institucional y fiscal, y en la actualidad no hay metodologías que indiquen cómo, según sus capacidades económicas y de acceso a la información, deben abordar los planes de ordenamiento territorial ó los planes estratégicos de gestión del riesgo. Esto tiene repercusiones en la falta de claridad de los tomadores de decisiones de las exigencias que se deben tener en cuenta a la hora de realizar dichos estudios que soportarán la planificación territorial, y que por otra parte representen realmente las necesidades de cada municipio. Otro factor es que el acceso a la información es muy limitado en los municipios de baja capacidad económica, puesto que los costos de la información básica son altos y esto limita la posibilidad de que se pueda hacer un excelente diagnóstico. Esto genera serios obstáculos y da como resultado una deficiente identificación del riesgo y por ende una mala planificación que al final se ve reflejado en pobres estrategias de reducción del riesgo y en una nula gestión de riesgo de desastres.

De lo anterior se deriva la necesidad de contar con metodologías acorde a las características de cada municipio que permitan llevar a cabo la evaluación de las amenazas y riesgo. Se deberían estratificar los municipios para este fin debido a la gran discrepancia que existe entre ellos, siendo el 90% de baja capacidad fiscal, además, de tener múltiples problemáticas sociales. Por esto es necesario que se establezcan orientaciones para cada municipio según sus capacidades, facilitando que puedan escoger metodologías que sean aplicables o factibles en su territorio.

El riesgo debe ser un determinante para la definición de los usos del suelo, con el fin de zonificar el territorio, condicionándolo a intervenciones correctivas, prospectivas y prescriptivas como se expuso en la Tabla 5 y así visualizar diferentes opciones de uso, los cuales fueron propuestos en los cuadros 1 y 2. Lo anterior con la finalidad de evitar la construcción del riesgo y la ocurrencia de nuevos desastres que se presentan en mayor y menor escala en forma continua y cuyo mayor ejemplo ha sido el de Armero en 1985; eventos que son el resultado de la no inclusión en el pasado de la gestión del riesgo de desastres en la planificación del territorio.

Hasta ahora la incorporación del riesgo en los POT en Colombia, tal como lo señala la Ley 388 de 1997, se ha fundamentado en el desarrollo de mapas multiamenaza y multirisgo usando categorías (alta, moderada y baja) obtenidas de zonificar áreas con un sistema de información geográfica en el cual se integran diferentes mapas temáticos que se cruzan entre sí como se explicó anteriormente. Desafortunadamente estas interpretaciones o categorías deben ser contextualizadas desde el punto de vista social y culturalmente y deben asociarse a la intensidad de fenómenos con diferentes periodos de retorno. Esto excepcionalmente se ha hecho en los POT en Colombia hasta ahora. Propuestas como la evaluación de amenazas de manera probabilista, tal como se explicó en el marco teórico y en la secciones 4.4,4.5 y 0, donde se explican metodologías que se han ilustrado en los ejemplos de aplicación en la sección 0 (POMCA, Pieza de planificación El Rosario) son ejemplos del tipo de evaluaciones que se deberían tener en cuenta especialmente en municipios de categoría especial 1 y 2. También se proponen enfoques metodológicos para los demás municipios más pequeños con menor capacidad fiscal, que son más asequibles a sus capacidades económicas.

Iniciativas como los proyectos pilotos del POMCA del río Chinchiná ó los trabajo que al respecto se han realizado para el PRICC son ejemplos metodológicos a nivel nacional de como incluir la gestión del riesgo de desastres en la planificación territorial. En la ciudad de Manizales ya se han comenzado aplicar nuevas metodologías en la evaluación de las amenazas naturales para la actualización del POT que se está realizando en el año 2014. De igual manera el Fondo Adaptación está incorporando metodologías como las propuestas en este documento en el proyecto de plan de acción para la reducción del riesgo de La Mojana; es decir, ya existen casos ilustrativos que deben replicarse en todo el territorio Colombiano, más cuando se pretende realizar 136 Planes de Ordenamiento y Manejo Ambiental de Cuencas en todo Colombia. No sería coherente luego de los esfuerzos y avances en la temática no aplicar lo aprendido y generar un punto de inflexión en la planificación del territorio, lo que contribuirá a salvaguardar la vida de los colombianos y mejorar su calidad de vida.

## **7. Bibliografía**

- Acuerdo No 508 de 2001. Por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales. (2001). Alcaldía de Manizales, Consejo Municipal de Manizales. Manizales.
- Acuerdo 573.de 2003. Por medio del cual se modifica el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales; Acuerdo 508 de Octubre 12 de 2001.(2003). Consejo Municipal de Manizales. Manizales.
- Acuerdo 663 de 2007. Por medio del cual se adopta la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Manizales. (2007).Consejo Municipal de Manizales. Manizales.
- Ambalagan, R. (1992). Terrain evaluation and Landslide Hazard Zonation for Environmental Regeneration and Land Use Planning in Mountainous Terrain. Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, pp. 861-871. En Suarez (1998).
- Aristizábal, V. (2013). Ajuste a las Fajas Forestales Protectoras a Escala de Detalle 1:10.000 de las Corrientes de las Cabeceras Municipales del Departamento de Caldas Según la Resolución 561 de 2012. Contrato 272-2012. Corporación Autónoma Regional de Caldas - Corpocaldas. Manizales.
- Birkmann, J. (Ed.), (2006). Measuring Vulnerability to Natural Hazards Towards Disaster-Resilient Societies.UNU Press, Tokyo, New York.
- Birkmann, J. (Ed.), (2013). Measuring Vulnerability to Natural Hazards Towards Disaster-Resilient Societies. Second edition .UNU Press, Tokyo, New York.
- Campos A. (2009). Incorporando la gestión del riesgo de desastres en la planificación y gestión territorial: Guía técnica para la interpretación y aplicación del análisis de amenazas y riesgos. Proyecto de Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina-PREDECAN. ISBN 978-9972-787-87-4.Lima.
- Cardona O. D. (1986). *Análisis de vulnerabilidad y evaluación del riesgo sísmico. Seminario Nacional sobre prevención y manejo de catástrofes naturales*. Medellín, Colombia.
- Cardona, O.D.& Hurtado J.E. (2000),”*Modelación Numérica para la estimación Holística del riesgo Sísmico Urbano, Considerando Variables Técnicas, Sociales y Económicas*”. Barcelona. España.
- Cardona, O. D. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España
- Cardona, O. D. (2002). Amenazas Naturales y Antrópicas y Vulnerabilidad, Riesgo y Desastre. Capítulos 4 y 5 de Teoría del Riesgo y Desastres; Curso de Gestión Integral de Riesgos y Desastres, Structuralia /CIMNE UPC, Madrid.
- Cardona, O.D., J.E. Hurtado, G. Duque, A. Moreno, A.C. Chardon, L.S. Velásquez & S.D. Prieto. (2005). Sistema de indicadores para la gestión del riesgo de desastre: Informe técnico principal. Programa

BID/IDEA de Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Disponible en <http://idea.unalmzl.edu.co>

- Cardona., O.D.; González., C.C.; Mora., M; Salgado., M.A.; Bernal., G.A., Londoño., J.P; Suárez., D.C & Correa, O. (2013). Documento diagnóstico del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná; Componente de gestión de riesgos. Instituto de Estudios Ambientales-IDEA. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Manizales.
- Cardona O.D.; Mendes, K.; Suárez., D.C; Pérez., MP; Cifuentes., P.; González., C.C., Londoño, J.P., Bernal, G.A. (2013). Piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidroclimáticos en el ordenamiento territorial municipal. Plan Regional Integral De Cambio Climático Región Capital Bogotá-Cundinamarca-PRICC. Bogotá.
- Cardona, O. D, Vélez, J.I., Montoya, J.D., Marulanda, A., Bustamante, N. (2014). Modelación Hidrológica. Informe final para el proyecto: Aunar esfuerzos para mejorar la gestión del riesgo mediante el conocimiento y el desarrollo de sistemas de información en el municipio de Manizales. Instituto de Estudios Ambientales-IDEA. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
- Carreño, M.L, Cardona, O.D. & Barbat, A.H. (2004). Metodología para la evaluación del desempeño de la gestión del riesgo, Monografía CIMNE IS-51, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Carreño, M.L., (2006). Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones ex ante y ex post, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Carreño, M.L.; Cardona, O.D.; Barbat, A.H. (2007a). Urban Seismic Risk Evaluation: A Holistic Approach". Evaluation: A Holistic Approach. In Journal of Natural Hazards, 40,1 (January): 137-172.
- Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles - CEDERI: Grupo de estudios sobre desastres y Riesgos. Universidad de los ANDES. (2002). *Microzonificación sísmica de la ciudad de Manizales*. Bogotá, Colombia
- Chivata., I. (2006) Contribuciones para el tratamiento de la incertidumbre en la evaluación de la amenaza por fenómenos de remoción en masa. Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Facultad de ingeniería y Arquitectura. Manizales. 2006. 195p
- Constitución Política de Colombia. (1991) Colombia. Presidencia de la Republica .Bogotá.
- Correa, I.C., Hincapié, L.C.(2010). Caracterización geológica, geomorfológica y zonificación de amenazas por fenómenos asociados a flujos de lodo, avalanchas y lahares, para el plan parcial El Rosario. Documento técnico de soporte del plan parcial El Rosario. Alcaldía de Manizales. Manizales
- Decreto 1400 de 1984, por el cual se adopta el Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes. (1984, 7 de junio). Colombia. Presidencia de la República de Colombia. Bogotá.
- Decreto 93 de 1998, Por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. (13 de enero de 1998). Colombia Ministerio del Interior. Bogotá.

*Enfoque Metodológico para la Evaluación e Incorporación del Riesgo de Desastres en los Instrumentos de Ordenamiento Territorial*

- Decreto 879 de 1998, Por el cual se reglamentan las disposiciones referentes al ordenamiento del territorio municipal y distrital y a los planes de ordenamiento territorial. (13 de mayo de 1998) Colombia .Ministerio de Desarrollo Económico. Bogotá.
- Decreto 919 de 1989, Por el cual se organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y se dictan otras disposiciones. (1 de mayo de 1989).Colombia. Presidencia de la República de Colombia. Bogotá.
- Decreto 200 de 2000, Por medio del cual se determina la composición y el funcionamiento del Comité Local para la Prevención, Atención y Recuperación de Desastres – COLPADE. (1 de septiembre de 2000).Colombia, Alcaldía de Manizales. Manizales.
- Decreto 2015 de 2001, Por el cual se reglamenta la expedición de licencias de urbanismo y construcción con posterioridad a la declaración de situación de desastre o calamidad pública. (24 de septiembre de 2001).Colombia. Ministerio de Desarrollo Económico. Bogotá.
- Decreto 4002, por el cual se reglamentan los artículos 15 y 28 de la Ley 388 de 1997. (30 de noviembre de 2004). Colombia Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.
- Decreto 564 de 2006, Por el cual se reglamentan las disposiciones relativas a las licencias urbanísticas; al reconocimiento de edificaciones; a la función pública que desempeñan los curadores urbanos; a la legalización de asentamientos humanos constituidos por viviendas de Interés Social, y se expiden otras disposiciones.(24 de febrero de 2006).Colombia Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.
- Decreto 2181, por el cual se reglamentan parcialmente las disposiciones relativas a planes parciales contenidas en la Ley 388 de 1997 y se dictan otras disposiciones en materia urbanística. (29 de junio de 2006). Colombia Presidencia de la Republica. Bogotá.
- Evaluación de Riesgos Naturales – América Latina ERN-AL (2009). Perfil de riesgo catastrófico del Perú. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington, D.C.
- ERN-AL. (2011). *Probabilistic Modeling of Disaster Risk at Global Level: Development of a methodology and implementation of case studies. Phase 1A: Colombia, México and Nepal*. Background paper prepared for the 2011 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland. UNISDR.
- Evaluación de Riesgos Naturales América Latina-ERN: Consultores en riesgos y desastres. (2011). *Modelación Probabilista de Riesgos Naturales a Nivel Global: La Curva Híbrida de Excedencia de Pérdidas*. Bogotá.
- Flores, A.N., Bledsoe, B.P., Cuhaciyán, C.O. and Wohl, E.E. (2006).*Channel- reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data*. Water Resources Research 42: doi: 10.1029/2005WR004226. ISSN: 0043-1397.
- Gellert-de Pinto, G.I. (2012). *El cambio de paradigma: de la atención de desastres a la gestión del riesgo*. Boletín Científico Sapiens Research, 2 (1), 13-17.

- González, C. C. (2012, junio) La Evaluación del Riesgo con Técnicas Probabilistas y su Incorporación en los Planes de Ordenamiento Territorial: El Caso de Manizales. *Boletín ambiental, Instituto de Estudios Ambientales-IDEA.107*. 11p
- González, C. C. (2012, Agosto) El Bahareque y el Paisaje Cultural Cafetero. *Blog sociedad espacio y Naturaleza*. Recuperado de <https://sociedadespacionaturaleza.wordpress.com/2012/08/28/el-bahareque-y-el-paisaje-cultural-cafetero-caso-manizales/#respond>
- González, C. C. (2013, abril) La Catedral Basílica de Manizales Símbolo de la Cultura Local de la Gestión del Riesgo en la ciudad de Manizales (Colombia). *Boletín ambiental, Instituto de Estudios Ambientales-IDEA.116*. 8p
- González, C. C. (2013, mayo) La Catedral Basílica de Manizales Símbolo de la Cultura Local de la Gestión del Riesgo en la ciudad de Manizales (Colombia). *Boletín ambiental, Instituto de Estudios Ambientales-IDEA.117*. 8p
- INGENIAR LTDA: Ingenieros-Arquitectos, consultores.(2006). Informe de consultoría: Insumos para el diagnóstico del desempeño del MAVDT en la gestión del riesgo de desastre. Bogotá.
- INGENIAR LTDA Ingenieros-Arquitectos, consultores.(2006) Informe de consultoría. Un Marco conceptual para la formulación de una política de gestión integral de riesgos del MAVDT. Bogotá.
- INGENIAR LTDA Ingenieros-Arquitectos, consultores. (2006).Informe de consultoría. Participación del MAVDT y las entidades del SINA en el plan nacional de prevención y atención de desastres. Bogotá.
- INGENIAR LTDA Ingenieros-Arquitectos, consultores. (2006). Informe de consultoría. La gestión integral del riesgo de desastres en Manizales un ejemplo a seguir y promover por el MAVDT. Bogotá.
- INGENIAR LTDA Ingenieros-Arquitectos, consultores.(2006). Informe de consultoría: Programa de gestión de riesgos del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo y de las entidades del sistema nacional ambiental. Bogotá.
- INGENIAR LTDA Ingenieros-Arquitectos, consultores.(2006).Informe de consultoría. Plan estratégico para impulsar el programa de gestión de riesgos del ministerio del ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Bogotá.
- IPCC, (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- Kanungo (1993). En Suárez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Editor: Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga, Colombia

- Lavell, A (Comp.) (1994). *Al Norte del Río Grande, Ciencias Sociales y Desastres una Perspectiva Norteamericana*. La Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina (LA RED). Bogotá, Colombia.
- Lavell, A (Comp.) (1994). *Viviendo en Riesgo, Comunidades Vulnerables y Prevención de Desastres en América Latina*. La Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) / Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO). Bogotá, Colombia.
- Lavell, A (1996). “Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación”, en Ma. A. Fernández (comp.). *Ciudades en riesgo*. LA RED-USAI. Lima, Perú.
- Lavell, A & Franco, Eduardo (Comp.) (1996). *Estado, Sociedad y Gestión de los Desastres en América Latina. En busca del paradigma perdido*. La Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) / Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) / Intermediate Technology Development Group (ITDG). Lima, Perú.
- Ley 46 de 1988, por la cual se crea y organiza el sistema nacional para la prevención y atención de desastres, se otorga facultades extraordinarias al presidente de la república y se dictan otras disposiciones. (2 de noviembre de 1988). Colombia Congreso de la República .Bogotá.
- Ley 9 de 1989, por la cual se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, compraventa y expropiación de bienes y se dictan otras disposiciones. Colombia Congreso de la República. (11 de enero de 1989).Bogotá.
- Ley 02 de 1991, Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989. (15 de enero de 1991). Colombia. Congreso de la República. Bogotá.
- Ley 152 de 1994, Por el cual se establece la Ley Orgánica del Plan de Desarrollo. (15 de julio de 1994).Colombia Congreso de la República. Bogotá.
- Ley 388 de 1997, Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras. (24 julio de 1997). Colombia Congreso de la República. Ibagué.
- Ley 902 de 2004, por la cual se adicionan algunos artículos de la Ley 388 de 1997 y se dictan otras disposiciones. (26 de julio de 2004). Colombia Congreso de la República. Bogotá.
- Ley 1400, Por la cual se adoptan normas sobre Construcciones Sismo Resistentes. (19 de agosto de 1997). Colombia Congreso de la República .Bogotá.
- Ley 1523, por el cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones. (24 de abril de 2012).Colombia Congreso de la República. Bogotá.
- Londoño, J.P. (2006).Tesis de Maestría, Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo. *Evaluación Holística del Riesgo Frente a Deslizamientos en Áreas Urbanas Andinas, Estudio de Caso: Manizales*. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Facultad de ingeniería y arquitectura. Manizales. 2006.

- Londoño, J.P. (2014). Zonificación de susceptibilidad y amenaza por deslizamientos umbrales de lluvia detonante. Informe para el proyecto Insumos técnicos para el ajuste del plan de ordenamiento territorial de Manizales con base en las evaluaciones ad-hoc de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por deslizamiento, inundaciones y eventos sísmicos. Instituto de Estudios Ambientales-IDEA. Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Manizales.
- Mansilla, E. (2000). Riesgo y Ciudad. Universidad Nacional Autónoma de México. División de Estudios de Posgrado. Facultad de Arquitectura. Distrito Federal, México.
- Marulanda., M.C. (2013) Tesis doctoral presentada para optar al grado de doctor, programa de doctorado: Análisis estructural. *Modelación Probabilista de Pérdidas Económicas por Sismo para la Estimación de la Vulnerabilidad Fiscal del Estado y la Gestión Financiera del Riesgo*. Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería. Barcelona.2013
- Marulanda, A.; Fonseca, O.A. (2013). *Estudio hidrológico considerando la fusión del glaciar para determinar las zonas inundables en el sector del plan parcial de la zona El Rosario del Municipio de Manizales*, Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.
- Maskrey, A. (Comp.) (1993). Los desastres no son naturales. La Red de Estudios Sociales de Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) / Tercer Mundo Editores. Bogotá, Colombia.
- Mendes, K.C. (2013) La reducción del riesgo de desastres en la planificación urbana. Caso de estudio la parroquia Caraballeda en el estado Vargas. Tesis de Maestría en Planificación Urbana: Mención Política y Acción Local Universidad Central de Venezuela, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005) *Serie ambiental y ordenamiento Territorial. Guía metodológica 1: Incorporación de la prevención y la reducción de riesgos en los Procesos de Ordenamiento Territorial*. Bogotá.
- Ministerio del Interior y Justicia, Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres. (2006). *Taller Nacional para el Fortalecimiento Institucional de La Gestión del Riesgo en Colombia. (17y18, junio, 2006: Bogotá, Colombia).Memorias*. Bogotá, Colombia
- Montoya, J. (2005). Tránsito Hidráulico en canales de alta pendiente. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Mora S. y Vahrson W.G. (1993). Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología Ice*. Vol 3 No. 1. Octubre, 1993.
- Mora S. y Vahrson W.G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, *Bulletin of the Association of Engineering Geologist*, Vol. XXXI, No. 1, pp. 49-58.
- Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina-PREDECAN. Agenda estratégica para el fortalecimiento de la gestión del riesgo en Colombia.Lima.2008.68p



- Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina-PREDECAN. (2009) *La gestión local del riesgo en una ciudad andina: Manizales, un caso integral, ilustrativo y evaluado*. Lima.
- Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina-PREDECAN. (2009). *Incorporando la gestión del riesgo de desastres en la planificación del desarrollo: Lineamientos generales para la formulación de planes a nivel local*. ISBN: 978-9972-787-86-7. Lima Perú.
- Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina-PREDECAN. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: un enfoque basado en procesos*. ISBN: 978-9972-787-88-1. Lima .Perú.
- Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina-PREDECAN. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: Instrumentos financieros de retención y transferencia para la comunidad andina*. ISBN: 978-9972-787-79-9. Lima. Perú
- Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina-PREDECAN. (2008). *Colombia, Agenda estratégica para el fortalecimiento de la gestión del riesgo*. ISBN: 978-9972-787-73-7. Lima, Perú
- UNISDR, International Strategy for Disaster Reduction, (2004). *Living with Risk: A Global Review of disaster Reduction Initiatives*, Geneva: UN Publications. Disponible en: [http://www.unisdr.org/eng/about\\_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm](http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-lwr-2004-eng.htm). Anexo1.
- UNISDR International Strategy for Disaster Reduction (2011). *GAR2011: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Revealing risk, redefining development*. Geneva, Switzerland: United Nations International Strategy for Disaster Reduction.
- United Nations. (1987). *Report Commission on Environment and Development*.
- Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. (2012). *Guía para el acotamiento de las rondas hídricas de los cuerpos de agua de acuerdo a lo establecido en el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 – Plan Nacional de Desarrollo*.
- Velásquez, C. A., Cardona, O. D., Yamin, L. E., Mora, M. G., & Barbat, A. H. (2011). *Curva de excedencia de pérdidas híbrida para la representación del riesgo*. Cuarto Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Granada, España.
- Vélez, J.J. (1989). *Estudio del lahar ocurrido el 13 de Noviembre de 1985 en el río Chinchiná como consecuencia de la erupción del volcán Nevado del Ruiz*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
- Wilches-Chaux, G. (1998). *Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo mecánico y soldado o Yo voy a correr el riesgo: Guía de la RED para la gestión local del riesgo*. Editorial: La Red. Lima, Perú.



## **ANEXO I. EL CASO DE MANIZALES: SU PRIMER ENFOQUE**

### **El riesgo en el plan de ordenamiento territorial de Manizales**

Los primeros planes de ordenamiento territorial en Colombia se generan luego de expedida la Ley 388 de 1997, cuyo objetivo principal menciona la prevención de desastres en asentamientos humanos de alto riesgo apoyado de acciones urbanísticas eficaces, es importante relacionar el concepto de prevención de desastres (gestión de riesgo) con la planificación del territorio. Esta situación implica identificar primero las amenazas y establecer según su frecuencia e intensidad que lineamientos urbanísticos, se deben adoptar para lograr la mejor seguridad posible de sus habitantes, esto en el caso de urbanizaciones nuevas (perspectivo). Para las urbanizaciones existentes se debe analizar su vulnerabilidad, además de identificar las amenazas que han afectado la zona y las que podrían afectar en el futuro, con la finalidad de estructurar estrategias que reduzcan el riesgo (prevención).

Con esta información el tomador de decisiones debe establecer cuál es el riesgo aceptable en su municipio basado en el conocimiento de las amenazas, su frecuencia e intensidad. Desde una visión transdisciplinaria esta situación debe llevar a determinar cuáles son las zonas de protección, reubicación y urbanización, además, de asignar un adecuado uso del suelo, sea comercial, residencial, industrial, cultural o deportivo.

La Ley 388 en sus diferentes artículos resalta la prevención de riesgos, para esto establece como determinante en los POT la zonificación y estrategias de manejo de las zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales en los asentamientos humanos. Luego de la identificación de las amenazas y la zonificación de las zonas expuestas, la Ley determina la necesidad de hacer un inventario de las zonas que presentan alto riesgo para la localización de asentamientos humanos por amenazas naturales o por condiciones de insalubridad (Artículo 16). Con base en este inventario de la zonificación se puede entrar a establecer cuáles son los suelos de protección que según el artículo 35 son:

*“Constituido por zonas y áreas localizados dentro de cualquiera de las anteriores clases (suelo de expansión urbana, suelo urbano, suelo suburbano, suelo rural) que por sus características geográficas, paisajísticas o ambientales, o por formar parte de las zonas de utilidad pública para la ubicación de infraestructuras para la provisión de servicios públicos domiciliarios o de las áreas de amenazas y riesgo no mitigable para la localización de asentamientos humanos, tiene restringida la posibilidad de urbanizarse”.*

La Ley establece para las zonas catalogadas como riesgo no mitigable (no recuperable según el artículo 121) lo siguiente:

*“Las áreas catalogadas como de riesgo no recuperable que hayan sido desalojadas a través de planes o proyectos de reubicación de asentamientos humanos, serán entregadas a las corporaciones Autónomas Regionales a la autoridad ambiental para*

*su manejo y cuidado de forma tal que se evite una nueva ocupación. En todo caso el alcalde municipal o distrital respectivo será responsable de evitar que tales áreas se vuelvan a ocupar con viviendas y responderá por este hecho”.*

Además el alcalde determina cual es el suelo de protección y las características mínimas para su clasificación, es decir, cuáles serán los reasentamientos, los proyectos de interés social, los Macroproyectos urbanos, los perímetros urbanos y rurales, las licencias urbanísticas y las funciones de los curadores urbanos.

Estas políticas de planificación son un proceso de transformación del territorio, por este motivo los POT establecen políticas a largo, mediano y corto plazo. El primero tendrá una vigencia de tres períodos constitucionales de las administraciones municipales y los dos siguientes una vigencia de dos y un periodo respectivamente (Artículo 28, Ley 388 de 1997). De acá la importancia que los municipios planifiquen los planes de ordenamiento territorial teniendo en cuenta la mayor cantidad de actores en el proceso, sin olvidar la importancia de la academia en la planificación.

Tomando como ejemplo el POT de la ciudad de Manizales este comenzó luego de la Ley 388 de 1997, el cual fue interrumpido debido a problemas en la administración municipal por un cambio de alcalde inesperado. En el año 2000 más precisamente en agosto se reinicia el proceso; en esta época una de las principales inquietudes que se tenía era la de estudiar nuevas zonas de expansión urbana debido a que se tenía conocimiento que las condiciones ambientales y geológico-técnicas del actual casco urbano de Manizales son de amenaza alta y limitan el proceso urbanístico.

El proceso de la realización del primer POT en la ciudad se plasmó en el acuerdo 508 de 2001 por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Manizales, se destaca el artículo 7 y su numeral 7.4 que establece:

*“[...] será un municipio responsable. Para ello manejará adecuadamente las condiciones de vulnerabilidad física frente a las amenazas naturales y disminuirá las zonas de riesgo indebidamente ocupadas, afrontando la ocupación del territorio con conocimiento de las condiciones de aptitud del suelo y las características ambientales y ecológicas, con responsabilidad pública, social y política”.*

Es sabido que la ciudad de Manizales se encuentra en una zona con múltiples amenazas por fenómenos naturales, por citar algunas, los sismos, los deslizamientos, los incendios, las erupciones volcánicas y en menor medida las inundaciones. Esta situación ha convertido a Manizales en un laboratorio que ha sido aprovechado por la academia con la finalidad de tratar de establecer métodos para ayudar a la seguridad de sus habitantes, además, no podemos olvidar que su cultura ha estado influenciada por estos fenómenos naturales y antrópicos lo que ha permitido desarrollar incluso tecnología propia como el estilo temblorero como respuesta a la alta ocurrencia de los sismos, desarrollando una cultura sísmica local (Robledo 1993; Cardona 2006). Todos estos acontecimientos hacen de las amenazas naturales en Manizales un tema de vital importancia y sin duda debe ser la

base para la toma de cualquier decisión sobre el uso del suelo y su ordenamiento territorial (González, 2013; González, 2012,11p).

El Plan de ordenamiento territorial de Manizales ha sufrido varias modificaciones, luego del primero realizado en el año 2001 bajo el acuerdo 508 se hizo la primera modificación en el año 2003 bajo el acuerdo 573 y en el año 2007 bajo el acuerdo 663. Estos acuerdos basados en la Ley 388 de 1997 están discriminados en dos componentes, urbano y rural definidos según la Ley:

- ✓ Componente Urbano: *“Constituido por las políticas, acciones, programas y normas para encausar y administrar el desarrollo físico urbano”*.
- ✓ Componente Rural: *“Constituido por las políticas, acciones, programas y normas para orientar y garantizar la adecuada interacción entre los asentamientos rurales y la cabecera municipal, así como la conveniente utilización del suelo”*

Algunos de los objetivos, políticas y estrategias de mediano y largo plazo, concerniente a la gestión de riesgo en el POT de Manizales son:

- ✓ Ofrecer alta calidad de vida a todos los ciudadanos en cualquier lugar del territorio.
- ✓ Conseguir una relación sostenible entre el medio ambiente y el desarrollo físico-territorial. (se habla de trabajar de manera permanente en el ordenamiento de los territorios de la cuenca hidrográfica del río Chinchiná, nuestro ecosistema estratégico, buscando preservar el recurso de agua de manera sostenida)
- ✓ Ocupar el territorio con conocimiento de las condiciones geográficas y ambientales. (la cultura de la prevención estará basada en el reconocimiento de las condiciones físicas del territorio y en la claridad sobre la forma de ocuparlo) (componente general, acuerdo 503 de 2003, numeral 1.4).

Aparte de los objetivos también se orienta las políticas y estrategias para la ocupación del suelo y se resalta el siguiente enunciado: *“Conocer las condiciones naturales del territorio para prevenir las amenazas naturales sobre el mismo y poner en ejecución medidas de mitigación y prevención de los riesgos”*.

El POT basado en el conocimiento de las amenazas naturales determina cual es el suelo de protección con la finalidad de otorgar seguridad a la sociedad, en algunos casos incluso prohibiendo los asentamientos humanos, también establece las áreas de protección ambiental que está compuesto por las laderas de protección y las áreas de tratamientos geotécnicos. Se definen áreas de interés ambiental como aquellas zonas deterioradas, por uso inadecuado o con procesos avanzados de erosión natural ó antrópica.

El POT establece áreas de riesgo no mitigable para la ubicación de asentamientos humanos, se definen estas áreas como: *“áreas que por sus características geológicas, topográficas e hidrometeorológicas, unidas a la falta de protección ambiental y a la localización de asentamientos humanos, son propensas a la ocurrencia de desastres*

*causados por deslizamientos e inundaciones”* (Acuerdo 508 de 2001,). Por este motivo estas áreas son de carácter restrictivo y no permite su desarrollo urbanístico.

El acuerdo 573 de 2003 y su antecesor el 508 de 2001 determinan los riesgos a los cuales está expuesto el municipio de Manizales, con una serie de mapas temáticos (geotécnicos, de formaciones superficiales, geomorfológico, morfológico, de procesos erosivos y cobertura vegetal) los cuales se integran en un modelo de Sistema de Información Geográfica- SIG. Esta información se cruzó mediante un SIG, al cual se le asignan valores de peso a cada una de las variables que las conforman, para de esta manera determinar zonas expuestas a los diferentes tipos de amenazas naturales y antrópicas. Estas zonas son delimitadas por intermedio de la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres-OMPAD (UGR actualmente), se delimitan por comunas, barrios y se establece el tipo de tratamiento que necesita según su diagnóstico siendo discriminadas en zonas de alta, moderada y baja amenaza.

Con base en estas delimitaciones se establecen cuáles son las laderas de protección ambiental y cuales tienen la posibilidad de intervención urbanística (sector urbano). Además, determina cuales son las zonas que tienen asentamientos humanos en zonas de riesgo, zonas que son identificadas por estudios geotécnicos y geológicos, restringiendo así nuevas construcciones e instalaciones de servicios públicos básicos. Las zonas de mejoramiento ambiental están limitadas a un diagnóstico técnico que determine cuáles deben ser las obras correctivas que garanticen la estabilidad global del sector (Acuerdo 508 & 573; 2001,2003).

Estas disposiciones determinan cuales son las zonas de rehabilitación o cuáles son las zonas de reubicación las cuales son determinadas por la Unidad de Gestión de Riesgo-UGR. De igual manera el crecimiento urbano es determinado según las áreas que son consideradas viables luego de un análisis realizado con base en herramientas informáticas como el Sistema de Información Geográfica-SIG, haciendo un cruce de mapas temáticos que determinan cuales son las zonas aptas para urbanizaciones.

Los fenómenos naturales en el POT se consideran una amenaza para el desarrollo social y económico del municipio de Manizales. Dada la importancia del tema se expresa que cualquier avance en el conocimiento de todas y cada una de las amenazas, vulnerabilidades y riesgos obtenidos en el presente trabajo pueden ser modificadas en la medida que se tengan los estudios más detallados y ante la ocurrencia de nuevos eventos naturales destructivos, esto garantiza incluir nuevas técnicas en el proceso de planeación territorial, lo que da pie a incluir nuevas metodologías en futuras revisiones de los Planes de Ordenamiento Territorial en Colombia, cómo se está haciendo en la actualización de 2014, metodologías que fueron ilustradas en el presente documento (Acuerdo 508,2001).

El suelo urbano según el acuerdo 508 establece en el numeral 1.7 la caracterización física y determinación preliminar de las amenazas , riesgos naturales y antrópicos de la ciudad de Manizales, allí se exponen sus características geológicas y geotécnicas, en el numeral 1.7.8 se exponen las amenazas que para Manizales son: deslizamientos, inundaciones, sismos, erupciones volcánicas e incendios. Estas amenazas se discriminan en

alta, moderada y baja y su determinación como se enuncio anteriormente está basada en el cruce de mapas temáticos (SIG).

Para la amenaza por incendio solo se tenía un insumo y es el inventario de tipologías constructivas realizados por la OMPAD (hoy UGR), dada la relación que poseen estas con la capacidad calorífica de los materiales, obteniéndose así las diferentes clases de amenaza (alta, moderada, baja).

En el numeral 1.7.9.1 se establecen las vulnerabilidades preliminares por deslizamientos, inundación, sismo. La vulnerabilidad también se clasifica como alta, moderada ó baja.

En el numeral 1.7.9.5 se establecen los riesgos, este resulta de la combinación entre la amenaza y la vulnerabilidad, el cual debe ser tenido en cuenta para las decisiones que el municipio debe tomar para su mitigación. Este riesgo fue determinado mediante la matriz expuesta en la Tabla A.I 1 para cada uno de los fenómenos naturales (Sísmico, inundación, deslizamiento, incendio).

**Tabla A.I 1 Matriz de riesgo según el POT de la ciudad de Manizales**

		Riesgo		
		Alta	Moderada	Baja
Vulnerabilidad / Amenaza	Alta	Alto	Moderado	Bajo
	Moderada	Moderado	Moderado	Bajo
	Baja	Bajo	Bajo	Bajo

**Fuente: Acuerdo 508 de 2001**

En el acuerdo 663 de septiembre 13 de 2007, se hacen algunos cambios sobre los usos del suelo, además, habían sido aprobadas las leyes 902 de 2004 y el decreto Nacional 4002 de 2004 que modifican en algunos aspectos la Ley 388 de 1997, especialmente el caso de las revisiones de cuando y como se deben hacer y bajo qué restricciones.

En este acuerdo 663 de 2007 en el artículo 19 se introduce una escala más detallada para la planificación territorial, por intermedio de las Piezas Intermedias de Planificación (PIP), las cuales se crean como normas complementarias, establecidas en el numeral 38 como: “[...] *normas complementarias para el municipio: Mediante la presentación de proyectos específicos, la secretaría de planeación deberá elaborar la normativa urbanística urbana y rural a través de las piezas intermedias de planificación-PIP[...].el contenido ambiental de dichos proyectos debe contar con la concertación ante CORPOCALDAS o quien haga sus veces*”. Las PIP según el artículo 45 son útiles para: “*reconocer una porción del territorio, urbana ó rural; define los usos del suelo, los tratamientos urbanísticos y la normativa urbanística, y establece las guías generales para el diseño de los componentes de escala zonal*”.

La ciudad de Manizales ha realizado una completa identificación del riesgo en diferentes zonas de su territorio, detectando así las más críticas, y formulando procesos de reubicación debido a su alta vulnerabilidad, lo anterior se vio reflejado en el proceso de reubicación que

se dio en barrio la playita, por lo anterior se citarán algunos estudios que el acuerdo 663 incluyó con la finalidad de tener un conocimiento más acertado del riesgo:

- ✓ Estudio de consolidación de las zonas aptas para el desarrollo y suelo de protección ajustado en obras de estabilidad, retiros de cauces en la ciudad de Manizales. Realizado por el ingeniero Carlos Enrique Escobar Potes en junio de 2003.
- ✓ AQUATERRA S.A realizó un estudio que sirvió como base para definir con mayor precisión las laderas de protección ambiental en la zona de la sultana.
- ✓ *INGENIERÍA DE SANEAMIENTO AMBIENTAL -INGESAM LTDA.* Contrato No 2005-0189: Estudio de factibilidad para la recuperación y mantenimiento de la calidad de la cuenca del río Chinchiná-Fase I. Manizales 2007,1157p.Informe final. Aguas de Manizales S.A E.S.P. Proyecto No.022-2005: Componente 1-Estudío de factibilidad Técnica, Socio-Económica y Ambiental.
- ✓ Actualización del inventario de áreas con tratamientos geotécnicos con la participación de la secretaría de planeación y personal técnico del programa guardianas de la ladera (COROPOCALDAS).
- ✓ Revisión, ajuste y delimitación a las áreas de amenaza por deslizamiento e inundación en la zona del municipio de Manizales realizado por el geólogo Alfonso Restrepo en febrero de 2006.

Es importante resaltar que en este acuerdo en las zonas determinadas como de riesgo no mitigable, la única alternativa es la reubicación lo que impide reconstruir la vulnerabilidad. También se crea en el componente urbano del acuerdo 663 el sistema Municipal de áreas protegidas del municipio de Manizales –SIMAP el cual fue aprobado en el acuerdo No 603 del 22 de diciembre de 2004. Con relación a los anteriores acuerdos se nota una diferencia en el nombre de las comunas que fueron cambiadas en el decreto 042 del 28 de febrero de 2005.

Es importante resaltar que estos Planes de Ordenamiento tienen un consejo consultivo conformado por:

- ✓ El Alcalde quien lo convoca y preside.
- ✓ El Secretario de Planeación Municipal, quien hará las veces de secretario.
- ✓ El Secretario de Obras Públicas del Municipio.
- ✓ El Secretario de Tránsito y Transportes del Municipio.
- ✓ El Gerente de Aguas de Manizales S.A. E.S.P.
- ✓ El Gerente de la Caja de la Vivienda Popular.
- ✓ El Gerente del INVAMA
- ✓ Los Curadores Urbanos del Municipio.
- ✓ Un representante del Concejo Municipal en calidad de invitado.

Se observa la ausencia del director de la Unidad de Gestión de Riesgo- UGR, el cual se considera necesario bajo la premisa que la UGR es el ente gubernamental encargado de la gestión de riesgo de la ciudad.



El Plan de Ordenamiento Territorial de Manizales establece una ocupación del territorio con conocimiento de las condiciones geográficas y ambientales, además, de evitar la ocupación de suelos con riesgos no mitigables los cuales deben ir desapareciendo gradualmente y se trabajará permanentemente en prevenir la ocurrencia de nuevas urbanizaciones evitando la construcción de la vulnerabilidad. De igual manera se manifiesta que la cultura de la prevención se basará en el reconocimiento de las condiciones físicas del territorio y en la claridad sobre la forma de ocuparlo. También establece como política para la ocupación del suelo prevenir las amenazas naturales y poner en ejecución medidas de mitigación y prevención de los riesgos que puedan ocasionar y se mencionan las siguientes estrategias (Acuerdo 663,2007):

- ✓ Reubicación de viviendas que ocupan zonas de alto riesgo.
- ✓ Rehabilitación de viviendas y mejoramiento de entorno.
- ✓ Construcción de obras de defensa y estabilidad.
- ✓ Diseño del plan de atención de emergencias.
- ✓ Ejecución del plan de acción para la prevención y atención de desastres.
- ✓ Educación de la comunidad.
- ✓ Elaboración de las normas complementarias para el municipio, Código de Construcciones y urbanizaciones y el estatuto de usos del suelo.

El Plan de Ordenamiento Territorial establece una base ambiental como estructura soporte para el desarrollo. Esto incluye la identificación tanto de las áreas de reserva agrícola y ambiental como para la infraestructura de servicios públicos. El plan de ordenamiento también establece que el crecimiento urbano tendrá lugar en áreas viables que resulte una vez se establezca el cruce de variables como las zonas de protección ambiental y de riesgo.

Según el acuerdo 663 de 2007 la zonificación de los riesgos es determinada por la UGR luego de procesar la información sobre las diferentes amenazas y los sitios de su ocurrencia utilizando mapas temáticos, si bien este método tuvo su utilidad, se tienen hoy otras herramientas tecnológicas que estiman la amenaza con una frecuencia e intensidad lo cual permite tener diferentes escenarios de riesgo.

### **Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo**

Se ha ilustrado como se ha tenido en cuenta el riesgo y las gestión del riesgo en el Plan de Ordenamiento Territorial, en esta sección se expone como en Manizales se ha evaluado la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo, según el anexo suelo urbano que hace parte del acuerdo 663 de 2007.

**Amenazas.** Las amenazas identificadas en Manizales son:

- ✓ Deslizamiento
- ✓ Inundación
- ✓ Incendio
- ✓ Sismo

## Vulnerabilidad

Para la determinación de este aspecto en la ciudad de Manizales se tiene en cuenta la ubicación de la infraestructura (viviendas unifamiliares, edificios, colegios, hospitales, policía, bomberos etc.) con respecto al área de influencia de las diferentes amenazas identificadas, obteniéndose la siguiente tabla:

**Tabla A.I 2 Matriz de vulnerabilidad según el POT de la ciudad de Manizales**

Grados de vulnerabilidad			
Elementos expuestos Grados de amenaza	Líneas Vitales (alcantarillado, acueducto, gas teléfono)	Infraestructura (Área construida, vías)	Cultivos
Alta	Alta	Alta	Alta
Moderada	Moderada	Alta	Moderada
Baja	Baja	Baja	Baja

Los grados de vulnerabilidad otorgados para los diferentes elementos expuestos, consignados en la Tabla A.I 2, dependen de la importancia de cada uno de ellos para el normal funcionamiento de la ciudad y del grado de amenaza; encontrándose que en caso de la ocurrencia de un fenómeno ofrece un mayor grado de importancia las pérdidas que involucren vidas (construcciones y sistemas viales), mientras que en un segundo y tercer grado se encuentran las líneas vitales y los cultivos, respectivamente.

Para cualquier tipo y grado de amenaza se analizan los diferentes elementos que pueden ser afectados (elementos expuestos) por la ocurrencia de un fenómeno (deslizamiento, incendio, inundación, sismos).

## Riesgo.

El riesgo resulta de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad, el cual debe ser tenido en cuenta para las decisiones que el municipio debe tomar para su mitigación. Fue determinado mediante la siguiente matriz para cada uno de los fenómenos naturales y antrópicos anteriormente analizados (Acuerdo 663, 2007).

**Tabla A.I 3 Matriz de riesgo según el POT de la ciudad de Manizales**

Riesgo			
Vulnerabilidad Amenaza	Alta	Moderada	Baja
Alta	Alto	Moderado	Bajo
Moderada	Moderado	Moderado	Bajo
Baja	Bajo	Bajo	Bajo

## **ANEXO II. EJEMPLOS DE MÉTODOS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS (MOVIMIENTOS EN MASA)**

### **Nivel I. Métodos con bajos niveles de información**

#### **Método 1. Observación directa**

A partir de la Tabla A.II 1, es posible establecer zonas con características similares, que lleven a generar grados de susceptibilidad para el terreno.

**Tabla A.II 1. Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a deslizamientos**

<b>Grado de susceptibilidad</b>	<b>Criterio</b>
Muy Alta	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurran
Alta	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran
Moderada	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos pero no existe completa seguridad de que no ocurran
Baja	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados no saturados con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos
Muy baja	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos

A manera de ilustración, se presenta en la Figura A.II 1 un mapa con cinco categorías que pueden obtenerse después de una inspección en campo con la ayuda de un GPS o cartografía temática, para definir los contornos.

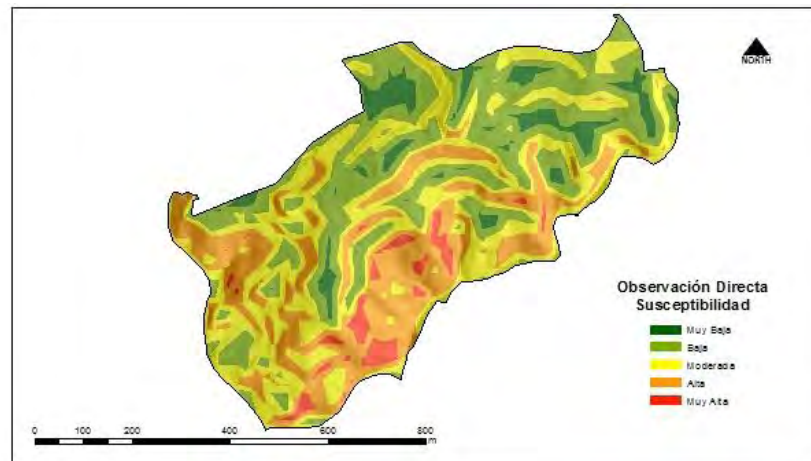


Figura A.II 1. Zonificación directa de susceptibilidad a deslizamientos  
Fuente: (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II).

### **Método 2: Zonificación heurística basada en criterio experto.**

Suponiendo que después de una inspección de campo se llegó a la identificación de una zona con las siguientes características:

- Vegetación intensa, área húmeda
- Material predominante: Lutitas no arcillosas
- Espesor de la capa del suelo: 8 metros
- Pendiente media:  $38^\circ$
- Diferencia de altura entre la divisoria de aguas y el valle: 120 metros
- El ángulo que forman la dirección del talud y la dirección de las discontinuidades más representativas es mayor a  $30^\circ$
- La relación entre buzamiento de las discontinuidades e inclinación del talud de más de  $10^\circ$

Para asignar pesos con estas características del terreno, debe emplearse la Tabla 15. Los pesos específicos son:

**Tabla A.II 2. Asignación de pesos a los diferentes factores dentro del área de estudio**

Factor	Descripción	Peso
Litología	Lutitas no arcillosas	1.80
Estructura	Espesor de 6 a 10 metros	0.85
	Relación de paralelismo entre talud y discontinuidades 31°	0.20
	Relación entre buzamiento e inclinación: 15°	0.30
	Buzamiento 27°	0.30
Morfometría	16° a 25°	0.80
Relieve relativo	95 metros	0.30
Uso de la tierra	Vegetación intensa	0.80
Aguas subterráneas	Húmedo	0.20

$$Amenaza = 2 * 1.8 + 2 * \frac{0.85 + 0.2 + 0.3 + 0.3}{4} + 2 * 0.8 + 0.3 + 2 * 0.8 + 0.2$$

$$Amenaza = 8.1$$

La zona así delimitada correspondería a una amenaza relativa muy alta.

## **Nivel 2. Métodos con niveles intermedios de información**

### **Método 3. Métodos heurísticos basados en datos**

Para efecto de ilustrar la metodología de Mora y Vahrson, se presenta un ejemplo ficticio (Mora y Vahrson, 1993).

Una cuadrícula tiene como características  
L=4 piroclastos poco compactados

Pendiente: Elevación máxima=1750m  
Elevación mínima=1430m  
Relieve relativo: 320m

Rr=3

3 meses < 125 mm	3*0=	0
4 meses 125 – 250 mm	4*1=	4
5 meses > 125 mm	5*2=	10
Sumatoria		14

H=3

$$Susc = R_r \cdot L \cdot H = 36$$

La actividad sísmica máxima en esta cuadrícula llegó a un valor de IX en la escala Mercalli Modificada, por lo tanto,  $S=7$ .

Las lluvias máximas para una duración de 24 horas, en un período de retorno de 100 años poseen un valor de 321mm, entonces,  $Ll=4$

El factor de disparo total se obtiene de la suma  $Disp=S+Ll=11$

El potencial de deslizamientos disparado por sismos posee un valor de  $PDS=S*Susc=252$ , clasificándose como de mediano grado de amenaza;

El potencial de deslizamientos disparados por lluvias intensas asciende al valor de  $PDI=Ll*Susc=144$ , clasificada como amenaza moderada;

La amenaza total de deslizamiento tiene un valor de

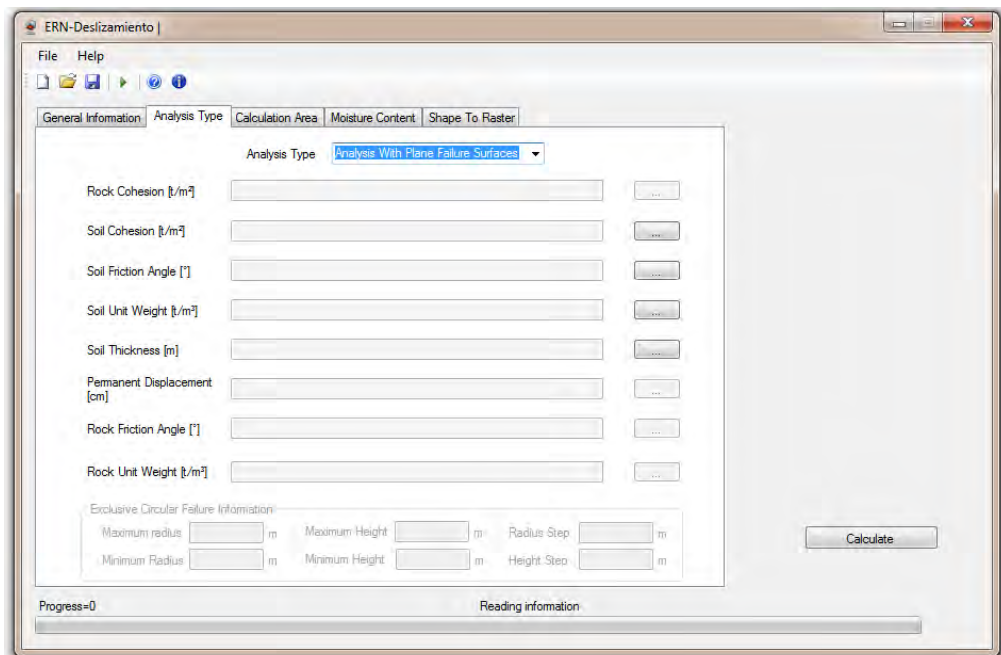
$$Ad=PDS+PDI=Susc*Disp$$

$$Ad=252+144=36*11=396$$

Lo cual, hace que la ladera posea un mediano grado de amenaza por generación de deslizamientos.

#### **Método 4. Métodos Geotécnicos asociados a Factores de Seguridad**

Utilizando el software ERN-Deslizamientos se ha llevado a cabo un análisis de susceptibilidad mediante el método de falla plana traslacional. Los factores necesarios para este procedimiento se ilustran en la Figura A.II 2 y son: modelo digital de elevaciones, archivo .AME de aceleraciones sísmicas, mapas de cohesión, ángulo de fricción, peso unitario y espesores de suelos.



**Figura A.II 2. Parámetros de entrada del software ERN-Deslizamientos para análisis de falla plana.**  
**Fuente (Cardona, Mendes, 2013, parte II)**

Se ha efectuado un análisis sin sismo, con suelo completamente saturado. Los resultados son el inverso del Factor de Seguridad y expresan el grado de susceptibilidad de las diferentes celdas que constituyen el área de estudio (Figura A.II 3).

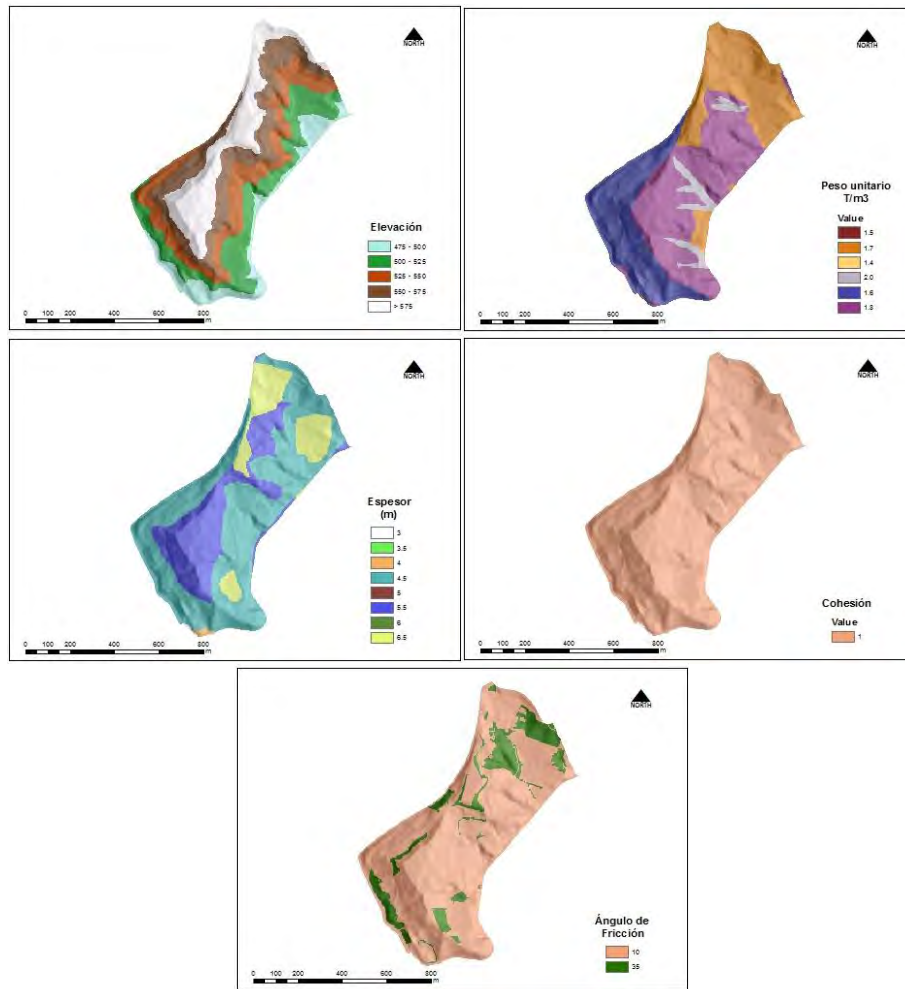


Figura A.II 3 Parámetros geotécnicos del terreno para análisis de falla plana. Elevación, Peso Unitario, Espesor, Cohesión y Ángulo de Fricción del suelo. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

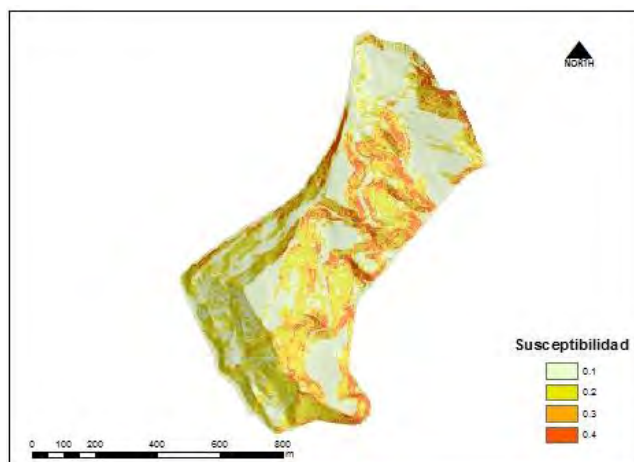


Figura A.II 4. Índices de Susceptibilidad calculados (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



### **Nivel 3. Métodos con altos niveles de información**

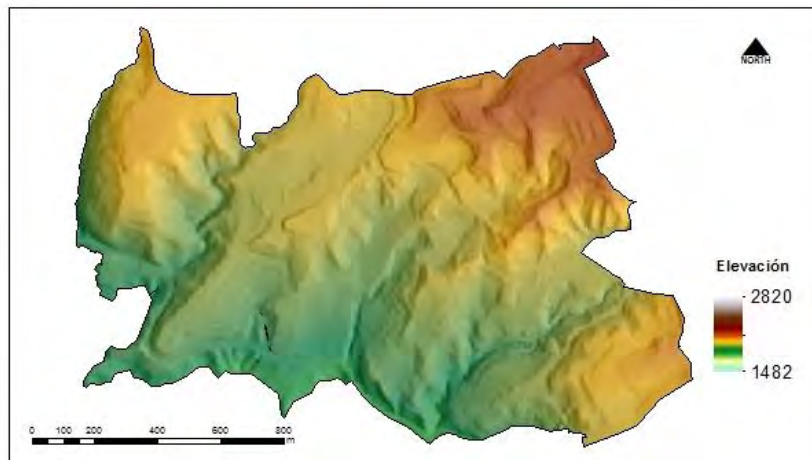
#### **Método 5. Análisis Discriminante**

Para un área de estudio se han logrado extraer datos relacionados con 22 factores de propensividad a la inestabilidad de laderas.

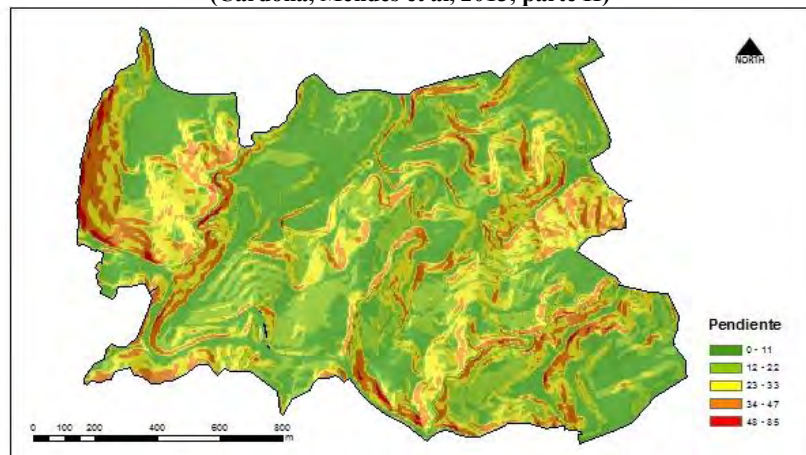
**Tabla A.II 3. Listado de factores de propensividad para el área de estudio**

Modelo de elevación digital (DEM)
Pendientes (SLOP)
Insolación (INSO)
Orientación de las laderas (ASPE)
Rugosidad (RUGO)
Curvatura perpendicular a la pendiente (CRPL)
Curvatura paralela a la pendiente (CRPR)
Curvatura en dos dimensiones del terreno (CURV)
Áreas aferentes (ACCA)
Coberturas (COBE)
Formaciones superficiales (FMSU)
Geología (GEOL)
Geomorfología (GEOM)
Distancia a red de acueductos (DACU)
Distancia a red de alcantarillado (DALC)
Distancia a drenajes y cauces (DDRE)
Distancia a fallas geológicas y lineamientos (DFAL)
Distancia a la red vial (DVIA)
Densidad poblacional (hab/ha) (DPNE)
Densidad neta de viviendas (viv/ha) (DVNE)
Densidad poblacional (habitantes en 50 metros) (H50M)
Densidad de viviendas (viviendas en 50 metros) (V50M)

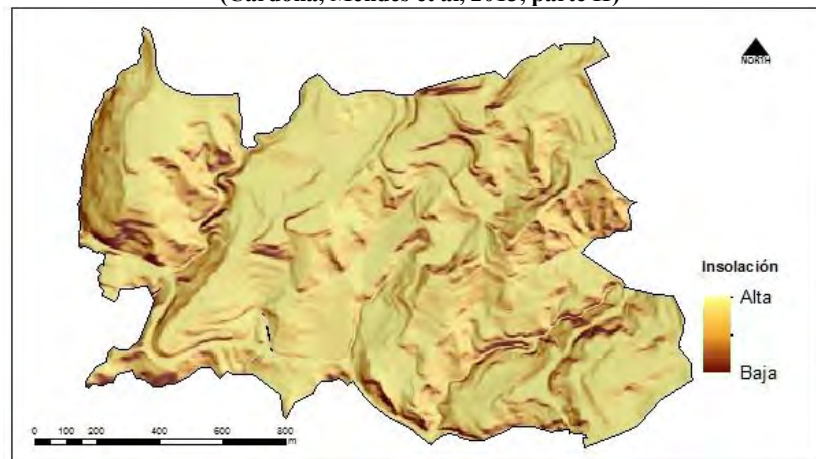
Tales factores tienen su representación cartográfica en los mapas mostrados desde la Figura A.II 5 hasta la Figura A.II 25.



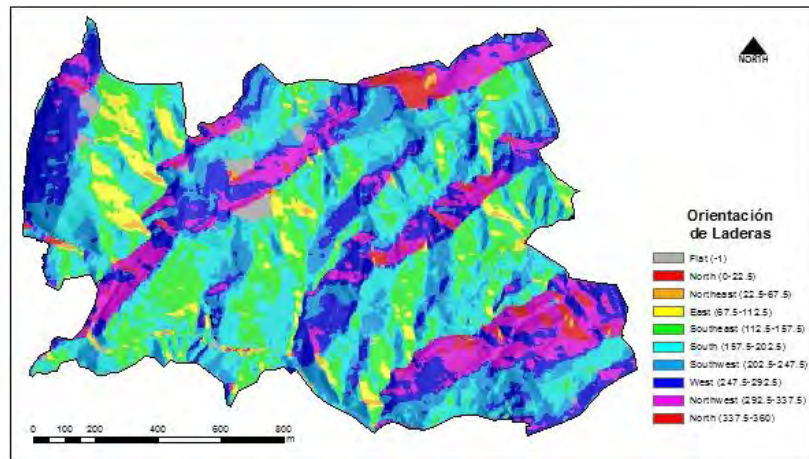
**Figura A.II 5. Modelo digital de elevaciones para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



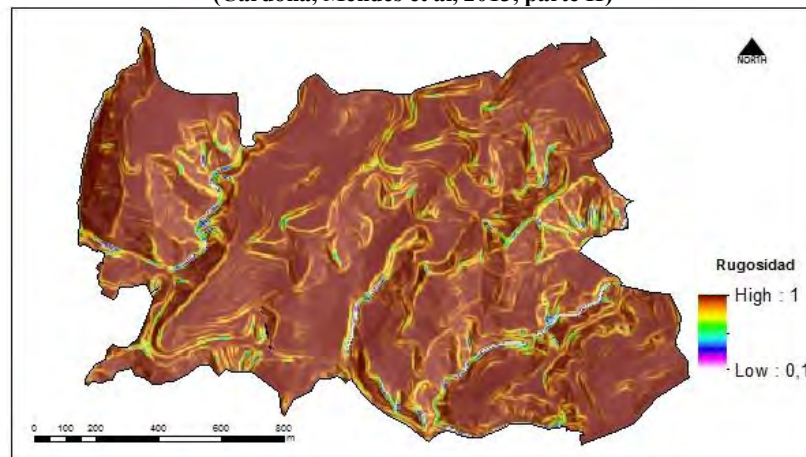
**Figura A.II 6. Mapa de pendiente para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



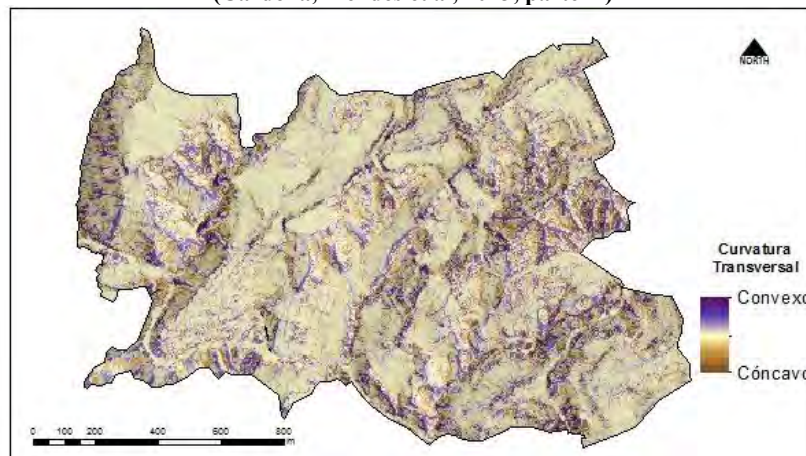
**Figura A.II 7. Mapa de insolución calculado para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 8. Mapa de orientación de laderas para el área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 9. Mapa de rugosidad para el área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 10. Mapa de Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente para el área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

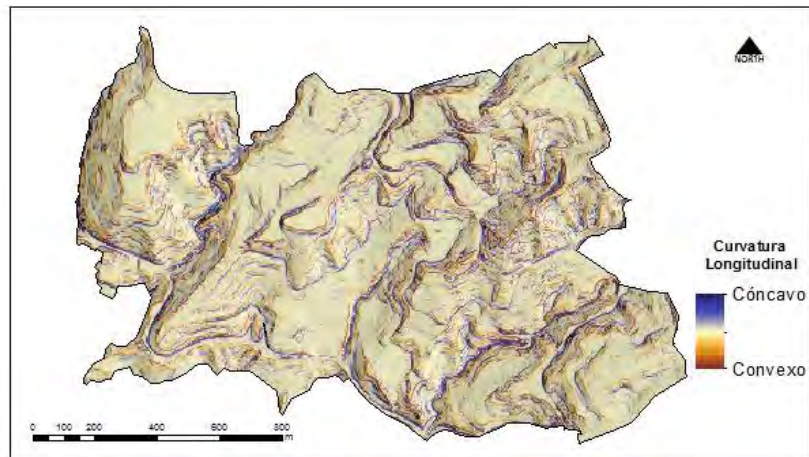


Figura A.II 11. Mapa de Curvatura en el sentido paralelo a la pendiente para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

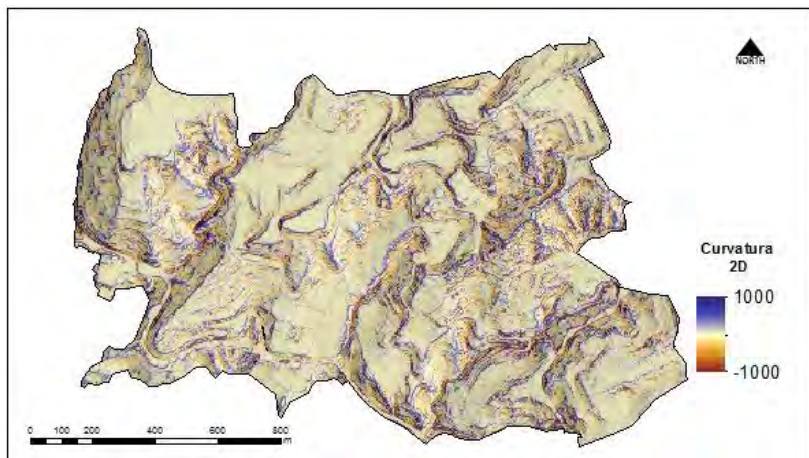


Figura A.II 12. Mapa de Curvatura (en dos dimensiones) para el área de estudio (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

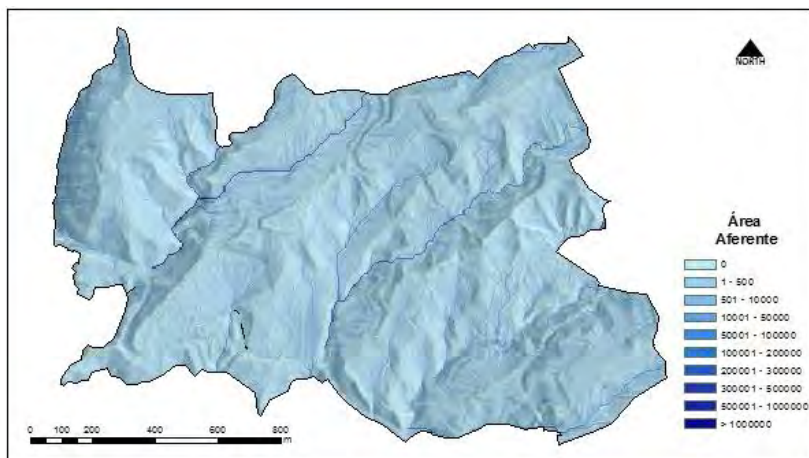
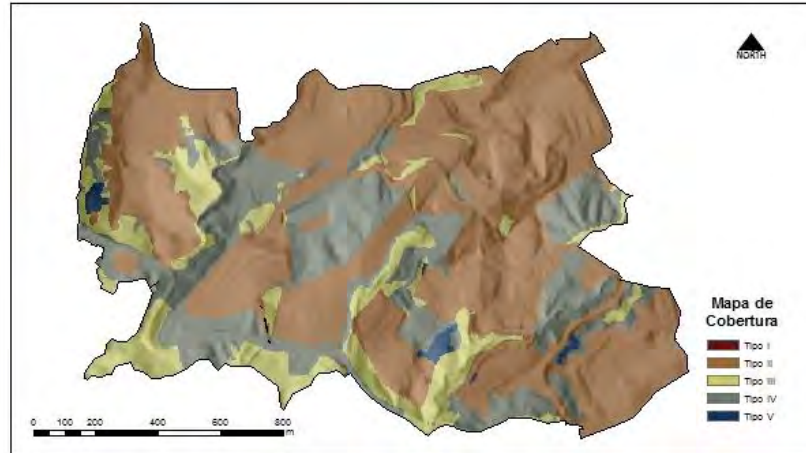
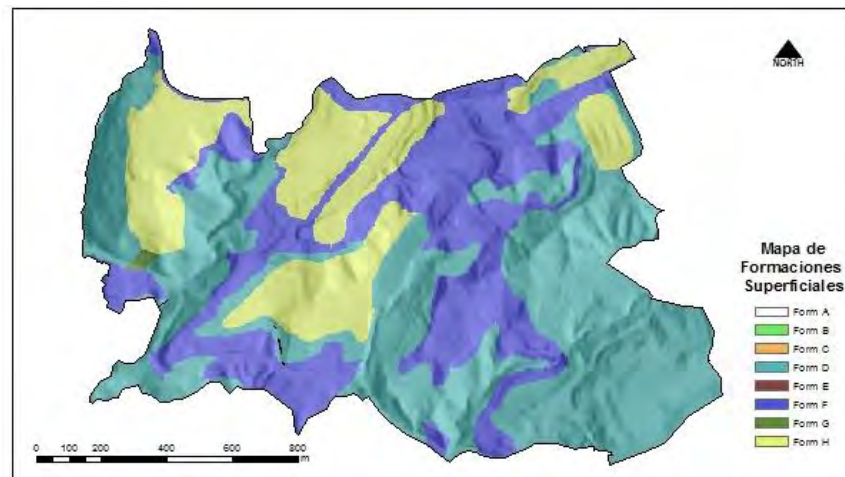


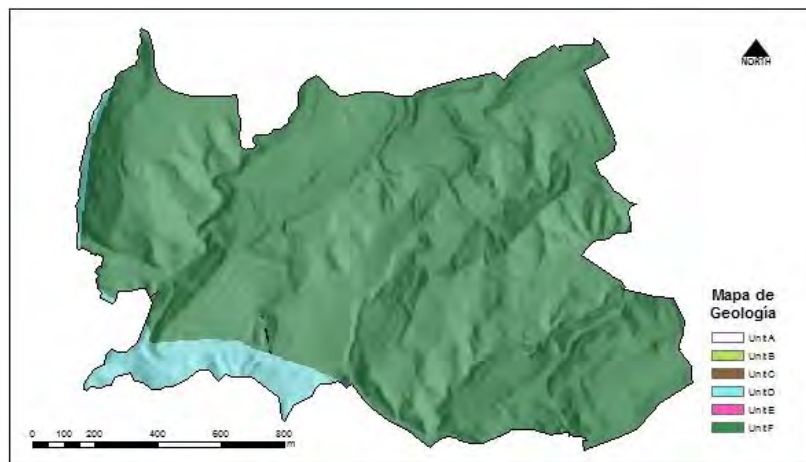
Figura A.II 13. Mapa de áreas aferentes por píxel (área acumulada). (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 14. Mapa de coberturas para el área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 15. Mapa de formaciones superficiales para el área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 16. Mapa de geología del área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

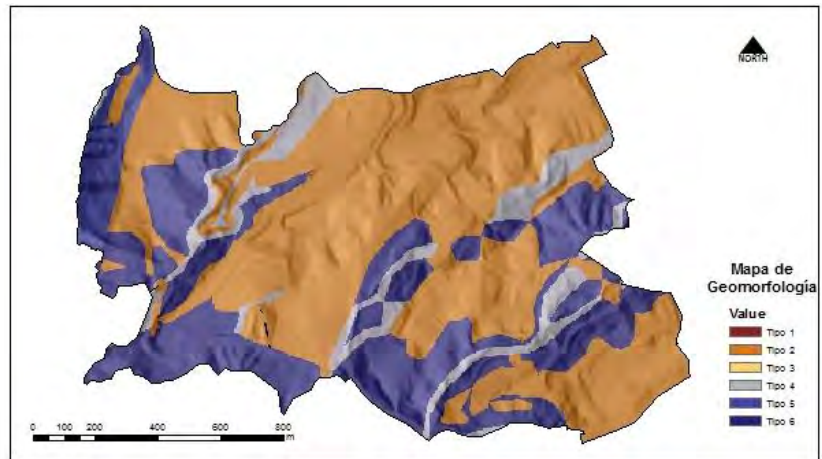


Figura A.II 17. Mapa de geomorfología del área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

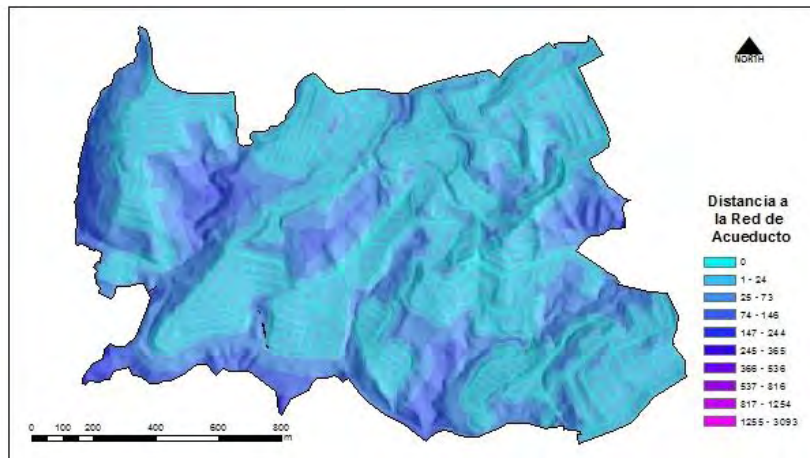


Figura A.II 18. Mapa de distancia a la red de acueducto para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

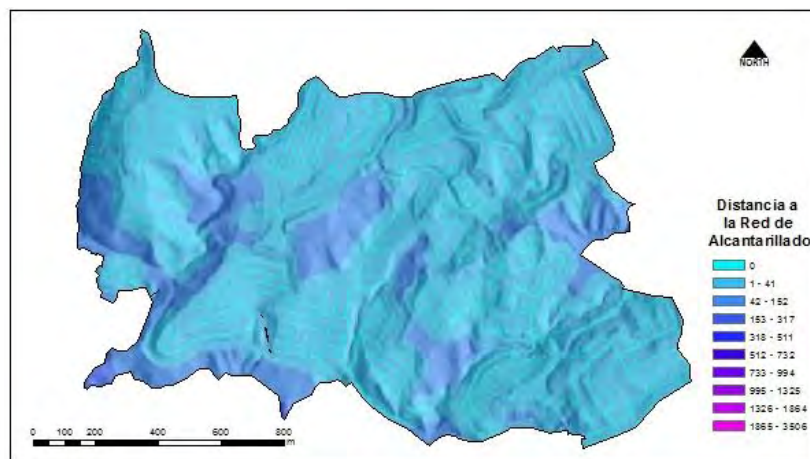


Figura A.II 19. Mapa de distancia a la red de alcantarillado para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

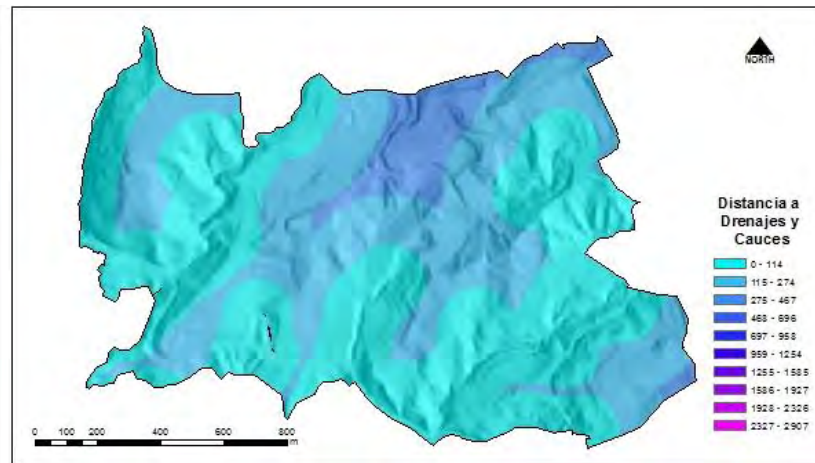


Figura A.II 20. Mapa de distancia a drenajes y cauces para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

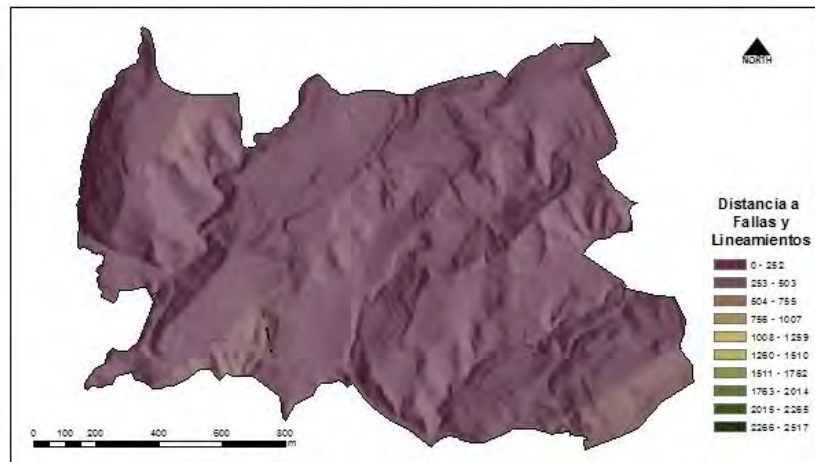


Figura A.II 21. Mapa de distancia a fallas geológicas y lineamientos para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

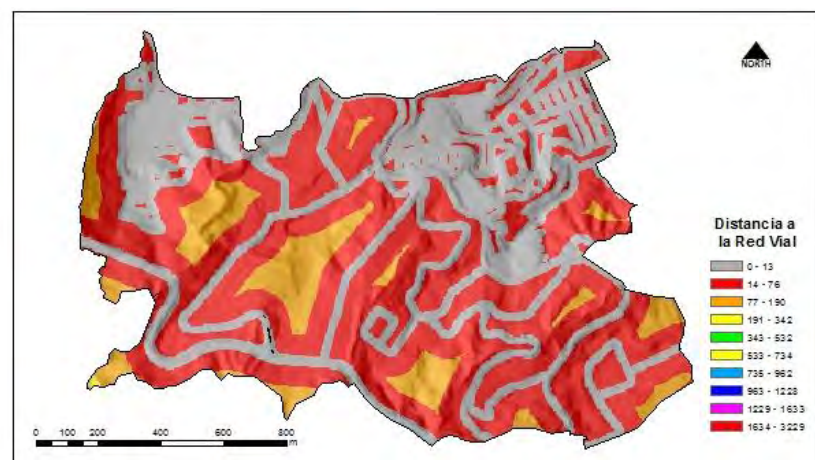


Figura A.II 22. Mapa de distancias a la red vial del área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

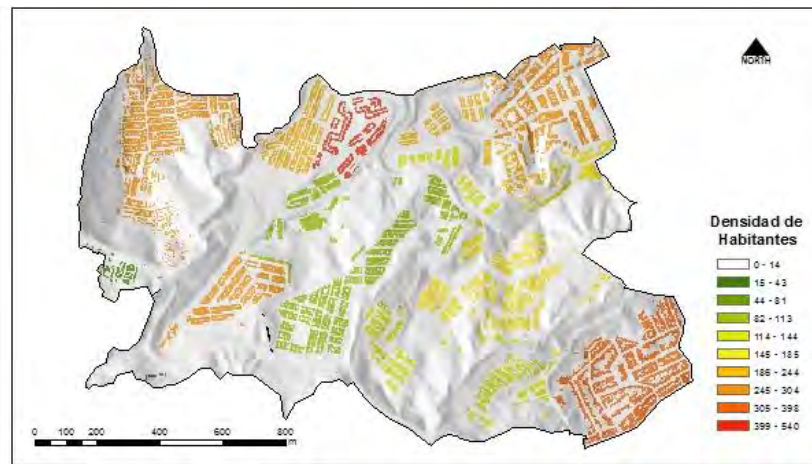


Figura A.II 23. Mapa de densidad poblacional expresada en habitantes por hectárea para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

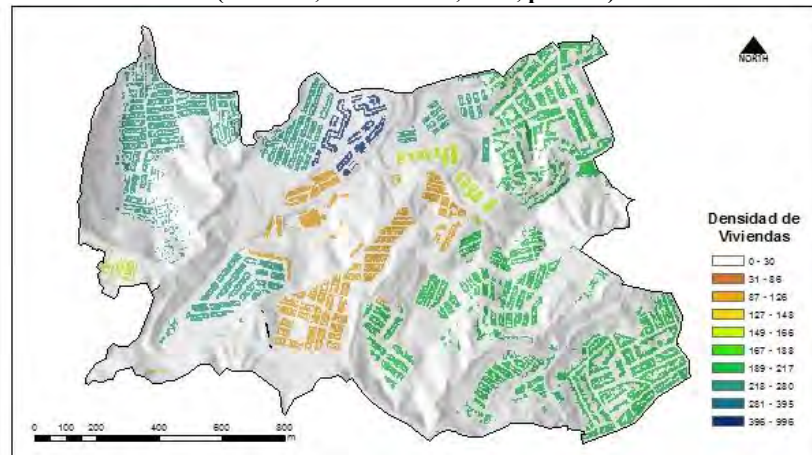


Figura A.II 24. Mapa de densidad neta de viviendas (viviendas por hectárea) para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

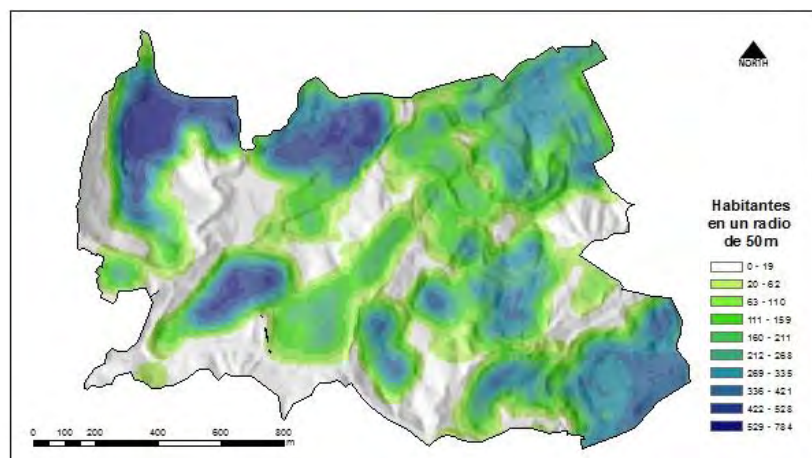
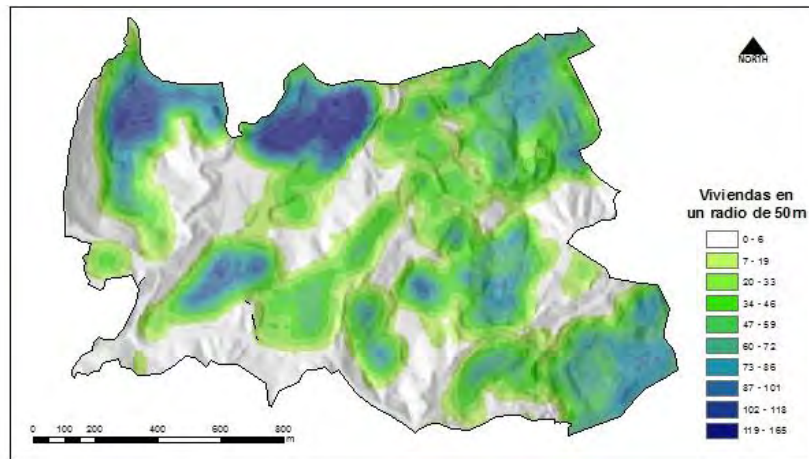


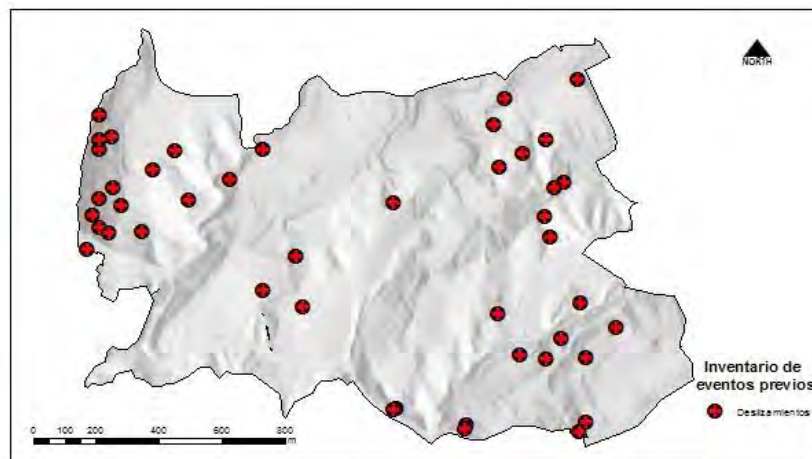
Figura A.II 25. Densidad poblacional, expresada en habitantes en un radio de 50 metros para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)





**Figura A.II 26.** Mapa de densidad de viviendas, expresada en viviendas en un radio de 50 metros para el área de estudio.(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

Adicionalmente se cuenta con el inventario de deslizamientos que aparece en la Figura A.II 26, donde se tienen registrados 50 eventos pasados de deslizamientos.



**Figura A.II 27.** Inventario de eventos previos de deslizamiento en el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

Con la información disponible del área de estudio se conforma una muestra de 50 eventos de deslizamiento, que constituyen uno de los dos grupos sobre los que se realizarán los análisis posteriores. El otro grupo estará constituido por otros 50 puntos elegidos aleatoriamente dentro del área donde no existen eventos registrados. En total se tienen 100 puntos (Tabla A.II 4) como muestra de análisis dividida en dos grupos: área estable (DESL=0) y área inestable (DESL=1).

**Tabla A.II 4. Extracto de la muestra de análisis obtenida con los datos disponibles  
(solo se muestran 50 de los 100 elementos)**

ID	ACCA	ASPE	SINA	COSA	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DPNE	DVIA	DVNE	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	RUGO	SLOP	V50M	DESL
26	300.00	178.09	0.03	-1.00	80	-0.09	-1.76	1.67	264.01	180.62	50.00	2030.33	841.86	0.00	295.68	0.00	60	60	60	0.00	124	1.00	33.46	0	0
27	25.00	151.68	0.47	-0.88	80	1.01	-0.67	1.68	641.40	1160.83	439.00	2258.98	393.86	0.00	574.33	0.00	70	30	60	0.00	128	1.00	34.45	0	0
28	75.00	230.28	-0.98	0.18	80	-1.24	-0.57	-0.67	31.62	163.25	314.01	2245.05	83.82	0.00	75.00	0.00	70	30	100	0.00	141	1.00	34.55	0	0
29	100.00	234.49	-0.81	-0.58	80	-0.35	-1.59	1.24	431.86	85.00	65.00	1971.89	553.94	0.00	178.89	0.00	30	30	100	0.00	135	0.99	34.69	0	0
30	375.00	282.56	-0.98	0.22	60	-7.38	-0.88	-6.50	200.12	199.06	20.62	2176.46	188.22	0.00	237.17	0.00	70	30	80	0.00	140	0.99	34.87	0	0
31	75.00	172.45	0.13	-0.99	80	2.03	-1.11	3.13	197.80	123.49	115.43	2073.64	620.75	0.00	367.19	0.00	60	60	60	7.00	122	1.00	35.16	1	0
32	50.00	308.27	-0.79	0.62	80	2.56	-1.06	3.62	30.41	35.00	31.62	2001.54	140.89	0.00	35.36	0.00	70	50	60	51.00	134	0.99	35.41	12	0
33	25.00	95.73	0.99	-0.10	60	-5.24	-1.32	-3.92	156.60	61.03	15.81	1877.89	25.00	0.00	156.60	0.00	50	50	60	0.00	140	0.98	36.68	0	0
34	425.00	234.24	-0.81	-0.58	60	2.32	-4.84	7.16	199.06	236.01	46.10	1916.61	185.27	0.00	582.00	0.00	50	50	100	0.00	132	0.99	38.05	0	0
35	25.00	308.43	-0.78	0.62	60	0.48	-4.57	5.05	57.01	101.24	25.00	2207.77	425.82	0.00	90.14	0.00	70	30	100	0.00	132	0.98	38.20	0	0
36	25.00	134.62	0.71	-0.70	80	-0.42	0.22	-0.64	32.02	39.05	82.01	2114.63	29.15	0.00	40.00	0.00	70	80	20	4.00	129	0.99	38.51	1	0
37	75.00	203.89	-0.40	-0.91	60	-1.04	-8.82	7.78	95.52	90.00	22.36	1900.51	10.00	0.00	20.00	0.00	70	80	80	11.00	121	0.99	39.03	2	0
38	25.00	184.30	-0.07	-1.00	60	5.04	0.04	5.00	53.85	60.42	142.13	2060.98	613.62	0.00	55.90	0.00	70	50	100	0.00	113	0.98	40.57	0	0
39	25.00	259.55	-0.98	-0.18	60	0.78	0.74	0.04	892.75	1061.14	262.39	2273.95	326.88	0.00	1107.81	0.00	70	80	100	0.00	137	1.00	40.61	0	0
40	0.00	174.56	0.09	-1.00	60	11.17	28.72	-17.54	75.00	71.59	0.00	2022.76	395.28	0.00	256.22	0.00	30	30	60	0.00	112	0.74	41.62	0	0
41	50.00	335.09	-0.42	0.91	80	1.32	-1.08	2.41	506.95	1565.84	1092.93	2325.16	218.40	0.00	685.51	0.00	60	100	100	0.00	118	1.00	41.63	0	0
42	100.00	222.19	-0.67	-0.74	80	-3.90	2.68	-6.58	145.34	155.32	288.14	2010.70	477.13	0.00	275.41	0.00	60	60	40	0.00	123	1.00	42.58	0	0
43	7725.00	354.18	-0.10	0.99	100	-0.14	13.94	-14.08	40.31	15.00	47.43	2018.93	485.72	0.00	5.00	0.00	60	60	20	0.00	109	0.96	43.29	0	0
44	250.00	296.42	-0.90	0.45	60	-4.87	5.78	-10.65	101.24	105.48	68.01	1981.70	35.36	0.00	116.73	0.00	50	100	100	0.00	131	1.00	43.48	0	0
45	25.00	69.15	0.93	0.36	80	2.21	-8.88	11.09	5.00	344.42	80.00	2004.10	300.83	0.00	7.07	0.00	50	50	80	0.00	132	0.98	44.12	0	0
46	25.00	285.67	-0.96	0.27	60	-1.78	5.28	-7.05	303.73	285.39	60.21	1925.63	139.46	0.00	428.08	0.00	50	100	100	0.00	128	1.00	49.23	0	0
47	25.00	242.21	-0.88	-0.47	60	27.07	-23.69	50.76	732.27	1277.60	501.32	2318.41	599.60	0.00	704.56	0.00	70	30	60	0.00	124	0.96	49.99	0	0
48	175.00	299.57	-0.87	0.49	80	-1.80	-13.95	12.16	7.07	32.02	343.98	2152.81	180.07	0.00	18.03	0.00	70	30	100	62.00	120	0.99	53.11	14	0
49	75.00	4.84	0.08	1.00	80	-6.03	11.34	-17.36	191.05	183.85	40.31	2151.33	482.60	0.00	183.85	0.00	70	30	80	0.00	85	1.00	55.33	0	0
50	0.00	104.68	0.97	-0.25	60	7.63	-9.61	17.23	320.04	1682.00	300.37	2198.07	46.10	0.00	1394.10	0.00	60	60	60	0.00	121	1.00	57.31	0	0
51	150.00	43.80	0.69	0.72	10	1.10	-0.70	1.81	11.18	7.07	71.59	1968.11	272.26	922.00	14.14	200.00	50	30	20	206.00	144	1.00	20.16	44	1
52	25.00	181.38	-0.32	-1.00	10	0.51	2.14	-1.63	10.00	7.07	120.21	2069.83	65.19	0.00	11.18	0.00	50	50	20	317.00	139	1.00	20.35	71	1
53	150.00	21.61	0.37	0.93	10	0.18	0.98	-0.80	18.03	21.21	323.11	2103.68	344.38	0.00	21.21	0.00	70	80	20	251.00	141	1.00	20.71	64	1
54	125.00	355.11	-0.09	1.00	10	-1.75	7.64	-9.39	35.36	0.00	82.76	2015.13	267.68	0.00	65.00	0.00	70	50	20	158.00	139	0.92	20.81	31	1
55	25.00	191.81	-0.20	-0.98	10	2.08	0.14	1.95	36.40	47.43	106.30	2073.50	143.00	0.00	5.00	0.00	70	50	20	112.00	140	1.00	20.95	23	1
56	25.00	322.33	-0.61	0.79	80	0.43	-0.44	0.88	25.00	0.00	76.32	2107.89	204.02	0.00	15.00	0.00	100	80	20	25.00	142	1.00	21.20	7	1
57	3200.00	13.31	0.23	0.97	60	-3.61	-8.34	4.73	33.54	46.10	49.24	2020.55	148.41	0.00	85.00	0.00	50	30	100	81.00	140	0.95	21.28	16	1
58	75.00	314.82	-0.71	0.70	10	0.20	1.29	-1.10	18.03	18.03	203.96	2177.13	190.00	0.00	20.62	0.00	100	30	20	252.00	143	1.00	21.38	57	1
59	0.00	333.32	-0.45	0.89	80	3.44	0.72	2.72	15.81	14.14	49.24	1951.55	305.37	0.00	42.43	0.00	70	50	100	86.00	141	1.00	21.56	21	1
60	175.00	130.89	0.76	-0.65	60	-1.06	0.45	-1.10	11.18	122.58	7.07	1848.24	107.94	0.00	272.86	0.00	50	50	100	0.00	143	1.00	22.28	0	1
61	75.00	127.13	0.80	-0.60	10	0.53	0.21	0.32	5.00	5.00	33.54	2027.76	284.69	1715.00	85.00	342.00	70	80	100	154.00	144	1.00	22.91	30	1
62	0.00	112.84	0.92	-0.39	10	4.90	-1.88	6.78	0.00	0.00	42.43	2064.60	69.46	0.00	5.00	0.00	70	80	20	267.00	146	1.00	23.19	67	1
63	250.00	329.47	-0.51	0.86	10	-2.11	0.84	-2.95	10.00	7.07	165.08	2137.14	65.00	730.00	20.62	164.00	80	30	60	275.00	140	1.00	23.44	62	1
64	150.00	266.96	-1.00	-0.05	10	-3.13	5.87	-9.00	22.36	7.07	80.00	2071.28	74.33	0.00	182.48	0.00	70	50	20	353.00	146	0.99	23.89	78	1
65	275.00	337.70	-0.38	0.93	10	-4.24	8.85	-13.09	49.50	83.82	70.71	2062.00	163.78	0.00	226.38	0.00	70	50	100	0.00	138	0.99	24.26	0	1
66	350.00	122.15	0.85	-0.53	80	-5.82	11.51	-17.33	7.07	0.00	316.23	2062.16	80.62	0.00	5.00	0.00	70	80	60	177.00	144	0.99	24.31	41	1
67	275.00	240.58	-0.87	-0.49	80	-2.04	-1.61	-0.43	81.39	74.33	97.08	1921.42	354.68	0.00	83.82	0.00	50	50	80	6.00	144	1.00	24.52	1	1
68	0.00	113.65	0.92	-0.40	10	0.97	2.75	-1.79	20.00	15.00	389.65	2071.25	116.62	0.00	18.03	0.00	70	80	20	148.00	145	0.99	24.58	34	1
69	175.00	105.52	0.96	-0.27	10	-1.97	5.96	-7.93	7.07	11.18	362.22	2097.54	407.06	0.00	38.08	0.00	70	80	20	262.00	145	0.98	25.12	68	1
70	200.00	53.15	0.80	0.60	60	-5.36	13.01	-18.36	50.00	49.50	125.00	2034.35	138.65	0.00	15.00	0.00	50	50	20	0.00	142	0.97	25.30	0	1
71	0.00	193.75	-0.24	-0.97	10	2.39	-4.70	7.08	20.00	22.36	315.16	2123.80	303.03	0.00	50.00	0.00	100	50	20	225.00	136	0.98	25.35	56	1
72	0.00	283.39	-0.97	0.23	80	0.59	-8.79	9.38	36.06	20.62	164.01	2080.68	185.00	0.00	20.62	0.00	100	80	20	25.00	145	0.99	25.45	6	1
73	100.00	80.90	0.99	0.16	10	-2.41	11.51	-13.92	5.00	0.00	215.06	2087.90	66.71	0.00	5.00	0.00	70	50	20	280.00	145	0.99	25.68	62	1
74	17825.00	38.25	0.62	0.79	10	-4.37	-0.62	-3.75	22.36	0.00	0.00	2046.53	5.00	0.00	81.39	0.00	50	80	20	246.00	139	0.99	25.68	49	1
75	3175.00	156.73	0.40	-0.92	80	-4.77	0.08	-4.85	78.10	92.20	121.04	1956.33	170.00	0.00	67.08	0.00	70	50	100	0.00	136	0.99	25.90	0	1

Un paso preliminar es efectuar un análisis de correlaciones para remover variables redundantes de los datos. Se obtiene la matriz de correlaciones que aparece en la Tabla A.II 5

</

Como puede observarse, existen algunos factores que presentan correlaciones altas (en negrita). En este caso deben analizarse por pares para evaluar la conveniencia de descartar o conservar esos factores.

El test de igualdad de media entre grupos permite medir el potencial de cada variable independiente. Puede notarse que algunas variables no son relevantes en el modelo (valores F de Fisher bajos, Lambda de Wilks altos y significancia estadística alta).

**Tabla A.II 6. Test de igualdad de media entre grupos**

	Wilks' Lambda	F	Sig.
COBE	0.867	164.026	0.000
DACU	0.890	132.004	0.000
DALC	0.927	84.330	0.000
DDRE	0.933	76.776	0.000
DEM	0.939	69.815	0.000
DFAL	0.946	61.224	0.000
DVIA	0.948	58.490	0.000
H50M	0.961	43.407	0.000
INSO	0.962	41.959	0.000
RUGO	0.963	40.833	0.000
SLOP	0.987	14.338	0.000
V50M	0.987	14.063	0.000
SINA	0.993	7.284	0.007
GEOM	0.995	5.245	0.022
FMSU	0.999	1.269	0.260
CRPR	0.999	0.983	0.322
CRPL	1.000	0.303	0.582
DPNE	1.000	0.266	0.606
GEOL	1.000	0.261	0.610
ACCA	1.000	0.230	0.631
CURV	1.000	0.141	0.708
COSA	1.000	0.022	0.881
DVNE	1.000	0.019	0.890
DPBR	1.000	0.000	0.985

El análisis de varianza permite descartar las variables FMSU CRPR CRPL DPNE GEOL ACCA CURV COSA DVNE DPBR por su bajo poder discriminante.

El test Box's M (Tabla A.II 7) es utilizado para probar la homogeneidad de las matrices de covarianza, chequea el supuesto de igualdad de covarianzas entre grupos.

**Tabla A.II 7. Test Box M**

Box's M		3765,654
F	Approx.	21,640
	Sig.	,000

El Lambda de Wilks (Tabla A.II 8) es una medida de la manera como la función separa los casos en grupos. Pequeños valores de Lambda indican gran poder discriminante de la función. El Chi-cuadrado asociado chequea la hipótesis de que las medias de las funciones son iguales entre grupos. Valores de significancia estadística pequeños indican que la función tiene resultados mejores al azar en la separación entre grupos.

**Tabla A.II 8. Lambda de Wilks para el modelo general**

Wilks' Lambda	Chi-square	Sig.
,739	320,263	,000

El modelo lineal obtenido con la función discriminante se ensambla con los coeficientes canónicos mostrados en la Tabla A.II 9.

**Tabla A.II 9. Coeficientes para ensamblar la función discriminante**

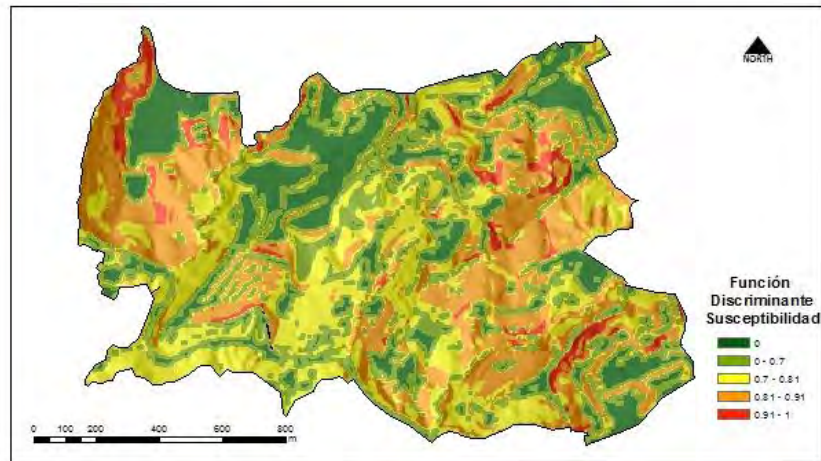
Canonical Discriminant Function Coefficients	
GEOM	0.00564
INSO	0.01356
RUGO	-6.18953
SLOP	0.03399
V50M	-0.00566
DEM	0.00125
DACU	-0.00031
DALC	-0.00024
SINA	0.09161
COBE	-0.00885
DDRE	-0.00079
DVIA	-0.00168
H50M	0.00297
DFAL	-0.00046
(Constant)	1.52521

La Tabla A.II 10 muestra los resultados de clasificación del modelo obtenido. Un 67.5% de celdas estables fueron correctamente clasificados; un 73.5% de deslizamientos fueron correctamente clasificados como inestables.

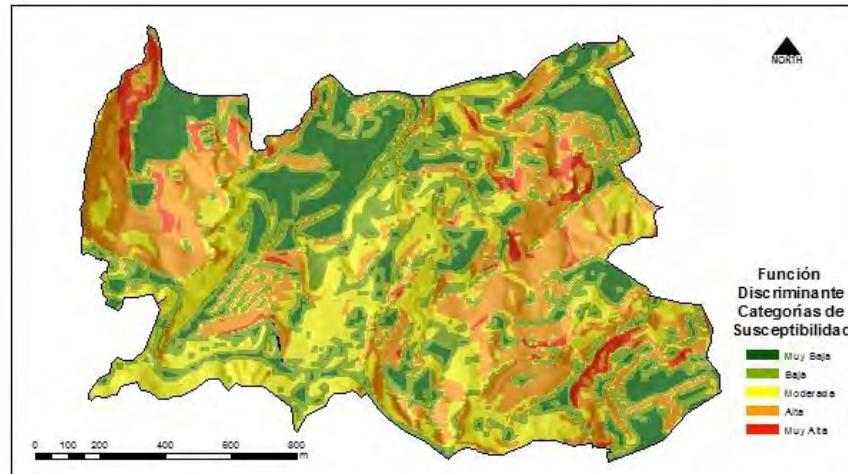
**Tabla A.II 10. Resultados de clasificación del modelo**

Resultados de Clasificación				
		0	1	Total
%	0	67.5	32.5	100
	1	26.5	73.5	100

Con los coeficientes de la Tabla A.II 7 es posible ensamblar una ecuación lineal para obtener la susceptibilidad del terreno, y mediante un SIG, expresarla en términos cartográficos (Figura A.II 27). En la Figura A.II 28 se presenta la susceptibilidad organizada en 5 categorías.



**Figura A.II 28.** Mapa resultado de la aplicación del análisis discriminante. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



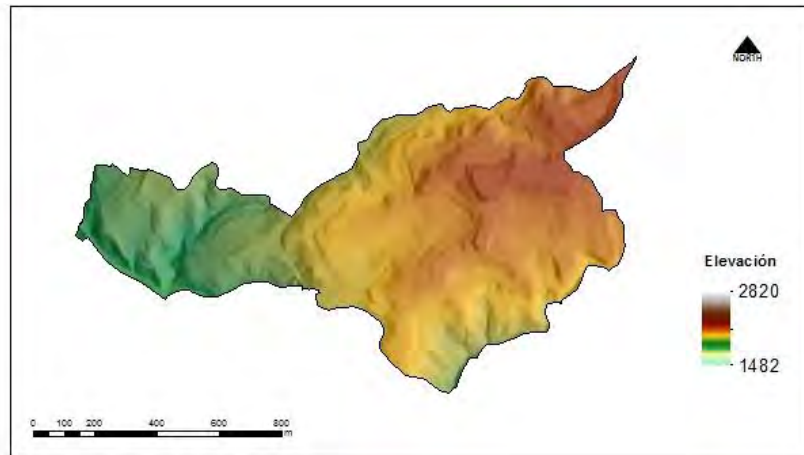
**Figura A.II 29.** Mapa final de susceptibilidad expresada en categorías. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

## Método 6. Redes Neuronales Artificiales

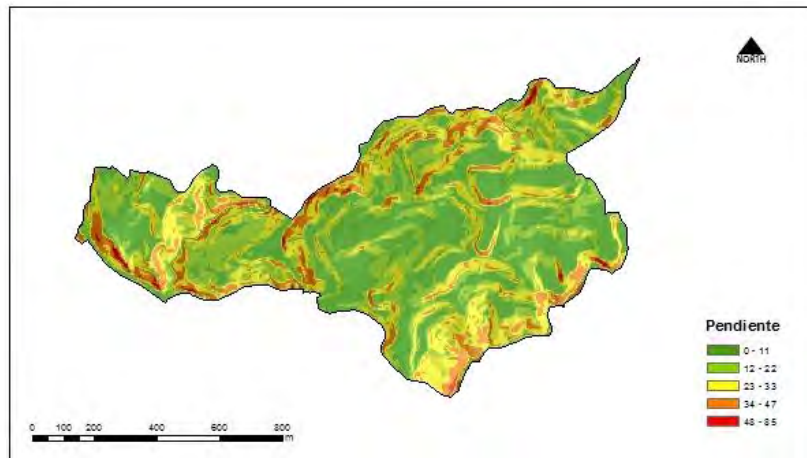
Para modelar la susceptibilidad a deslizamientos por este método se han utilizado los factores de propensividad enumerados en la Tabla A.II 11 y presentados desde la Figura A.II 30 hasta la Figura A.II 50

**Tabla A.II 11. Factores de propensividad para la aplicación del método de Redes Neuronales**

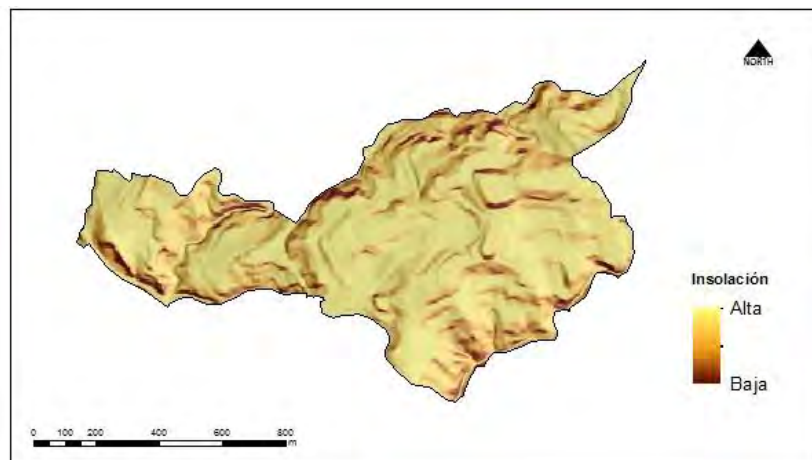
Modelo digital de elevaciones (DEM)
Pendientes (SLOP)
Insolación (INSO)
Orientación de las laderas (ASPE)
Rugosidad (RUGO)
Curvatura perpendicular a la pendiente (CRPL)
Curvatura paralela a la pendiente (CRPR)
Curvatura en dos dimensiones del terreno (CURV)
Áreas aferentes (ACCA)
Longitudes de flujo (LCCA)
Coberturas (COBE)
Formaciones superficiales (FMSU)
Geología (GEOL)
Geomorfología (GEOM)
Distancia a red de acueductos (DACU)
Distancia a red de alcantarillado (DALC)
Distancia a drenajes y cauces (DDRE)
Distancia a fallas geológicas y lineamientos (DFAL)
Distancia a la red vial (DVIA)
Densidad neta de viviendas (viv/ha) (DVNE)
Densidad poblacional (habitantes en 50 metros) (H50M)
Densidad de viviendas (viviendas en 50 metros) (V50M)



**Figura A.II 30. Modelo digital de elevaciones para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 31. Mapa de pendiente para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 32. Mapa de insolución calculado para el área de estudio.**

(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

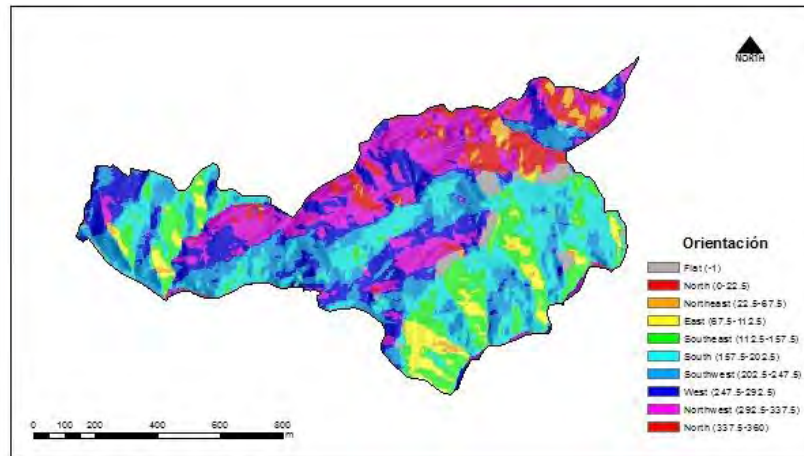


Figura A.II 33. Mapa de orientación de laderas para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

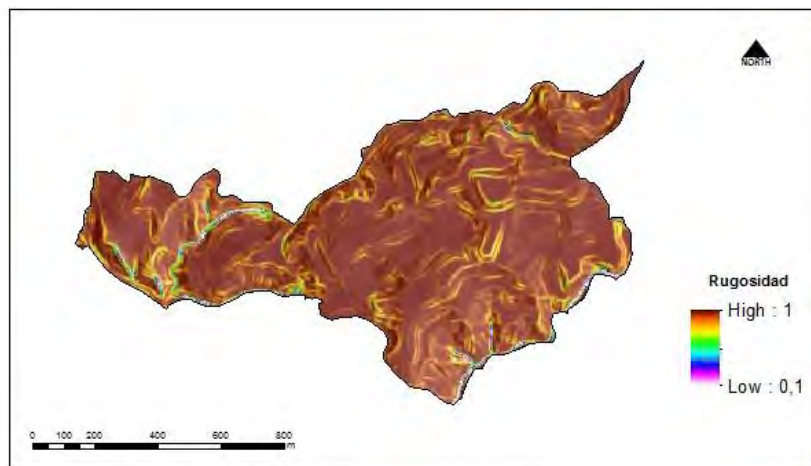
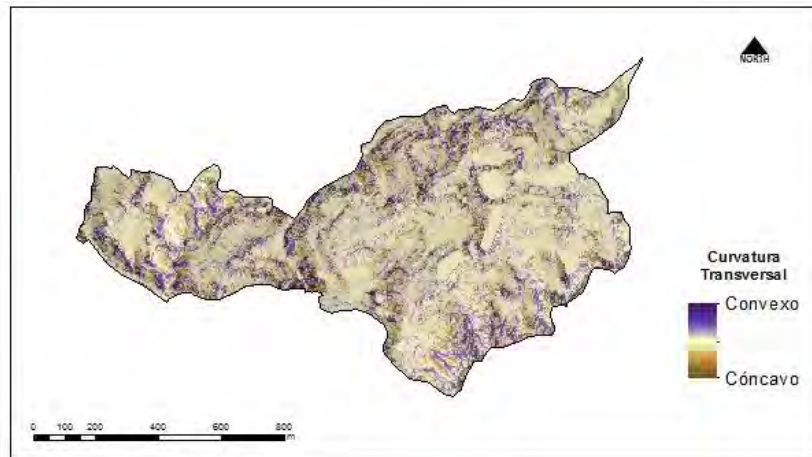
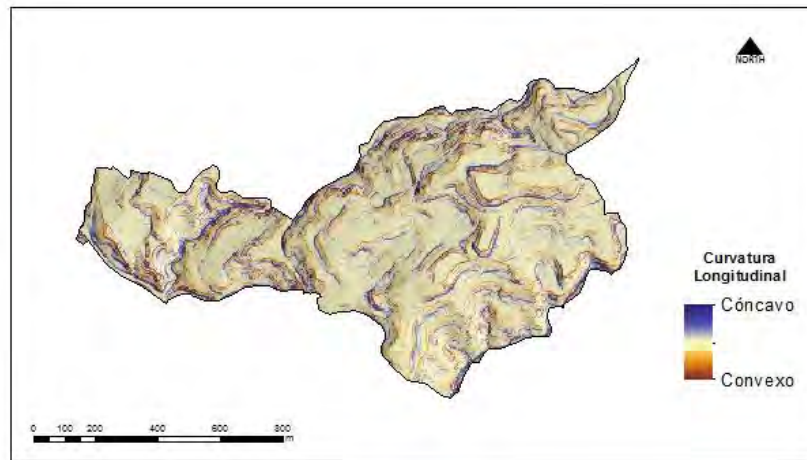


Figura A.II 34. Mapa de rugosidad para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

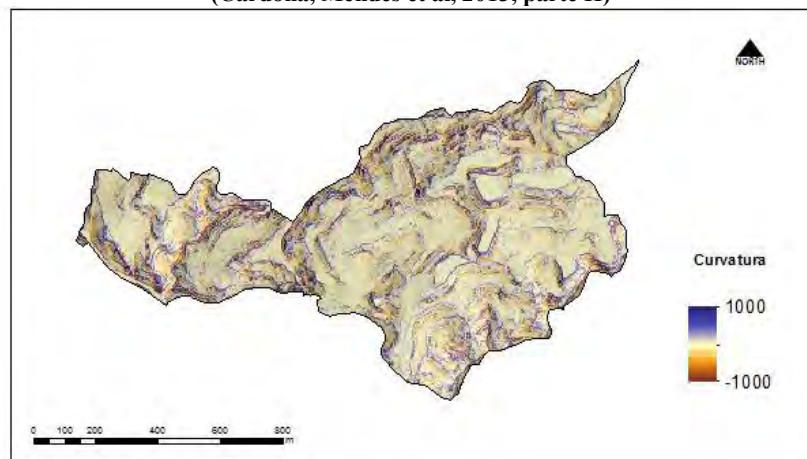




**Figura A.II 35. Mapa de Curvatura en el sentido perpendicular a la pendiente para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 36. Mapa de Curvatura en el sentido paralelo a la pendiente para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 37. Mapa de Curvatura (en dos dimensiones) para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**

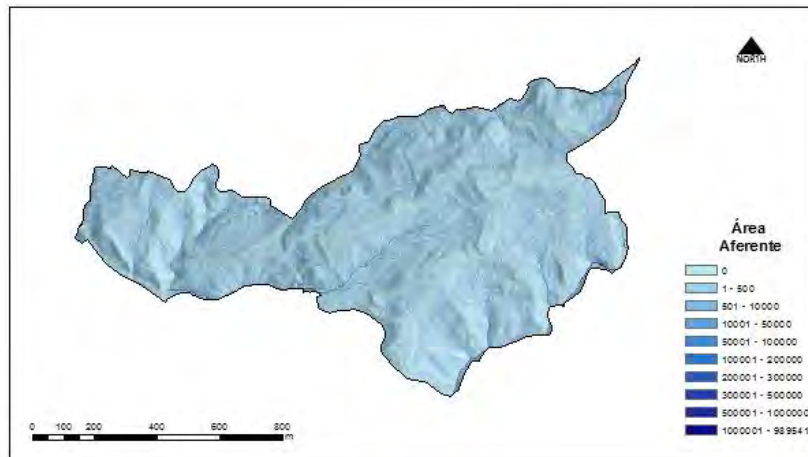


Figura A.II 38. Mapa de áreas aferentes por píxel (área acumulada).  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

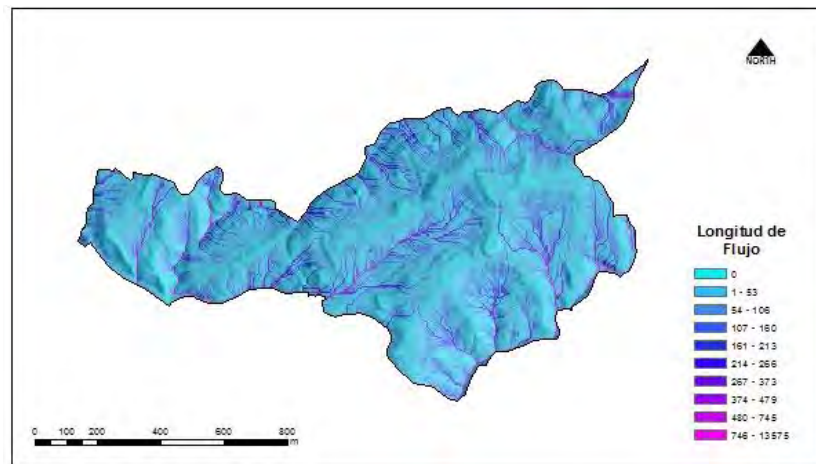


Figura A.II 39. Mapa de longitudes de flujo para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

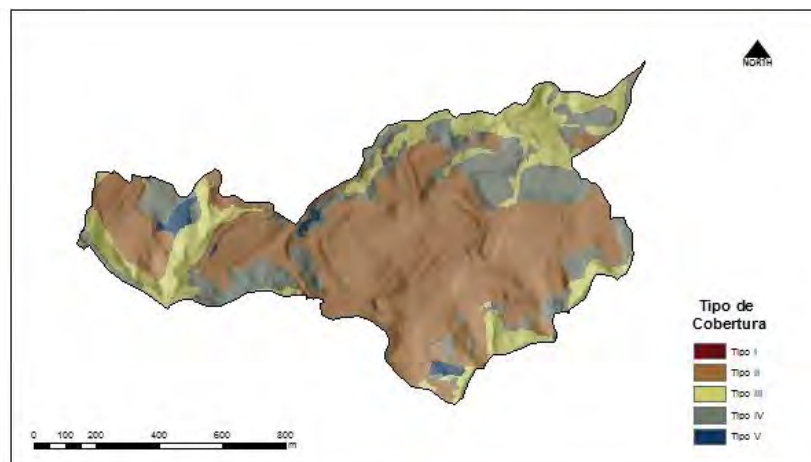
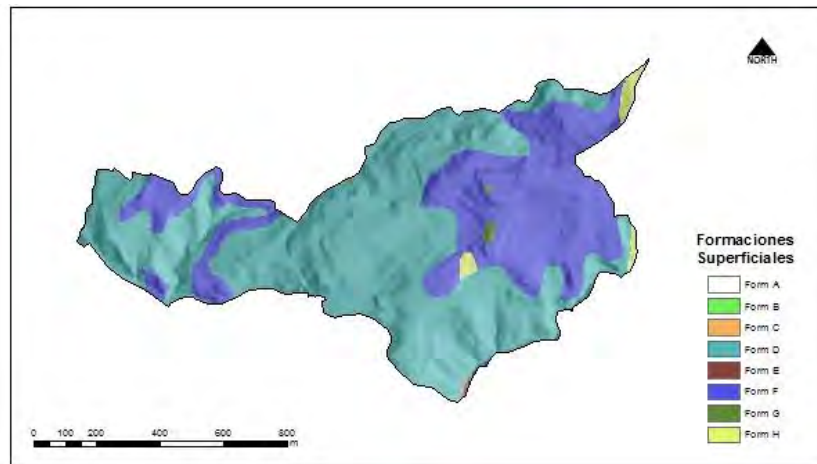
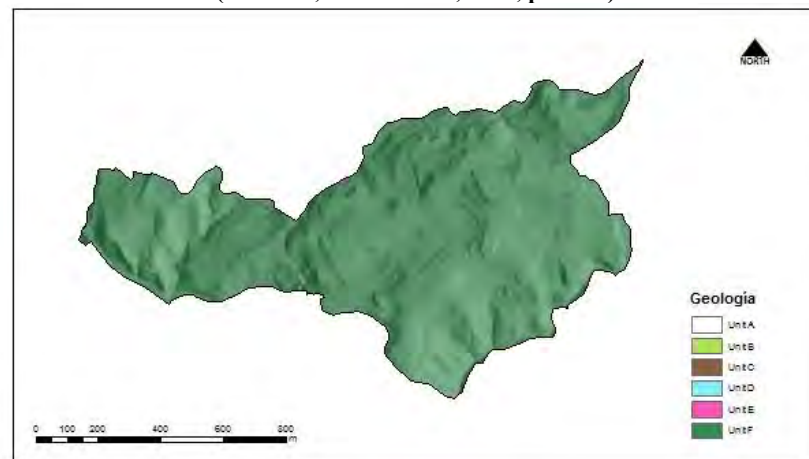


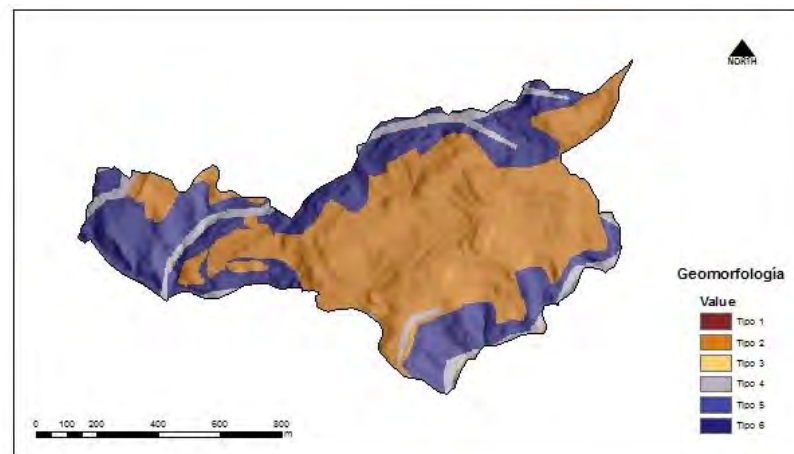
Figura A.II 40. Mapa de coberturas para el área de estudio.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 41. Mapa de formaciones superficiales para el área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 42. Mapa de geología del área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)



**Figura A.II 43. Mapa de geomorfología del área de estudio.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

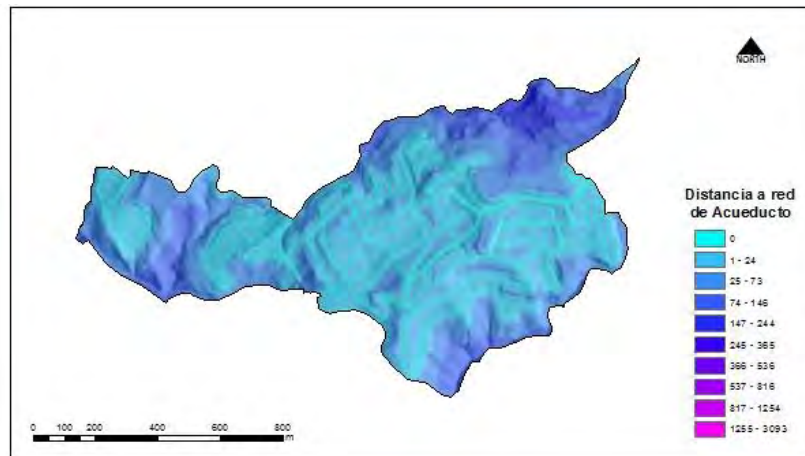


Figura A.II 44. Mapa de distancia a la red de acueducto para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

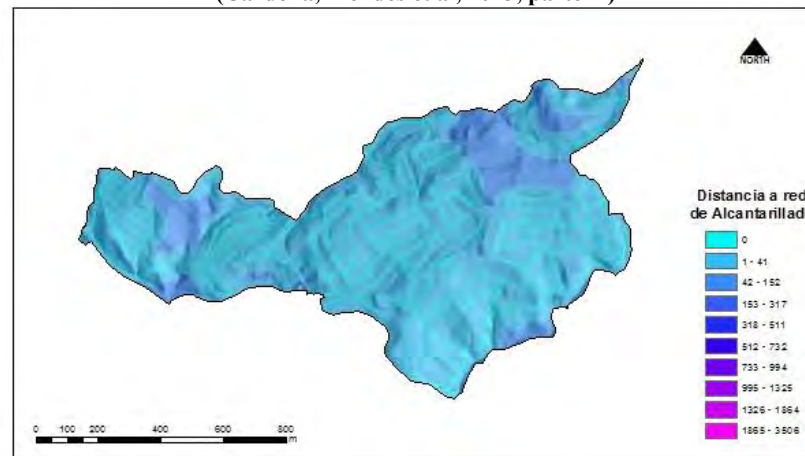


Figura A.II 45. Mapa de distancia a la red de alcantarillado para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

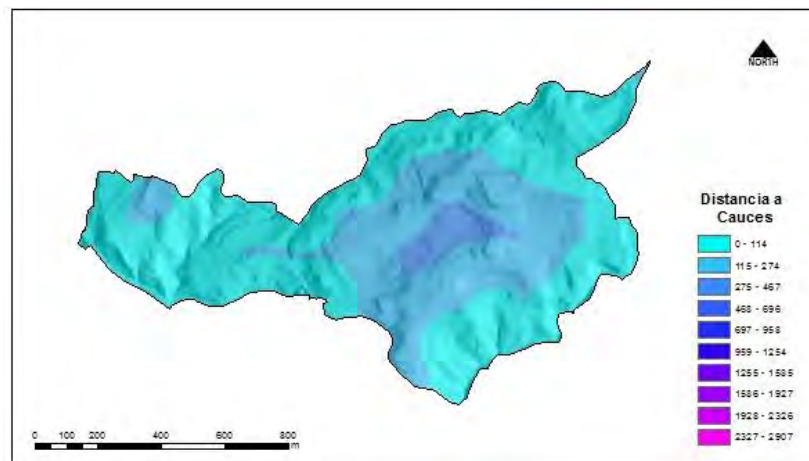


Figura A.II 46. Mapa de distancia a drenajes y cauces para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

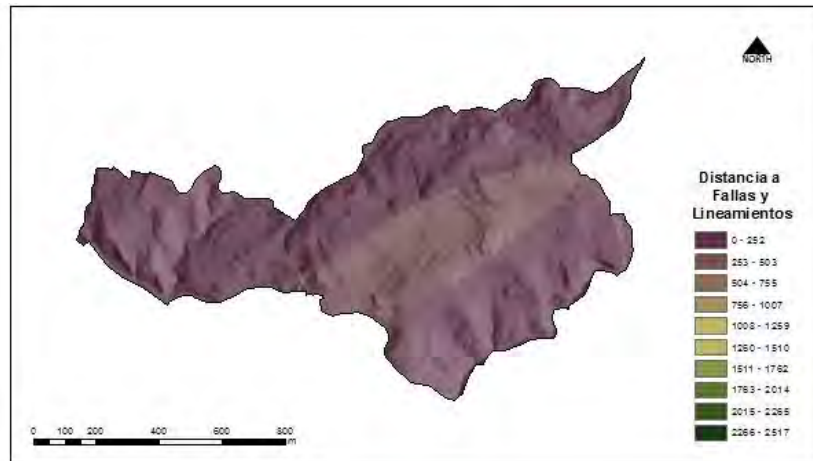


Figura A.II 47. Mapa de distancia a fallas geológicas y lineamientos para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

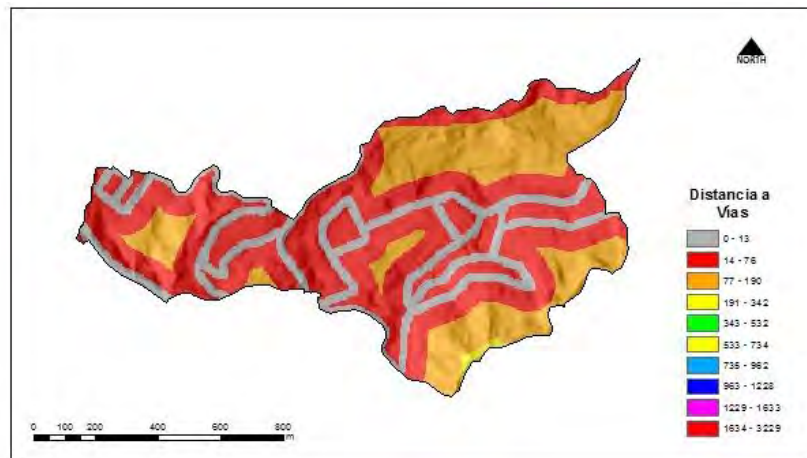


Figura A.II 48. Mapa de distancias a la red vial del área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

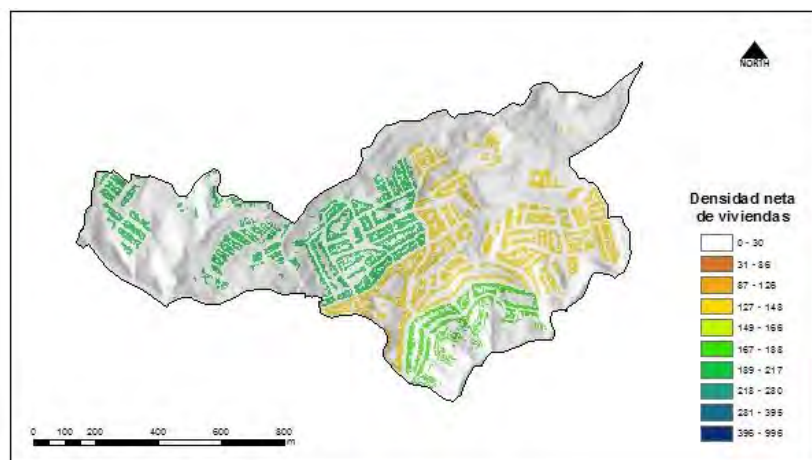


Figura A.II 49. Mapa de densidad neta de viviendas (viviendas por hectárea) para el área de estudio.

(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

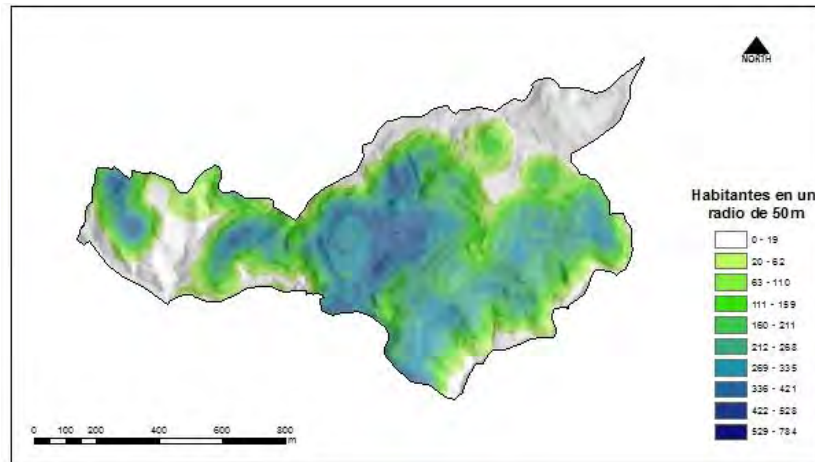


Figura A.II 50. Densidad poblacional, expresada en habitantes en un radio de 50 metros para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

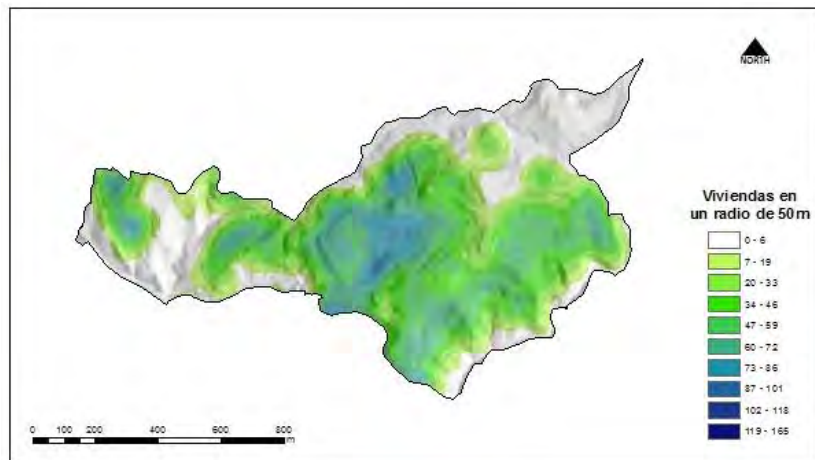
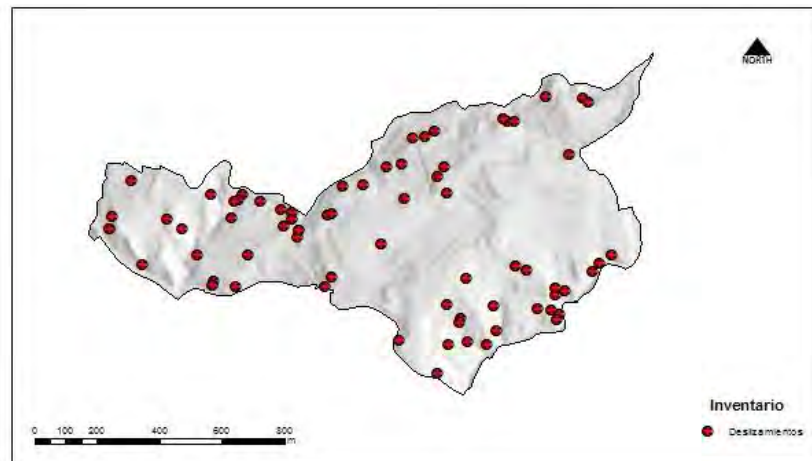


Figura A.II 51. Mapa de densidad de viviendas, expresada en viviendas en un radio de 50 metros para el área de estudio. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

Se dispone también de un inventario con 71 eventos previos registrados dentro del área de estudio (Figura A.II 51 )



**Figura A.II 52. Inventario de deslizamientos.**  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

Se ha ensamblado una muestra de análisis con los 71 puntos con deslizamientos previos (zona inestable), adicionando 71 puntos más, ubicados aleatoriamente en el área restante (zona estable), para conformar la muestra de análisis de 142 puntos, con la cual se efectuará todo el proceso de entrenamiento, validación y test de un modelo de redes neuronales.

Para iniciar el proceso de modelización se ha optado por normalizar todas las variables para que queden en el rango 0-1. En la Tabla A.II 12 aparece una vista parcial de la muestra de datos obtenida.

**Tabla A.II 12. Muestra de datos normalizada**

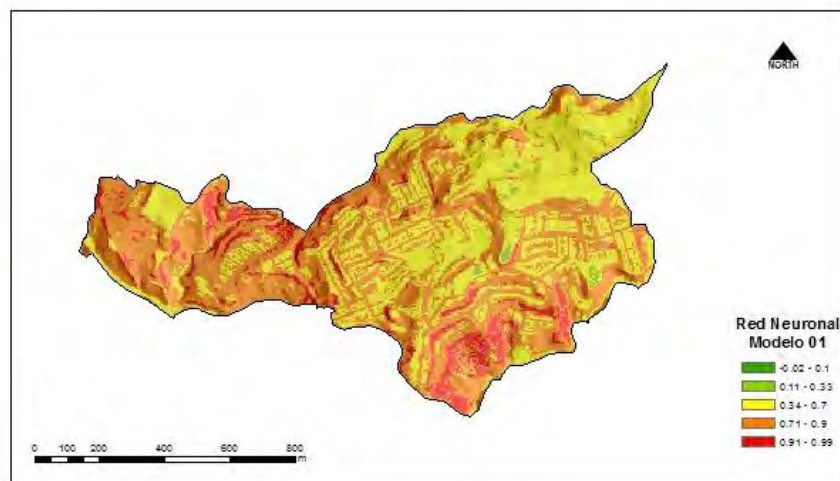
ID	ACCA	ASPE	SINA	COSA	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DVIA	DVNE	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	LCCA	RUGO	SLOP	V50M	DESL
41	0.00	0.32	0.95	0.29	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.10	0.52	0.04	0.01	0.13	1.00	0.38	0.20	0.09	0.98	0.00	1.00	0.20	0.10	0
42	0.00	0.21	0.98	0.63	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.18	0.01	0.30	0.08	0.22	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.20	0.00	0
43	0.00	0.75	0.00	0.50	0.60	0.88	0.34	0.78	0.14	0.43	0.37	0.61	0.06	0.22	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.99	0.03	0.94	0.20	0.00	0
44	0.00	0.73	0.01	0.42	0.60	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.10	0.53	0.20	0.01	0.00	0.70	1.00	1.00	0.03	0.99	0.00	1.00	0.20	0.04	0
45	0.00	0.82	0.04	0.70	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0.07	0.02	0.56	0.02	0.01	0.00	0.60	0.75	0.20	0.00	0.98	0.00	1.00	0.20	0.00	0
46	0.00	0.50	0.51	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.07	0.46	0.06	0.00	0.00	0.70	1.00	0.20	0.19	0.95	0.00	0.99	0.20	0.24	0
47	0.00	0.81	0.04	0.70	0.80	0.88	0.34	0.78	0.06	0.07	0.10	0.51	0.01	0.06	0.00	0.70	0.75	0.40	0.00	0.98	0.01	1.00	0.20	0.00	0
48	0.00	0.67	0.06	0.27	0.80	0.88	0.34	0.78	0.20	0.21	0.03	0.57	0.15	0.24	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.98	0.00	1.00	0.21	0.00	0
49	0.00	0.12	0.83	0.88	0.10	0.88	0.35	0.78	0.00	0.00	0.06	0.46	0.39	0.00	0.00	1.00	0.63	0.20	0.15	0.97	0.00	0.98	0.21	0.22	0
50	0.00	0.04	0.61	0.99	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.17	0.04	0.58	0.01	0.00	0.00	0.70	0.38	0.80	0.00	0.95	0.00	1.00	0.22	0.00	0
51	0.00	0.92	0.24	0.93	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.14	0.48	0.13	0.02	0.25	0.70	0.38	0.20	0.60	0.95	0.01	1.00	0.22	0.64	0
52	0.00	0.85	0.09	0.79	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.10	0.47	0.10	0.03	0.16	0.30	0.38	0.20	0.35	0.97	0.00	1.00	0.22	0.37	0
53	0.00	0.67	0.06	0.27	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.02	0.43	0.18	0.01	0.25	0.70	0.38	0.20	0.50	0.97	0.00	1.00	0.22	0.54	0
54	0.00	0.72	0.01	0.40	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.04	0.45	0.10	0.02	0.00	1.00	0.63	0.20	0.53	0.98	0.00	1.00	0.22	0.54	0
55	0.00	0.27	1.00	0.45	1.00	0.88	0.34	0.78	0.15	0.16	0.04	0.55	0.18	0.23	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.22	0.00	0
56	0.00	0.36	0.89	0.19	0.60	0.88	0.34	0.78	0.09	0.25	0.02	0.59	0.31	0.31	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.97	0.00	1.00	0.22	0.00	0
57	0.00	0.40	0.80	0.10	0.80	0.88	0.34	0.78	0.05	0.04	0.00	0.52	0.34	0.08	0.00	0.30	0.38	1.00	0.00	0.95	0.01	0.95	0.23	0.00	0
58	0.00	0.84	0.07	0.75	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.01	0.01	0.45	0.11	0.08	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.97	0.00	0.99	0.23	0.00	0
59	0.00	0.05	0.66	0.97	0.80	0.88	0.34	0.78	0.05	0.03	0.00	0.47	0.06	0.01	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.94	0.01	0.97	0.24	0.00	0
60	0.00	0.96	0.36	0.98	0.60	0.88	0.34	0.78	0.02	0.01	0.07	0.53	0.23	0.00	0.00	0.30	0.38	0.20	0.00	0.94	0.00	1.00	0.24	0.00	0
61	0.00	0.40	0.80	0.10	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.05	0.34	0.08	0.03	0.12	1.00	1.00	0.20	0.25	0.95	0.00	1.00	0.24	0.28	0
62	0.00	0.83	0.06	0.75	0.80	0.88	0.34	0.78	0.27	0.34	0.21	0.63	0.03	0.00	0.00	0.60	0.75	0.20	0.00	0.97	0.00	0.99	0.24	0.00	0
63	0.00	0.40	0.80	0.10	0.80	0.88	0.34	0.78	0.06	0.06	0.03	0.31	0.06	0.07	0.00	0.60	0.75	0.40	0.00	0.95	0.01	1.00	0.25	0.00	0
64	0.00	0.02	0.56	1.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.73	0.74	0.62	0.79	0.07	0.26	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.93	0.00	1.00	0.25	0.00	0
65	0.00	0.52	0.43	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.36	0.30	0.20	0.64	0.08	0.34	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.93	0.01	1.00	0.25	0.00	0
66	0.00	0.83	0.06	0.74	0.80	0.88	0.35	0.78	0.03	0.27	0.01	0.28	0.09	0.29	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.97	0.00	0.99	0.25	0.00	0
67	0.00	0.64	0.12	0.18	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.07	0.45	0.14	0.01	0.25	0.70	0.38	0.20	0.64	0.96	0.00	1.00	0.26	0.68	0
68	0.00	0.60	0.20	0.10	1.00	0.88	0.34	0.78	0.01	0.05	0.10	0.55	0.04	0.03	0.00	0.70	0.38	1.00	0.00	0.94	0.00	0.96	0.26	0.00	0
69	0.00	0.52	0.43	0.01	0.60	0.87	0.34	0.78	0.10	0.08	0.00	0.27	0.04	0.25	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.92	0.01	0.95	0.26	0.00	0
70	0.00	0.97	0.42	0.99	0.60	0.87	0.34	0.78	0.06	0.06	0.00	0.36	0.09	0.11	0.00	0.50	0.13	0.60	0.00	0.92	0.03	0.81	0.27	0.00	0
71	0.00	0.12	0.85	0.86	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.02	0.36	0.11	0.00	0.20	0.50	0.38	0.20	0.26	0.96	0.00	1.00	0.24	0.27	1
72	0.00	0.51	0.49	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.04	0.44	0.03	0.00	0.00	0.50	0.63	0.20	0.40	0.93	0.00	1.00	0.24	0.43	1
73	0.00	0.06	0.68	0.96	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.11	0.46	0.14	0.01	0.00	0.70	1.00	0.20	0.32	0.94	0.00	1.00	0.24	0.39	1
74	0.00	0.99	0.46	1.00	0.10	0.88	0.35	0.78	0.01	0.00	0.03	0.40	0.11	0.02	0.00	0.70	0.63	0.20	0.20	0.93	0.00	0.90	0.24	0.19	1
75	0.00	0.53	0.40	0.01	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.04	0.44	0.06	0.00	0.00	0.70	0.63	0.20	0.14	0.93	0.00	1.00	0.25	0.14	1
76	0.00	0.90	0.19	0.90	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0.00	0.03	0.47	0.08	0.00	0.00	1.00	1.00	0.20	0.03	0.95	0.00	0.99	0.25	0.04	1
77	0.00	0.04	0.62	0.99	0.60	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.02	0.40	0.06	0.03	0.00	0.50	0.38	1.00	0.10	0.93	0.01	0.94	0.25	0.10	1
78	0.00	0.87	0.15	0.85	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.07	0.52	0.08	0.01	0.00	1.00	0.38	0.20	0.32	0.95	0.00	1.00	0.25	0.35	1
79	0.00	0.93	0.28	0.95	0.80	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.02	0.35	0.12	0.01	0.00	0.70	0.63	1.00	0.11	0.94	0.00	1.00	0.25	0.13	1
80	0.00	0.37	0.88	0.17	0.60	0.88	0.34	0.78	0.09	0.03	0.00	0.27	0.04	0.08	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.95	0.00	1.00	0.26	0.00	1
81	0.00	0.35	0.90	0.20	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.01	0.41	0.11	0.03	0.34	0.70	1.00	1.00	0.20	0.96	0.00	1.00	0.27	0.18	1
82	0.00	0.32	0.96	0.31	0.10	0.89	0.34	0.78	0.00	0.00	0.01	0.44	0.03	0.00	0.00	0.70	1.00	0.20	0.34	0.97	0.00	1.00	0.27	0.41	1
83	0.00	0.92	0.25	0.93	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.06	0.49	0.03	0.01	0.16	0.80	0.38	0.60	0.35	0.93	0.00	1.00	0.28	0.38	1
84	0.00	0.74	0.00	0.47	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.00	0.03	0.44	0.03	0.06	0.00	0.70	0.63	0.20	0.45	0.97	0.00	0.99	0.28	0.47	1
85	0.00	0.94	0.31	0.96	0.10	0.88	0.35	0.78	0.02	0.02	0.02	0.43	0.07	0.07	0.00	0.70	0.63	1.00	0.00	0.92	0.00	0.99	0.28	0.00	1
86	0.00	0.34	0.92	0.23	0.80	0.88	0.35	0.78	0.00	0.00	0.11	0.43	0.03	0.00	0.00	0.70	1.00	0.60	0.23	0.96	0.00	0.99	0.29	0.25	1
87	0.00	0.67	0.06	0.25	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.02	0.03	0.33	0.14	0.03	0.00	0.50	0.63	0.80	0.01	0.96	0.01	1.00	0.29	0.01	1
88	0.00	0.32	0.96	0.30	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.00	0.13	0.44	0.05	0.01	0.00	0.70	1.00	0.20	0.19	0.97	0.00	0.98	0.29	0.21	1
89	0.00	0.30	0.98	0.37	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.12	0.46	0.16	0.01	0.00	0.70	1.00	0.20	0.33	0.97	0.00	0.98	0.29	0.41	1
90	0.00	0.15	0.90	0.80	0.60	0.88	0.35	0.78	0.02	0.01	0.04	0.41	0.06	0.00	0.00	0.50	0.63	0.20	0.00	0.95	0.00	0.96	0.30	0.00	1
91	0.00	0.54	0.38	0.01	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.11	0.48	0.12	0.02	0.00	1.00	0.63	0.20	0.29	0.91	0.00	0.97	0.30	0.34	1
92	0.00	0.79	0.01	0.62	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0															



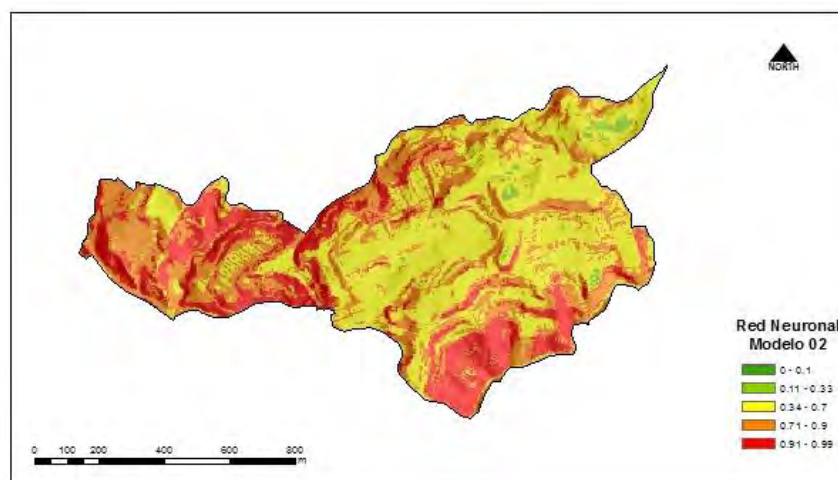
**Tabla A.II 13. Distribución de conjuntos de datos para entrenamiento (E), validación (V) y test (T)**

	EVT01	EVT02	EVT03	EVT04	EVT05	EVT06	EVT07	EVT08	EVT09	EVT10
10%	E	T	T	V	V	E	E	E	E	E
10%	E	E	T	T	V	V	E	E	E	E
10%	E	E	E	T	T	V	V	E	E	E
10%	E	E	E	E	T	T	V	V	E	E
10%	E	E	E	E	E	T	T	V	V	E
10%	E	E	E	E	E	E	T	T	V	V
10%	V	E	E	E	E	E	E	T	T	V
10%	V	V	E	E	E	E	E	E	T	T
10%	T	V	V	E	E	E	E	E	E	T
10%	T	T	V	V	E	E	E	E	E	E

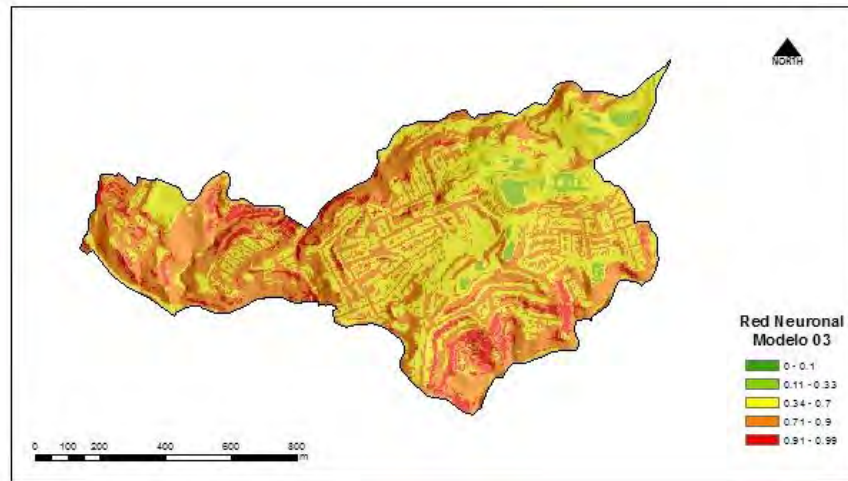
Los 10 modelos de susceptibilidad así obtenidos se presentan desde la Figura A.II 52 hasta la Figura A.II 61



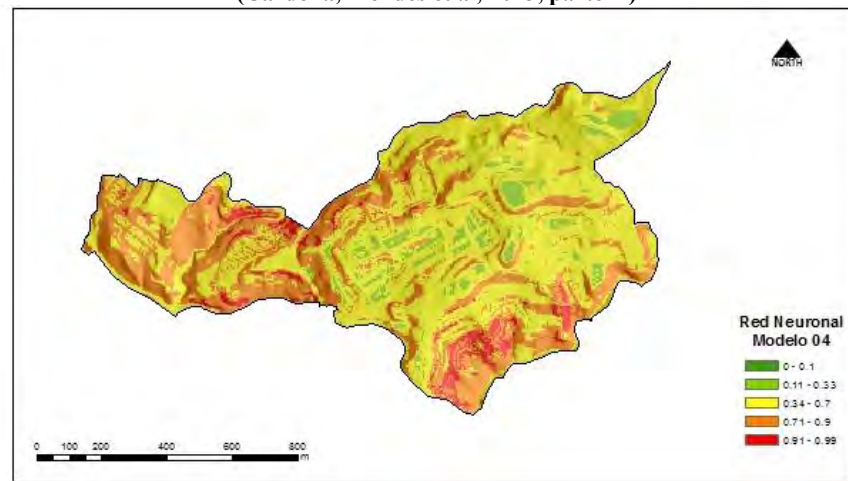
**Figura A.II 53. Modelo 01 aplicando la metodología de RNA. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



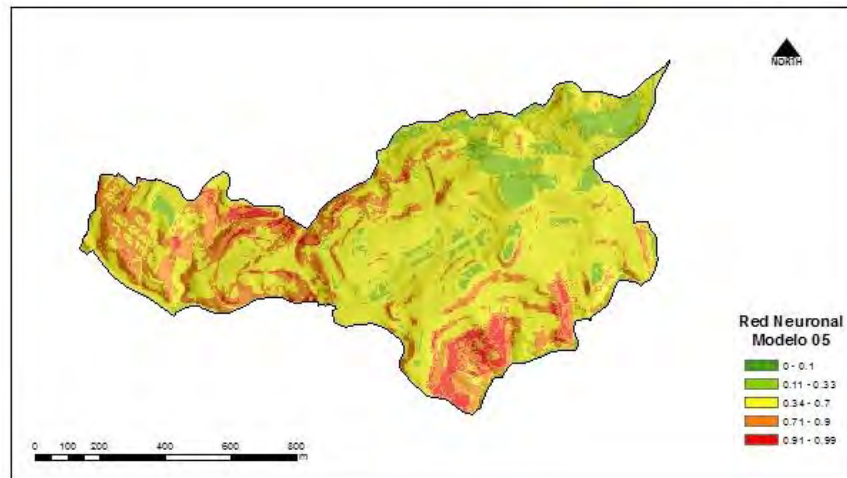
**Figura A.II 54. Modelo 02 aplicando la metodología de RNA. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



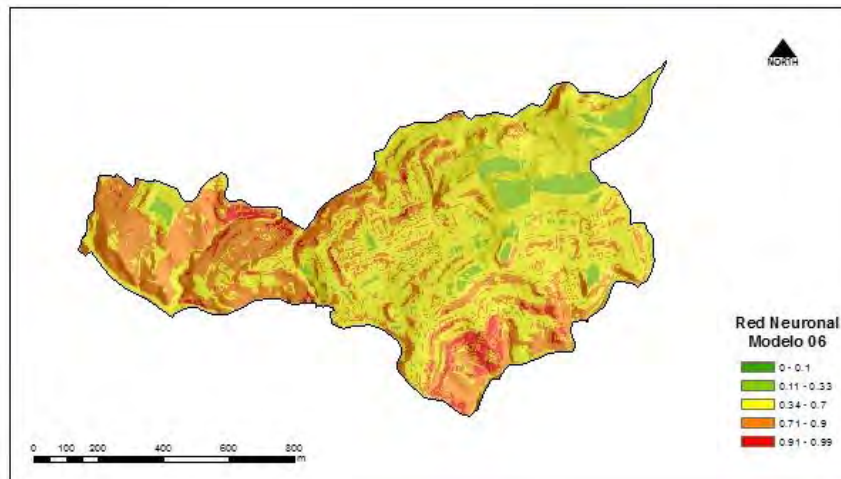
**Figura A.II 55. Modelo 03 aplicando la metodología de RNA.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 56. Modelo 04 aplicando la metodología de RNA.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 57. Modelo 05 aplicando la metodología de RNA.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



**Figura A.II 58. Modelo 06 aplicando la metodología de RNA.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**

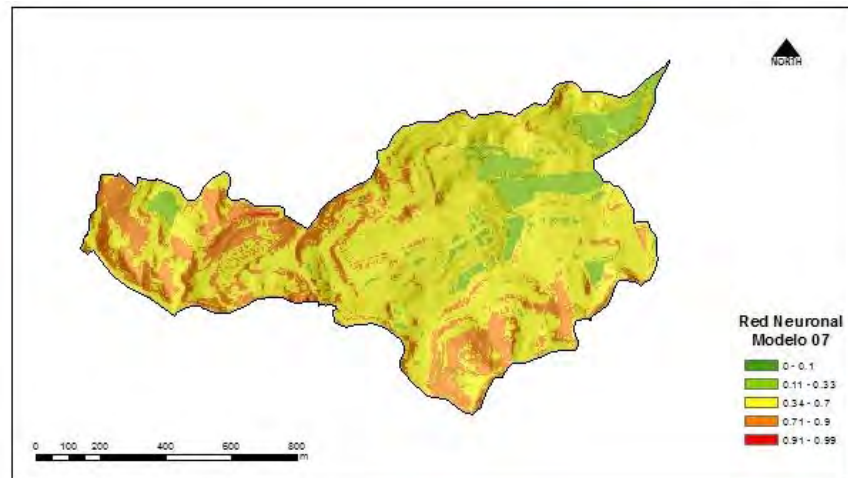


Figura A.II 59. Modelo 07 aplicando la metodología de RNA. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

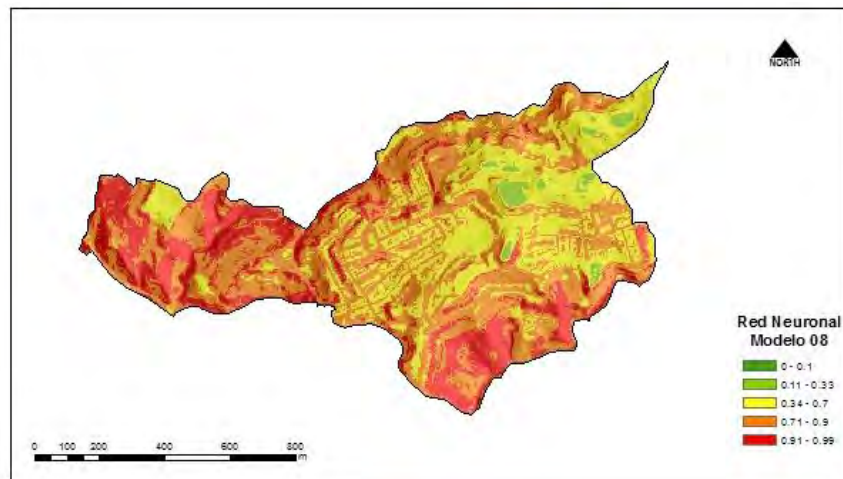


Figura A.II 60. Modelo 08 aplicando la metodología de RNA.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

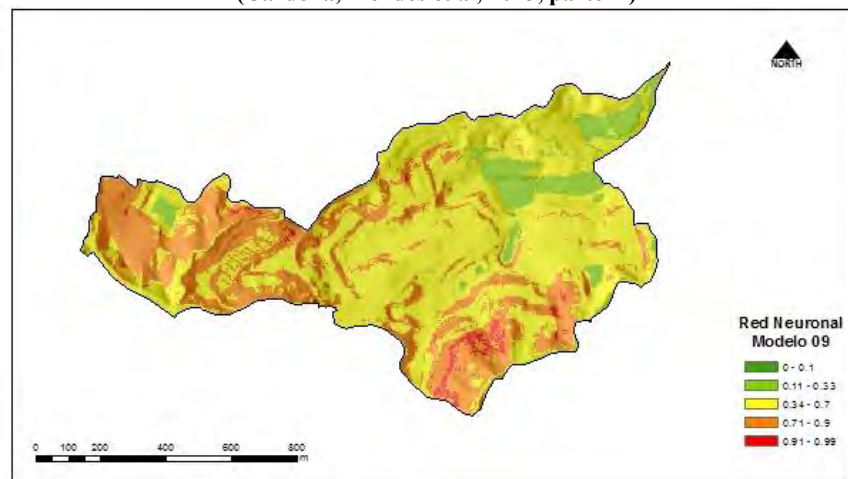
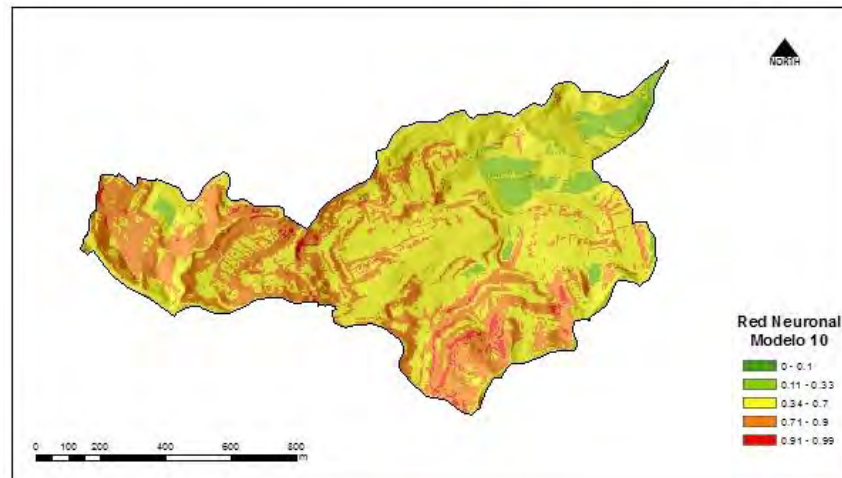
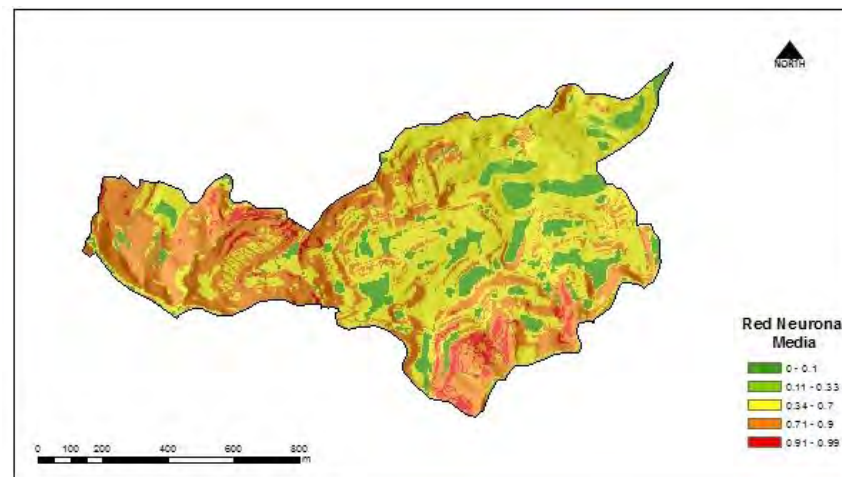


Figura A.II 61. Modelo 09 aplicando la metodología de RNA.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)

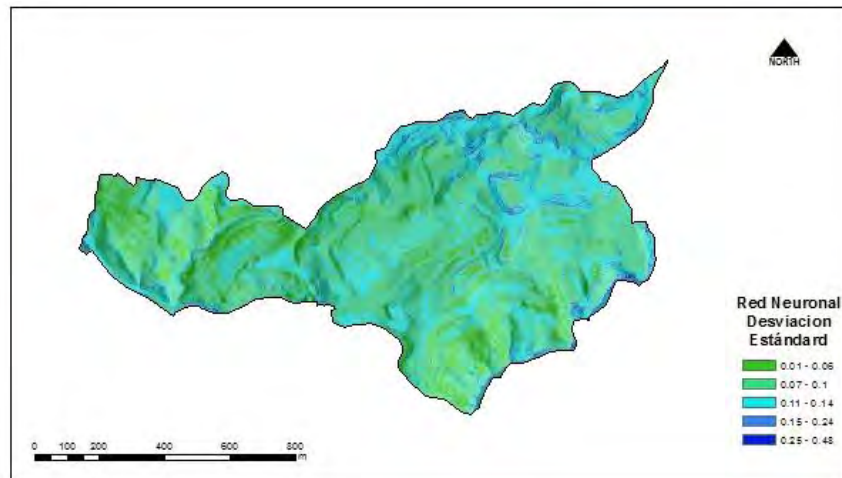


**Figura A.II 62. Modelo 10 aplicando la metodología de RNA. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**

Como resultado final, se obtiene un valor medio de susceptibilidad (Figura A.II 63) y su dispersión (Figura A.II 64)



**Figura A.II 63. Modelo Final (Medio) aplicando la metodología de RNA. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**



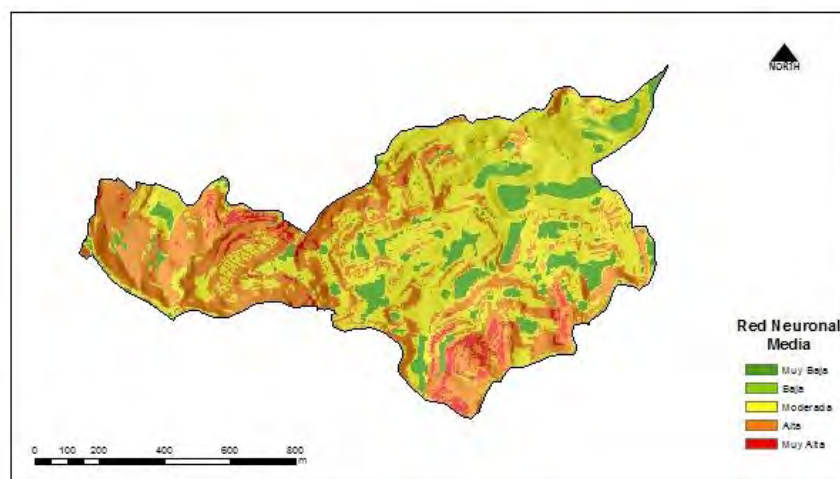
**Figura A.II 64. Dispersión del Modelo final aplicando la metodología de RNA. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**

Los resultados de clasificación obtenidos se presentan en la Tabla A.II 14

**Tabla A.II 14. Resultados de clasificación de los diferentes modelos probados**

	Modelo 01	Modelo 02	Modelo 03	Modelo 04	Modelo 05	Modelo 06	Modelo 07	Modelo 08	Modelo 09	Modelo 10
Celdas estables correctamente clasificadas	70.2%	76.6%	68.2%	61.5%	69.4%	69.4%	68.5%	65.4%	70.5%	66.3%
Celdas inestables correctamente clasificadas	76.9%	77.6%	74.5%	77.1%	74.1%	72.2%	78.7%	83.2%	74.3%	77.9%

El resultado así obtenido puede categorizarse para su mejor interpretación. En la Figura A.II 64 se han utilizado cinco categorías de susceptibilidad.



**Figura A.II 65. Modelo Final reagrupado en categorías, aplicando la metodología de RNA. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte II)**

## **ANEXO III. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA AMENAZA POR INUNDACIONES (Parte baja de la cuenca del Río Chinchiná)**

### **Información pluviométrica**

La información de lluvia diaria mensual multianual recopilada para este ejemplo se obtiene a partir de estaciones pluviométricas, localizadas dentro y fuera de la cuenca distribuidas en zonas hidrológicamente homogéneas, de instituciones como la CHEC S.A. (Central Hidroeléctrica de Caldas S.A ESP), IDEAM, CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca) y la Federación Nacional de Cafeteros en nombre de CENICAFÉ.

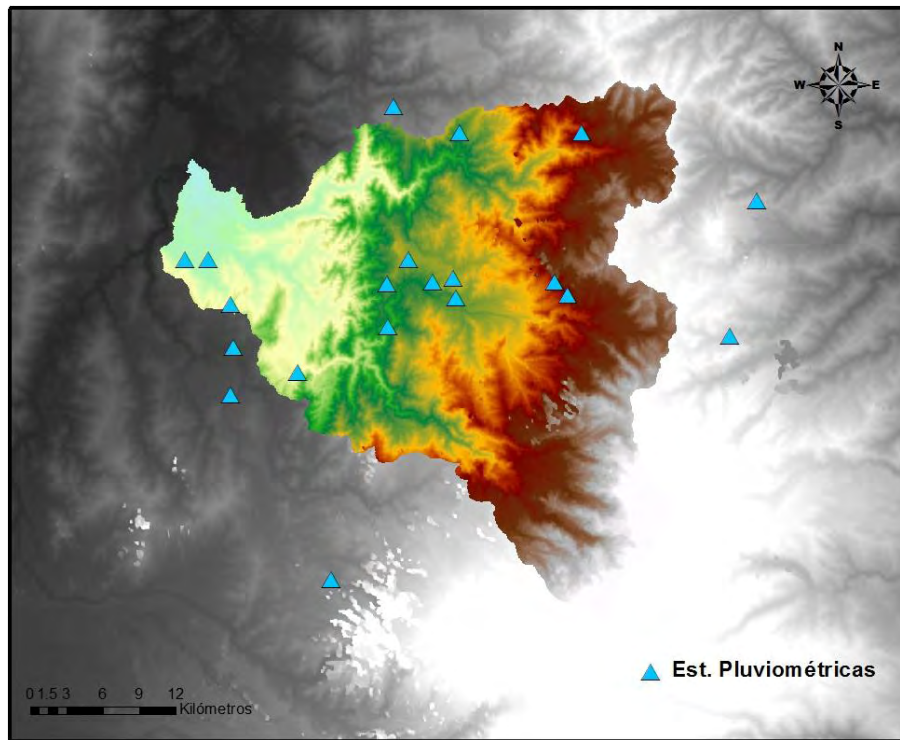
Con base en la localización georreferenciada de la cuenca del río Chinchiná y de la totalidad de las estaciones disponibles para el estudio, se identificaron las estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas que por su cercanía y ubicación hidrológica son representativas del régimen de precipitación de la cuenca, con el propósito de describir de manera correcta los eventos sintéticos de precipitación para un período de retorno determinado.

En la **Figura A.III 1** se muestra la topografía de la cuenca del río Chinchiná, que comprende un rango de altitud variable entre 800 y 4100 m.s.n.m., aproximadamente. Adicionalmente se presenta la localización de las estaciones pluviométricas seleccionadas para el análisis.

De un total de 41 estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas disponibles para el área aferente de la cuenca del río Chinchiná fueron seleccionadas un total de 20. La selección se realiza teniendo en cuenta 3 aspectos:

- a) Localización geográfica dentro de las zonas hidrológicamente homogéneas
- b) Completitud de la información pluviométrica
- c) Medición mínima de parámetros para un período de 30 años

A partir del análisis de estos parámetros para el conjunto de estaciones disponibles se tienen las estaciones presentadas en la Tabla AIII 1.



**Figura A.III 1 Localización geográfica de estaciones pluviométricas disponibles.  
(Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)**

**Tabla AIII 1 Estaciones pluviométricas seleccionadas**

CÓDIGO	LONG.	LAT.	NOMBRE ESTACIÓN	ELEVACIÓN [msnm]	INSTITUCIÓN	PERIODO MEDICIÓN
6-9001	-75.58	4.83	MONTEVIDEO	1370	CHEC	1975-2010
6-9002	-75.65	5.00	INSULA	1225	CHEC	1975-2010
6-9004	-75.48	5.04	PLANTA SANCANCIO	1850	CHEC	1975-2010
6-9029	-75.52	5.07	SUBESTACION MARMATO	2000	CHEC	1976-2010
6-9039	-75.48	5.05	SUBESTACION ALTASUIZA	2055	CHEC	1976-2010
6-9041	-75.53	5.05	SUBESTACION URIBE	1842	CHEC	1976-2010
6-9045	-75.53	5.18	NEIRA	1902	IDEAM	1976-2010
Agro	-75.50	5.05	AGRONOMIA	2088	IDEAM	1975-2010
2615006	-75.40	5.04	ARAUCA	890	IDEAM	1975-2007
2615502	-75.60	4.98	CENICAFE	1310	CENICAFE	1975-2010
2615009	-75.65	5.03	EL RECREO	1430	IDEAM	1975-2010
2615514	-75.68	5.07	GRANJA LUKER	1031	IDEAM	1975-2010
2615035	-75.53	5.02	JAVA	1778	IDEAM	1981-2010
2613505	-75.65	4.97	NARANJAL	1381	CHEC	1975-2010
2615509	-75.67	5.07	SANTAGUEDA	1026	CHEC	1975-2010
26155-110	-75.28	5.01	APTO LA NUBIA	2058	CHEC	1975-2010
26155-120	-75.41	5.05	APTO	933	CHEC	1975-1989



CÓDIGO	LONG.	LAT.	NOMBRE ESTACIÓN	ELEVACIÓN [msnm]	INSTITUCIÓN	PERIODO MEDICIÓN
			SANTAGUEDA			
26145-020	-75.48	5.16	BELLAVISTA	1932	IDEAM	1975-2010
26160-120	-75.26	5.11	LA CRISTALINA	2290	IDEAM	1975-2010
26170-260	-75.39	5.16	GUERRERITO	810	IDEAM	1979-2010

### **Análisis de la precipitación**

A continuación se describen los análisis realizados con la información de precipitación. Estos parten con la complementación de información, consistente en estimar información incompleta o inexistente en los registros históricos, con el fin de buscar disponer de series de tiempo diarias y mensuales con el mayor grado de completitud, requerida para algunos análisis. Adicionalmente, con base en el análisis espacial de precipitaciones máximas presentado en el desarrollo de la sección 5.3, se obtienen las curvas PADF para la cuenca del río Chinchiná.

### **Complementación de la información faltante o incompleta**

El proceso de completitud de información consiste en la estimación de datos faltantes o incompletos en los registros históricos diarios y/o mensuales de las diferentes estaciones disponibles. Para ello fueron aplicadas diferentes aproximaciones, las cuales se describen a continuación.

En general éstas se basaron en el uso de información concurrente completa en las estaciones vecinas. En estaciones con registros diarios, los datos fueron inspeccionados para identificar días faltantes o incompletos. En general hubo gran cantidad de casos en los cuales los días faltantes o incompletos eran pocos (1 a 3) y disgregados en el mes, por lo cual la lluvia en cada uno de estos días se estimó con información concurrente en estaciones vecinas pertenecientes a la misma cuenca o cuencas vecinas de similar régimen pluviométrico, de la siguiente manera

$$Pd_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Pd_j \quad (\text{Ec. 42})$$

En donde  $Pd_i$  es la lluvia diaria estimada en la estación incompleta  $i$  y  $N$  es el número de estaciones vecinas  $j$  con información de lluvia diaria completa  $Pd_j$ . En aquellos casos en donde el número de días consecutivos sin dato era mayor que 4 pero no más de 10, no se intentó estimar cada uno de los datos diarios sino el valor acumulado de lluvia en ese período, como

$$Sd_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Sd_j \quad (\text{Ec. 43})$$

En donde  $Sd_i$  es la lluvia acumulada en los días consecutivos faltantes estimada en la estación  $i$  y  $N$  es el número de estaciones vecinas  $j$  con información de lluvia acumulada completa  $Sd_j$ . En la medida en que en los casos anteriormente descritos se obtuvieran meses completos con información diaria, simultáneamente se iba completando la lluvia mensual de la estación.

Cuando la información diaria faltante o incompleta era extensa (más de 10 al mes, pero menos de 20) se estimó el agregado faltante con base en la siguiente expresión

$$Sd_i = \frac{M_i}{N} \sum_{j=1}^N \frac{Sd_j}{M_j - Sd_j} \quad (\text{Ec. 44})$$

En donde  $M_i$  es el valor mensual incompleto de lluvia en la estación  $i$ ,  $Sd_j$  es la lluvia acumulada en la estación  $j$  en los días sin información en la estación  $i$  y  $M_j$  es el valor mensual completo en la estación  $j$ .

A nivel mensual, meses faltantes o incompletos se estimaron con base en información mensual completa de estaciones vecinas, de la siguiente manera

$$M_i = \frac{\overline{M}_i}{N} \sum_{j=1}^N \frac{M_j}{\overline{M}_j} \quad (\text{Ec. 45})$$

En donde  $M_i$  es el mes incompleto o faltante en la estación  $i$ ,  $N$  es el número de estaciones vecinas  $j$  completas en el mes concurrente,  $M_j$  es la lluvia mensual completa en cada estación  $j$  y  $\overline{M}_j$  es el valor medio multianual de lluvia en el mes. Si  $M_i$  es mayor o igual al dato incompleto en la estación  $i$ , se adoptó  $M_i$  como datos mensual completo.

### Curvas PADF

A partir de la información completa de estaciones pluviométricas para un período diario mensual multianual se obtienen las curvas PADF (ver **Figura A.III 2**) para una duración de 1 día, usando el procedimiento presentado en la sección 5.3

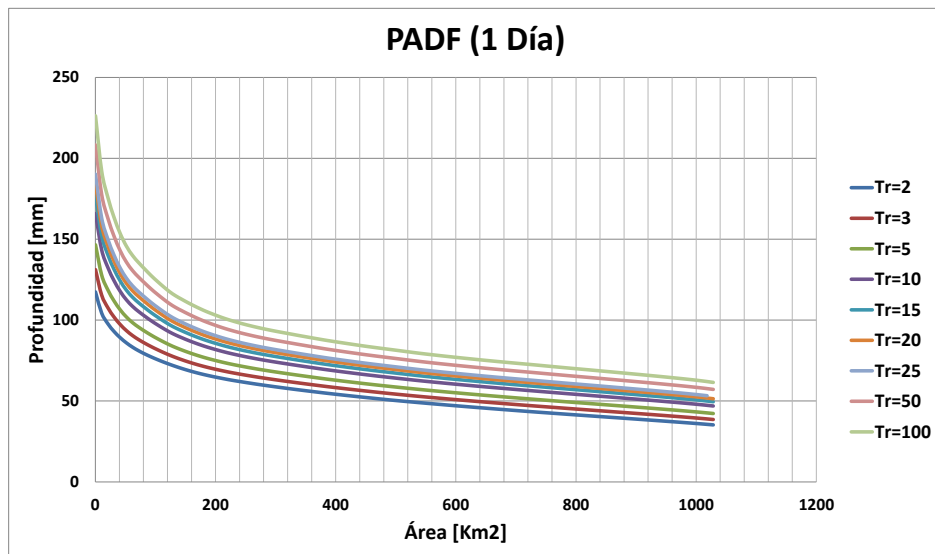


Figura A.III 2. Curvas PADF para eventos de precipitación de 1 día en la cuenca del río Chinchiná. (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)

### **Comportamiento histórico de precipitación en la cuenca**

Para la generación sintética de eventos de precipitación en la cuenca del río Chinchiná se tiene en cuenta el comportamiento espacial histórico de la lluvia a lo largo del período de registro contenido en las estaciones pluviométricas. A partir del análisis de completitud y de regímenes de lluvia para la información seleccionada se obtienen valores de precipitación diaria multianual y diaria trimensual multianual, para los meses de Marzo, Abril y Mayo y los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre. Lo anterior se hace con el fin de caracterizar con el método de las isoyetas la espacialidad de las precipitaciones históricas en la cuenca para posteriormente generar escenarios sintéticos de precipitación con mayor o menor frecuencia en las zonas delimitadas, de acuerdo a su pluviosidad.

Al trazar las isoyetas para lluvias mensuales o anuales, se pueden incorporar los efectos topográficos sobre la distribución espacial de la precipitación, tomando en cuenta factores tales como la altura y la exposición de la estación. Este método también se recomienda para calcular promedios espaciales en el caso de eventos individuales localizados.

A partir del análisis de isoyetas se determina la malla de localización preferencial de centros de tormenta que serán generados de manera sintética. Figura A.III 3 presenta el análisis de isoyetas diario multianual, en el cual se observan zonas de relativa baja precipitación con valores de 1250 mm por año, en contraste con zonas en las cuales se presentan precipitaciones cercanas a los 3000 mm anuales.

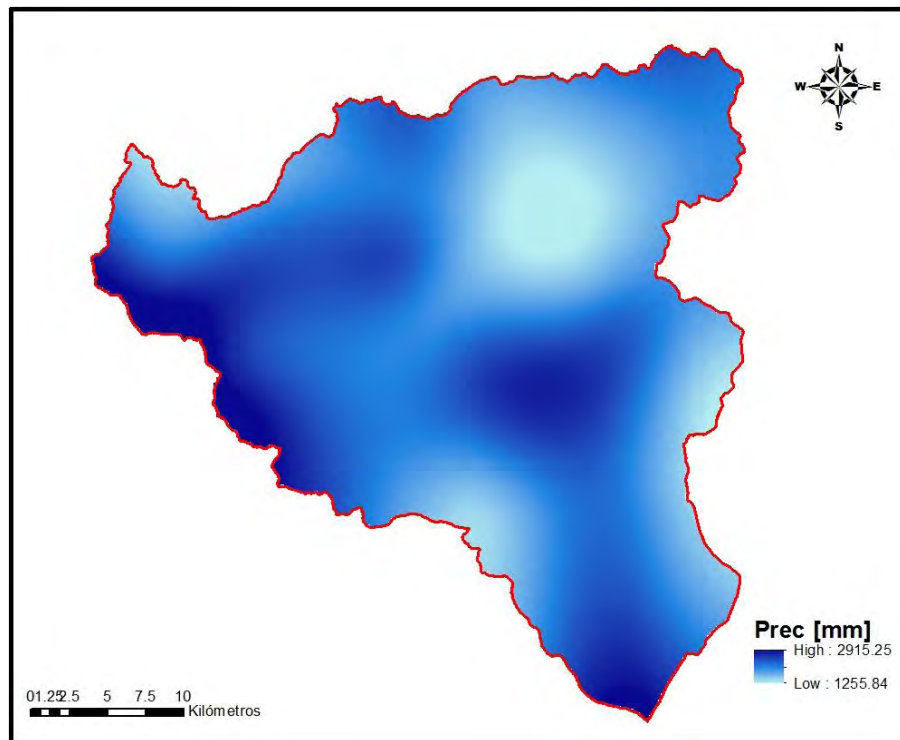
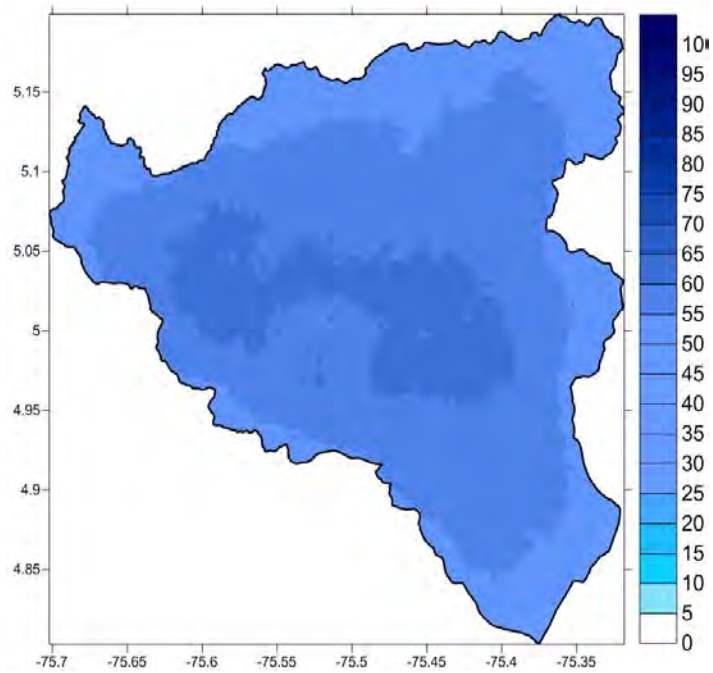


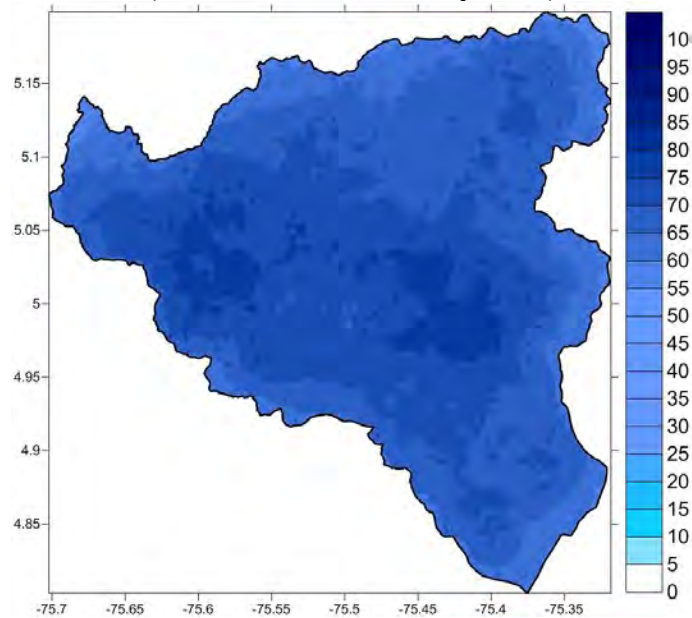
Figura A.III 3. Análisis de isoyetas de precipitación diaria multianual para la cuenca del río Chinchiná.  
(Cardona, Mendes, 2013, parte III)

### Mapas de amenaza por lluvias intensas para la cuenca del río Chinchiná

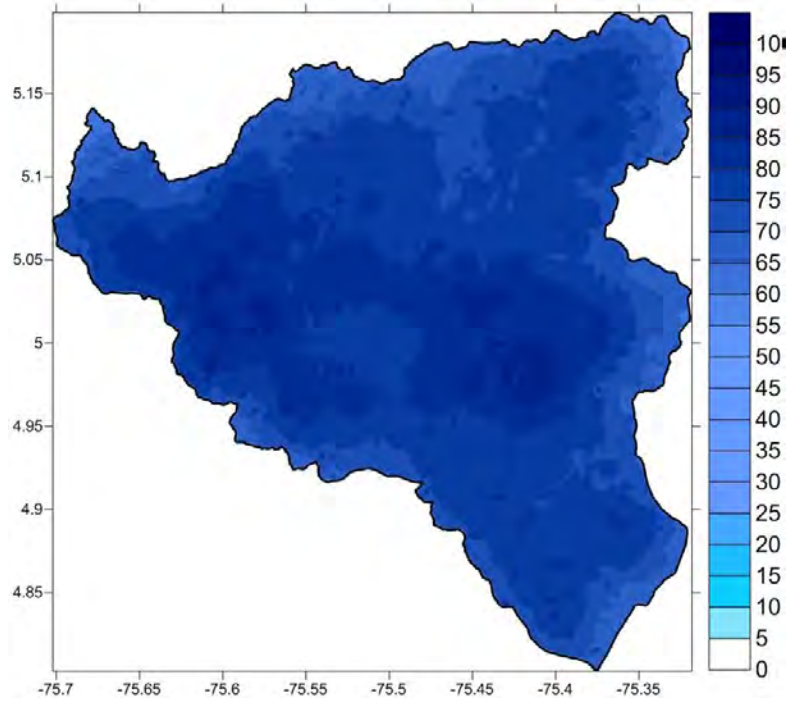
Se calcularon mapas de amenaza uniforme por lluvias intensas, tomando como única medida de intensidad la profundidad de precipitación para períodos de retorno de 10, 25, 40 y 50 años. Estos fueron calculados haciendo uso del software ERN-LLUVIA-NH (ERN-AL, 2009).



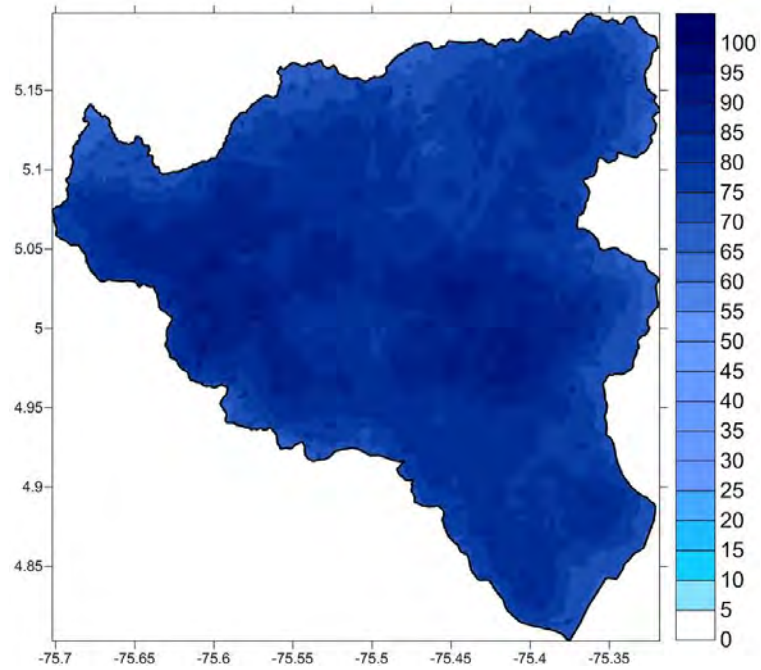
**Figura A.III 4. Mapa de amenaza por lluvias intensas para 1 Día de precipitación. Pr 10 años. [mm] (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)**



**Figura A.III 5. Mapa de amenaza por lluvias intensas para 1 Día de precipitación. Pr 25 años. [mm] (Cardona, Mendes et al 2013, parte III)**



**Figura A.III 6 .Mapa de amenaza por lluvias intensas para 1 Día de precipitación. Pr 40 años. [mm]  
(Cardona, Mendes et al 2013, parte III)**

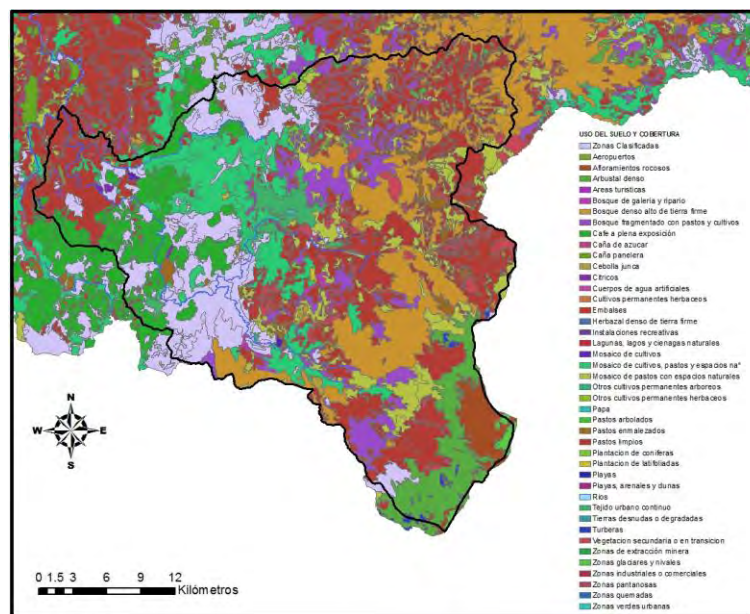


**Figura A.III 7. Mapa de amenaza por lluvias intensas para 1 Día de precipitación. Pr 50 años. [mm]  
(Cardona, Mendes et al 2013, parte III)**

## Factores de escurrimiento

Los factores de escurrimiento se determinan de acuerdo a la metodología especificada por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos, en el cual se definen números de curva de acuerdo al uso del suelo, cobertura vegetal, tipo de suelo y condición de la superficie (sección 5.3).

En la **Figura A.III 8** se presentan los diferentes usos de suelo y cobertura vegetal para la cuenca del río Chinchiná y zonas aledañas. A partir de esta información es posible determinar para cada una de las áreas específicas un nivel de uso. La condición de la superficie es determinada a partir de imágenes satelitales, haciendo uso de las imágenes del satélite LANDSAT 5tm.



**Figura A.III 8.** Usos del suelo y cobertura para la cuenca del Río Chinchiná (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)

En la **Figura A.III 9** se presentan las características geológicas y los tipos de suelo para cada zona de la cuenca del río Chinchiná y zonas aledañas. A partir de esta información es posible generar una clasificación en torno a los tipos de suelo especificados en la Tabla 7.

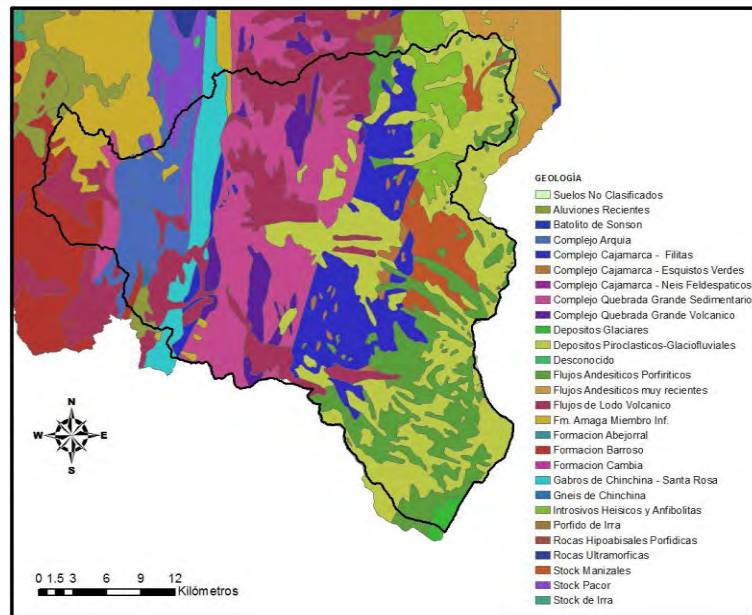


Figura A.III 9.Capa de geología y tipos de suelo para la cuenca del Río Chinchiná (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)

A partir del uso de la información mencionada, se presenta en la Figura A.III 10 la clasificación de cada una de las zonas de la cuenca del río Chinchiná en términos del número de curva, entre 0 y 100, en donde 0 representa las zonas que poseen mayor capacidad de absorción de agua en un evento de precipitación, mientras que zonas identificadas con números de curva cercanos a 100 poseen una mayor capacidad de escurrimiento de agua en un evento de precipitación determinado.

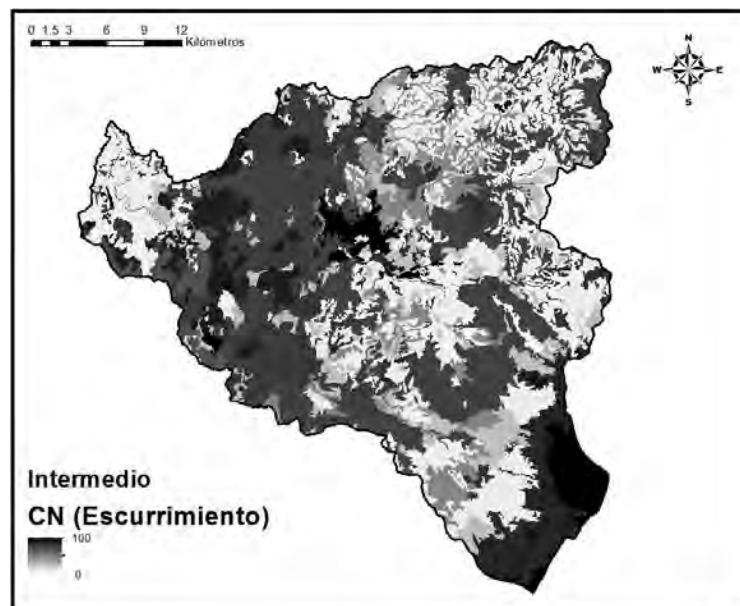
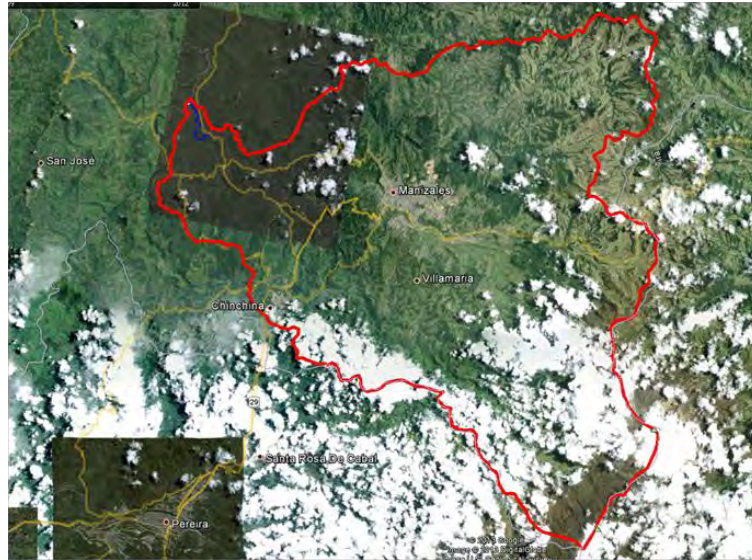


Figura A.III 10.Factores de escurrimiento para la cuenca del Río Chinchiná. Condiciones de saturación del suelo intermedias (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)



### **Modelación de la inundación**

La inundación se calcula para el tramo más aguas debajo del río Chinchiná, en cercanías a su desembocadura en el río Cauca. La **Figura A.III 11** muestra este tramo, en la parte más baja de la cuenca, en color azul sobre la fotografía satelital.



**Figura A.III 11.**Localización del tramo de análisis del río Chinchiná  
(Cardona, Mendes et al 2013, parte III)

La modelación hidráulica de este tramo se realizó con el programa HEC-RAS, el cual implementa el modelo de análisis unidimensional descrito en este instructivo. A partir de la topografía de la zona de análisis, se determinaron las secciones transversales a lo largo del cauce.

La topografía empleada corresponde a la disponible de la misión satelital ASTER, con resolución espacial de 30m.

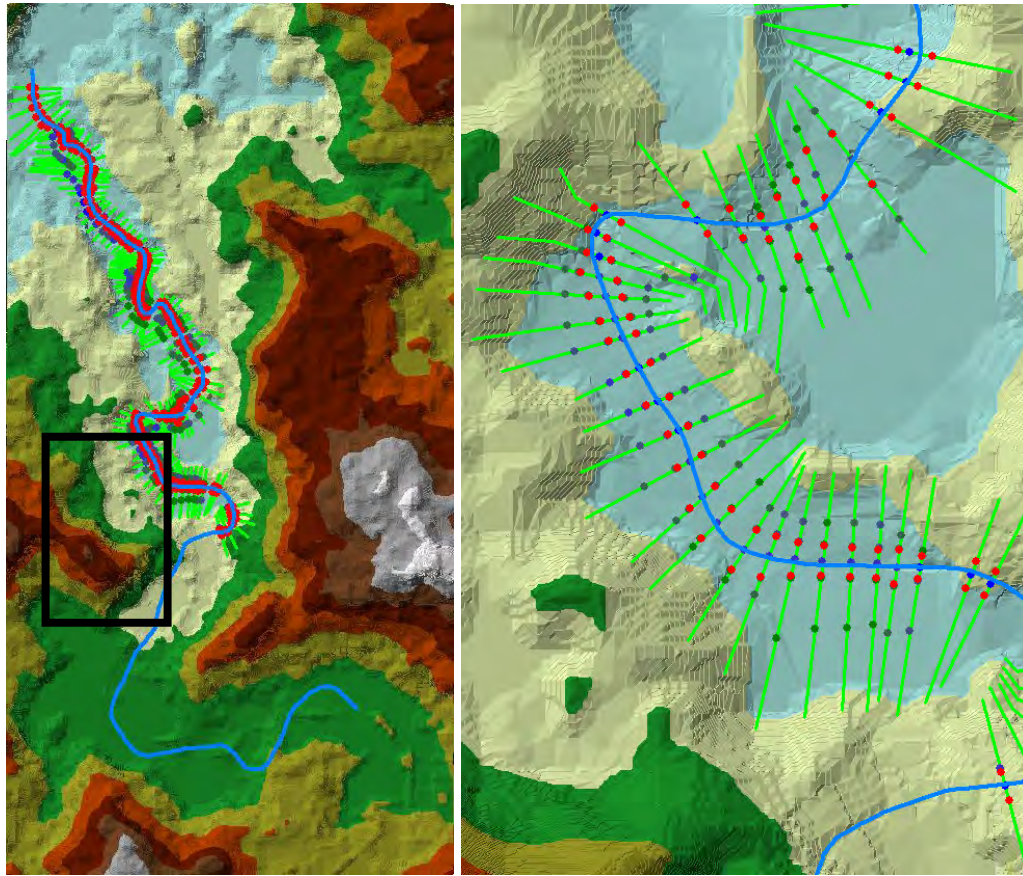
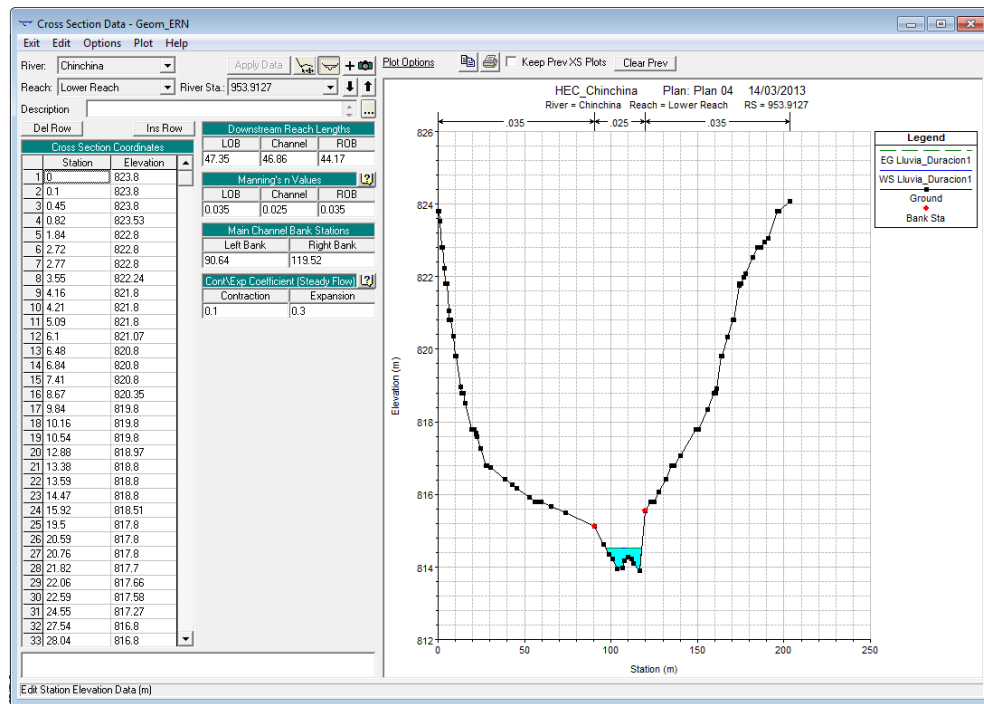


Figura A.III 12. Secciones transversales a lo largo del tramo analizado. La imagen a la derecha es un acercamiento al recuadro negro (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III).

Para cada una de las secciones transversales se define lo siguiente:

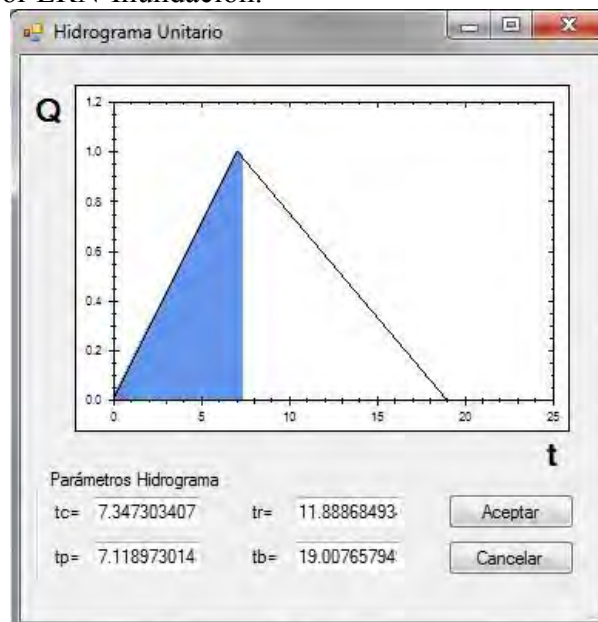
- Distancia a la próxima sección transversal.
- $n$  de Manning para las subdivisiones del cauce.
- Límites izquierdo y derecho del cauce.
- Coeficientes de contracción y expansión.

La Figura A.III 13 presenta una de las secciones transversales como se muestra en el programa HEC-RAS.



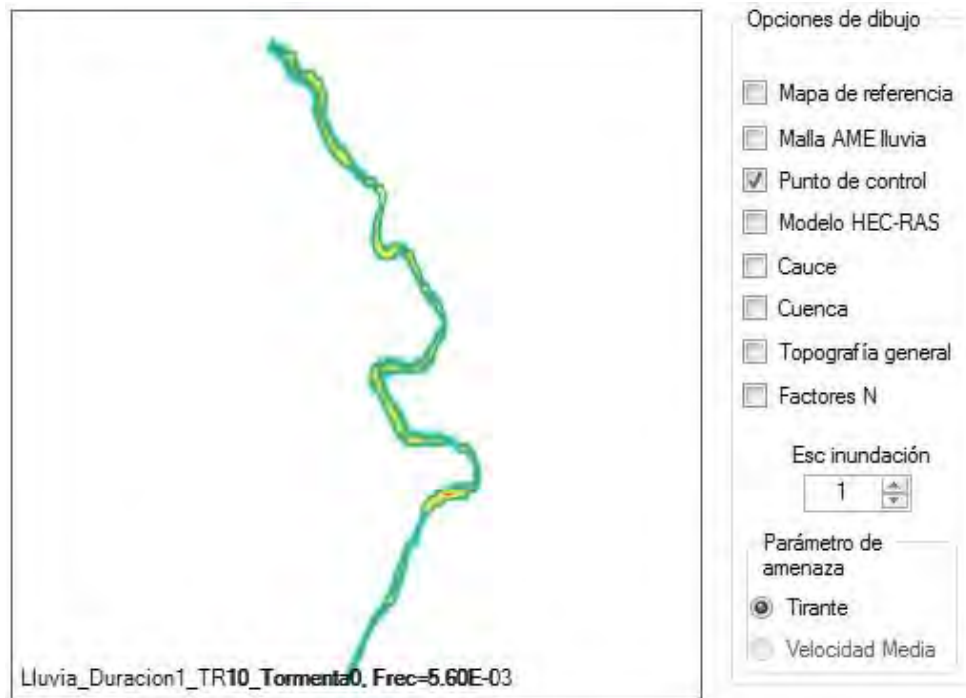
**Figura A.III 13. Sección transversal de análisis (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)**

Para el desarrollo del modelo de amenaza, se emplea el programa ERN-Inundación (ERN-AL, 2009), el cual implementa el método del hidrograma unitario, y adicionalmente controla el proceso de cálculo con HEC-RAS. La Figura A.III 14 presenta el hidrograma triangular calculado por ERN-Inundación.



**Figura A.III 14. Hidrograma triangular calculado con ERN-Inundación (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)**

ERN-Inundación calcula un hidrograma para cada escenario de precipitación, el cual es transitado empleado HEC-RAS a lo largo del tramo de análisis. El resultado es entonces un escenario de inundación para cada tormenta. La Figura A.III 15 muestra un escenario de inundación tal como se presenta en ERN-Inundación.



**Figura A.III 15. Hidrograma triangular calculado con ERN-Inundación (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)**

Con el conjunto de escenarios de inundación, se realiza el proceso de integración de la amenaza, mediante el cual se obtienen los mapas de igual periodo de retorno. Las Figuras 24 a 26 muestran los mapas de amenaza por inundación, en términos de la profundidad del agua, para 25, 50 y 100 años de periodo de retorno.

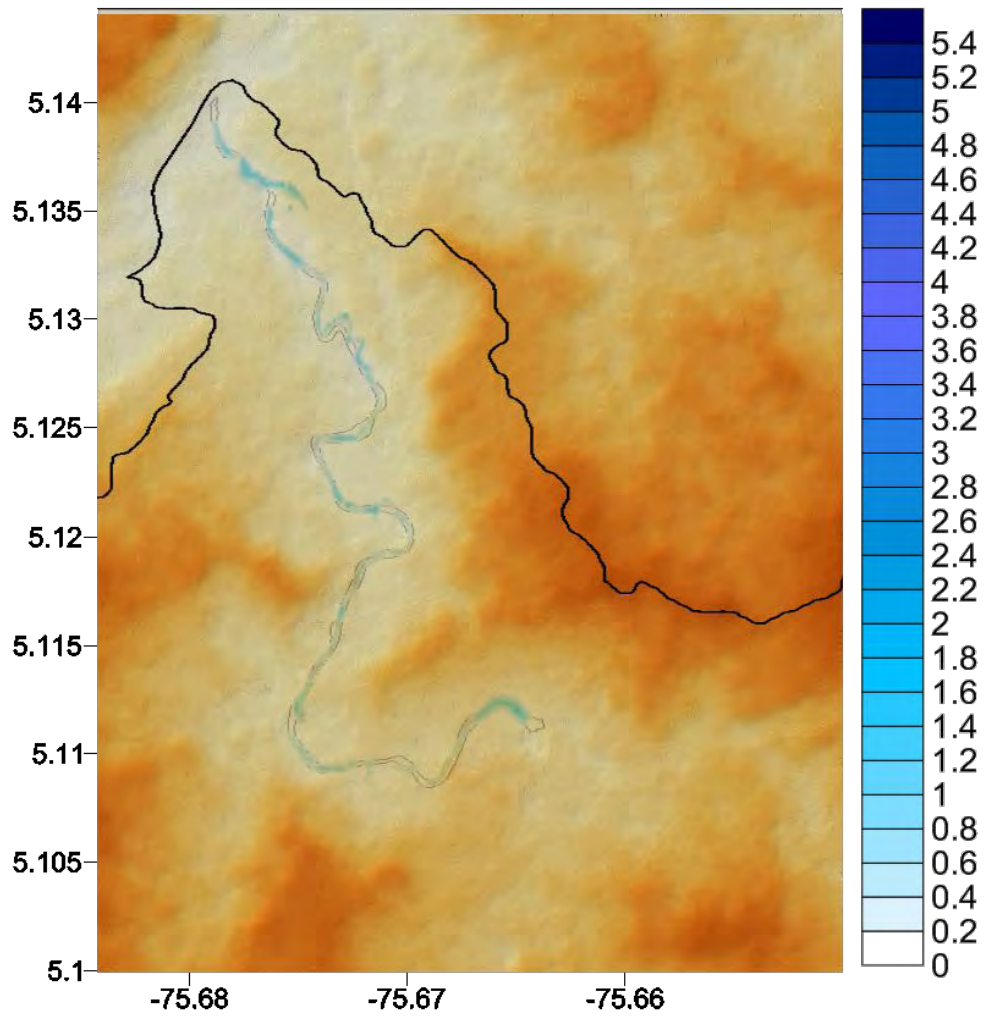


Figura A.III 16. Mapa de inundación de 25 años de periodo de retorno (Cardona, Mendes et al, 2013, parte III)

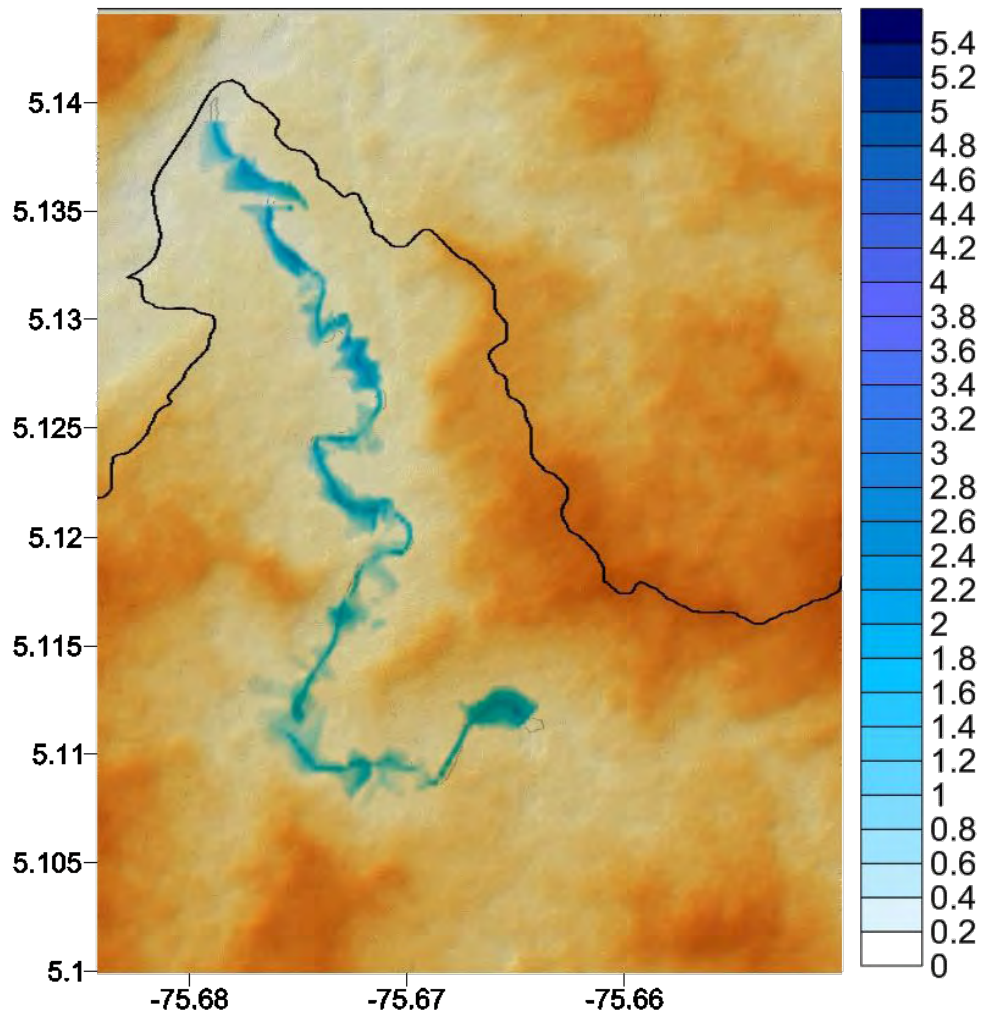


Figura A.III 17. Mapa de inundación de 50 años de periodo de retorno

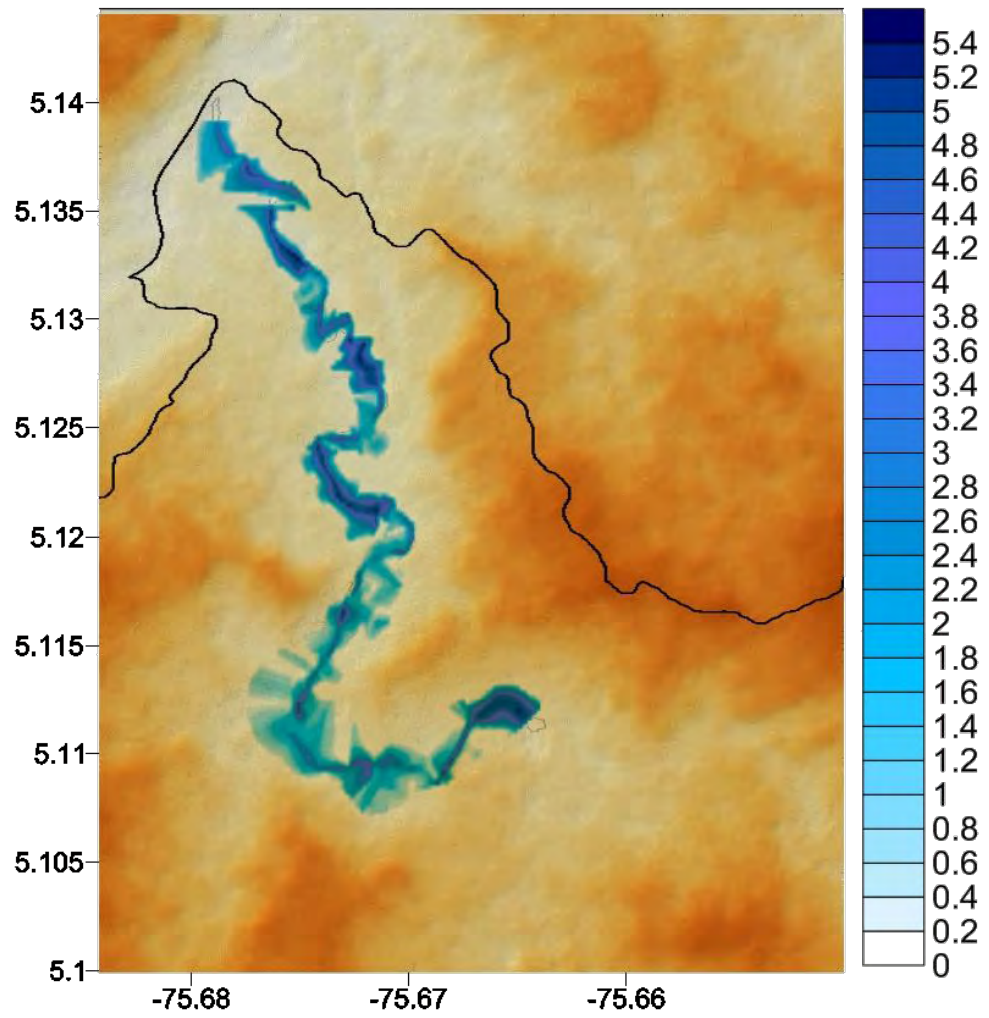


Figura A.III 18. Mapa de inundación de 100 años de periodo de retorno