

*Figura tomada de Londoño*

# *GEOLOGÍA AMBIENTAL*



---

---

## EVALUACIÓN HOLÍSTICA DE RIESGOS FRENTE A MOVIMIENTOS EN MASA EN ÁREAS URBANAS ANDINAS. UNA PROPUESTA METODOLÓGICA

---

---

*Juan Pablo Londoño L.*  
*Doctorando en Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*  
*Universidad Politécnica de Cataluña*  
*juan.pablo.londono@catunesco.upc.edu*

Recibido para evaluación: 22 de Septiembre de 2006 / Aceptación: 15 de Junio de 2007 / Recibida versión final: 20 de Junio de 2007

### RESUMEN

El presente trabajo propone de manera preliminar una metodología que procura asimilar el concepto de riesgo de manera integral, desde el paradigma ambiental, considerando la vulnerabilidad de las comunidades como un proceso derivado de múltiples causas, desde aquellas netamente físicas de localización en zonas propensas, hasta determinantes de segregación socioespacial, que involucran procesos sociales, económicos y políticos. Con lo anterior y con la utilización de Sistemas de Información Geográfica, se han generado mapas asociados a 27 Factores de Amenaza y de Vulnerabilidad para la ciudad andina de Manizales Colombia. Se ha obtenido un modelo explicativo a partir del Análisis Discriminante y una Red Neuronal Artificial, para generar mapas de riesgo asociado a movimientos en masa. Con un modelo de este tipo y la información correcta, se tendría un verdadero Sistema de Prevención y Alerta Temprana para movimientos en masa en áreas urbanas, aportando así a la sostenibilidad de las Ciudades Andinas.

**PALABRAS CLAVES:** Evaluación de Riesgos, Deslizamientos, Sistemas de Información Geográfica SIG, Redes Neuronales Artificiales, Desarrollo Sostenible

### ABSTRACT

This article proposes a preliminary methodology that tries to assimilate the concept of risk from a integral point of view, from the environmental paradigm, considering the vulnerability of the communities like a process derived from multiple causes, from those physical of location in exposed zones, to social determinants of spatial segregation, this involve social, economic and political processes. With the previous argument, and the use of GIS, maps associated to 27 Factors of Hazard and Vulnerability for the Andean city of Manizales Colombia, have been generated. An explanatory model from the Discriminant Analysis and an Artificial Neuronal Network was used to generate maps of associated risk to landslides. With a model of this type and the correct information, would have a true System of Prevention and Early Alert for landslides in urban areas, thus contributing to the sustainability of the Andean Cities.

**KEY WORDS:** Risk Evaluation, Landslides, GIS, Artificial Neuronal Networks, Sustainable Development.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Manizales Colombia (360.000 habitantes), objeto de este estudio, existen una serie de antecedentes de desastres, especialmente los movimientos en masa detonados por lluvias. Los registros se remontan al año 1948, y según la Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres OMPAD, se pueden resumir en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Eventos de deslizamientos en la ciudad de Manizales a lo largo de su historia.

<i>Período</i>	<i>Deslizamientos</i>	<i>Muertos</i>	<i>Heridos</i>	<i>Deslizamientos por año</i>	<i>Muertos por año</i>	<i>Heridos por año</i>
1948-1962	25	45	65	1.79	3.21	4.64
1963-1977	163	170	49	11.64	12.14	3.50
1978-1982	85	98	154	6.07	7.00	11.00
1983-1989	78	34	64	13.00	5.67	10.67
1990-1994	149	21	11	37.25	5.25	2.75
1995-1998	195	1	0	65.00	0.33	0.00
2002	4	2	1	4.00	2.00	1.00
2003	90	16	32	90.00	16.00	32.00
<b>TOTAL</b>	<b>789</b>	<b>387</b>	<b>376</b>	<b>13.84</b>	<b>6.79</b>	<b>6.60</b>

*Fuente:* Oficina Municipal para la Prevención y Atención de Desastres OMPAD Manizales

Es evidente un incremento en el número de eventos en años recientes; entre los años 1948 a 1989 (41 años) se tiene un total de 32 eventos, mientras que para el período comprendido entre 1990 y 2003 (13 años) se registran 196 eventos, lo que muestra una tendencia al aumento en la frecuencia de los deslizamientos que pone en peligro la sostenibilidad en el tiempo de la ciudad y sus habitantes.

El registro más reciente y catastrófico se remonta al año 2003: el 18 y 19 de marzo se presentó un evento de lluvias fuertes que contribuyó a la generación de movimientos en masa con un costo económico total de la emergencia para la ciudad de \$17.537.900.000; el 28 y 29 de octubre, un proceso similar implicó un costo de \$400.000.000 en atención de la emergencia y \$3.655.600.000 en obras de rehabilitación, y el 4 de diciembre, un evento aislado en el barrio La Sultana sepultó a 16 personas. En total, según los datos del Comité Local para Prevención, Atención y Recuperación de Desastres -COLPADE- de Manizales, los eventos de esas fechas dejaron como consecuencia 41 muertos, más de 100 personas heridas, más de 45 sectores afectados en toda la ciudad, daño en 220 laderas, destrucción de 200 viviendas y evacuación preventiva de más de 1.400 familias (Corpocaldas: 2005).

Cuando se observa esta realidad, recurrente en muchas ciudades Latinoamericanas (Andinas), y se advierte que el ciudadano promedio se encuentra atrapado entre una maraña de fuerzas opuestas que intentan aniquilarlo, y van desde lo macro y microeconómico, hasta lo natural, resulta fundamental profundizar en las causas de esta situación. De igual manera, cuando se es habitante de una ciudad andina donde existe una larga historia de desastres, surge conciencia e interés sobre el tema y se hace importante como investigador de los temas de sostenibilidad, indagar esas causas, porque en último término, desvelando (en lo posible) estas relaciones, se estaría indagando sobre la convivencia entre sociedad y naturaleza, sobre los procesos sociales, y en último caso, sobre el mismo desarrollo, sea cual fuere su definición.

### 1.1. Área de Estudio

Enclavada en el corazón de los Andes, en la zona montañosa colombiana, en la denominada Cordillera Central, adaptada urbanísticamente a una topografía quebrada y abrupta, la ciudad de Manizales, aparece como un intento muy especial por generar suelos aptos para construir, sobre terrenos en los cuales el sentido común se niega a edificar una ciudad.

La topografía regional ha sido modelada por las erupciones que han tenido lugar en el Macizo Volcánico Ruiz-Tolima, sobre la cordillera central colombiana. La Ciudad posee una topografía montañosa ondulada con pendientes predominantes que varían entre el 20 y el 100%; los terrenos presentan diferencias de nivel que pueden llegar hasta 220m entre sus partes más altas y más bajas.

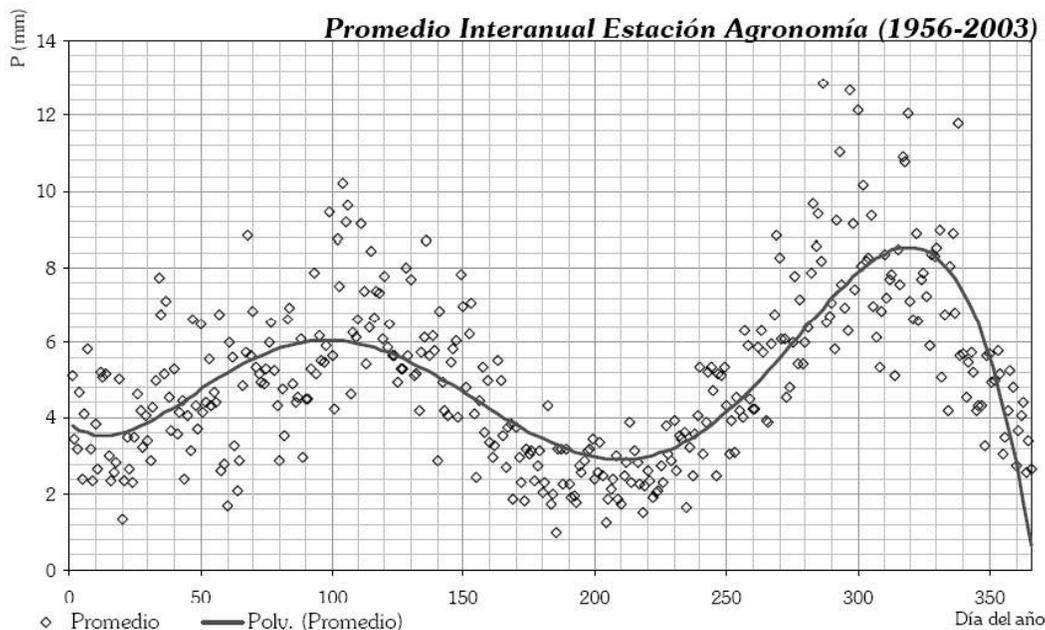
Los drenajes principales de la ciudad son el Río Chinchiná, ubicado al sur y la Quebrada Olivares, ubicada al norte. La ciudad, por lo menos en su centro histórico, aparece como una meseta erguida sobre estos dos ríos, con una parte plana (Carrera 23) y unas laderas que se van agudizando gradualmente hasta llegar a los cauces.

La Tabla 2 resume de forma general las principales características de la ciudad, para ofrecer una idea de los aspectos meteorológicos más sobresalientes.

**Tabla 2.** Aspectos generales de la ciudad de Manizales

Localización	Flanco occidental de la cordillera central Colombiana (Pertenece al sistema montañoso de Los Andes)
Coordenadas geodésicas	X=835000,850000 Y=1045000,1057000
Coordenadas geográficas	5° 4' latitud norte 75° 31' longitud oeste
Área aproximada	550Km <sup>2</sup>
Población aproximada	360000 Habitantes (1993)
Altitud promedio	2150 msnm
Temperatura media	18°C
Temperatura mínima promedio	12°C
Temperatura máxima promedio	22°C
Periodos secos	Enero-Marzo; Junio-Agosto
Periodos Húmedos	Abril-Mayo; Octubre-Noviembre
Mes más seco	Junio ( 74% de humedad relativa)
Mes más húmedo	Octubre (81% de humedad relativa)
Vegetación característica	Bosques húmedos tropicales, cultivos y pastos.
Vientos	velocidad menor a 7 Km/hora en la mayor parte del año, el sentido predominante de la corriente de aire es occidente-oriente

Como es característico de esta región, dada su ubicación en la Zona de Convergencia Intertropical ZCIT, se presenta una distribución de precipitaciones de tipo bimodal, con dos períodos lluviosos en el año; uno máximo hacia el mes de octubre con 253 mm en promedio, y otro un poco menor hacia el mes de abril, con 208 mm. El mayor nivel de precipitación mensual registrado es de 485 mm para octubre de 1969, seguido de 480 mm en abril de ese mismo año. En cuanto a la extensión de los dos períodos lluviosos en el año, a partir de la Figura 1, elaborada con el promedio de los valores diarios para cada año de registro, es claro que el primer período lluvioso es más extenso, empieza en febrero y termina en julio; mientras el segundo, aunque más corto, es más intenso y termina después de diciembre. Los máximos estarían situados hacia principios del mes de abril (día 100 del año, aproximadamente) para el primer semestre, y hacia finales del mes de octubre (día 320) para el segundo semestre.



**Figura 1.** Distribución de Precipitaciones (promedios) en el año

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Esquema Conceptual

#### 2.1.1 *Un enfoque integral del riesgo urbano para movimientos en masa*

Dados los niveles de complejidad y multidisciplinaria que requiere el tema de Evaluación de Riesgos, cualquier estudio de este tipo se debe realizar en el cuadro de un enfoque sistémico, utilizando métodos cualitativos y cuantitativos (Chardon: 2002). Ante la complejidad del problema y del sistema socio-técnico involucrado en la modelización del riesgo en entornos urbanos, Cardona (2001) sugiere que es mejor obtener "una respuesta 'aproximada' a la correcta formulación del problema desde una perspectiva holística - que necesariamente se tiene que hacer con cierta vaguedad - que una respuesta exacta a la formulación 'incorrecta' del problema, que de manera reduccionista y fragmentada podría realizarse con cierta precisión".

La lógica reduccionista es aplicable con precisión en el campo de las matemáticas y ciertos fenómenos sencillos de la física, pero se torna inaplicable y gradualmente más "borrosa" cuando se trata de describir procesos que se encuentran en niveles más complejos como la biología y las ciencias sociales. "Holismo es una alternativa al reduccionismo, siempre que se diferencie de la abstracción común (la oriental), que consiste en ver únicamente el aspecto global en detrimento de lo particular: un sistema se considera como una unidad y a menudo se ignora su contexto. Aquí, holismo significa integralidad, proviene de holos que en griego significa "todo", "íntegro", "entero", "completo", en tanto que el sufijo ismo denota su práctica. El enfoque holístico, al que aquí se hace referencia, significa proceso de integración y desagregación, conservando las sinergias o relaciones entre componentes. Es la noción de pensamiento complejo, al que se refiere el sociólogo francés Edgar Morin, que separa y reúne, que distingue - sin desunir - y religa" (Cardona: 2001).

El mismo autor sugiere que para captar el riesgo en un entorno urbano se deben utilizar representaciones de la interacción entre el asentamiento humano y su entorno, ambos sistemas dinámicos complejos. El método a emplear consiste en construir un modelo buscando explicar los acontecimientos presentes o pasados que afectan o han afectado al sistema y, lo que es más importante, al menos desde el punto de vista del método científico, el modelo ha de servir para predecir su comportamiento futuro.

Retomando esta perspectiva, el presente trabajo estudia el tema de movimientos en masa en el entorno urbano, considerando el fenómeno como un producto de múltiples factores acentuados con el tiempo; es decir, se trata de un proceso que se va gestando paulatinamente a través de la convergencia y acumulación de muchas situaciones y subprocesos que pueden ser de órdenes tan diferentes como los sociales y los físicos.

Metodológicamente se ha dividido el riesgo en los apartados Amenaza y Vulnerabilidad, considerando las sugerencias de importantes autores en el tema (Blaikie et al : 1996; Lavell: 1992,1994,2003,2003a; Maskrey: 1998; Velásquez y Rosales: 1999; Wilches-Cháux: 1993,1995; Cardona: 2001) y siendo acordes con el marco conceptual vigente para la temática. Se hace referencia a Factores de Amenaza como todos aquellos relacionados directamente con el ecosistema de soporte del asentamiento urbano. Los factores de amenaza se consideran en cierto sentido, y para fines conceptuales, independientes de la existencia o no del asentamiento humano. Se incluye todo lo relacionado con el terreno y sus características, como se observa en la Figura 2, considerando variables físicas y naturales que tienen que ver con la estabilidad de las laderas, es decir, con el principio físico de equilibrio estático que debe mantenerse en el terreno para que no se produzcan los movimientos en masa. Elevación del terreno, pendiente del terreno, rugosidad, curvatura de la superficie, características de las cuencas, factores asociados al tipo de suelo y precipitaciones, son factores considerados en este componente.

Haciendo una simplificación conceptual un tanto gruesa, pero necesaria para lograr coherencia, se supondrá que estos factores son característicos del ecosistema de soporte, y pueden encontrarse en cualquier otro sitio, independiente de la

existencia o no de un asentamiento sobre él. Obviamente, la modelación del relieve no puede ser independiente de la acción antrópica sobre el terreno, pues los procesos de urbanización constituyen uno de los principales factores modeladores del paisaje urbano. A esto se refiere la simplificación conceptual incorporada. Teniendo en cuenta que la evaluación de riesgo planteada se hace en un momento específico de tiempo, no resulta traumático hacer esta simplificación, pues cada vez que se realice, habrá que evaluar el ecosistema de soporte en su momento actual, sin importar las causas de la posible variación que sufra el entorno de una época a otra.

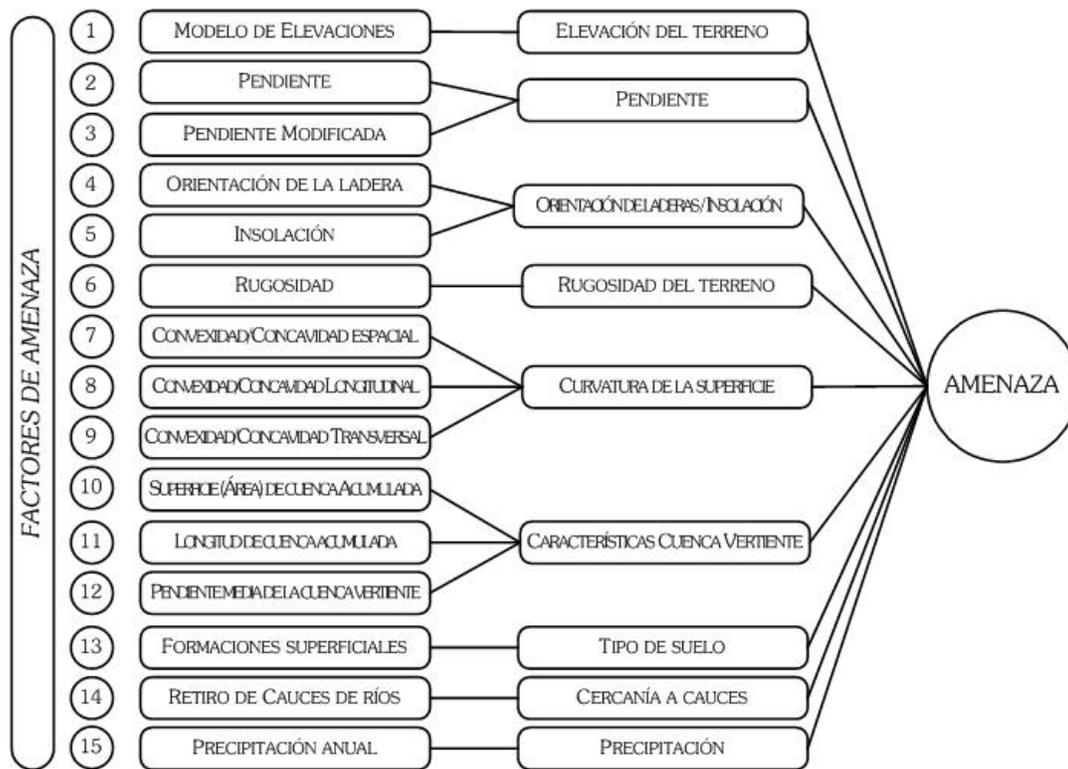


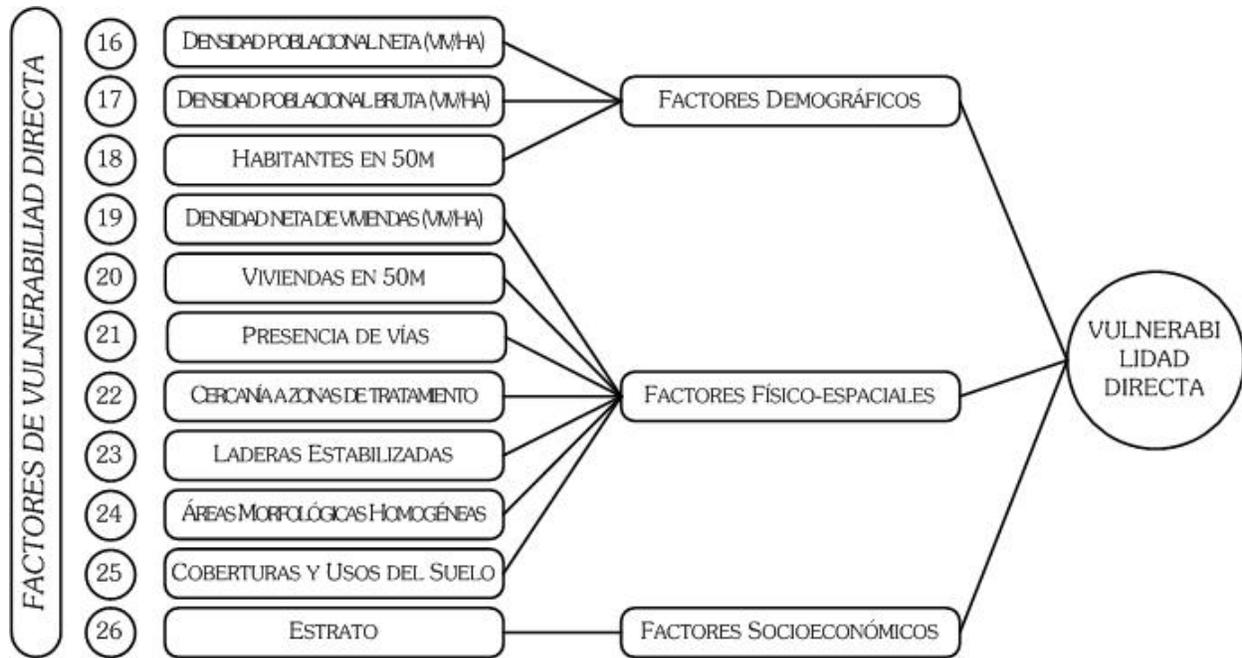
Figura 2. Esquema Conceptual de riesgo por movimientos en masa - Factores de Amenaza

Los Factores de Vulnerabilidad Directa (Figura 3) se asocian al sistema comunidad, es decir, todos aquellos elementos que componen el asentamiento humano, con su consecuente exposición y dinámicas propias. Se incluyen factores demográficos, factores socioeconómicos y factores físico espaciales, que determinan el modo de ocupación del territorio con variables como las densidades habitacionales y poblacionales, el nivel socioeconómico, los tratamientos superficiales existentes, entre otras, que de alguna manera intervienen en el establecimiento de las personas en sus barrios de habitación o son fruto de los procesos de urbanización.

A partir de los conceptos anteriores - Factores de Vulnerabilidad Directa y Factores de Amenaza - se propone la acuñación del término Riesgo Directo para el caso de movimiento en masa, entendido como la confluencia de todos aquellos factores, que puedan generar en algún momento, de manera directa, inestabilidad en las laderas. Este concepto explicaría la sectorización espacial del fenómeno en la unidad territorial estudiada y sería la base para la elaboración de mapas de zonificación o susceptibilidad. En otras palabras, obteniendo el Riesgo Directo se estaría indicando dónde (con cierto margen de error) ocurrirán los eventos.

No obstante lo anterior, el riesgo frente a movimientos en masa no estará totalmente descrito hasta que se incorporen por lo menos dos conceptos complementarios: como primera medida es necesario incorporar algunos Factores Amplificadores de Vulnerabilidad, que se entienden como todos aquellos factores funcionales e institucionales relacionados

con la gestión de riesgo y capacidad de atención de emergencias, los cuales, aunque no son elementos que influyen directamente en la presencia o ausencia de movimientos en masa, sí determinan los procedimientos y mecanismos de gestión que establecerían la diferencia entre una emergencia bien manejada o un desastre. Factores funcionales/institucionales hacen que algunas zonas con riesgos físicos iguales puedan sufrir diferentes niveles de pérdidas (de vidas, pérdidas económicas, etc.). La Gestión de Riesgos generalmente se hace a niveles municipales, lo cual no incorporaría elementos de discriminación espacial en la ciudad, haciendo que en este ítem cobren más importancia los aspectos relacionados con la capacidad de atención de emergencias como puestos de socorro, cercanía a hospitales y grupos de rescate, entre otros, pues la existencia de esta infraestructura o la cercanía a ella, sí presenta diferencias de un lugar a otro dentro de las áreas urbanas.



**Figura 3.** Esquema Conceptual de riesgo por movimientos en masa - Factores de Vulnerabilidad

Como segunda instancia, es necesario conocer, en forma aproximada, el momento en el cual se presentarían los procesos de inestabilidad de laderas. En el caso de los fenómenos de movimientos en masa en zonas andinas, este momento no está determinado por la ley de la probabilidad, como ocurre con otros fenómenos como el sísmico, y podría decirse que se trata de un proceso más o menos determinístico - aunque complejo - dependiente básicamente de variables relacionadas con el estado del suelo y factores climáticos. En ciudades andinas, la mayor parte de los movimientos en masa son producidos por aguaceros aislados que los activan, es decir, se trata de eventos detonados por lluvias. Tradicionalmente en la literatura la cantidad límite de precipitación que debe caer sobre un área para que comiencen a evidenciarse procesos de inestabilidad se conoce como umbrales de lluvia (Terlien: 1996; Mayorga: 2003). Por lo anterior, para que el riesgo por deslizamientos quede bien caracterizado, es necesario incorporar un Factor Detonante considerando el umbral de lluvia necesario para que se den las condiciones de inestabilidad. Este factor indicaría el momento - cuándo - a partir del cual sería factible encontrar deslizamientos en la ciudad.

Con lo anterior, se podrán generar mapas dinámicos (un mapa para cada período de tiempo) asociados al Riesgo Directo, otros asociados a los Factores Amplificadores de Vulnerabilidad, y por último, mapas - en lo posible en tiempo real - del Factor Detonante. Con un modelo de este tipo y la información correcta, se tendría un verdadero Sistema de Prevención y Alerta Temprana para los deslizamientos en áreas urbanas.

Con los mapas de Riesgo Directo sería posible identificar aquellos sectores que merecen intervención correctiva en el terreno mediante obras de estabilidad o reubicación urgente de viviendas o familias. Con los mapas de Factores Amplificadores de Vulnerabilidad se tendrá un panorama de sectores que requieren atención especial por parte de la administración municipal en cuanto a infraestructura de gestión y atención de emergencias. Por último, con la combinación de los tres tipos de mapas se tendría un sistema de alerta temprana que indicaría en tiempo real los lugares donde se generarían emergencias, y podría servir para hacer evacuaciones de última hora y prevenir eventos catastróficos o reducir las pérdidas humanas y materiales, situación de la cual en el medio local existen bastantes antecedentes.

### ***2.1.2. Definición espacial de los estudios***

Se toma como unidad de análisis un recorte cuadrado del terreno de tamaño de 10 metros de lado para caracterizar adecuadamente la unidad territorial con la información disponible. En el caso de variables naturales, al depender éstas de condiciones físicas (como la topografía) se requiere un nivel de observación bien detallado, es decir, un buen nivel de resolución, dado por la mencionada celda de 10m de lado. Otros factores (socioeconómicos, por ejemplo) se trabajan con información secundaria disponible a nivel de barrio, levantada por las entidades correspondientes, susceptible de ser desagregada también en celdas de 10mx10m para hacerla compatible con los demás datos utilizados.

## **2.2. Generación de Mapas de Factores de Amenaza y Vulnerabilidad**

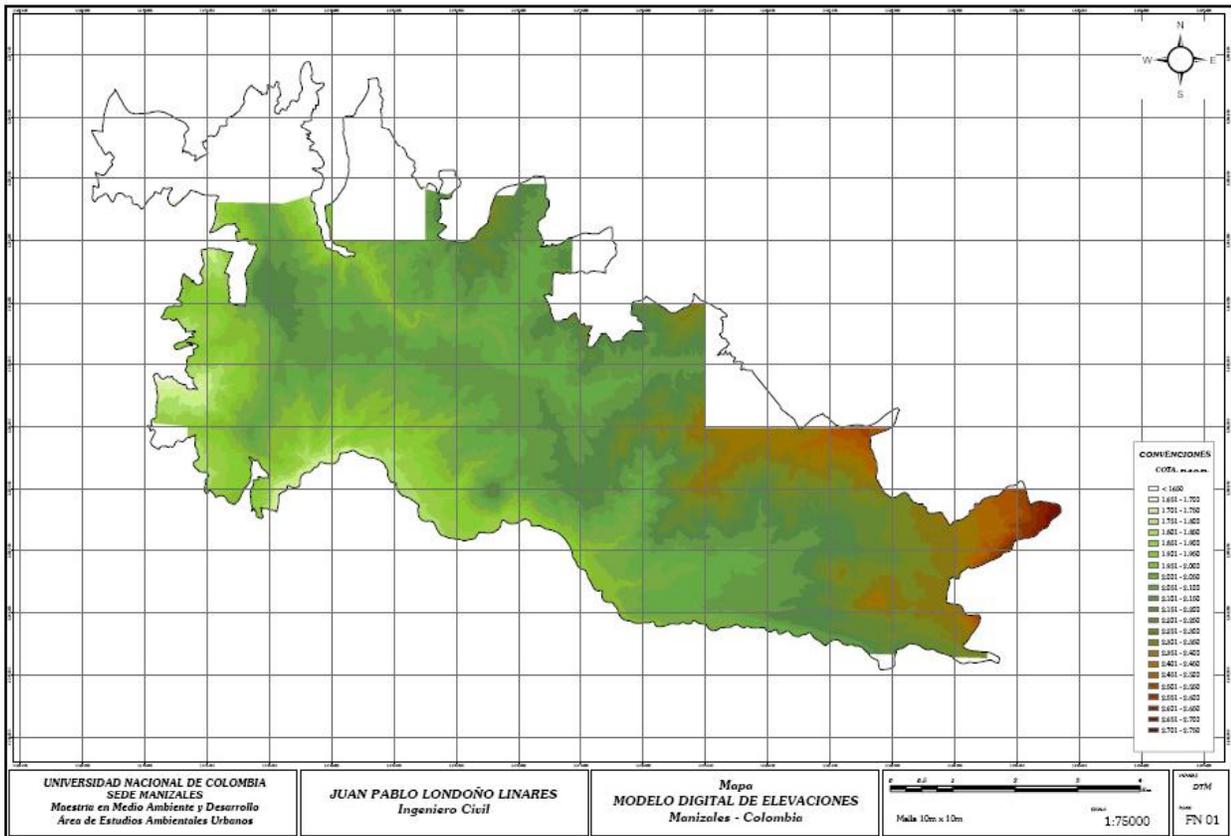
La topografía de un área representa una característica muy importante al momento de analizar cualquier problema ambiental, representa sencillamente el entorno en el cual se desarrolla el proceso bajo estudio. A partir de un modelo de elevaciones del terreno es posible calcular otras variables determinantes, como pueden ser la pendiente, la curvatura del terreno, las dimensiones de cuencas que drenen hacia un mismo punto, las orientaciones de ladera, y hasta la forma como el sol ilumina la superficie.

Para la ciudad de Manizales, en el presente estudio, se ha generado un modelo de elevaciones a partir de curvas de nivel. Este modelo consiste en una malla continua de celdas o píxeles (Raster) obtenida mediante el SIG, a la cual se le da el nombre de Modelo Digital de Elevaciones DTM. A partir de este modelo digital de elevaciones es posible generar varios mapas relacionados con factores de amenaza, mediante diferentes cálculos. Por otro lado, en la administración municipal reposa información secundaria relacionada con variables poblacionales, socioeconómicas y de infraestructuras, que es factible representar en mapas raster, con posibilidades de ser combinados y modificados mediante diferentes operaciones de cálculo para obtener los factores de vulnerabilidad. En la aplicación del procedimiento a otras áreas podrían incorporarse otros factores de vulnerabilidad adicionales, dependiendo de la información disponible en cada caso, y buscando que se refleje la segregación socioespacial del municipio y la infraestructura construida para hacer frente al problema.

Siguiendo siempre la premisa de trabajar con la información disponible, y respetando el esquema planteado en las Figuras 2 y 3, se han elaborado 26 mapas temáticos: 15 asociados a Factores de Amenaza, y 11 asociados a Factores de Vulnerabilidad (Tabla 3). Como ejemplo se muestran los mapas de modelos de elevaciones DTM (Figura 4) y el mapa HAB50M, habitantes en 50 metros a la redonda (Figura 5).

**Tabla 3.** Listado de mapas elaborados - Factores de Amenaza y Vulnerabilidad

<i>Factores de Amenaza</i>	<i>Factores de Vulnerabilidad</i>
DTM - Modelo Digital de Elevaciones (Mapa FN01)	DNETHAB – Densidad poblacional neta (Mapa FO01)
PEND – Pendiente del Terreno (Mapa FN02)	DBRUTHAB – Densidad poblacional bruta (Mapa FO02)
PENDT – Pendiente Transformada del Terreno (Mapa FN03)	HAB50M – Habitantes en un radio de 50m (Mapa FO03)
ASPECT – Orientación del Terreno (Mapa FN04)	DNETHAB – Densidad neta de viviendas (Mapa FO04)
INSOL – Insolación del Terreno (Mapa FN05)	VIV50M – Número de viviendas en un radio de 50m (Mapa FO05)
RUGOS – Rugosidad del Terreno (Mapa FN06)	BUFFERV - Presencia de Vías (Mapa FO06)
CURVAR – Convexidad/concavidad espacial del terreno (Mapa FN07)	DZONASTTO - Cercanía a zonas de Tratamientos Superficiales (Mapa FO08)
PERFL – Convexidad/concavidad longitudinal (Mapa FN08)	OBRASESTAB – Laderas Estabilizadas (Mapa FO09)
PERFT – Convexidad/concavidad Transversal (Mapa FN09)	AMHGral - Áreas Morfológicas Homogéneas (Mapa FO10)
ACUENCA – Área de Cuenca Acumulada (Mapa FN10)	USOSS – Coberturas y Usos del Suelo (Mapa FO11)
LONG – Longitud de Cuenca Acumulada (Mapa FN11)	ESTRATO - Nivel socioeconómico de los habitantes (Mapa FO07)
PENDM – Pendiente Media de Cuenca Vertiente (Mapa FN12)	
FMS – Formaciones Superficiales (Mapa FN13)	
RCAUCE – Retiros de Cauces de Ríos (Mapa FN14)	
PANUAL – Precipitación Anual (Mapa FN15)	



**Figura 4.** Mapa DTM - Modelo Digital de Elevaciones del Terreno

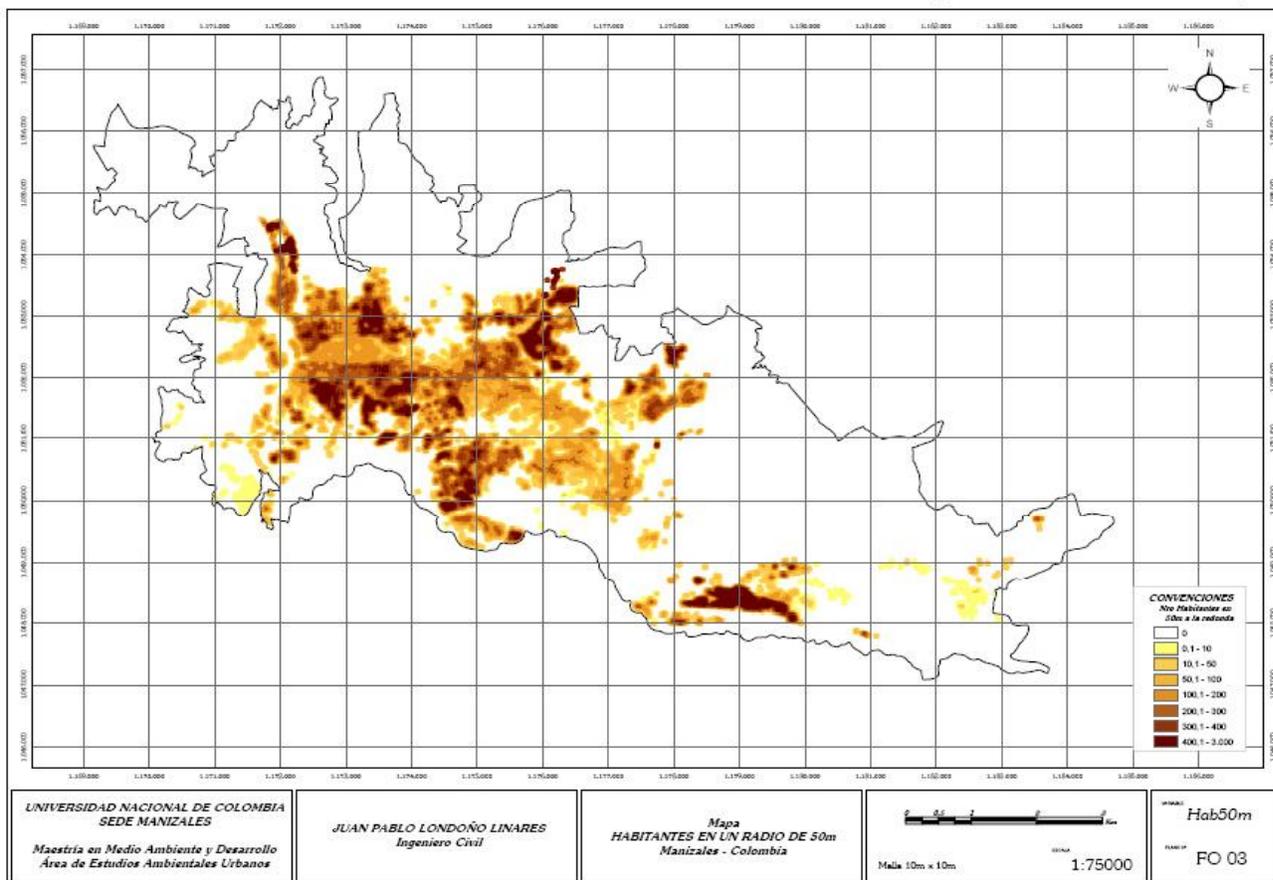


Figura 5. Mapa HAB50M - Habitantes en un radio de 50m

### 2.3. Modelización del Riesgo Directo

#### 2.3.1 Obtención de la muestra a analizar

Cada uno de los factores representados por mapas en formato raster, equivale a una matriz de datos, con coordenadas (X,Y,Z), donde X y Y son los valores de la ubicación espacial de cada celda de 10m x 10m y Z es el valor para la celda de cada uno de los factores mencionados. En total, se ha dividido el área urbana de la ciudad de Manizales en 609.426 celdas de 10mx10m, organizadas en 1172 filas y 1712 columnas, lo cual significa que cada mapa de los enumerados en el capítulo anterior, es en realidad una matriz de datos de 609.426 filas por 3 columnas (X, Y, Z).

Para efectos de cálculos posteriores, se reunieron en una sola matriz los factores a analizar, obteniendo una matriz de 609.426 filas por 29 columnas. Esta matriz constituye estadísticamente la población sobre la cual se aplicarán diferentes procedimientos de análisis para interpretar la problemática de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en el entorno urbano y generar los mapas ya mencionados.

Para realizar esta zonificación se ha tomado como punto de partida la experiencia propia, con el argumento de que si en una región con ciertas condiciones específicas, se presentaron en el pasado eventos de movimientos en masa, es posible, que en otros sitios, bajo las mismas condiciones, eventos similares se repitan. Por este motivo, es necesario utilizar una muestra de trabajo que involucre aquellos puntos dentro del terreno de los cuales se tengan evidencias de deslizamientos anteriores, documentados con sus respectivas coordenadas (X,Y). Dicha muestra debe estar formada por un número similar de individuos (celdas o unidades de terreno, en este caso) de las poblaciones estable (sin movimientos en masa)

e inestable (con movimientos en masa). Con esto, se evita la dependencia estadística de una de las poblaciones y es condición necesaria para asegurar una óptima clasificación de los individuos, es decir, que exista una probabilidad origen y un error de clasificación igual para cada individuo de ambas poblaciones. Para el caso de la ciudad de Manizales, se dispone de una muestra de 346 datos, 173 puntos estables del terreno, y 173 con movimientos en masa registrados en el año 2003: 129 entre el 18 y 19 de marzo, 43 en octubre y 1 en diciembre, período de tiempo particular por la cantidad de eventos.

### ***2.3.2 Análisis discriminante y selección de la función discriminante***

El análisis Discriminante es útil para situaciones cuando se quiere construir un modelo predictivo con un grupo de variables, basado en las características observadas de cada caso. El procedimiento genera una función discriminante basado en las combinaciones lineales de las variables de predicción que proporcionan la mejor discriminación entre los grupos (en este caso 2: celdas estables y celdas inestables del terreno).

La obtención de la función discriminante pasa por un proceso de síntesis de un espacio multidimensional en el que se encuentra distribuido el conjunto de datos, convirtiéndolo en espacio euclidiano y definiendo un nuevo sistema de coordenadas cartesianas (factores). Este nuevo espacio trata de describir la dispersión de la nube de puntos (muestra) por medio de sus direcciones principales. Una vez establecido este nuevo espacio, los individuos de cada población tienen sus coordenadas situadas sobre los n ejes factoriales que definen las direcciones principales, generándose un centro de gravedad para cada población (centroide). La mayor o menor proximidad de cada uno de los individuos al centro de gravedad de las poblaciones (estable/inestable), permite su clasificación. Para mayor información sobre el análisis puede consultarse los trabajos de David et al (1977), Lebart et al (1982), Dillon y Goldstein (1986) y Cuadras (1991).

En el análisis estadístico multivariante de tipo discriminante se deben seguir los siguientes pasos (Baeza, 1994; Baeza y Corominas, 1996):

Comprobación del ajuste a una distribución normal de todas las variables cuantitativas mediante el Test de Kolmogorov-Smirnov a un nivel de confianza del 5%. Las variables que no presentan una distribución normal son transformadas a distribuciones lognormales.

Aplicación del Análisis Factorial de Componentes Principales para determinar dependencias entre variables.

Aplicación de los tests T-test y One-Way (que analizan medias y varianzas) para determinar relaciones entre las variables y la inestabilidad.

Selección de las variables independientes con el nivel de significancia más alto para el análisis discriminante.

Aplicación del análisis discriminante por pasos (Agtergerg, 1974) y selección de la función discriminante final.

Mediante el paquete estadístico SPSS se realizaron los diferentes pasos del análisis mencionado. Se obtuvieron 9 factores principales que intervienen en la sectorización de movimientos en masa. En la Tabla 4 se presentan los pesos de cada variable, resaltando los valores por encima de 0.4, utilizado el método de Componentes Principales con Rotación Varimax, para ver con mayor claridad la influencia de las variables dentro de cada factor.

**Tabla 4.** Matriz de Componentes Rotados. Rotación Varimax

	Componente o Factor								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>DTMFill</b>	-0.180	-0.227	0.148	-0.013	-0.196	-0.098	<b>0.724</b>	0.051	0.009
<b>Pend</b>	-0.107	<b>0.920</b>	-0.224	-0.073	0.074	-0.044	-0.043	0.060	-0.047
<b>PendT</b>	-0.105	<b>0.928</b>	0.042	-0.074	0.063	-0.053	-0.018	0.110	-0.095
<b>Aspect</b>	-0.074	-0.023	-0.048	0.005	-0.029	0.008	0.124	-0.030	<b>0.845</b>
<b>Insol</b>	0.107	<b>-0.585</b>	<b>0.502</b>	0.067	0.034	0.036	0.264	0.268	-0.094
<b>Rugos</b>	0.059	-0.146	<b>0.779</b>	0.019	0.041	-0.017	0.184	0.278	-0.100
<b>Curvar</b>	-0.038	-0.031	<b>-0.889</b>	0.003	0.106	-0.021	0.056	0.331	-0.055
<b>PerfL</b>	0.013	0.005	<b>0.905</b>	0.007	-0.102	0.023	-0.016	-0.150	0.009
<b>PerfT</b>	-0.102	-0.103	-0.205	0.036	0.046	0.004	0.158	<b>0.752</b>	-0.178
<b>Acuena</b>	-0.024	-0.033	0.002	0.011	-0.058	<b>0.980</b>	-0.024	0.022	-0.001
<b>Long</b>	-0.034	-0.066	0.022	-0.022	-0.054	<b>0.975</b>	-0.049	-0.038	0.028
<b>Pendm</b>	-0.100	<b>0.708</b>	0.171	-0.150	-0.044	0.002	-0.176	-0.329	0.127
<b>UsosS</b>	<b>-0.790</b>	0.104	-0.020	-0.134	-0.056	0.013	-0.017	0.035	0.151
<b>RetiroC</b>	-0.042	0.034	0.038	-0.098	0.327	0.326	0.157	-0.367	-0.211
<b>Fms</b>	0.393	0.029	0.020	0.014	0.080	0.033	<b>0.638</b>	0.029	0.155
<b>PAnual</b>	0.095	0.034	-0.003	0.063	<b>0.562</b>	-0.110	-0.363	0.016	-0.003
<b>Dnethab</b>	0.148	-0.105	0.014	<b>0.953</b>	0.060	-0.009	-0.023	0.037	0.015
<b>Dbruthab</b>	0.081	-0.015	-0.093	0.051	<b>0.842</b>	-0.027	-0.072	0.020	0.007
<b>Hab50m</b>	<b>0.752</b>	-0.096	0.013	<b>0.460</b>	0.050	-0.042	0.063	-0.111	-0.151
<b>Dnetviv</b>	0.151	-0.116	0.016	<b>0.948</b>	0.065	-0.010	-0.024	0.040	0.017
<b>Viv50m</b>	<b>0.775</b>	-0.112	0.014	<b>0.443</b>	0.050	-0.043	0.070	-0.109	-0.135
<b>BufferV</b>	<b>0.476</b>	-0.022	-0.046	-0.133	-0.053	0.001	-0.166	0.302	0.153
<b>Estrato</b>	<b>0.557</b>	-0.162	0.130	-0.090	0.198	-0.038	-0.008	0.007	0.195
<b>Dzonastto</b>	<b>-0.547</b>	-0.248	-0.063	-0.058	-0.257	-0.058	<b>0.561</b>	-0.112	0.035
<b>ObrasEstab</b>	0.080	0.078	0.140	-0.004	0.336	-0.005	-0.160	<b>0.448</b>	0.238
<b>AMHGral</b>	0.085	0.048	-0.070	0.049	<b>0.776</b>	0.000	0.068	0.061	-0.037

La función discriminante final que a partir de la serie de factores arrojará una clasificación de celdas entre estables e inestables, según el análisis discriminante realizado es:

$$DISC = -0.014*UsosS+0.525*RetiroC+0.001*Dnethab-0.001*Dbruthab+0.541*BufferV+0.000*Dzonastto+0.828*ObrasEstab+0.009*AMHGral+2.852*PendT-1.420 \quad (1)$$

Esta función acierta en clasificar el 87.3% de las celdas con roturas, el 78.6% de las celdas estables, y el 82.9% del total de celdas consideradas en el estudio, lo cual da una idea de los márgenes de error que se obtendrán al aplicar este procedimiento. Es de anotar que con una muestra mayor, producto de una investigación posterior, posiblemente estos valores de aciertos y correcta clasificación de celdas se incrementen, haciendo más confiable la función.

### 2.3.3 Red Neuronal Artificial para Predicción de Deslizamientos

Considerando la existencia de no-linealidad en las relaciones de las variables involucradas en el fenómeno estudiado, se ha aplicado un procedimiento que tenga en cuenta este tipo de relaciones entre variables, las redes neuronales artificiales.

En nuestro caso, la red debe aprender a relacionar los valores de las variables predictoras con el correspondiente estatus de estabilidad o inestabilidad de cada celda. En la fase de propagación, se presenta a la capa de entrada de la red los valores de las 26 variables predictoras correspondientes a cada celda de entrenamiento. Esta información se va propagando

a través de todas las capas superiores hasta generar una salida. Se compara el resultado obtenido con la salida que se debería obtener - 0 si la celda es estable y 1 si es inestable -, y se calcula el error que comete la neurona de la capa de salida. En la fase de adaptación, este error se propaga hacia atrás, capa por capa, recibiendo cada neurona un error que describe su aporte relativo al error global que comete la red. Basándose en el valor del error recibido, se reajustan los pesos de conexión de cada neurona, de manera que la siguiente vez que se presenten los valores del mismo sujeto, la salida esté más cerca de la deseada, es decir, el error disminuya.

Un perceptron multicapa con dos capas ocultas podría, en ese caso, ofrecer un buen rendimiento, pues es un mapeador universal. Los matemáticos pueden demostrar que una red de este tipo, siempre que el tiempo de entrenamiento y el número de neuronas en cada capa no esté restringido, tiene la posibilidad de resolver cualquier problema. El número de neuronas de la capa de entrada está determinado por el número de variables involucradas en el estudio. La función de cada una de las neuronas de la capa de entrada es recibir y transmitir a la siguiente capa el valor de cada una de las variables. Por otra parte, el número de neuronas de la capa de salida está sujeto a la función de la red: para tareas de clasificación, la capa de salida tendrá tantas neuronas como categorías o clases tenga el problema; En el presente caso, existirá sólo una neurona de salida que arrojará valores entre cero (0) si la celda estudiada es estable y uno (1) si es inestable. No existe un criterio establecido para decidir el número de neuronas de la capa (o capas) intermedia u oculta. Según el problema de sobreentrenamiento, lo preferible es usar el menor número de neuronas ocultas con los cuales la red presente un buen comportamiento (Masters: 1993; Smith: 1993; Rzepoluck: 1998).

Con lo anterior, evaluando el rendimiento de diferentes arquitecturas en función de los resultados arrojados por el grupo de validación y de test, se seleccionó una red neuronal compuesta por dos capas intermedias, una capa de entrada y una capa de salida. 26 neuronas en la capa de entrada correspondientes a 26 variables de entrada, 18 neuronas en la primera capa intermedia y 24 neuronas en la segunda, 1 neurona en la capa de salida (Figura 6). Esta configuración permitió alcanzar la convergencia (valor límite, hasta el cual los pesos permanecen estables) en 2326 iteraciones o ciclos de aprendizaje, momento en el cual se decidió parar el entrenamiento.

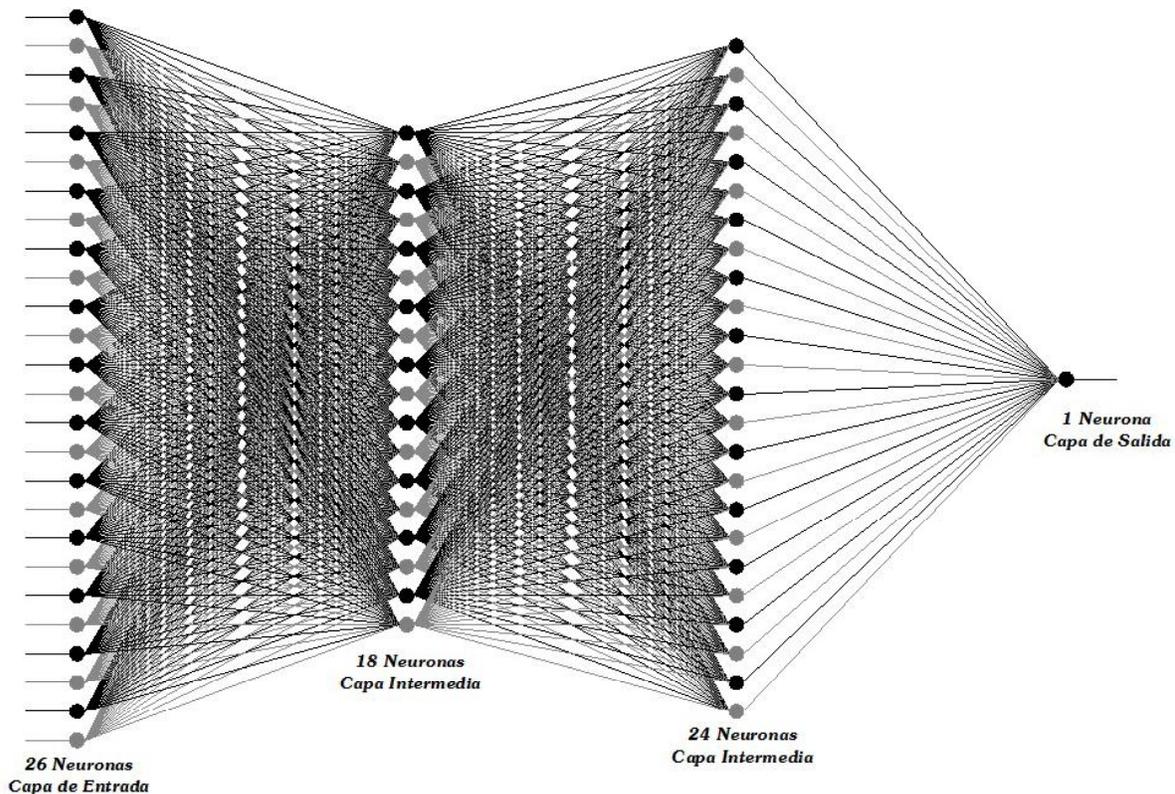


Figura 6. RNA de 2 capas intermedias

A la red neuronal así obtenida se presentaron los datos de test, arrojando resultados satisfactorios. La tabla muestra la respuesta obtenida por la red neuronal para los 70 datos de test disponibles. Puede verse que de los 35 datos correspondientes a celdas inestables ( $Var\_agrup=1$ ), sólo fueron clasificados de manera errónea 4, acertando en el 88.6% de los casos. En el caso de celdas estables se encontraron 8 datos clasificados erróneamente.

En pro de la discusión y mejoramiento de estas metodologías, se debe mencionar que en realidad, desde los datos de entrada existe incertidumbre, pues se tienen clasificaciones de celdas con roturas (1) o celdas estables (0), pero se desconocen estados intermedios. Lo ideal (si fuera posible) sería tener una muestra con diferentes estados, que permitiera reconocer valores entre los límites. En cualquier caso, se prefiere un modelo que tenga buena predicción sobre celdas inestables, pues la clasificación de una celda estable como inestable está del lado de la seguridad, mientras que el caso contrario constituiría un error.

Se calculó la medida de sensibilidad para cada variable predictora sobre la presencia o ausencia de deslizamientos. En la figura 7 se presentan los valores de la sensibilidad de las variables en la salida de la red neuronal. De esta manera, puede observarse que los factores con más influencia en la predicción de deslizamientos son sólo 14 de los 26 iniciales. Como ejemplo puede tomarse la variable PendT (Figura 8). Cuando dicha variable toma valores cercanos a cero (terreno llano), la salida de la red se acerca a cero (poca probabilidad de movimientos en masa). A medida que se aumenta el valor de la variable de entrada PendT, el valor de la salida de la red también se va incrementando. Finalmente, cuando PendT toma valores cercanos a 1 (pendiente de 45°), el valor arrojado por la red es alto (cerca de 0,7), es decir, inestabilidad. Por lo anterior, es posible afirmar que la variable PendT está relacionada con la salida de la red, y por ello, es un predictor del estatus de estabilidad de las laderas. La variable que más sensibilidad refleja en la salida de la red es Dzonasto, que representa la distancia desde cada punto del terreno a la obra de tratamiento más cercana; cuando la distancia a la zona de tratamiento toma valores bajos, la salida de la red refleja valores igualmente reducidos, indicando estabilidad en la celda, a medida que estos valores aumentan, también lo hace la inestabilidad.

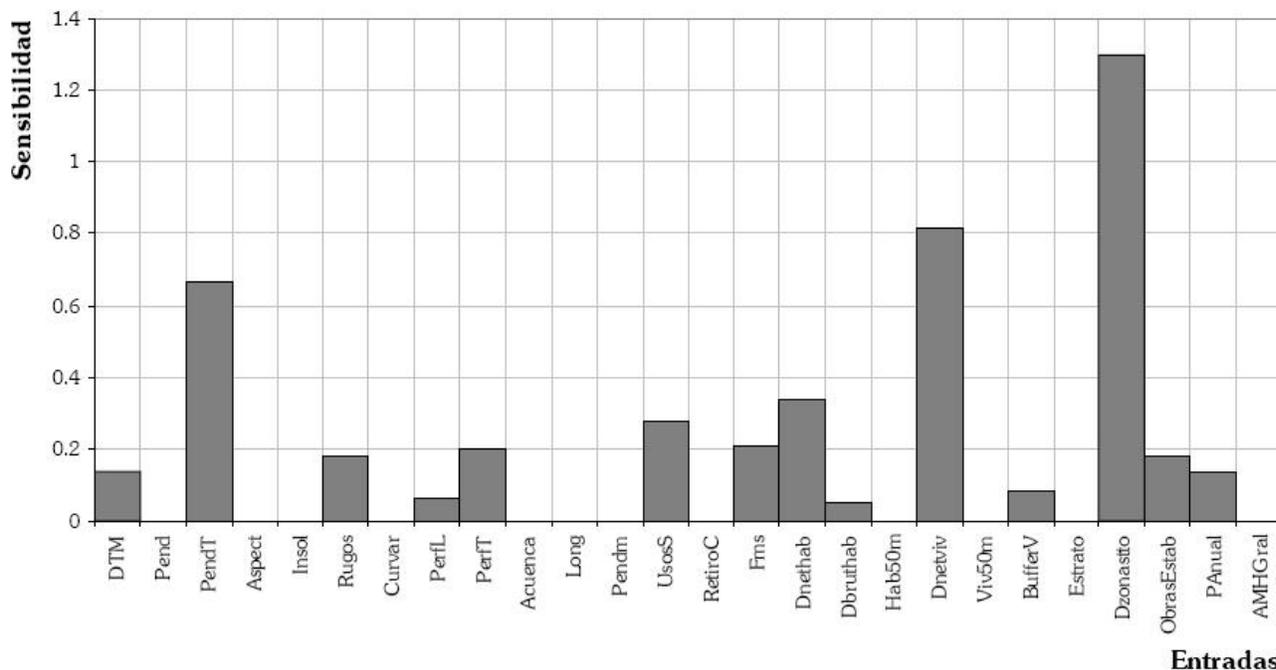
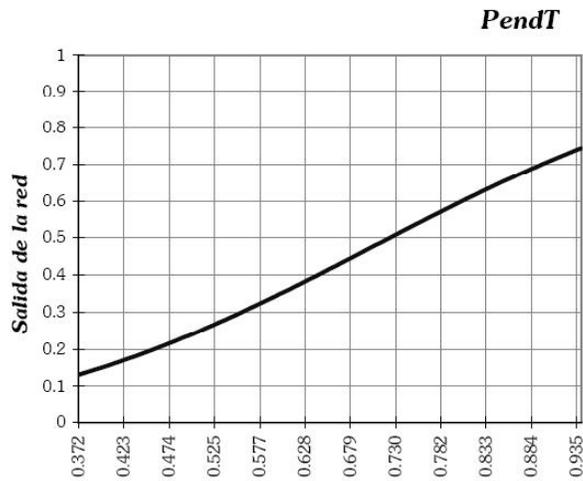


Figura 7. Sensibilidad de las variables de entrada frente a la salida de la RNA



**Figura 8.** Sensibilidad de la variable PendT (pendiente del terreno) frente a la salida de la RNA

Con este procedimiento se llega a clasificar eficientemente un 88,6% de las celdas con roturas, lo cual es prueba de un rendimiento satisfactorio, más aún cuando se trata de identificar sectores con mayor susceptibilidad de deslizamientos. El desempeño de una red neuronal de este tipo puede incrementarse aumentando el número de datos de entrenamiento, para que el modelo pueda establecer los pesos adecuados de cada neurona teniendo más casos disponibles. En realidad, los datos utilizados en este trabajo constituirían solo una pequeña parte de todos aquellos que pudieran encontrarse con una adecuada búsqueda. Recuérdese que se toman en consideración sólo los puntos sobre el mapa de la ciudad de Manizales que resultaron afectados por movimientos en masa en el año 2003. Sin embargo, con análisis temporales de fotografías aéreas de años anteriores, esta base de datos, y con ello el mejor ajuste de la red neuronal, seguramente podría incrementarse sustancialmente.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Elaboración del Mapa de Riesgo Directo

A partir de la función discriminante obtenida por el procedimiento descrito, o a partir del análisis de redes neuronales, es posible calcular para cada uno de los puntos en los cuales se dividió el área urbana de Manizales, un Nivel de Riesgo Directo asociado. Es posible calcular un listado de valores para cada punto, el cual, al ser asociado a sus correspondientes coordenadas, constituye el insumo principal para elaborar un mapa en cualquier Sistema de Información Geográfica disponible (Valores X, Y, y dato asociado Z).

Para la elaboración del mapa se ha optado por dividir la serie en intervalos iguales según el histograma de frecuencias de los datos, de manera que cada uno de los rangos contenga igual cantidad de datos. El mapa así obtenido (Figura 9) zonifica a la ciudad según su mayor o menor susceptibilidad a movimientos en masa. Se obtiene una sectorización a nivel de resolución de celda de 10m x 10m. Este mapa indicará el lugar donde es factible (con los márgenes de error mencionados: cerca del 80% de acierto en clasificación de celdas inestables) encontrar movimientos en masa (zonas rojas), y los lugares más estables (zonas verde claro).

Se han generado dos mapas; uno por cada método empleado, en los cuales, la ubicación de áreas críticas es similar, variando solamente la extensión de las mismas, la cual aparece incrementada en el método de análisis discriminante, haciendo suponer que se trata de una aproximación más gruesa que aquella obtenida con la red neuronal artificial. En la Figura 10, a manera de comparación, se muestra un sector de la ciudad: la comuna 2; en la parte izquierda aparecen las 9 categorías de riesgo (9 rangos iguales, según el histograma de frecuencias de los datos), arriba para el método de análisis discriminante y en la parte inferior para la red neuronal; a la derecha se sintetizan los datos en tres categorías, con el mismo razonamiento. Resulta claro por simple vista que los mapas del lado derecho se corresponden, variando, como ya se dijo, la extensión de las áreas oscuras, aunque no su ubicación.

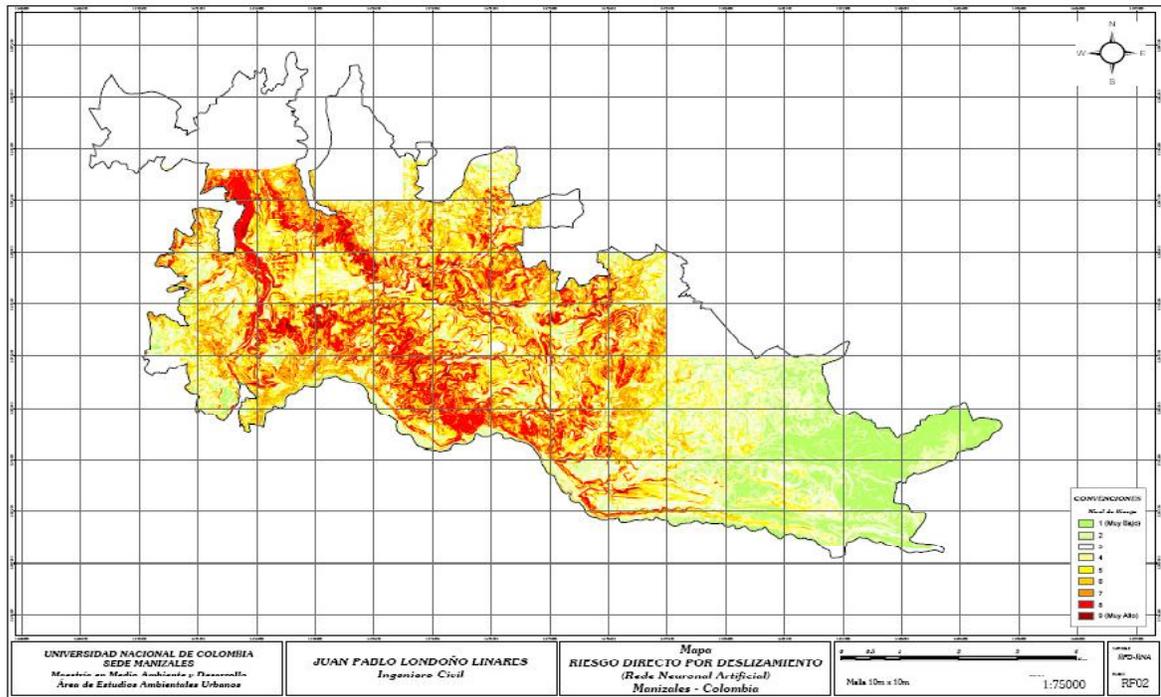


Figura 9. Mapa final de Riesgo Directo: Zonificación de Riesgo por Deslizamientos

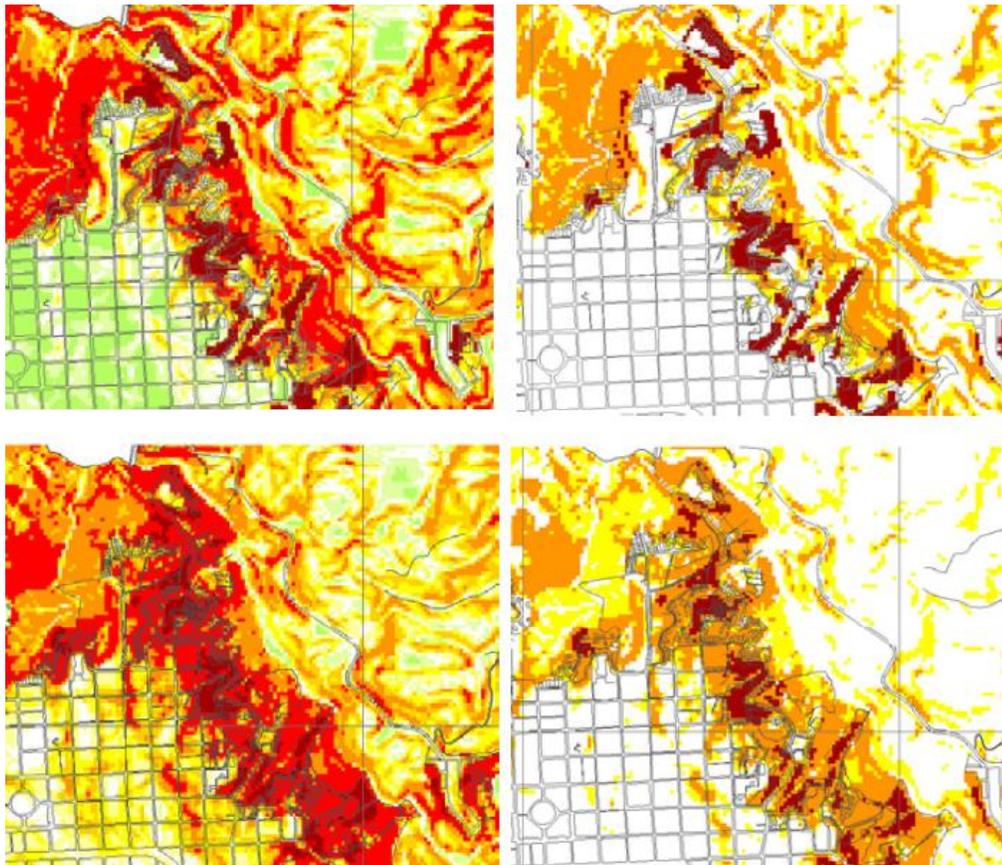


Figura 10. Comparación de resultados de Riesgo Directo

### 3.2. Consideraciones Complementarias

Como complemento necesario para establecer un Sistema de Prevención de Movimientos en Masa es necesario evaluar detalladamente el evento detonante del fenómeno, en este caso, la lluvia. Una evaluación detallada de los umbrales que establecen el límite sobre el cual la precipitación caída generaría deslizamientos, es difícil e implica precisión en los datos de ocurrencia de deslizamientos y series históricas amplias de precipitación en diferentes sectores de la ciudad. Para el área de estudio este tipo de información apenas comienza a levantarse. Se tienen desde el año 2003 unas series de datos de precipitación con suficiente resolución - registros de lluvia cada 5 minutos -, por un lado, y de otra parte, se conocen las fechas en las cuales han ocurrido numerosos eventos de deslizamientos detonados por lluvias en la ciudad para el mismo año. Con esta información es posible lograr de manera preliminar algunos acercamientos a las tendencias que pudieran describir la dinámica lluvias - deslizamientos, las cuales deberán ser corroboradas por futuros estudios. Se ha hecho un análisis preliminar con la distribución temporal de la lluvia diaria y la lluvia antecedente para diferentes períodos de tiempo: 3 días, exponencial de 3 días, 5 días, 7 días, exponencial de 7 días, exponencial de 15 días, 25 días, exponencial de 30 días, desde el 01 de enero de 2003 hasta el 30 de septiembre de 2005. Para ese período de tiempo se conoce la cantidad de deslizamientos presentados en la ciudad y las fechas correspondientes (Marzo, Octubre y Diciembre de 2003).

De la simple inspección de los gráficos elaborados resulta evidente que para la ciudad, con los datos disponibles, el valor que más parece apropiado como relación entre lluvia y deslizamientos es el de lluvia antecedente de 3 días. Es evidente que cuando este valor supera los 100 milímetros, se presentan eventos de movimientos en masa extraordinarios (Figura 11).

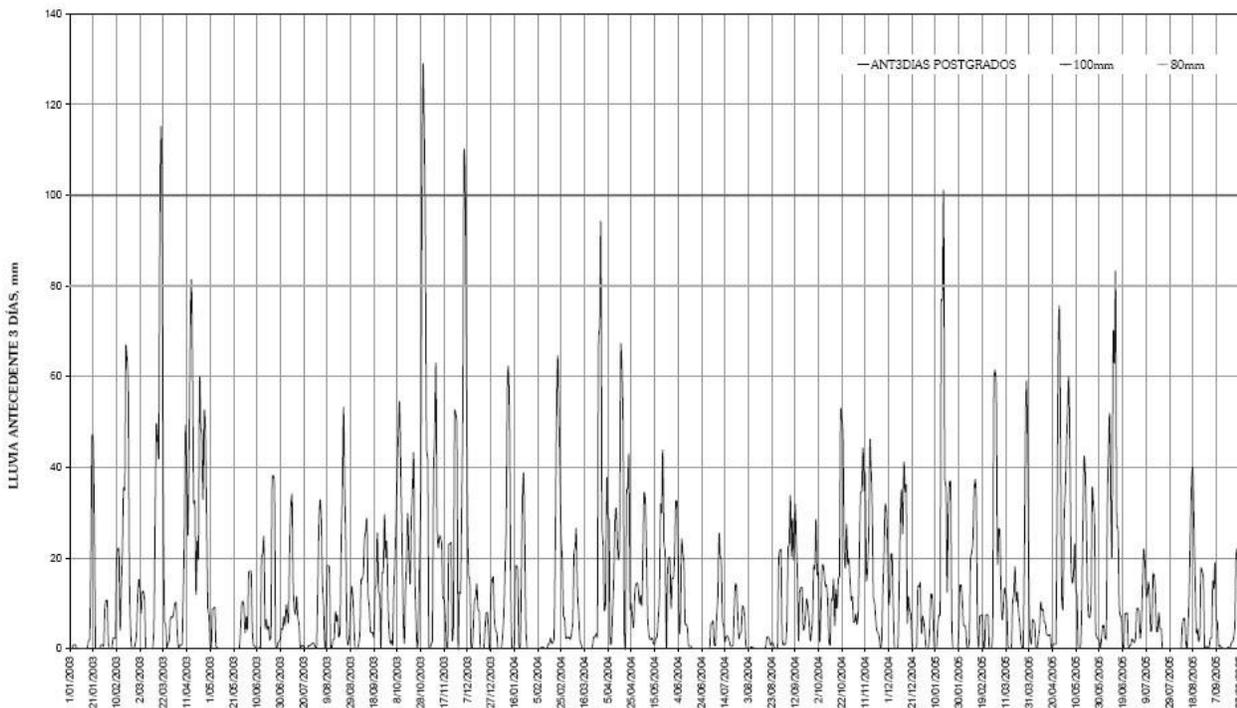


Figura 11. Cálculo de umbrales de lluvia crítica detonante de movimientos en masa

## 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha mostrado en sus términos más generales, una manera de evaluar el riesgo a partir de información disponible, motivo por el cual, la creación de un mapa detallado que incorpore conceptualmente la teoría existente es difícil de elaborar dada la escasez de datos y la dificultad en sus mediciones. Cuando se considera, por ejemplo, el riesgo como la probabilidad de pérdida durante un período de tiempo dado, se hace necesario evaluar o cuantificar el grado de pérdida esperada (pérdida económica, pérdida social, etc.), sin embargo, esta evaluación se torna difícil cuando no existen lineamientos teóricos suficientes que indiquen cómo validar la vida y las actividades de la población

(¿cuánto, en términos económicos cuesta una vida humana?). Por esta razón, una evaluación de riesgo como la aquí planteada se limita a indicar "donde" pueden ocurrir las pérdidas e incluso (con una profundización mayor del estudio) indicaría, en términos aproximados, "cuándo" es factible que se presente. No obstante, la evaluación económica o valoración de estas pérdidas ("cuánto"), escapa a los alcances de un trabajo de este tipo y requiere la participación y el consenso de profesionales de disciplinas como la economía, la sociología, etc. Otra característica importante que debe tomarse en cuenta en el caso de establecer un programa de evaluación de riesgos continuado - por ejemplo, en las administraciones municipales - es el carácter dinámico que tiene el concepto. Mediante la intervención antrópica y las dinámicas sociales mismas, se intervienen la amenaza y la vulnerabilidad, haciendo variar los niveles de riesgo en el tiempo. Estas fluctuaciones de niveles de riesgo son susceptibles de medirse haciendo evaluaciones como la aquí planteada en diferentes períodos de tiempo (la población, las viviendas, la topografía, y la mayoría de los factores mencionados en este artículo cambian con el tiempo), es decir, actualizando los mapas de riesgo obtenidos, sería factible tener un acercamiento más riguroso con el concepto de riesgo (variable en el tiempo) y medir la gestión que desde los niveles administrativos se hace del riesgo urbano.

Por otra parte, este trabajo demostró que en temas como la zonificación de riesgos, específicamente, y en general, en temas relacionados con la sostenibilidad de asentamientos humanos, los Sistemas de Información Geográfica SIG juegan un importante rol debido a su elevado poder de cálculo y sus posibilidades de almacenar, actualizar y manipular datos. Ésta herramienta, unida a paquetes de análisis de información estadística y programas de modelación numérica para el tratamiento de datos, son en la actualidad los medios necesarios para que los conocedores de estos temas realicen sus investigaciones y obtengan conclusiones precisas y localizadas.

Como punto de discusión final, cabe anotar que la una de las vías para obtener ciudades y municipios más seguros, que sean sostenibles en el tiempo, es monitorear el estado actual de dichos centros urbanos, construir modelos de evaluación y sistemas de gestión útiles por parte de los tomadores de decisiones, en lo posible con técnicas rigurosas desde el punto de vista científico. Solo de ésta manera se llevarán las teorías que han surgido en los últimos años en los campos de la sostenibilidad a terrenos prácticos y útiles para la gente del común.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Agencia Española de Cooperación Internacional, AECI su financiación a través de la beca MAEC-AECI para la realización de los estudios doctorales del autor.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Almenara J, González JL, García C, Peña P. 1998. ¿Qué es el análisis de componentes principales? *Jano*; 1268:pp. 58-60
- Baeza, C. 1994. Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica ETSECCPB-UPC
- Bishop, C.M. 1995. *Neural networks for pattern recognition*. New York: Oxford University Press
- Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I.; Wisner, B. 1996. Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres. LARED / ITDG Bogotá. Primera edición. En: [http://www.desenredando.org/public/libros/1996/vesped/vesped-todo\\_sep-09-2002.pdf](http://www.desenredando.org/public/libros/1996/vesped/vesped-todo_sep-09-2002.pdf).
- Cardona, O.D. 2001. Estimación Holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Carrara, A. 1983a. Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Math. Geology* 15. pp. 403-426.
- Carrara, A. 1983b. Geomathematical assessment of regional landslide hazard. 4th Int. Conf. Applic. Stat. Probabil. In Soil and Estruct. Eng. Firenze. pp. 3-27.
- CORPOCALDAS 2005. Base de Datos de Deslizamientos Ocurridos en el año 2003. Sistema de Información Ambiental Regional SIAR. (Tablas con coordenadas .dBF), Corporación Autónoma Regional de Caldas.

- CORPOCALDAS 2005. Base de Datos de Deslizamientos Ocurredos en el año 2003. Unidad de Recursos Naturales, Corporación Autónoma Regional de Caldas (Tablas de datos .xls).
- Cuadras, C.M. 1991. Métodos de análisis multivariante, Colección estadística y análisis de datos. Ed. Eunibar. 664 P.
- Chardon, A.C. 2002. Un Enfoque Geográfico de la Vulnerabilidad en Zonas Urbanas Expuestas a Amenazas Naturales. El Ejemplo Andino de Manizales - Colombia. Editorial Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.
- Hilera, J.R. y Martínez, V.J. 1995. Redes Neuronales Artificiales: Fundamentos, modelos y aplicaciones. Madrid: Ra-Ma.
- Lavell, A. 1992. Ciencias Sociales y desastres naturales en América Latina: un encuentro inconcluso, en Maskrey, A. (1993), Los desastres no son naturales, LA RED, Bogotá.
- Lavell, A. 1994. Viviendo en Riesgo: Comunidades Vulnerables y Prevención de Desastres en América Latina. LA RED - FLACSO - CEPREDENAC. Primera edición. Tercer Mundo editores.
- Lavell, A. 1996. Degradación Ambiental, Riesgo y Desastre Urbano. Problemas y Conceptos: Hacia la Definición de una Agenda de Investigación. Ciudades en Riesgo, M. A. Fernández (Ed.), La RED, USAID.
- Lavell, A.; mansilla, E. 2003. Del Concepto de Riesgo y su Gestión al Significado y Formas de la Intervención Social. Proyecto de Gestión de Riesgo de Desastres con Enfoque de Seguridad Alimentaria. PGRD COPASA GTZ. Arequipa Perú.
- Lavell, A. 2003a. I. Internacional Agency Concepts and Guidelines for Disaster Risk Management; II. The Transition from Risk Concepts to Risk Indicators, IADB/IDEA Programa de Información e Indicadores para la Gestión de Riesgos, Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalmzl.edu.co>
- Londono, J.P. 2006. Evaluación Holística de Riesgo Frente a Deslizamientos en Áreas Urbanas Andinas, Universidad Nacional de Colombia, Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Tesis. Manizales.
- Maskrey, A. 1998. Navegando entre brumas. La aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgo en América Latina. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina LA RED. Primera edición. Encontrado en: [http://www.desenredando.org/public/libros/1998/neb/neb\\_todo\\_nov-09-2002.pdf](http://www.desenredando.org/public/libros/1998/neb/neb_todo_nov-09-2002.pdf)
- Mayorga, R. 2003. Determinación de Umbrales de Lluvia Detonante de Deslizamientos en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias. Programa de Postgrado Magister en Meteorología.
- Mulder, H.F.H.M. 1991. Assessment of landslide hazard. Nederlandse Geografische Studies. PhD Thesis, University of Utrecht, 150 P.
- Naranjo J.L., Ríos, P.A. 1989. Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos. Manizales: Revista Universidad de Caldas Vol 10 No. 1-3. Enero-Diciembre.
- Ripley, B.D. 1996. Pattern recognition and neural networks. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rumelhart, D.E.; Hinton, G.E y Williams, R.J. 1986. Learning internal representations by error propagation. En: D.E. Rumelhart y J.L. McClelland (Eds.). Parallel distributed processing Cambridge, MA: MIT Press. pp. 318-362.
- Rzempoluck, E.J. 1998. Neural network data análisis using Simulnet. New York: Springer-Verlag.
- Santacana, N. 2001. Análisis de la Susceptibilidad del Terreno a la Formación de Deslizamientos Superficiales y Grandes Deslizamientos Mediante el Uso de Sistemas de Información Geográfica. Aplicación a la Cuenca Alta del Río Llobregat. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Smith, M. 1993. Neural networks for statistical modeling. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Terlien, M.T.J. 1996. Modelling spatial and temporal variations in rainfall - triggered landslides. Enschede (Holanda), Trabajo de doctorado (Ingeniero Geógrafo). International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences ITC. 254 P.
- Velásquez, A. y Rosales, C. 1999. Escudriñando en los desastres a todas las escalas. Primera parte [http://www.desenredando.org/public/libros/1999/edete/edte1\\_v.1.0-ago-30-2001.pdf](http://www.desenredando.org/public/libros/1999/edete/edte1_v.1.0-ago-30-2001.pdf) Segunda parte [http://www.desenredando.org/public/libros/1999/edete/edte2\\_v.1.0-ago-30-2001.pdf](http://www.desenredando.org/public/libros/1999/edete/edte2_v.1.0-ago-30-2001.pdf)