

Modelización de problemas ambientales en entornos urbanos utilizando sistemas de información geográfica y métodos multivariantes

Juan Pablo Londoño-Linares¹, Paula Andrea Cifuentes-Ruiz²,
José Juan de Felipe Blanch³

Subgrupo de Medida y Modelización de la Sostenibilidad. Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. Universidad Politécnica de Cataluña

(1) Doctorando Programa de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo. Universidad Politécnica de Cataluña. Becario Agencia Española de Cooperación Internacional AECI. juan.pablo.londono@catunesco.upc.edu

(2) Doctorando Programa de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo. Universidad Politécnica de Cataluña. paula.cifunte@catunesco.upc.edu

(3) Doctor por la UPC. Profesor de la Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. felipe@mmt.upc.edu

Resumen

En el presente documento se hace una descripción general de una propuesta metodológica para la modelización de problemas ambientales urbanos, utilizando una combinación de Sistemas de Información Geográfica y técnicas numéricas para generar escenarios probables de impacto. Se presenta como ejemplo una aplicación específica a la creación de mapas de escenarios de susceptibilidad a deslizamientos de tierra en una ciudad intermedia colombiana.

Específicamente, se hace una descripción breve de la necesidad de buscar métodos transversales de análisis para las realidades complejas que constituyen los entornos urbanos, uno de ellos (entre muchos existentes) constituido por el fenómeno de deslizamientos de tierra en ciudades andinas, y a partir de ello, se propone una metodología basada en el análisis multifactorial de causas, que aprovecha experiencias pasadas para proponer escenarios futuros posibles, aprovechando las ventajas ofrecidas por los Sistemas de Información Geográfica para manejar información, y las Redes Neuronales Artificiales para clasificar datos.

Descriptor: Sistemas de Información Geográfica SIG, Modelización Urbana, Sostenibilidad, Planificación Territorial, métodos multivariantes.

* * *

Title: Modeling of urban environmental problems using geographic information systems and multivariate methods.

Abstract: In the present work a methodological proposal is presented for modeling urban environmental problems. It combines Geographic Information Systems and numerical techniques in order to generate probable impact scenarios. Additionally, a specific application is presented as an example oriented to creating susceptibility maps of landslides risk scenarios in an intermediate Colombian city.

More specifically, the necessity of finding transversal methods to analyze the complex urban realities is presented. Among these realities, we pick up the possibility of landslides in Andes cities and a whole methodology based on a multifactorial cause analysis is introduced. This methodology takes into account past experiences to propose possible futures scenarios, relying on both Geographic Information Systems to store data and on Artificial Neural Networks to classify them.

Keywords: Geographic Information Systems GIS, Urban Modeling, Sustainability, Territorial Planning, Multivariate Methods.

1 Introducción

Los estudios sobre temas ambientales pertenecen a un nuevo paradigma del conocimiento que se toca con el área de estudio de las Ciencias Sociales en lo que respecta a escudriñar los efectos de la acción humana sobre el entorno y viceversa. Esto se explica porque la generalidad de los problemas ambientales surge de la relación de retroalimentación entre las personas (como colectividad, en asentamientos humanos) y el medio natural. Desde el punto de vista académico algunos estudios tienden a describir los procesos de intervención, otros tratan de interpretarlos; allí están las diferencias conceptuales entre una disciplina dura (*hard*) y una disciplina blanda (*soft*). Con el enfoque que se presenta en este artículo se trata de estar en la posición intermedia, entendiendo que el tema de estudio en la actualidad está en un proceso de gestación, que no existen conceptos definitivos aún, y que además es necesario llegar a la conciliación entre los diferentes planteamientos para elaborar una teoría útil y completa.

La solución o mitigación de cualquier problema de tipo ambiental debe tener como punto de partida el hecho de asumir cada problema como algo real, de dimensiones enormes, y con consecuencias importantes para las sociedades presentes y futuras. Modelizar los diferentes escenarios, llevar la realidad de los entornos urbanos a modelos simplificados para su análisis, constituye el primer paso hacia la búsqueda de soluciones. Cuestionar el presente, las normas, los puntos de vista dominantes en las administraciones municipales, e incluso sostener discusiones sobre los axiomas sociales del devenir diario, son actos que se deberían realizar comprendiendo que los temas ambientales son complejos, que no existen soluciones mágicas, ni expertos absolutos, sino temas importantes que se deben abordar desde el rigor del conocimiento en un entorno de discusión permanente y aporte multidisciplinar.

Como aporte a esta discusión, en este escrito se introduce una metodología para la generación de escenarios prospectivos de problemas ambientales, basada en la utilización de Sistemas de Información Geográfica para búsqueda, generación y manipulación de información multivariante, y métodos de estadística clásica o modelos de inteligencia artificial para el procesamiento de esta información y la generación de modelos predictivos. Se contextualiza todo con el problema ambiental de riesgo frente a deslizamientos de tierra y se proponen escenarios de zonificación (prospectivos) de riesgos para la ciudad Andina de Manizales Colombia.

2 Modelización de Sistemas Urbanos

Necesidad de una visión transversal

Tradicionalmente se han escrito multitud de trabajos relacionados con estudios focalizados en las ciudades, pero en su mayoría presentan la característica de abordar temas sumamente puntuales, para lo cual es suficiente la aplicación del conocimiento individual de un experto en dicho tema. Pese a esto, el devenir normal de las ciudades con sus situaciones complejas evidencia que los enfoques especializados no son suficientes, y que hace falta una visión transversal que pueda

ofrecer alternativas de análisis integrales útiles, aplicables a la búsqueda de soluciones reales a problemas reales, presentes en entornos urbanos.

Dichos problemas han surgido históricamente de las bases de la relación hombre-naturaleza y se pueden vislumbrar incluso en los mismos paradigmas de los cuales se ha valido la ciencia para establecer su edificio de conceptos que explican la realidad de cada época. Asimismo, estas relaciones son el factor que podría explicar gran parte de los enfoques utilizados para la interpretación y estudios de lo urbano.

El primer gran paradigma que utilizó la ciencia es el racionalista mecanicista, propio de la modernidad, elaborado a partir de los trabajos de Newton, Galileo, Descartes, Bacon y otros pensadores a partir del siglo V ac, el cual se caracterizó por los siguientes rasgos: una visión anatómica, concibiendo a las partes como elementos iguales al todo; una plataforma mecanicista, es decir, lineal, enfocada en la relación inmediata de causa efecto; una concepción simplista, no preocupada por las conexiones, enfatizando la simplicidad y el reduccionismo de la complejidad; la búsqueda de la exactitud y lo absoluto y la orientación al presente, asumiendo que el futuro era igual al pasado (CAPRA: 1999; ANGEL-MAYA: 2000)

A partir de este paradigma, se desencadena un proceso de desnaturalización de la sociedad y deshumanización de la naturaleza; se ubica a la sociedad en un plano netamente metafísico y a la naturaleza en uno fisicalista y determinista. Este paradigma condujo a la elaboración de un saber especializado, necesario para legitimar las diferentes disciplinas científicas, aisladas entre sí, y aisladas de los procesos que involucran a las sociedades. El ser humano se analizó aislado de su condición social. Así, este paradigma filosófico científico influyó en los comportamientos de las sociedades, induciendo, entre otras, las siguientes características (CAPRA: 1999; ANGEL-MAYA: 2000):

- La concepción reduccionista de las ciencias, según la cual, el mundo, la naturaleza, y todos los procesos, se asimilan al funcionamiento de una máquina compuesta por partes fragmentables y susceptibles de ser estudiadas y analizadas por separado, llevó a análisis pormenorizados de las diferentes situaciones, perdiendo en muchos casos el contexto de trabajo.
- La confianza ilimitada en la ciencia y la tecnología, capaces de solucionar la mayoría de problemas conocidos, dando vía libre para la sobreexplotación de los ecosistemas, con la promesa de encontrar soluciones en la tecnología a problemas fácilmente previsibles o solucionables por otros medios.
- La súper valorización de los hechos, los datos y la experiencia, sin tener en cuenta la realidad de los fenómenos, condujo a pensar en la existencia de problemas sin solución y a ignorar temas complejos, por estar compuestos de muchas facetas que no presentan soluciones exactas, ni metodologías concretas para su análisis.
- La ausencia de la solidaridad generacional, tanto presente como futura, llevó a la consolidación de escenarios de desigualdad inmensos, como los que se evidencian hoy en

día, especialmente en la vida cotidiana de las ciudades de los países en vías de desarrollo.

Sin embargo, en contraposición a lo anterior, a partir de la segunda mitad del siglo XX, fueron elaborándose conceptos entre las diferentes disciplinas que cuestionaban la esencia misma del paradigma mecanicista. La Teoría General de Sistemas (BERTALLANFY: 1968), Las teorías de la Complejidad (enumeradas en CAPRA: 1999), la Idea de Gaia –según la cual, la Tierra funciona como un organismo vivo (LOVELOCK: 2000)–, la Doctrina del Caos y los Fractales, y principalmente la visión dialéctico-sistémica sobre la sociedad y la naturaleza, fueron conceptos clave para replantear la visión de la realidad desde la ciencia. La dimensión ambiental comenzaba a configurarse como un elemento integrador entre la sociedad y la naturaleza. Se comienza a constituir entonces un “paradigma ambiental” teniendo dentro de sus características las de ser:

- Holístico: al aceptar que los fenómenos del universo están intrínsecamente relacionados en diversos niveles de la totalidad
- Sistémico: al incorporar una perspectiva cibernética en cuanto a la totalidad, la que es estructurada en sistemas de diversa complejidad y jerarquía
- Integrativo – complejo: al concebir a cada sistema, como la unidad dialéctica de las partes, identificada en el plano de la totalidad y aceptando la idea de que tienen la propiedad de estructurarse y organizarse a sí mismos
- Dinámico: al concebir que todas las partes de un sistema están en permanente movimiento, que el organismo o sistema encuentra su estabilidad por la capacidad de adaptación y la búsqueda del equilibrio dinámico y que están en situaciones de una reorganización permanente.

Precisamente esta interpretación “ambiental”, aceptando la teoría de sistemas, las interrelaciones entre factores, la complejidad y el aspecto dinámico de los procesos, es la que debería aplicarse a los diferentes estudios ambientales a nivel urbano, aceptando la necesidad de una visión transversal y multidisciplinaria de la realidad.

A partir de la discusión anterior, y dados los niveles de complejidad y multidisciplinaria que requiere el tema de impactos ambientales y su modelización en el contexto urbano, cualquier estudio se debe realizar en el cuadro de un enfoque sistémico, utilizando métodos cualitativos y cuantitativos. Ante la complejidad del problema y del sistema socio-técnico involucrado en la modelización en entornos urbanos, Cardona (2001, 136) 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 (Smuts 1926), 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 (1994), que separa y reúne, que distingue – sin desunir – y religa”*. (Cardona: 2001, 100ss).

3 Urbanización, degradación ambiental y riesgos derivados

Si se acepta que el concepto de medio ambiente es amplio y no se restringe sólo a la dimensión natural, también se debe concebir la idea de degradación desde un punto de vista igualmente complejo e integrador, haciendo referencia no solamente a los elementos de la “naturaleza”, el medio ambiente natural o el ecosistema, sino a un medio producto de una compleja relación, a formas particulares de interacción entre los elementos del soporte ofrecidos por la “naturaleza” (tierra, agua, aire, etc.) y el ambiente construido socialmente (la ciudad y sus estructuras físicas, patrones sociales y culturales, etc.). La degradación, en este marco conceptual, hace referencia a la totalidad ambiental: lo natural, lo físico y lo social, juntos e interactuando. Además de ser un concepto eminentemente social e histórico, implica, como proceso, el examen del impacto de lo social sobre lo social, del acondicionamiento social del impacto del ser humano sobre lo natural, y del impacto de la naturaleza transformada sobre la sociedad (LAVELL: 1996).

Esta manera de vislumbrar el problema de la degradación ambiental invita a abordar el tema de desarrollo sostenible desde los entornos urbanos y, adicionalmente, establece otro marco de referencia desde un punto de vista humano-ecológico, marcadamente distinto a las corrientes “fiscalistas”, “sociales” o “sociológicas” existentes. La degradación se hace equivalente a un aumento en la vulnerabilidad global de la sociedad, operando sobre los componentes físicos, ecológicos y sociales discutidos por Wilches Chau (1993).

Aunque presente desde hace algún tiempo, la relación entre urbanización, degradación ambiental y riesgos se ha hecho evidente hasta muy recientemente a pesar de que nace con el surgimiento mismo de las ciudades. Los procesos de ocupación territorial y de crecimiento urbano, los patrones de uso del suelo, la falta de regulaciones para la construcción y los severos déficit y obsolescencia de la infraestructura y los servicios básicos, combinados con el crecimiento poblacional y de la pobreza urbana, son, entre otros, factores que aumentan la presión sobre los recursos, exponiendo a una proporción cada vez más creciente de la población de las ciudades a enormes riesgos.

Para los años setenta, ciudades como Lima, Guatemala, México, Río de Janeiro, Delhi, El Cairo,

Manila, etc. se habían vuelto muy vulnerables, con poca capacidad para absorber el impacto de las amenazas o para recuperarse de éstas. Se puede afirmar razonablemente que muchos de los desastres urbanos de los años setenta y ochenta (Managua 1972, Guatemala 1976, México 1985, San Salvador 1986, etc.) fueron causados por una concentración de factores de vulnerabilidad a consecuencia de dichos cambios (MASKREY: 1998).

Si bien el crecimiento de la población urbana no representa en sí mismo un problema, en América Latina, los efectos negativos de este crecimiento están muy relacionados con las dinámicas generadoras de pobreza y de violencia; elementos que propician la aparición de riesgos. Según datos de la Comisión de las Naciones Unidas para Asentamientos Humanos, cerca de 40% de los residentes urbanos de América Latina y El Caribe vive hoy en asentamientos marginales, espontáneos o ilegales. Las ciudades reciben migraciones de población, sin que existan las condiciones apropiadas para la satisfacción de necesidades básicas, y menos aún, las condiciones adecuadas para mantener un entorno con calidad ambiental. La mayoría de los asentamientos marginales están localizados en áreas en las que se convive con problemas identificables: contaminación del suelo, del aire, del agua, procesos de erosión y hacinamiento. En el decenio del 90, las estadísticas regionales muestran que el 65% de las familias pobres vive en zonas urbanas donde no tienen cubiertas las necesidades básicas y sobreviven en condiciones de alta marginalidad – hacinamiento, viviendas inadecuadas, acceso insuficiente al agua potable y a la infraestructura sanitaria – (PNUMA: 2001).

Como consecuencia de lo anterior, en muchos casos es difícil determinar la relación causal de los riesgos de origen natural-antrópico. Así, el riesgo de deslizamiento por ejemplo, aparece como consecuencia, generalmente, del asentamiento de grupos humanos pobres en laderas de fuerte pendiente, inapropiadas para la urbanización, agravándose con la deforestación y el manejo inadecuado de las aguas lluvias y servidas que trae consigo el asentamiento marginal. Sin embargo, la causa de tal deslizamiento no es necesariamente producto de que la población se asiente en lugares peligrosos, sino el hecho de que escogió ese sitio debido a que no tenía otras opciones por la limitación de acceso a tierra urbana habitable.

La situación descrita evidencia la complejidad del problema de degradación ambiental, expuesto claramente en ciudades latinoamericanas, con historias de desastres pequeños, cotidianos y recurrentes. Tal es el caso de los deslizamientos en épocas de lluvia en Colombia, al igual que las inundaciones para los mismos períodos. Este es un ejemplo de degradación ambiental en todas sus facetas. Generalmente los afectados coinciden con las clases sociales menos favorecidas, desempleados, sectores de economía informal, y en algunos casos ilegal, bajos niveles de educación, que verifican el hecho evidente de que existe un trasfondo para la degradación que va más allá de factores sólo “naturales”.

Problemas como los descritos, de enorme complejidad y extensión, requieren de una estrategia integral; de tal manera que con los escasos recursos con que normalmente se cuenta, se pueda mejorar la calidad de vida de los habitantes de centros urbanos y convertirlos en ciudades

sostenibles. Una ciudad sostenible, según Kuroiwa (2003) es aquella **segura (poca vulnerabilidad), ordenada (buena planificación territorial), saludable (libre de contaminación), atractiva** cultural y físicamente, **eficiente** en su funcionamiento y desarrollo, sin afectar al medio ambiente natural, ni el patrimonio histórico-cultural y, como consecuencia de todo ello, **gobernable**. Todos estos atributos que debe contener la ciudad, están orientados a dar bienestar al hombre, mediante obras que se ejecuten en el ámbito municipal.

El reto es enorme, y la investigación, guiada por la búsqueda de soluciones y formulada desde un punto de vista integral y holístico, es imprescindible si se quiere tener preparación para enfrentar la “sociedad del riesgo” que Luhmann (1991) analiza y pronostica (Beck: 1993; para otras consideraciones sobre el riesgo). Esta investigación, por definición, debe ser multidisciplinaria. La complejidad de los problemas, su contenido económico, social, político, cultural, científico y tecnológico harán ineficaces proposiciones o análisis llevados a cabo desde un punto de vista soslayadamente disciplinario. El “riesgo” es una categoría compleja, un interjuego de múltiples elementos, en sí altamente dinámicos y cambiantes (amenazas, amenazas complejas, vulnerabilidad, etc.) (LAVELL: 1996).

El entorno urbano como representación de lo local constituye el área de estudio adecuada para develar las interrelaciones presentes entre diferentes factores y órdenes que contribuyen a la degradación ambiental y la aparición de riesgos cada vez más complejos. De la misma manera, la ciudad es el laboratorio donde convergen visiones y estudios desde diferentes ópticas, lo cual sugiere posibilidades de hacer análisis multivariados, desde una visión integradora.

4 Metodología propuesta: zonificación de escenarios de riesgos

4.1 Propuesta metodológica

Generación y acopio de información con Sistemas de Información Geográfica SIG

Al aplicarse a estudios medioambientales, que son temas en los cuales se involucran múltiples variables, desde aquellas estrictamente naturales, relacionadas con las características físicas del terreno, hasta aquellas sociales o económicas, relacionadas con características de la población, los Sistemas de Información Geográfica tienen una doble tarea: de un lado, permiten la generación de nueva información a partir de un modelo digital de elevaciones del terreno, exclusivamente a partir de un plano de curvas de nivel, en el caso de las variables naturales, y por otro lado, permiten la agregación de la información ya existente, relacionada con los habitantes, como puede ser el caso de información socioeconómica, y la generación de nuevos mapas a partir de la combinación de los existentes.

Para hacer posible el trabajo de análisis de datos posterior se prefiere el formato *raster* en los mapas generados con SIG, por ser éste un formato fácilmente extrapolable a matrices numéricas. Se trata de una representación espacial de matrices; el terreno a ser estudiado es dividido en una cuadrícula, de tal forma que el tamaño de las celdas resultantes sea adecuado para dar una

resolución suficiente al problema que se pretenda estudiar. Cada celda contiene información espacial (coordenadas X y Y) y un dato asociado Z, correspondiente al valor de la celda para cada variable involucrada en el estudio, lo cual en términos matemáticos corresponde a una matriz de los valores Z, con un tamaño de $Y \times Z$.

Obtención de muestras basadas en experiencias anteriores

En general, podría afirmarse que somos conscientes de la gravedad de los problemas ambientales debido a la presencia misma de estos. En otras palabras, si se está estudiando un problema ambiental, es porque éste ya se ha presentado con anterioridad y se quiere buscar soluciones. Esta particularidad lleva implícita una ventaja incuestionable para quienes hacen modelización: existen datos que pueden servir para validar y ajustar los diferentes modelos propuestos, y en el futuro, existirán datos que permitirán verificar su precisión.

El método a emplear consiste entonces en construir un modelo buscando explicar los acontecimientos presentes o pasados que afectan o han afectado al sistema a partir de la experiencia 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.

Las experiencias pasadas a las que se hace referencia, enmarcadas en la representación espacial del terreno mencionada anteriormente, coincidirán solo con algunas de las celdas que componen el área de estudio, pues los impactos ambientales que se busca representar, son eventos puntuales que ocurren en áreas localizadas, y son susceptibles de ser georreferenciados convenientemente. Es por este motivo, que se debe extraer una muestra de la totalidad del terreno bajo estudio, la cual dependerá básicamente de la información de experiencias anteriores disponible.

Análisis de datos y elaboración de modelos

Resumiendo, se tendría información detallada de un área determinada en los siguientes términos: datos asociados a un problema ambiental a estudiar, representados en mapas y matrices, y datos de múltiples factores, relativos a las posibles causas de dichos problemas ambientales.

Una solución posible es generar índices mediante el análisis de componentes principales (ACP) (PEARSON: 1901; HOTELLING: 1933), que sirvan para interpretar conceptualmente la problemática bajo estudio. Dichos índices serán combinaciones lineales de las variables y permitirán el acercamiento a un modelo simplificado de interpretación, restando complejidad a la muestra inicial de datos, perdiendo la menor cantidad de información posible.

Otra opción es la aplicación del Análisis Discriminante, el cual es útil 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 basada en las combinaciones lineales de las variables de predicción que proporcionan la mejor discriminación entre los grupos. Las funciones se generan de una muestra de casos conocida y pueden aplicarse para generar grupos con nueva información (DAVID *et al.*: 1977; LEBART *et al.*: 1982; DILLON y GOLDSTEIN: 1986; CUADRAS: 1991; SPSS: 2004).

Una alternativa más para generar este tipo de modelos es la técnica de Redes Neuronales Artificiales (RNA), la cual presenta ciertas ventajas sobre el procedimiento de Análisis Discriminante: por su parte, el análisis discriminante lineal de la estadística clásica no posee la capacidad de calcular funciones no lineales y, por lo tanto, presentará un rendimiento inferior en tareas de clasificación que involucren relaciones no lineales o complejas entre variables, como puede ser el caso del fenómenos complejos en áreas urbanas.

Las RNA se consideran sistemas adaptativos que aprenden de la experiencia, esto significa que a partir de unos ejemplos ilustrativos, es posible llevar a cabo un entrenamiento sobre una red neuronal para que cumpla una determinada tarea. Mediante este entrenamiento, la red crea su propia representación interna del problema, por este motivo se dice que son auto-organizadas. Posterior a la etapa de aprendizaje, las RNA responden adecuadamente a situaciones nuevas a las que no se habían expuesto anteriormente, es decir, tienen la capacidad de generalizar de casos previos a casos nuevos. Precisamente esta es una de las principales ventajas de la utilización de redes neuronales: si bien existen problemas susceptibles de solucionarse de manera exacta mediante algún algoritmo o procedimiento matemático, no son la generalidad, y lo común es encontrarse con un alto grado de complejidad en los problemas a resolver. Precisamente, estas situaciones son las relacionados con el mundo real, caracterizadas por un alto grado de complejidad, no-linealidad imprecisión e incertidumbre.

De esta manera, aplicando uno de los procedimientos mencionados de modelización, se calcula un listado de valores del problema analizado para cada punto del terreno, como dato arrojado por el modelo. Esta serie de datos, al ser asociada a sus correspondientes coordenadas, constituye el insumo principal para elaborar un mapa resumen del proceso de modelización, en cualquier Sistema de Información Geográfica.

Se obtiene una sectorización al mismo nivel de resolución elegido al inicio. Este mapa indicará el lugar donde es factible (con los márgenes de error calculados) encontrar problemas ambientales, y sus posibles niveles de gravedad asociados.

4.2 Aplicación de la metodología

4.2.1 Área de Estudio: Manizales, Colombia

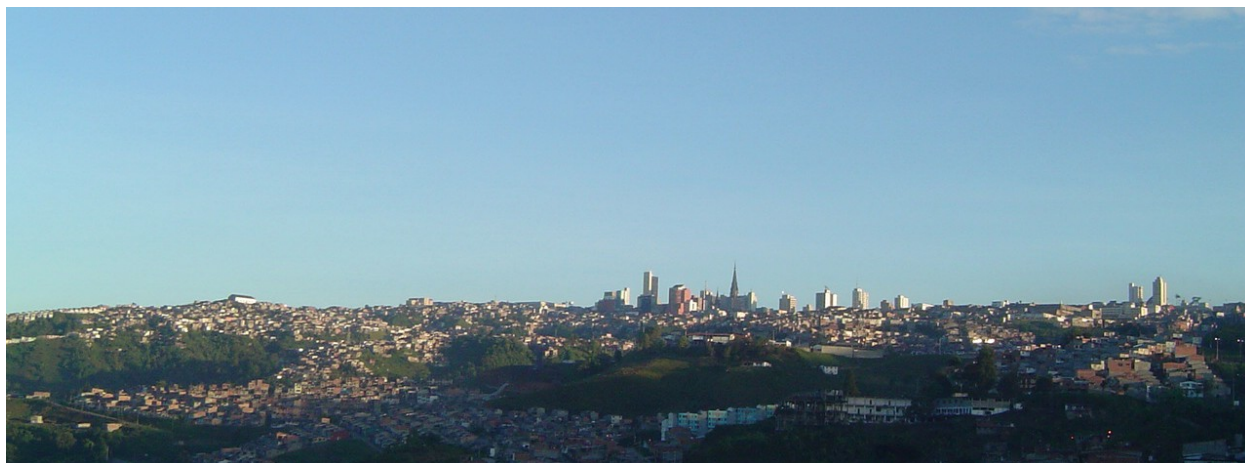


Foto 1. Vista General (W-E) de la ciudad de Manizales (Colombia)

Ubicada en el corazón de los Andes, en la zona montañosa colombiana, en la denominada Cordillera Central, adaptada urbanísticamente a una topografía quebrada y abrupta, Manizales (Foto 1), aparece como una ciudad intermedia, con los problemas típicos de la ciudad latinoamericana.

La topografía es una característica de análisis determinante en el crecimiento y configuración de la ciudad, en su evolución histórica, arquitectónica y la conformación de escenarios de riesgos. La ciudad nace en un estrecho terreno aplanado, con una ligera pendiente en sentido occidente-nororiente, y se va expandiendo en el terreno útil aledaño, llegando incluso a ocupar laderas de fuerte pendiente a medida que se va saturando el terreno llano.

En el gráfico 1 se muestra el crecimiento poblacional de la ciudad, exacerbado por la fuerza económica que ofreció el café, con el alto precio internacional y la facilidad de producción dada por lo fértil de los suelos y las condiciones climáticas favorables, lo cual propicia la aparición del proletariado urbano y un marcado aumento poblacional reflejado en el crecimiento perimetral de la ciudad con fuertes impactos posteriores debidos a la expansión indiscriminada y sin planificación sobre las laderas cercanas al centro.

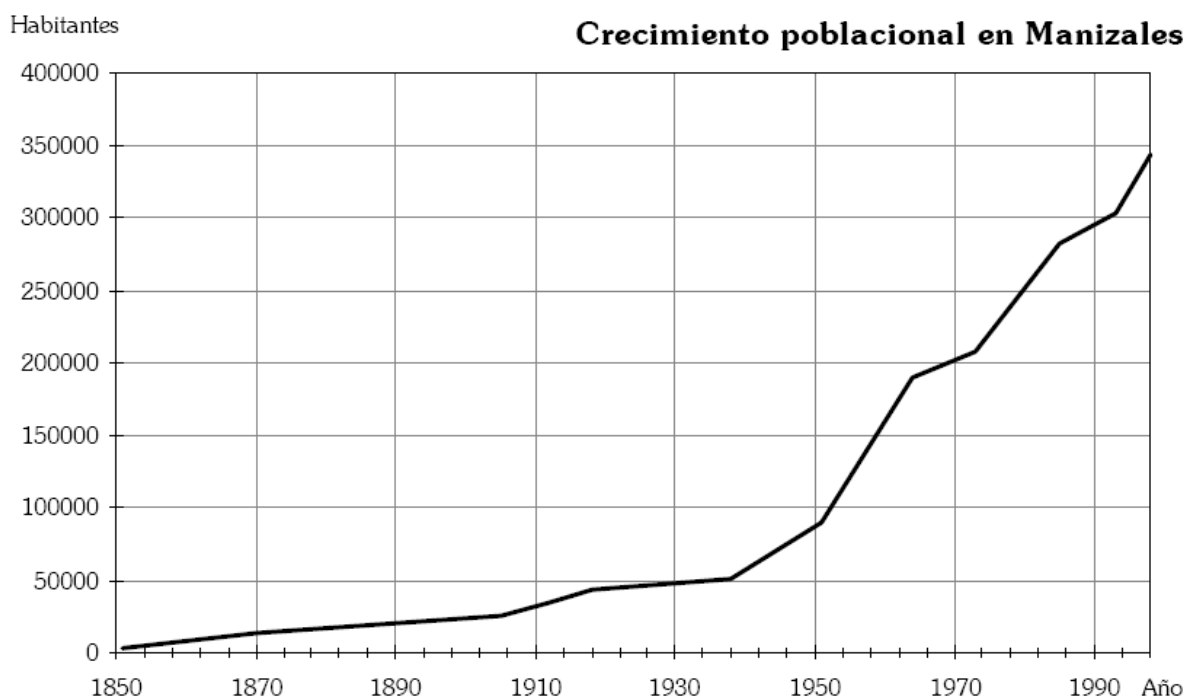


Gráfico 1. Crecimiento poblacional de Manizales

A partir de los años 30 en Manizales se empieza a dar un proceso de acelerada migración, que va a durar varias décadas, especialmente de poblaciones rurales por varias causas. Al principio, por las necesidades de empleo: La crisis de 1929 con la consecuente caída en el precio internacional del café dificulta la exportación, genera la quiebra de varios productores de grano, y propicia el aumento del sector industrial de la ciudad, pues también se hace difícil importar productos de consumo, que deben empezar a fabricarse en el medio local (CHARDON: 2002). Posteriormente, un segundo factor de migración se da a raíz de la denominada violencia partidista nacional entre los dos partidos políticos tradicionales, lo que obliga a los campesinos a acelerar su desplazamiento a los centros urbanos.



Foto 2. Ejemplo del uso de la Guadua como material de construcción (Ladera Norte, Barrio Galán)

A partir de 1963 la presencia de “invasiones” (urbanización ilegal) desde décadas anteriores ahora forma parte de la ciudad en lo que a su perímetro se refiere, y comienza una nueva etapa de utilización de la Bambusa Guadua como material básico de construcción popular y espontánea, unido a un urbanismo improvisado y una arquitectura informal, que da como resultado el poblamiento de laderas poco propicias para la formación de barrios (Foto 2).

Para el inicio del nuevo milenio, el municipio de Manizales, cumpliendo con la Ley 388 de 1997 de Ordenamiento Territorial, estará regido en su desarrollo urbanístico, arquitectónico y ambiental por su Plan de Ordenamiento Territorial, presentado por primera vez en el año 2001, y con lineamientos para el desarrollo futuro de la ciudad en los siguientes 9 años. Entre otras sugerencias, se plantea la actualización de la planimetría existente en la Alcaldía de la ciudad y se avanza en el estudio de las zonas de amenaza por deslizamiento y el inventario de obras geotécnicas, debido principalmente al aumento de las lluvias y sucesos de deslizamientos que llegan al número de 90 en 2003, con el índice más alto de muertos por año hasta el momento (41 muertos y más de 100 heridos en 2003).

Además de estas condiciones gestadas históricamente, también existen particularidades geológicas, geomorfológicas y climáticas, que configuran características físicas y naturales generadoras de amenaza.

Condiciones Físicas y Naturales

Fenómenos naturales / Amenazas presentes en la ciudad

La Ciudad se ve amenazada principalmente por fenómenos relacionados con la actividad sísmica, la actividad volcánica y movimientos en masa. Las características geológicas y topográficas particulares, hacen que Manizales sea una zona susceptible a sufrir fuertes procesos denudativos y de flujos de escombros; siendo amplificada esta situación por la adecuación de terrenos y las características físicas y mecánicas del suelo.

Los fenómenos de remoción en masa más comunes son movimientos de magnitud media a baja (menores de 5000 m³). Generalmente se trata de reptación o deslizamientos ocasionados por la infiltración de aguas superficiales y la saturación del terreno.

Clima

Las tablas 1 y 2 resumen de forma general las principales características de la ciudad, y ofrecen una idea de los aspectos meteorológicos más sobresalientes.

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 ²
Población aproximada	360000 Habitantes (1993); 380000 (aproximación 2003)
Altitud promedio	2150 msnm
Temperatura media	18°C
Temperatura mínima promedio	12°C
Temperatura máxima promedio	22°C

Tabla 1. Aspectos generales de la ciudad de Manizales

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

Tabla 2. Aspectos hidrometeorológicos

Como es característico de esta región andina colombiana, 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. El Gráfico 2 presenta como referencia el valor promedio de cada mes durante todo el periodo de registro y los valores máximos mensuales.

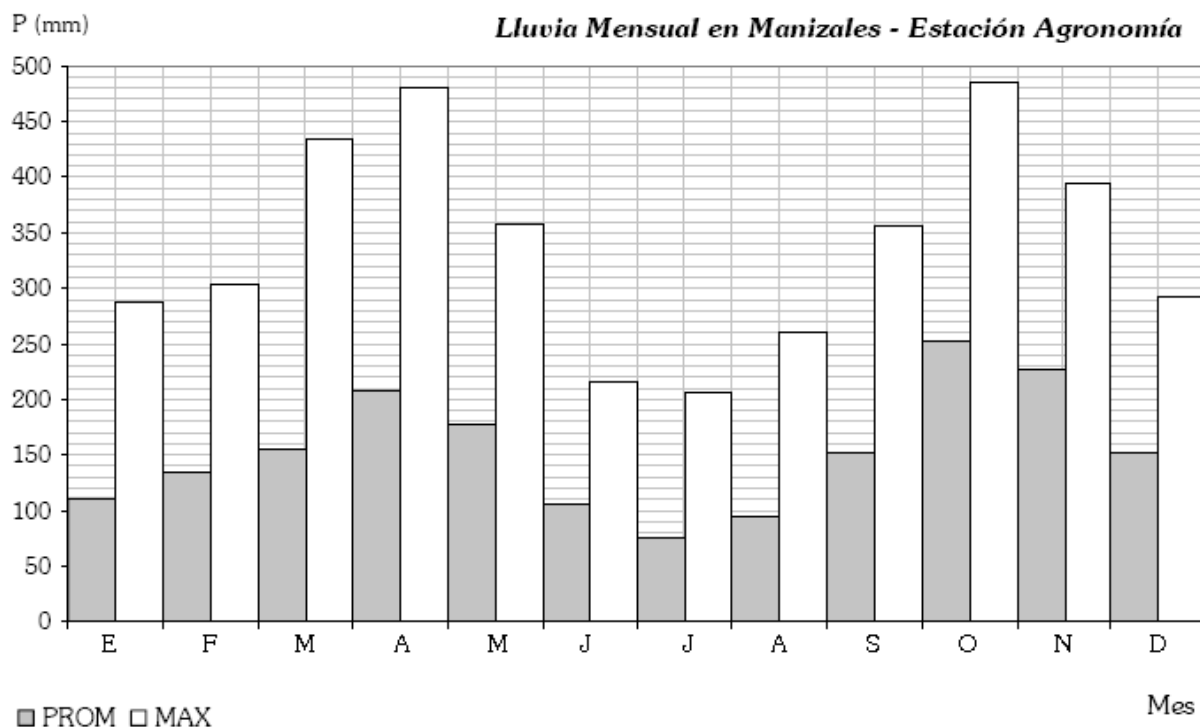


Gráfico 2. Aspectos Pluviométricos Históricos de La Ciudad

En cuanto a la extensión de los dos períodos lluviosos en el año, a partir del Gráfico 3, elaborado 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. Esta tendencia se repite para los valores máximos (Gráfico 3).

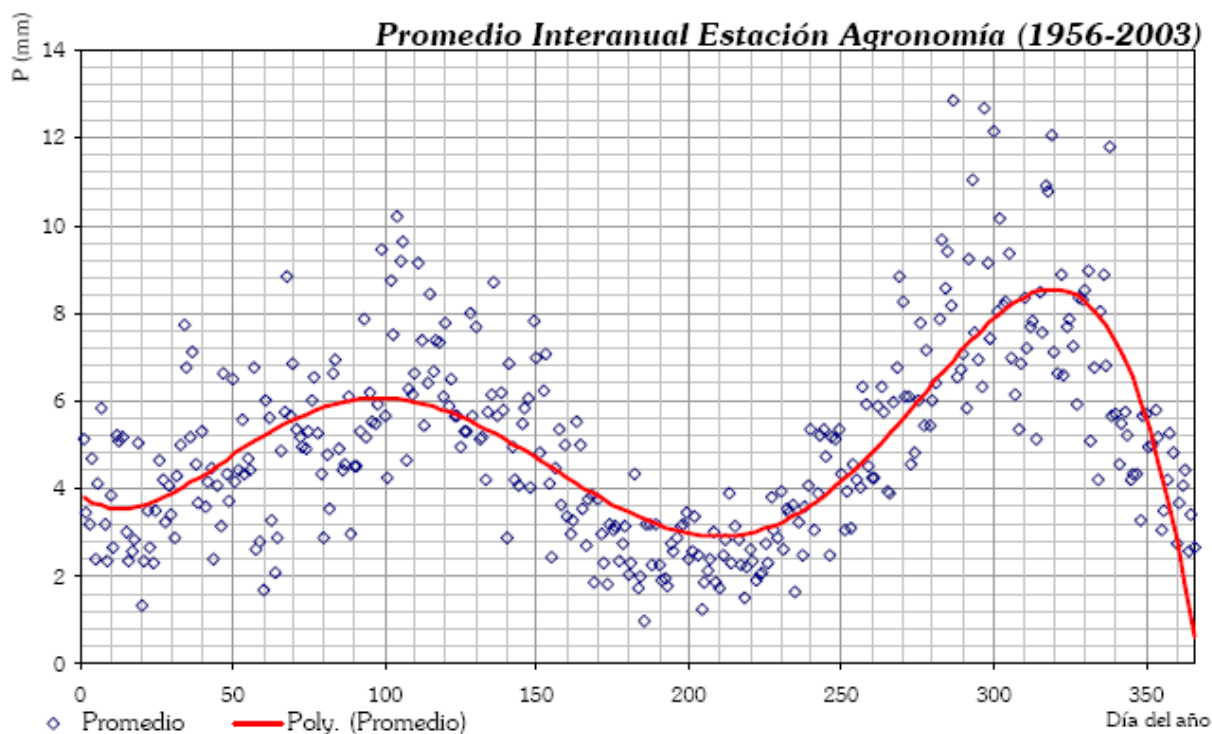


Grafico 3. Distribución de Precipitaciones (promedios) en el año

El panorama anterior muestra una ciudad que por sus características físicas naturales, por su evolución urbanística, sus maneras de ocupación del territorio y dinámicas de segregación socio-espacial, constituye un ejemplo de procesos típicos en ciudades latinoamericanas asentadas en las laderas de la cordillera de Los Andes. Se trata de un laboratorio natural para estudiar las complejas interacciones entre los diferentes factores y mecanismos que generan riesgos, especialmente enfocados al caso de deslizamientos activados por lluvias. Es un área de estudio apta para desarrollar un enfoque local que permita captar la mayor cantidad posible de elementos involucrados en el problema, para hacer comprensible la dinámica presente en estos entornos, siendo consecuentes con las nuevas teorías “ambientales” de análisis de una realidad compleja que no es susceptible de simplificaciones extremas. A partir de un análisis de este tipo, se podrán incorporar políticas más precisas y elementos de planificación concretos, que pensados a futuro, constituyan opciones de salida al bucle negativo de vulnerabilidad y riesgo que ofrecen en la actualidad como tendencia muchas de las ciudades andinas.

4.2.2 Consideraciones preliminares

En el presente trabajo se estudia el tema de deslizamientos 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.

Se plantea, como mecanismo necesario para la comprensión integral del fenómeno deslizamiento, la inclusión de conceptos alrededor del proceso de ocupación del territorio (factores sociales, políticos, económicos, culturales, exclusión social, marginalidad, etc.); pues el hecho de encontrar casi siempre en los terrenos deslizados a un sector muy particular de la población (marginado o muy pobre), no es simple casualidad, y sí es un elemento clave para la comprensión de la problemática. Esto llevaría a pensar en la posibilidad de hacer verdadera Prevención de Desastres desde otras perspectivas, más desde el punto de vista de la atención social y reducción de la pobreza, oportunidades de empleo, etc. Podría ser factible que invirtiendo el dinero de Gestión de Riesgos en procesos de mejoramiento social se dé a mediano plazo un mejor resultado de aquel obtenido con la construcción de costosos muros y pantallas de concreto para reforzar laderas. En cualquier caso, se debe comenzar por incorporar estos factores de ocupación del territorio a la comprensión de los procesos de desestabilización de laderas y entender en lo posible el contexto completo y complejo del riesgo al cual se hace referencia.

Para el presente trabajo, se ha dividido el riesgo en los apartados Amenaza y Vulnerabilidad, considerando las sugerencias de varios 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).

Se hace referencia a *Factores de Amenaza* como todos aquellos factores relacionados directamente con el ecosistema de soporte, y considerados 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 1, incorporando 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 deslizamientos. Elevación del terreno, pendiente del terreno, rugosidad, curvatura de la superficie, características de las cuencas, factores asociados al tipo de suelo y precipitaciones, son considerados en este componente. Se supondrá que estos factores son característicos del ecosistema de soporte, y estos mismos factores pueden encontrarse en cualquier otro sitio, independiente de la existencia o no de un asentamiento sobre él. En este punto se incorpora una simplificación conceptual, pues la modelización del relieve no puede ser independiente de la acción antrópica sobre el terreno, ya que los procesos de urbanización constituyen uno de los principales factores modeladores del paisaje urbano. 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, y para abarcar la variación temporal habrá que realizar evaluaciones en varios momentos del tiempo.

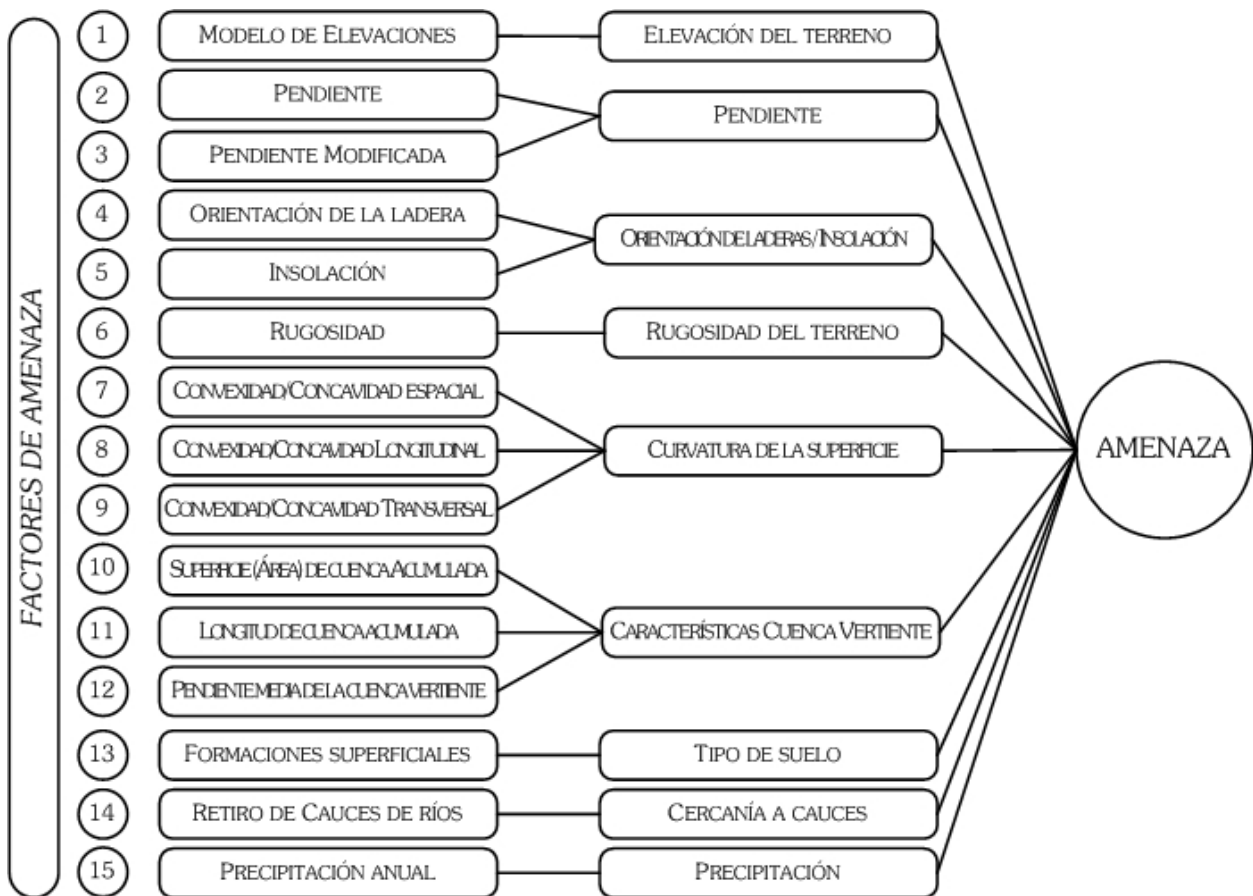


Figura 1. Esquema Conceptual de Riesgo por Deslizamiento – Factores de Amenaza

Los *Factores de Vulnerabilidad Directa* (Figura 2) 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 deslizamientos, 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 de los deslizamientos en la unidad territorial estudiada y serviría de base para la elaboración de mapas de zonificación de deslizamientos. En otras palabras, obteniendo el *Riesgo Directo* se estaría indicando dónde (con cierto margen de error) ocurrirán deslizamientos. Este es el escenario que se pretende modelizar.

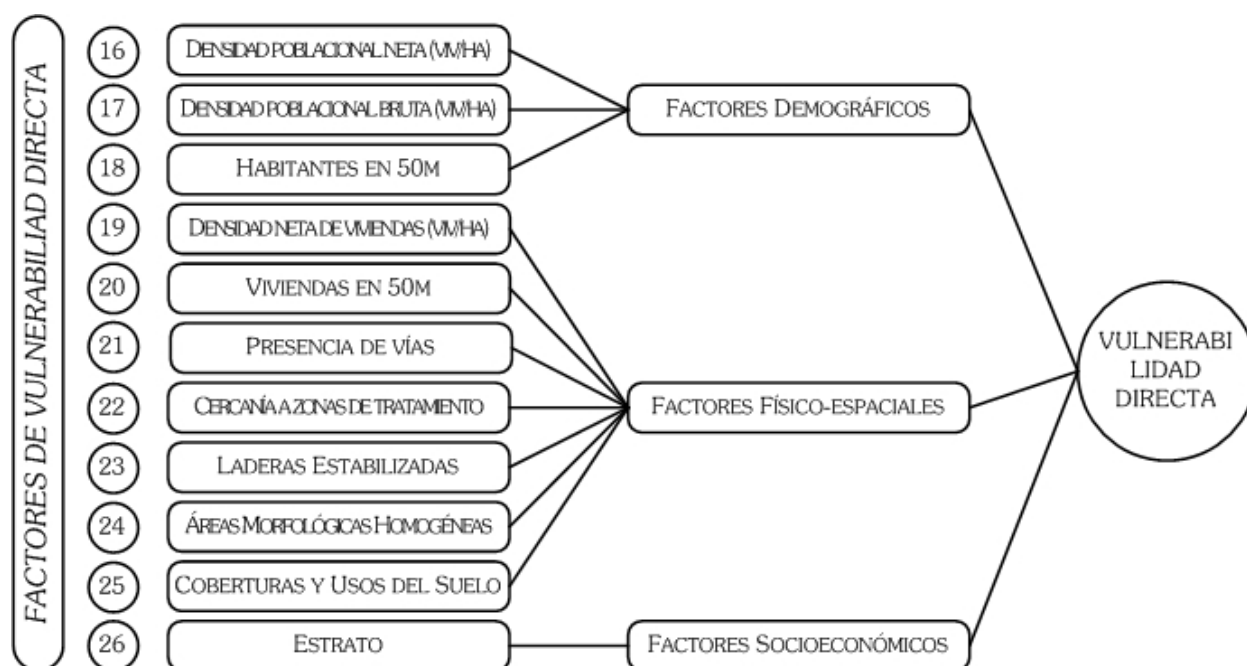


Figura 2. Esquema Conceptual de Riesgo por Deslizamiento: Factores de Vulnerabilidad Directa, Factores Amplificadores de Vulnerabilidad y Factor Detonante

Con lo anterior, se podrán generar mapas dinámicos (un mapa para cada período de tiempo) asociados al Riesgo Directo. Con estos mapas, sería posible identificar aquellos sectores que merecen intervención correctiva en el terreno mediante obras de estabilidad o reubicación urgente de viviendas o familias.

Definición Espacial de los Estudios

“En el campo espacial, de manera general, no sería posible desarrollar estudios urbanos, trabajando solamente a la escala de ciudad considerada como un conjunto. Es necesario trabajar primero en un espacio más restringido, el barrio por ejemplo. Efectivamente, un recorte del territorio permite poner en evidencia en diferentes campos, la existencia de particularidades que están atenuadas, incluso ocultas, si se trabaja en un espacio más amplio”. (CHARDON: 2002, 76).

Teniendo en cuenta estos problemas de escala, 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, pero se desagrega también en celdas de 10mx10m para hacerla compatible con los demás datos utilizados; es posible asignar el mismo valor de factor a cada una de las celdas que componen el barrio.

De esta manera, aunque se utilice información agregada inicialmente en la unidad barrio, se hace posible la superposición de mapas mediante el uso de una retícula similar a aquella empleada para los factores naturales y se da coherencia y homogeneidad a la serie de datos. Los factores encontrados exclusivamente a nivel municipal no se tienen en cuenta, pues la inclusión o exclusión de estos datos (un mismo dato para toda el área de estudio) no aportaría a la discriminación de sectores específicos de la ciudad.

Resulta importante precisar que cada una de las celdas incorporadas al estudio se caracteriza por tener asociado un par de coordenadas (X,Y) para su ubicación espacial y un valor Z que define el dato de cada factor analizado. De esta manera, es posible analizar mediante Sistemas de Información Geográfica SIG y técnicas estadísticas, una serie de datos ubicados espacialmente, lo cual resulta muy importante en el caso de modelos predictivos o de clasificación, pues los resultados suministrados por un análisis de este tipo son fáciles de actualizar y extrapolar a un mapa.

4.2.3 Extracción de datos del entorno a partir de Sistemas de Información Geográfica

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 drenan 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 programa ArcView, 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 en el Sistema de Información Geográfica.

Pendiente del Terreno

PEND – Pendiente del Terreno

Orientación de las laderas / Insolación

ASPECT – Orientación del Terreno

INSOL – Insolación del Terreno

Rugosidad del Terreno

RUGOS – Rugosidad del Terreno

Curvatura de la Superficie

CURVAR – Convexidad/concavidad espacial del terreno

PERFL – Convexidad/concavidad longitudinal

PERFT – Convexidad/concavidad Transversal

Características de la cuenca vertiente

ACUENCA – Área de Cuenca Acumulada

LONG – Longitud de Cuenca Acumulada

PENDM – Pendiente Media de Cuenca Vertiente

A partir de información existente, es posible elaborar mapas relacionados con propiedades del suelo y factores hidrológicos:

Tipo de Suelo

FMS – Formaciones Superficiales

RCAUCE – Retiros de Cauces de Ríos

PANUAL – Precipitación Anual

Partiendo de información sociodemográfica del municipio, se hace posible también elaborar los diferentes mapas de Factores de Vulnerabilidad:

Factores Demográficos

DNETHAB – Densidad poblacional neta

DBRUTHAB – Densidad poblacional bruta

HAB50M – Habitantes en un radio de 50m

Factores Físico Espaciales

DNETHVIV – Densidad neta de viviendas

VIV50M – Número de viviendas en un radio de 50m

BUFFERV - Presencia de Vías

DZONASTTO - Cercanía a zonas de Tratamientos Superficiales

OBRASESTAB – Laderas Estabilizadas

AMHGral - Áreas Morfológicas Homogéneas

USOSS – Coberturas y Usos del Suelo

Factores Socio-económicos

ESTRATO - Nivel socioeconómico de los habitantes

Cada uno de los factores mencionados anteriormente está representado por un mapa en formato raster, y equivale a una matriz con datos de 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 puede expresarse como una matriz de datos de 609.426 filas por 3 columnas (X, Y, Z).

Para efectos de cálculos posteriores, se combinan en una sola matriz los 27 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 de Riesgo ya mencionados.

Cualquier procedimiento que pretenda zonificar un área según su susceptibilidad a deslizamientos debe partir de la experiencia propia, con el argumento de que si en una región con ciertas condiciones específicas, se presentaron en el pasado eventos de deslizamiento, es posible, que en otros sitios, bajo condiciones similares, eventos del mismo tipo 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 deslizamientos) e inestable (con deslizamientos). 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 deslizamientos 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.

4.2.4 Red neuronal artificial para zonificación de riesgo directo de deslizamientos

Arquitecturas de RNA

Como modelo de red neuronal, se ha elegido una arquitectura de tipo perceptrón multicapa, entrenada mediante la regla de aprendizaje backpropagation (propagación de error hacia atrás) (Rumelhart, Hinton y Williams, 1986). El perceptrón multicapa está formado por una capa de entrada, una capa de salida y una o más capas ocultas o intermedias. La información se transmite desde la capa de entrada hasta la capa de salida y cada neurona está conectada con todas las neuronas de la siguiente capa. La utilización del algoritmo backpropagation o alguna de sus múltiples variantes supone alrededor del 80% de las aplicaciones que se realizan con RNA (Caudill y Butler, 1992), y presenta buenos resultados en la aproximación de funciones.

Para el caso de deslizamientos, se utiliza inicialmente la muestra mencionada anteriormente, compuesta por los factores de amenaza y vulnerabilidad extractados a partir del SIG. Se trata de una matriz de 30 columnas y 346 filas que reúne la información de una muestra tomada de 27 mapas temáticos, sus coordenadas X y Y, y una variable categórica que indica la presencia o

ausencia de deslizamientos en cada celda.

Las variables deberían seguir una distribución normal o uniforme en tanto que el rango de posibles valores debería ser aproximadamente el mismo y acotado dentro del intervalo de trabajo de la función de activación empleada en las capas ocultas y de salida de la red neuronal. Teniendo en cuenta lo comentado, las variables de entrada y salida suelen acotarse a valores comprendidos entre 0 y 1 o entre -1 y 1 (MONTAÑO: 2002). En el presente caso se ha elegido normalizar las variables de la muestra según sus valores máximos y mínimos absolutos, para obtener un valor entre cero (0) y uno (1) que reemplace la variable original.

En el presente estudio se obtuvieron tres conjuntos de datos mediante asignación aleatoria de los 346 datos que formaban la muestra. Así, se contó con 206 sujetos de entrenamiento (E) – 103 inestables y 103 estables –, 70 sujetos de validación (V) – 35 inestables y 35 estables –, y 70 sujetos de test (T) – 35 inestables y 35 estables –.

Para ensamblar una red neuronal y aplicar el algoritmo backpropagation al tratamiento del error, existen actualmente varias aplicaciones y herramientas informáticas disponibles.

Se han probado diferentes configuraciones variando el número de elementos (neuronas), inicialmente, para una sola capa intermedia, y posteriormente, para dos capas intermedias. También se han variado los pesos, manteniendo como función de activación de cada neurona, la sigmoideal (función no lineal con límites entre cero y uno), al igual que los datos de entrada. La regla de aprendizaje para los dos casos ha sido la de momento, y el tamaño del paso y valor del momentum se han variado también.

En este 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 (NeuroDimensions: 2005). 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 de entrada. 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 ya mencionado, lo preferible es usar el menor número de neuronas ocultas con los cuales la red presente un buen comportamiento (MASTERS: 1993; SMITH: 1993; RZEMPOLUCK: 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 y 1 neurona en la capa de salida (Figura 3). 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.

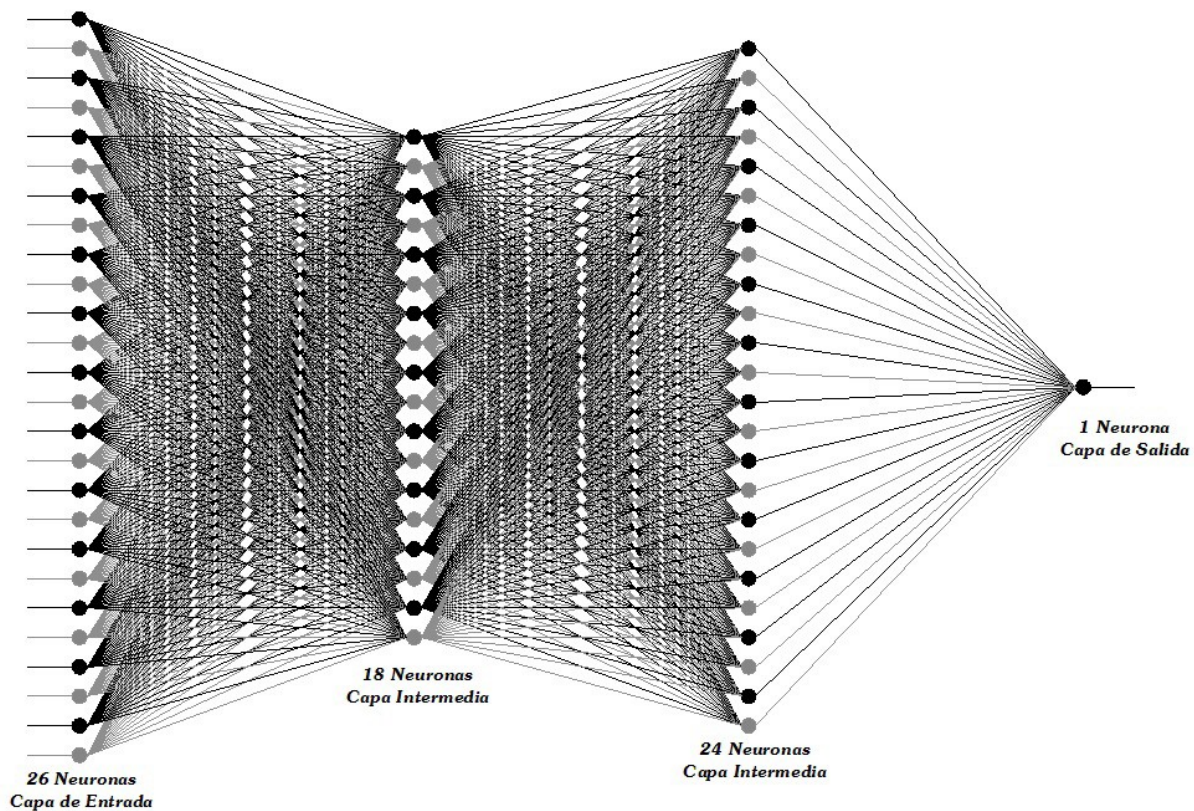


Figura 3. RNA de 2 capas intermedias

Resultados Obtenidos

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 permita 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.

Análisis de sensibilidad

Se calculó la medida de sensibilidad para cada variable predictora sobre la presencia o ausencia de deslizamientos. En el gráfico 4, 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 (Gráfico 5). Cuando dicha variable toma valores cercanos a cero (terreno llano), la salida de la red se acerca a cero (poca probabilidad de deslizamientos). 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 Dzonastto, 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.

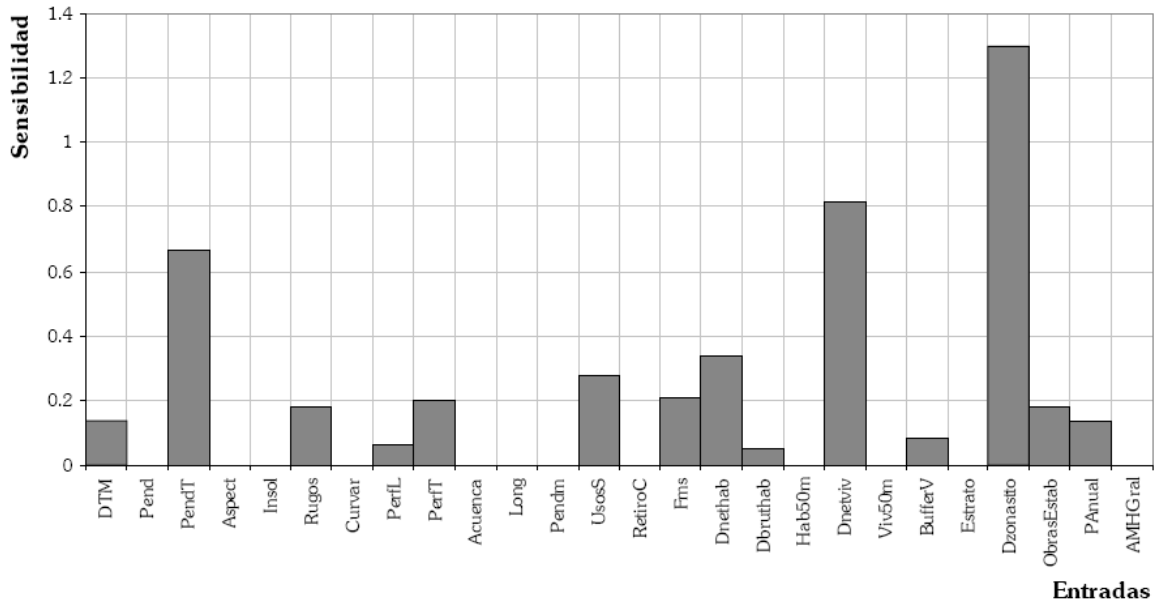


Gráfico 4. Sensibilidad de las variables de entrada frente a la salida de la red.

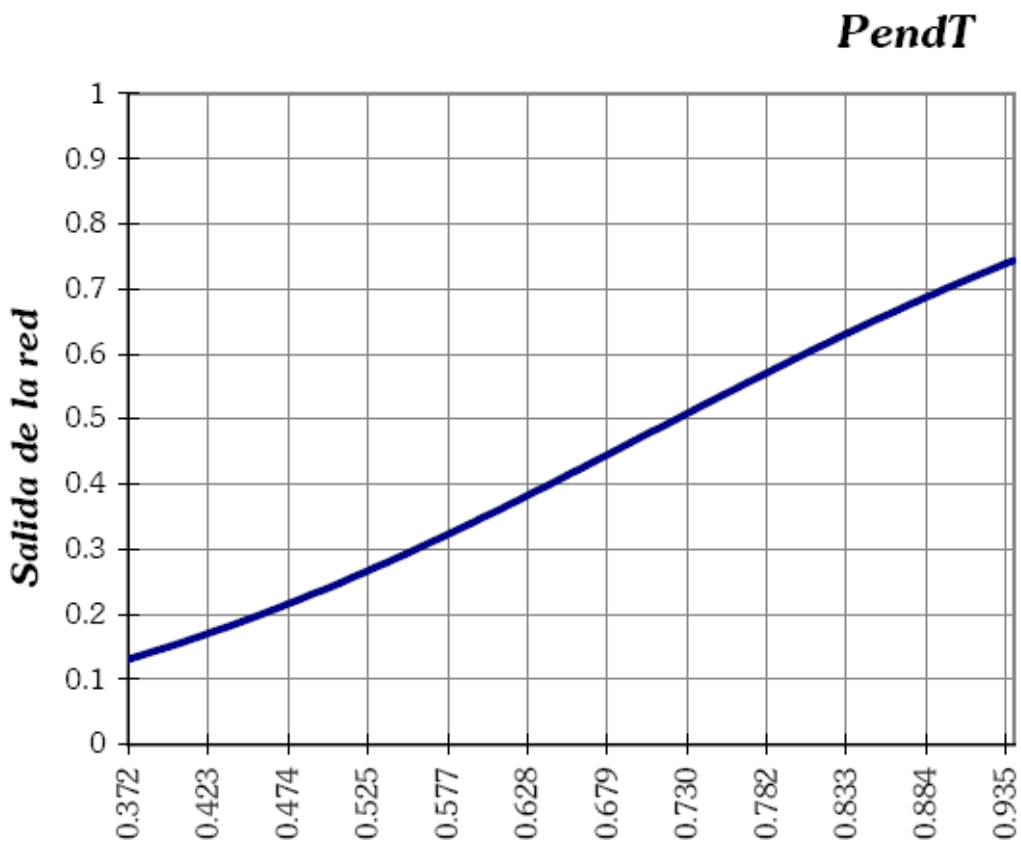


Gráfico 5. Sensibilidad de la variable PendT (pendiente del terreno) frente a la salida de la red.

Con este procedimiento se llega a clasificar eficientemente un 88,6% de las celdas con roturas, lo cual es prueba de un rendimiento satisfactorio cuando se trata de zonificar 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 deslizamiento 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.

Como resultado final del trabajo, se presenta un mapa (Figura 4) que reúne la aplicación del modelo a los datos de la generalidad de la unidad territorial, es decir, un mapa que contiene los valores extrapolados para toda la población bajo estudio. En términos espaciales, se trata de una zonificación de las áreas más propensas a sufrir el problema ambiental analizado, dentro de ciertos niveles, en este caso, se representan las áreas susceptibles a sufrir deslizamientos a partir de los eventos anteriores.

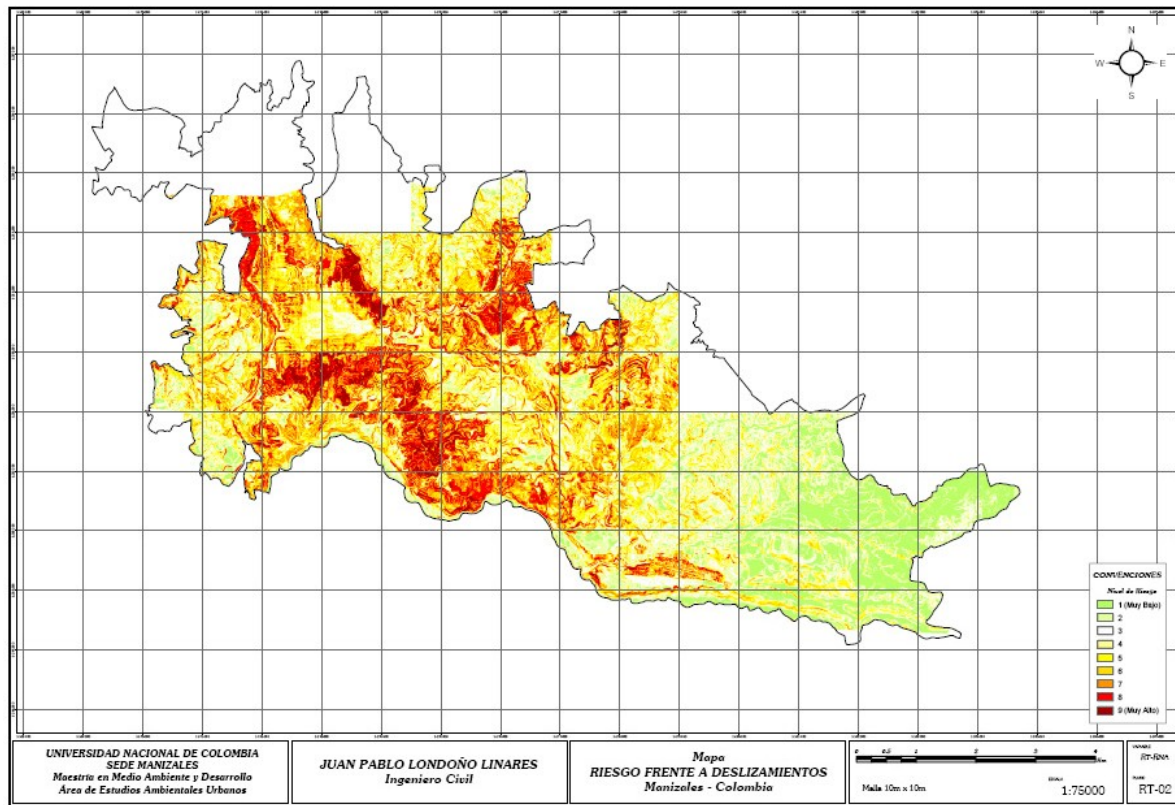


Figura 4. Mapa de zonificación de susceptibilidad a deslizamiento

5 Conclusiones

Metodológicamente, la propuesta presentada tiene como particularidad la asociación del componente espacial al análisis, incorporando con ello especificidad al estudio. Cada dato existe en realidad; no se trata de una abstracción, ni de un indicador subjetivo, sino de un valor medible que trae asociada una razón de ser. En este sentido, la utilización de mapas-matrices es uno de los principales elementos de la metodología, pues permite el aprovechamiento de mapas para la generación de altas cantidades de datos que pueden aprovecharse con métodos de cálculo adecuados, para obtener respuestas numéricas, que a su vez, pueden ser traducidas nuevamente a mapas. Es decir, puede pasarse de un mapa a una matriz numérica, o viceversa, según se requiera.

Si bien existen problemas susceptibles de solucionarse de manera exacta mediante algún algoritmo o procedimiento matemático, no son la generalidad, y lo común es encontrarse con un alto grado de complejidad e incertidumbre en los problemas a resolver. En este caso, la utilización de una Red Neuronal Artificial resulta satisfactoria desde el punto de vista práctico, y además, tiene coherencia conceptual y robustez para modelar el fenómeno de deslizamientos en el entorno urbano adecuadamente. Al ser sistemas adaptativos, las redes neuronales aprenden de la experiencia, esto significa que a partir de unos ejemplos ilustrativos o experiencias pasadas, es posible llevar a cabo un entrenamiento para que cumplan la tarea de clasificar el terreno según su susceptibilidad alta o baja a la presencia de deslizamientos. Esta propiedad es fácilmente

extrapolable a otros problemas ambientales de diferentes ámbitos, siempre que cumplan con la característica de presentar eventos previos como datos de estudio.

Por último, como se mencionó en el desarrollo de este documento, es importante resaltar que no siempre es preferible obtener resultados exactos con márgenes de error mínimos, basados en técnicas puntuales y exactas. Muchas veces resulta preferible tener una visión general del problema y plantear una respuesta aproximada, como en este caso, para tener un panorama general, y así un campo de actuación mayor, desde el punto de vista de la posible gestión del problema. El uso de este tipo de procedimientos combinados, aplicados a la planificación territorial, presenta altas posibilidades, y son una línea de estudio importante en temas de modelización urbana.

Adicionalmente, los desarrollos informáticos actuales permiten la manipulación de volúmenes inmensos de información, haciendo posible el trabajo con poblaciones de datos enormes, lo cual, desde el punto de vista estadístico ofrece ventajas indiscutibles en cuanto a la mayor disponibilidad de datos y sus amplias posibilidades de manipulación, con muestras que permiten mejor visualización de los diferentes problemas. Por otro lado, resulta también interesante la fuerte relación que se adivina entre la modelización de escenarios en ciencias ambientales y los desarrollos de modelos matemáticos de inteligencia artificial, que dejan un lugar a la incertidumbre en su desarrollo conceptual; podría tratarse de un punto en común que acerque la rigurosidad de la modelización a la necesidad de interpretación de las administraciones municipales encargadas de la gestión de las ciudades.

Referencias

- Angel Maya, A. (2000). *La aventura de los símbolos. Una visión ambiental de la historia del pensamiento*. Bogotá: Ecofondo.
- Aprile-Gnisset, J. (1992). *La Ciudad Colombiana Siglo XIX y Siglo XX*. Bogotá: Biblioteca Banco Popular.
- 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. En Santacana. 2001
- Beck, U. (1998). "La sociedad del riesgo" Paidós Básica, Barcelona.
- Bertalanffy, L. V. (1968). *Teoría General de Sistemas*. Braziler, Nueva York (Citado por F. Capra 1999).
- Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I.; Wisner, B. (1996). *Vulnerabilidad. El entorno social, político y económico de los desastres*. LA RED / ITDG, Bogotá. Primera edición. En: http://www.desenredando.org/public/libros/1996/vesped/vesped-todo_sep-09-2002.pdf.
- Capra, F. (1999). *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*. Barcelona: Anagrama.
- Capra, F. (2003). *Las Conexiones ocultas : implicaciones sociales, medioambientales, económicas y biológicas de una nueva visión del mundo / Fritjof Capra; traducción de David Sempau.-- Barcelona : Anagrama, 389 p*
- Cardona, O. D. (2001). *Estimación Holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. En:

http://www.tdcat.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0416102-075520/

- Caudill, M. y Butler, C. (1992). *Understanding neural networks: Computer explorations*. Cambridge, MA: MIT Press.
- 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.
- Cuadras, C. M. (1991). *Métodos de análisis multivariante, Colección estadística y análisis de datos*. Ed. Eunibar. 664 pp. En Santacana: 2001.
- David, M.; Dagbrt, M. y Beauchemin, Y. (1977). *Correspondence análisis*. Quaterly of Colorado School of Mines. V.72:1-45. En Santacana: 2001.
- Dillon, W.R. y Goldstein, M. (1986). *Multivariate análisis. Methods and applications*. Ed. John Wiley and Sons Ltd. 565 pp. En Santacana: 2001.
- Funahashi, K. (1989). *On the approximate realization of continuous mapping by neural networks*. *Neural Networks*, 2, 183-192. En Montaña et. al. (2002)
- Hornik, K., Stinchcombe, M. y White, H. (1989). *Multilayer feedforward networks are universal approximators*. *Neural Networks*, 2(5), 359-366. En Montaña et. al. (2002).
- Hotelling H. (1933). *Analysis of a complex of statistical variables into principal components*. *J Educ Psychol* 1933; 24: 417-441.
- Kuroiwa, J. (2003). *Reducción de Desastres en el Medio Urbano. Ciudades Sostenibles: Agenda Para el Siglo XXI. Curso en Gestión del Suelo Urbano para Centro América*. Instituto del Banco Mundial. Ciudad de Panamá, 13-15 marzo 2003.
- 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>
- Lebart, L.; Morineau, A. y Fenelan, J.P. 1982. *Traitement des donées statistiques*. Dunad Ed. Paris. En Santacana: 2001.
- Lovelock, J. (2000). *Gaia: A New Look at Life on Earth*. Oxford University Press. Oxford; New York.
- 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

- Masters, T. (1993). Practical neural networks recipes in C++. London: Academic Press. En Palmer y Montaña (1999).
- Montaña, J.J.; Palmer, A. (2002). Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de supervivencia: un estudio comparativo con el modelo de regresión de Cox en su aspecto predictivo. *Psicothema* Vol. 14, pp630-636.
- Montaña, J.J.; Palmer, A. (2002). Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de supervivencia: un estudio comparativo con el modelo de regresión de Cox en su aspecto predictivo. *Psicothema* Vol. 14, pp630-636.
- Morin, E. (1994). *Introducción al Pensamiento Complejo*. Editorial Gedisa, Barcelona.
- Neuro Dimensions Inc, 2005. *Neuro Solutions* versión 5. Programa para computador.
- Pearson, K. (1901). On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Phil Mag* 1901; 2: 559-572.
- PNUMA. (2001). *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Restrepo, I. (1995). *50 Años del desarrollo económico en Manizales*. Manizales: Iderna.
- 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* (pp. 318-362). Cambridge, MA: MIT Press. En Palmer y Montaña (1999, 2000, 2002).
- Rzempoluck, E.J. (1998). *Neural network data análisis using Simulnet*. New York: Springer-Verlag. En Palmer y Montaña (1999, 2000)
- 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. Escola Técnica Superior D'Enginyers de camins, Canals i ports. Departament D'Enginyeria del Terreny i Cartogràfica. Barcelona España.
- Smith, M. (1993). *Neural networks for statistical modeling*. New York: Van Nostrand Reinhold. En Palmer y Montaña (1999, 2000)
- Smuts, J.C. (1926). *Holism and Evolution*, Nova Iorque: Mac Millan.
- SPSS. (2004). *SPSS 13.0 for Windows*. SPSS Inc. Programa para computador.
- Velásquez, A.; 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 Segunda parte http://www.desenredando.org/public/libros/1999/edete/edte2_v.1.0-ago-30-2001.pdf
- Weil, P. (1990). *Holística: Una Nueva Visión y Abordaje de lo real*. Edit. San Pablo, 1997. Bogotá.
- Wilches Chaux, G. (1993). *La vulnerabilidad global*. in: Maskrey, A.: 1993. *Los desastres no son naturales*. LA RED – ITDG. Primera edición. Tercer Mundo editores.
- Wilches-Chaux G. (1995). *Desastres y el Medio Ambiente*. 2º edición Programa de Entrenamiento para el Manejo de los Desastres DMTP