



IDEAM

Instituto de Hidrología,
Meteorología y
Estudios Ambientales



*Al servicio
de las personas
y las naciones*

PILOTO DE ASISTENCIA TÉCNICA PARA
INCORPORAR LA GESTIÓN INTEGRAL DE
RIESGOS HIDROCLIMÁTICOS EN EL
ORDENAMIENTO TERRITORIAL MUNICIPAL

Plan Regional Integral de Cambio Climático
Región Capital Bogotá - Cundinamarca

INFORME TÉCNICO



Al servicio
de las personas
y las naciones

PILOTO DE ASISTENCIA TÉCNICA PARA INCORPORAR LA GESTIÓN INTEGRAL DE RIESGOS HIDROCLIMÁTICOS EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL MUNICIPAL

Plan Regional Integral de Cambio Climático
Región Capital Bogotá - Cundinamarca

INFORME TÉCNICO



Con la colaboración de:



PUNTOS FOCALES DIRECTIVOS DE LAS INSTITUCIONES SOCIAS

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO PNUD Fabrizio Hochschild Coordinador Residente y Humanitario de la ONU Silvia Rucks Directora de País Fernando Herrera Coordinador Área de Pobreza y Desarrollo Sostenible Jimena Puyana Oficial de Desarrollo Sostenible	IDEAM Omar Franco Torres Director José Alaín Hoyos Subdirector de Estudios Ambientales María Teresa Martínez Subdirectora de Meteorología Paola Bernal Jefe oficina de Cooperación Internacional	GOBERNACIÓN DE CUNDINAMARCA Álvaro Cruz Vargas Gobernador de Cundinamarca Fredy William Sánchez Secretario de Integración Regional Andrés Alejandro Romero Secretario de Planeación Marcela Orduz Quijano Secretario de Ambiente Jaime Matiz Ovalle Oficina de Atención y Prevención de Desastres	ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ Gustavo Petro Urrego Alcalde Mayor de Bogotá Gerardo Ardila Calderón Secretario Distrital de Planeación Néstor García Buitrago Secretario Distrital de Ambiente Alberto Merlano Gerente EAB Javier Pava Director IDIGER
CAR Alfred Ignacio Ballesteros Director	CORPOGUAVIO Oswaldo Jiménez Director	CORPORINOQUIA Martha Jhoven Plazas Directora	INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT Brigitte LG Baptiste Directora
PARQUES NACIONALES NATURALES Julia Miranda Directora Parques Nacionales Naturales	MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Rodrigo Suárez Director de Cambio Climático	DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN Alexander Martínez Subdirector de Desarrollo Ambiental Sostenible	

PUNTOS FOCALES DEL PRICC EN LAS INSTITUCIONES SOCIAS

PNUD: Claudia Marín; IDEAM: Vicky Guerrero, Juan Gabriel Osorio; Gobernación de Cundinamarca: Marleny Urbina, Constanza Cruz; Secretaría Distrital de Ambiente: Gloria Esperanza Narváez; Secretaría Distrital de Planeación: Carolina Chica; IDIGER: Lina María Hernández; EAB: Francisco Javier Canal; CAR: María Elena Báez; CORPOGUAVIO: Myriam Amparo Andrade; Instituto Alexander von Humboldt: Jorge Enrique Gutiérrez; Parques Nacionales Naturales: Juan Giovany Bernal; DNP: Silvia Calderón; MADS: Maritza Florián.

PLAN REGIONAL INTEGRAL DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA BOGOTÁ CUNDINAMARCA (PRICC)

UNIDAD COORDINADORA DEL PRICC Coordinador: Javier Eduardo Mendoza Sabogal Asesor técnico: Jason García Portilla Asesor comunicaciones: Juan Carlos Forero Amaya Asistente administrativo: Isabel Castro Robledo Consultoría elaborada por: Omar Darío Cardona Arboleda. Contrato No. PNUD 000020652 Las opiniones expresadas en este informe no suponen la expresión de una opinión o posición alguna de ninguna de las instituciones socias del Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio, Instituto Humboldt, Parques Nacionales de Colombia, MADS, DNP). Los autores son responsables de la selección y presentación de los datos que figuran en sus respectivos informes y de las opiniones expresadas en ellos, que no son forzosamente	las de las instituciones socias del Plan Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC). El PRICC es fruto de un trabajo en colaboración que ha sido posible gracias al apoyo y participación de numerosas personas e instituciones. Se ha financiado en virtud del documento de proyecto firmado entre las instituciones socias y también gracias a las generosas contribuciones del Gobierno de España y del Gobierno de Quebec, Canadá.	Fotografías: Instituto Humboldt, IDEAM, Oficina de prensa Alcaldía Mayor de Bogotá, Oficina de prensa Gobernación de Cundinamarca, El Tiempo. Diseño gráfico: Una tinta medios. Bogotá, Colombia - abril 2014
Cítese como: IDEAM, PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio, Instituto Alexander von Humboldt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP. 2012. Piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidroclimáticos en el ordenamiento territorial municipal		

PRESENTACIÓN

Los retos que la variabilidad y el cambio climático imponen a la sociedad de la Región Capital trascienden lo ambiental e incluyen todos los aspectos relacionados con nuestras actividades sobre los territorios. Los patrones y procesos de producción, extracción, asentamiento y consumo, van a estar influenciados por la forma como el clima cambie.

Mayor ocurrencia e intensidad de eventos extremos, climas más secos o más húmedos, tendrán efectos directos sobre la economía, la cultura, el medio ambiente y las decisiones políticas que se tomarán en el futuro, así como en la planeación territorial, sectorial e institucional de largo plazo.

Todo este conjunto de decisiones permeará de manera directa todos los aspectos relacionados con la calidad de vida de los cundinamarqueses y bogotanos, quienes cada vez más relacionan los cambios en el clima con los desastres y las emergencias, dejando de lado las oportunidades de adaptación que estos nuevos escenarios pueden traer para el desarrollo de la Región.

Por este motivo, el Plan Regional Integral de Cambio Climático Región Capital, Bogotá – Cundinamarca (PRICC), se ha constituido y se consolida como una plataforma de trabajo interinstitucional que permite construir las directrices técnicas, así como una estrategia regional, implementada a través de medidas y proyectos prioritarios de mitigación y adaptación a la variabilidad y al cambio climático, que permitirá a la Región Capital tener las bases científicas para enfrentar los retos y aprovechar las oportunidades de estos nuevos escenarios.

El PRICC es además, uno de los modelos piloto mundiales que, por iniciativa de la Alcaldía de Bogotá y de la Gobernación de Cundinamarca, vienen impulsando las Naciones Unidas y el IDEAM, junto con la activa participación de otros importantes socios (CAR, Corpoguavio, Corporinoquia, PNNC, IAvH, DNP y MADS), para fortalecer las capacidades y la toma de decisiones de las instituciones regionales públicas, para avanzar en la construcción de territorios resilientes a la variabilidad y al cambio climático. Este esfuerzo cuenta con el apoyo financiero de los Gobiernos de España y de Quebec.

A partir de lo anterior, este estudio, “Piloto de Asistencia Técnica para Incorporar la Gestión Integral de Riesgos Hidroclimáticos en el Ordenamiento Territorial Municipal” permite tener una guía para la toma de decisiones concretas de quienes han asumido o asumirán responsabilidades desde el gobierno regional, en materia de la generación de conocimiento y acciones para la mitigación del cambio climático.

Javier Eduardo Mendoza

Coordinador PRICC

CONTENIDOS

PARTE 1..... 6

PARTE 2..... 51

PARTE 3..... 128

PARTE 1

Piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidroclicmáticos en el ordenamiento territorial municipal
Incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial instructivo para el nivel municipal

Omar Darío Cardona Arboleda
Con el apoyo de:
Paula Andrea Cifuentes
Ketty Carla Mendes
María de Pilar Pérez
Dora Catalina Suárez
Cristian Camilo González
BOGOTÁ - NOVIEMBRE, 2013

TABLA DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN..... 4

INTRODUCCIÓN..... 10

ANTECEDENTES INSTITUCIONALES, LEGALES Y CONCEPTUALES 12

 1.Marco institucional y jurídico nacional de la gestión del riesgo 14

 2.Zonificación ambiental, servicios ecosistémicos y gestión del riesgo..... 16

 3.Cambio climático, adaptación y gestión del riesgo 17

ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y GESTIÓN DEL RIESGO 19

REVISITANDO LA NORMATIVA..... 23

PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL RIESGO Y DERIVAR INTERVENCIONES.....	33
1. Clasificación de los municipios para el alcance de los estudios de riesgo.....	40
ALGUNAS DEFINICIONES RELEVANTES	46
BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del suelo según el Artículo 30, Ley 388 de 1997.....	32
Tabla 2. Niveles de amenaza relativa y riesgo implícito para el caso de inundaciones y deslizamientos (movimientos en masa).....	34
Tabla 3. Intervenciones prospectivas, correctivas y prescriptivas, asociadas a los niveles de riesgo implícito.....	35
Tabla 4. Categorización de municipios según la Ley 1551 de 2012.....	41
Tabla 5. Categorización de municipios haciendo un cruce con la Ley 388 de 1997	42
Tabla 6. Categorización en tres grupos y número de municipios	43
Tabla 7. Información e insumos para la realización de los estudios técnicos.....	44
Tabla 8. Documentos orientadores de la incorporación de la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial.....	45

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Lineamientos a modo de ejemplo para la gestión de riesgo implícito en áreas urbanas:.....	37
Cuadro 2. Lineamientos a modo de ejemplo para la gestión de riesgo implícito en áreas rurales	38
Cuadro 3. Matriz resumen a modo de ejemplo de usos permitidos en el ordenamiento territorial.....	39

INTRODUCCIÓN

En el marco de *"la definición de líneas estratégicas de acción y respectivos portafolios de proyectos de mitigación y adaptación frente a la variabilidad y el cambio climático, que permitan impulsar opciones de desarrollo social y económico, lo suficientemente robustas para resistir las condiciones de un clima cambiante"* (Documento de proyecto PRICC. Agosto, 2010: página 2), que define el Plan Regional Integral de Cambio Climático de la Región Capital, Bogotá, Cundinamarca, se ha establecido la pertinencia de la orientación técnica para la incorporación de la gestión integral del riesgo particularmente generado por las amenazas hidroclimáticas en el ordenamiento territorial de los municipios de la zona. Para este fin, se parte de un enfoque conceptual y metodológico que permita abordar apropiadamente dicha problemática, teniendo en cuenta antecedentes nacionales e internacionales, con la perspectiva de generar una herramienta que pueda aportar a la a la reducción del riesgo a nivel local.

Este documento tiene como objetivo aportar en forma de instructivo cómo incorporar el riesgo en el ordenamiento territorial y consecuentemente la gestión del riesgo en las decisiones de planificación y en sus aspectos programáticos, con el fin que los municipios de la Región Capital y en el marco del PRICC, cuenten con una guía que les facilite llevar a cabo los estudios de amenaza y riesgo y se tengan en cuenta de una manera apropiada en la planificación física, la definición y usos del suelo y en la programación de acciones de gestión del riesgo de desastres como parte de la adaptación ante el cambio y la variabilidad climática. Una vez realizadas las indagaciones con las entidades del PRICC y otras entidades del orden nacional y regional se ha desarrollado este documento a modo de propuesta de tipo metodológico, que también puede servir de guía para otros municipios en diferentes zonas del país. En particular se han tenido en cuenta los deslizamientos y las inundaciones como las amenazas de especial relevancia, dadas sus características en relación con la implicación que pueden tener este tipo de eventos en términos de restricciones o prohibiciones o en términos de condicionantes o exigencias a considerar para la definición y los usos del suelo. Otras amenazas relacionadas con aspectos climáticos, e incluso geológicos, podrían tenerse en cuenta, pero su consideración sería básicamente de carácter prescriptivo –i.e. exigencias normativas que se deben cumplir– y no como un determinante físico del territorio de carácter prospectivo –en áreas no ocupadas– o correctivo –en áreas ya ocupadas por asentamientos humanos y actividades productivas–.

Este instructivo presenta una serie secciones cuyo objetivo es ilustrar en forma resumida los antecedentes acerca del tema del riesgo y el ordenamiento territorial. También se presenta un marco conceptual que es imprescindible para entender de manera sencilla la terminología y el propósito de este tipo de proceso

exigido por la legislación. Por otra parte, se hace énfasis en la importancia y el beneficio de llevar a cabo estas exigencias, como un elemento fundamental para la sostenibilidad del desarrollo, la protección de la vida y los bienes de los ciudadanos para lograr mejorar la seguridad y la calidad de vida de las personas. Finalmente se propone el uso de una categorización de los municipios para recomendar el alcance y las exigencias que se deben cumplir como mínimo para llevar a cabo los estudios y aplicar metodologías con diferente nivel de rigor y resolución, desde el punto de vista técnico, que se podrían utilizar en cada caso y cómo usar los resultados. Se presentan algunos ejemplos de evaluaciones técnicas con el fin de ilustrar a las personas que llevan a cabo los estudios cómo se aplican este tipo de metodologías seleccionadas con base en la literatura técnica especializada. Se intenta con esta iniciativa facilitar la toma de decisiones a partir de una adecuada evaluación de las amenazas y del riesgo.

Actualmente a nivel nacional se realizan esfuerzos de concertación para la reglamentación y orientación en relación con la misma temática por parte del Comité Nacional de Conocimiento del Riesgo de Desastres del Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres creado por ley 1523 de 2012. Por esta razón, se espera que los fundamentos y enfoques técnicos aquí propuestos no sólo estén en la misma dirección sino que también contribuyan al trabajo que se realiza principalmente la Unidad Nacional de Gestión del Riesgos de Desastres (UNGRD) de la Presidencia de la República, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y las Corporaciones Autónomas Regionales, el Fondo Adaptación y el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Omar Darío Cardona A.

Bogotá, noviembre 2013

ANTECEDENTES INSTITUCIONALES, LEGALES Y CONCEPTUALES

La incorporación de la gestión del riesgo de desastres en los procesos de planeación y ordenamiento territorial, facilita implantar medidas orientadas a la reducción del riesgo existente y evitar la generación de nuevos riesgos en el futuro. Aunque es un tema obvio actualmente en la mayoría de los países y en América Latina, tan sólo en las últimas dos décadas se ha venido paulatinamente explicitando en las normativas de planificación territorial, urbana, ambiental o de cuencas hidrográficas en los países.

Organismos internacionales como las agencias de la Organización de Naciones Unidas y otras entidades multilaterales de desarrollo como el Banco Mundial o el Banco Interamericano de Desarrollo han señalado en múltiples ocasiones y documentos relacionados con la planificación y la gestión del riesgo que evitar la ocupación de terrenos no apropiados para la urbanización por presencia de amenazas naturales más que una restricción es una oportunidad para el desarrollo local, ya que evita costosas inversiones que de una u otra manera los países deben sufragar en el momento de presentarse un desastre. Se ha planteado cada vez con mayor énfasis que identificar y zonificar de forma anticipada las zonas donde se puede generar riesgo es fundamental para determinar correctamente las áreas de expansión de los municipios a fin de evitar desastres futuros. Así mismo en relación con el riesgo que ya existe (zonas ya ocupadas), se ha indicado que la incorporación del riesgo en la planificación territorial es necesaria para determinar los tratamientos urbanísticos que se deberán implementar a fin de reducir el potencial de pérdidas de vidas y daños económicos en las zonas determinadas como de alto riesgo. El Programa de Prevención de Desastres de la Comunidad Andina hizo especial énfasis en explicitar esta temática y por eso se desarrollaron en los últimos años documentos de divulgación para los países como “Incorporando la Gestión del Riesgo de Desastres en la Planificación del Desarrollo” y “Incorporando la Gestión del Riesgo de Desastres en la Planificación y Gestión Territorial” publicados por el PREDECAN (2009).

En Colombia la incorporación de las amenazas y riesgo como determinantes de la planificación física se empezó a tratar desde los años 80 y hubo ejemplos como los de la ciudad de Manizales y el Plan de Ordenamiento Territorial para la Troncal de Occidente, donde se incluyeron amenazas como las zonas de inesta-

bilidad activa y potencial, las manchas de inundación y de flujos de lodo por erupción volcánica. Las zonas de caída de piroclastos a causa de erupciones. Desde 1989 la Ley 9 de ese año señala la necesidad de reubicar asentamientos de zonas de alto riesgo –con fines de prevención de desastres– por parte de las autoridades municipales y en 1997 se expidió la Ley 388 de Desarrollo Territorial y se exige la incorporación de las amenazas naturales y riesgos en el ordenamiento territorial: Planes de Ordenamiento Territorial, POT, Esquemas de Ordenamiento Territorial, EOT, y Planes Básicos, PBOT, según el tamaño y número de habitantes de los municipios. En 2013 se previó la realización de la primera actualización de estos instrumentos de planificación urbana después de 12 años de los primeros planes que sufrieron revisiones y en parte se debió a la necesidad de incluir las amenazas y riesgos en aquellos municipios donde no se hizo debidamente desde el inicio.

Más recientemente, con motivo de nuevas disposiciones se ha querido enfatizar estas exigencias. Por ejemplo, en 2012 se expidió un decreto ley que señala en uno de sus artículos:

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

Este artículo reconoce que aún falta reglamentación en lo relativo al tipo de metodologías de evaluación de amenazas y riesgo, buscando estandarizarlas, dado que hasta la fecha cada municipio ha adoptado la que ha considerado más apropiada según la información disponible. De manera casi paralela Colombia actualizó su legislación en materia de gestión del riesgo de desastres y expidió en abril de 2012 la Ley 1523, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. En dichas disposiciones se incluyen tres artículos en relación con la temática:

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

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

ARTÍCULO 40. INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN. Los distritos, áreas metropolitanas y municipios en un plazo no mayor a un (1) año, posterior a la fecha

en que se sancione la presente ley, deberán incorporar en sus respectivos planes de desarrollo y de ordenamiento territorial las consideraciones sobre desarrollo seguro y sostenible derivadas de la gestión del riesgo, y por consiguiente, los programas y proyectos prioritarios para estos fines, de conformidad con los principios de la presente ley.

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

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

De igual forma la zonificación ambiental ha seguido este tipo de disposiciones en relación con los planes de ordenamiento y manejo de cuencas (POMCAs) y se ha podido constatar que paulatinamente las exigencias de consideración del riesgo en la planificación se han ido consolidando y volviendo más explícitas, aunque subsisten dificultades en cuanto al tema de la estandarización (resolución, escalas, modelación) de las metodologías técnico-científicas que deben utilizarse para identificar las zonas inestables, las manchas de inundaciones, los flujos torrenciales, etc.

A continuación se hace un resumen de los principales aspectos conceptuales, técnicos y legales a tener en cuenta en relación con la necesidad de considerar el riesgo en el ordenamiento territorial como un determinante o estructurante. Esto es fundamental que sea conocido por quienes tienen a su cargo lograr que este tema se atienda en forma apropiada, con el fin no sólo de entender esta temática nueva o reciente sino para sustentar la pertinencia, importancia y necesidad de realizar este proceso en forma apropiada por parte de la Secretarías de Planeación o las Alcaldías Municipales.

1. MARCO INSTITUCIONAL Y JURÍDICO NACIONAL DE LA GESTIÓN DEL RIESGO

La gestión del riesgo de desastre en Colombia empezó a tratarse desde la Decreto 919 de 1989, como una obligación que corresponde a las autoridades municipales en cuanto a: *"la seguridad de los habitantes de las zonas urbanas ante los peligros naturales, estableciendo, la obligatoriedad a los municipios con la asistencia de las oficinas de planeación de levantar y mantener actualizado el inventario de las zonas que*

presentan altos riesgos para la localización de asentamientos humanos (inundación, deslizamiento) y adelantar programas de reubicación de los habitantes o proceder a desarrollar las operaciones necesarias para eliminar el riesgo en los asentamientos localizados en dichas zonas".

El avance institucional en esta área en el país ha sobresalido en la región, con la creación en 1988 de un Sistema de Prevención y Atención de Desastres, acompañados de un marco legal para el desarrollo de un Plan Nacional. La importancia de los conceptos de prevención, mitigación y preparación, trascendieron incluso a la Constitución de 1991 y a otras leyes como la 99 de 1993 (Medio Ambiente) y la 388 de 1997 (Ordenamiento Territorial). Las dificultades en la introducción de acciones que representaran este espíritu en los instrumentos de gestión y planificación se han presentado a lo largo del tiempo, así como también la generación de guías para este propósito.

La prevención y atención de desastres que se promovió en el país durante los últimos 25 años tuvo un nuevo y más fuerte énfasis con la creación de la Política Nacional de Gestión del Riesgo que aparece con la Ley 1523 de 2012. Esta ley genera un marco conceptual e institucional enfocado al riesgo y su construcción así como en su reducción y la rendición de cuentas de los municipios entorno al mismo. De esta forma el Artículo 1 define que: *"la gestión del riesgo de desastres [...] es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programa, regulaciones, instrumentos y medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible"*. Adicionalmente, reconoce que la planificación es una de las estrategias para reducción del riesgo, en el párrafo 1: *"La gestión del riesgo se constituye en una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y la comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población"*.

La comprensión y gestión sobre el territorio implica muchos retos tanto para las comunidades como para los gobiernos locales, regionales y nacionales. Uno de los temas más complejos a nivel territorial es anticipar el impacto que tienen las dinámicas de la naturaleza, los fenómenos de tipo geológico e hidrometeorológico, y las relaciones los ecosistemas. Adicionalmente, la relación de las comunidades con ese entorno genera necesariamente una transformación del mismo, como describe ampliamente Augusto Ángel Maya (1996), en donde, si no se consideran unos patrones de sostenibilidad, pueden producir conflictos ambientales que llevan al deterioro de los ecosistemas y de la calidad de vida de esas mismas poblaciones humanas.

En consecuencia, las actividades productivas sin monitoreo ni control, el crecimiento urbano en sitios inapropiados y la pérdida del saber tradicional sobre los ciclos ambientales, particularmente los de origen hidrometeorológico, pueden desencadenar problemas de alta degradación ambiental en áreas extensas, como en el caso de las cuencas hidrográficas. Dicha situación ha exacerbado la inestabilidad de las laderas, el potencial de inundaciones súbitas y de avalanchas, y por consiguiente la recurrencia de desastres naturales, tal como viene evidenciándose en el país con las consecuencias de las temporadas de lluvias que se vieron intensificadas por el fenómeno de La Niña en el 2010 y 2011.

Al respecto, el estudio de los desastres naturales y del riesgo de desastres ha permitido revisar conceptual y metodológicamente sus causas y consecuencias, así como su gestión para reducir los impactos en la sociedad. Uno de los aportes en este sentido es el concepto de seguridad territorial que expone Gustavo Wilches-Chaux (2007), en el cual el territorio se comprende como una unidad indisoluble con las dinámicas de las comunidades y de los ecosistemas que lo conforman, y por lo tanto la seguridad del mismo considera una serie de relaciones que pueden manifestarse en componentes: seguridad y soberanía alimentaria, seguridad ecológica, seguridad social, seguridad económica y seguridad jurídica-institucional. En este sentido, la planificación y ordenamiento del territorio, así como las estrategias para la sustentabilidad del desarrollo, son indispensables para generar las condiciones de seguridad requeridas para las comunidades.

Las condiciones de riesgo se generan por la confluencia de la amenaza y la vulnerabilidad. Según lo describe Omar Darío Cardona A.: "*...Amenazas que corresponden a determinadas condiciones físicas de peligro latente que se pueden convertir en fenómenos destructivos. Estos pueden tener su origen en la dinámica natural o ser inducidos o causados por los seres humanos. La vulnerabilidad comprende distintas características propias o intrínsecas de la sociedad que la predispone a sufrir daños en diversos grados. Una población expuesta a los efectos de un fenómeno físico sufrirá más o menos daño de acuerdo con el grado de vulnerabilidad que exhibe...*" (Lavell 2000; Cardona 2004).

2. ZONIFICACIÓN AMBIENTAL, SERVICIOS ECOSISTÉMICOS Y GESTIÓN DEL RIESGO

Desde el ámbito ambiental se han creado también instrumentos que han visto la necesidad de incluir el riesgo y la gestión del riesgo. De acuerdo a la Política Hídrica Nacional del 2010, la gestión del riesgo asociada al recurso hídrico ha estado hasta ahora relacionada principalmente a acciones encaminadas a dar respuesta a daños e impactos generados hidrometeorológicos, tanto a la población como a la infraestructura, entre los que se encuentran la recuperación, reconstrucción y rehabilitación de acueductos. Otras acciones desarrolladas se han orientado a la planificación territorial en prevención y mitigación de riesgos, buscando fortalecer los procesos de ordenamiento territorial y sectorial, para lo cual se ha brindado apoyo técnico a los municipios en la elaboración de planes de contingencia y procesos de capacitación a las empresas prestadoras de servicios públicos en la formulación de programas de reducción de riesgos y planes de contingencia ante el desabastecimiento de agua en temporadas de sequía (MAVDT, 2010).

La política establece por lo tanto como uno de sus objetivos (el objetivo 4) desarrollar la gestión integral de los riesgos asociados a la oferta y disponibilidad del agua. Además, esta hace referencia a su inclusión en las guías metodológicas para la formulación de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas, sin embargo es reconocido en el documento que "*no existe desarrollo suficiente para su adecuada implementación*" (MAVDT, 2010. p. 58). De todas formas se menciona que se están desarrollando dos guías metodológicas, una para priorización de microcuencas críticas para abastecimiento de agua, y otra para elaborar los planes de reducción de vulnerabilidad municipal y atención de emergencias ante escasez de agua, y que además se cuenta con las metodologías para la evaluación, zonificación y reducción de

riesgos por inundaciones y avenidas torrenciales y para la evaluación, zonificación y reducción de riesgos por fenómenos de remoción en masa, aunque no están referenciadas claramente en dicho documento.

Ahora bien, de acuerdo a la Política Nacional de Gestión Integrada de la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos: *“La gestión del riesgo puede ser un factor clave de articulación intra, inter institucional e inter-sectorial y movilizador de gestión al interior de las políticas económicas y sectoriales, para enfrentar los riesgos asociados al cambio ambiental y reducir así, la vulnerabilidad social y sectorial asociada al deterioro de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos”* (MADS, 2012). Desde la perspectiva de dicha política, el país aún tiene mucho camino por recorrer en el manejo integrado del riesgo ambiental (Wilches-Chaux, 2006, en: MADS, 2012), que puede apreciarse por ejemplo en la dificultad en la incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial, ante lo cual, se evidencia la necesidad de la protección de ecosistemas (y su biodiversidad) la cual puede contribuir a la reducción de la vulnerabilidad de los territorios y comunidades ante desastres naturales. Es así como a la luz de este tema se ha propuesto en la política un eje de *“Biodiversidad, Gestión del Riesgo y Servicios Ecosistémicos”* el cual se refiere a *“la necesidad de adelantar acciones para enfrentar las amenazas relacionadas con el cambio ambiental (pérdida y transformación de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos + variabilidad y cambio climático), para mantener la resiliencia socio-ecosistémica y reducir su vulnerabilidad, siguiendo el enfoque de mitigación y adaptación basadas en ecosistemas, de manera que no se comprometa la calidad de vida a escalas nacional, regional, local y transfronteriza”* (MADS, 2012).

3. CAMBIO CLIMÁTICO, ADAPTACIÓN Y GESTIÓN DEL RIESGO

El IPCC considera el cambio climático como *“el cambio en el estado del clima que puede ser identificado (usando pruebas estadísticas) por los cambios en la media o variabilidad de sus propiedades y que persiste por un período determinado extendido, generalmente durante décadas o más”,* cambios resultado de la variabilidad natural o la actividad humana (IPCC, 2007). Por otra parte la CMNUCC considera el cambio climático como el producto directo o indirecto de la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global en adición a la variabilidad climática observada sobre periodos de tiempo comparables (IPCC, 2007). Esta problemática abarca diferentes temas y actividades, desde la ciencia del clima, tecnología para pronóstico de eventos, desarrollo de modelos climáticos y escenarios de cambio climático, cuantificación de emisiones que producen el efecto invernadero, soluciones energéticas alternativas al uso de combustibles fósiles, programas de mitigación del cambio climático, educación, comunicación, y estrategias de adaptación al cambio climático, entre otras. En lo que respecta a la adaptación al cambio climático, el IPCC y la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de Naciones Unidas (EIRD), la definen como el ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a: estímulos climáticos reales, estímulos climáticos previstos o efectos de dichos estímulos climáticos. Esta respuesta modera los daños esperados o toma ventaja de las posibles situaciones benéficas (Lavell, 2011). Ejemplos de opciones sugeridas de adaptación por la revisión del Programa de Trabajo de Nairobi, sobre la evaluación de la adaptación, la planeación y la práctica, en 2010 del CMNUCC son: el cambio en el comportamiento a nivel individual (por ejemplo el ahorro del agua en tiempos de sequía), opciones tecnológicas (incremento de las defensas del mar o viviendas a prueba de inundaciones), sistemas de alerta temprana para eventos extremos, gestión del riesgo mejorada incluyendo seguros, la conservación de la biodiversidad

para reducir los impactos del cambio climático en las personas (por ejemplo conservando y restaurando manglares para la protección de personas de las tormentas) (UNFCCC, 2010).

A principios de 2012 el IPCC dio a conocer su más reciente publicación bajo el título Informe Especial Sobre la Gestión de Riesgos de Fenómenos Extremos y Desastres para Fomentar la Adaptación al Cambio Climático, que se le conoce como el SREX¹ –por su sigla en inglés–. El SREX integra los conocimientos de la ciencia del clima, la gestión del riesgo de desastres y la adaptación con el objetivo de contribuir al debate sobre cómo reducir el riesgo asociado a fenómenos extremos y desastres en el contexto de un clima cambiante. En general el SREX, al cual se hace aquí referencia, proporciona información sobre cómo la variabilidad climática natural y el cambio climático generado por el ser humano influyen en la frecuencia, intensidad, la extensión espacial y la duración de algunos fenómenos extremos meteorológicos y climáticos; cómo la vulnerabilidad de la sociedad y de los ecosistemas expuestos influye en el impacto y la probabilidad de que se presenten desastres; cómo los modelos de desarrollo pueden hacer que las futuras comunidades lleguen a ser más o menos vulnerables a los eventos extremos; cómo la experiencia con los extremos climáticos y la adaptación al cambio climático ofrece lecciones sobre la forma como se debe hacer la gestión del riesgo actual y de nuevos riesgos relacionados con fenómenos extremos meteorológicos y climáticos, y cómo las poblaciones pueden hacerse más resilientes antes de que los desastres se materialicen.

El Plan Nacional de Desarrollo de Colombia 2010 – 2014 “Prosperidad para Todos”, establece dentro de su capítulo VI “Sostenibilidad Ambiental y Prevención del Riesgo” la necesidad de “...establecer un Plan Nacional de Adaptación que apoye la preparación del país para enfrentar eventos climáticos extremos [...] reduciendo sus consecuencias en el largo plazo para las poblaciones, el sector productivo y los ecosistemas...”. La Ley 1450 del 16 de Junio de 2010 por la cual se expide el Plan de Nacional de Desarrollo define el rol del Departamento Nacional de Planeación (DNP) en el marco de la Formulación del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. En el Artículo 217 se establece que “El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático será coordinado por el Departamento Nacional de Planeación con el apoyo del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial o quien haga sus veces. Las entidades públicas del orden nacional deberán incorporar en sus Planes Sectoriales una estrategia de adaptación al Cambio Climático conforme a la metodología definida por el DNP, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y el IDEAM y revisado por los mismos previo a la autorización final por parte del CONPES”. Con base en esto la Subdirección de Desarrollo Ambiental Sostenible del DNP ha estado liderando la construcción de estas metodologías y inicialmente concluyó que había una metodología claramente definida que permita orientar a los actores sobre cómo medir la vulnerabilidad y, en general, el riesgo asociado al cambio y a la variabilidad climática. Por lo cual se ha propuesto brindar a los sectores y los territorios un protocolo que permita medir de manera estándar y comparable el riesgo climático. En consecuencia es importante tener en cuenta en este proyecto estas contribuciones desde la perspectiva del cambio climático si ya existen.

1 Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, SREX

ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y GESTIÓN DEL RIESGO

La incorporación de la gestión del riesgo de desastre en los procesos de planificación y ordenamiento territorial facilita implantar medidas orientadas a la reducción del riesgo existente y evitar la generación de nuevos riesgos en el futuro.

Estas medidas, como evitar la ocupación de terrenos no apropiados para la urbanización por presencia de amenazas naturales y socio-naturales, más que una restricción es una oportunidad para el desarrollo local, ya que evita costosas inversiones que de una u otra manera los municipios deben sufragar en el momento de presentarse un desastre. Identificar y zonificar de forma anticipada las zonas donde se puede generar riesgo es fundamental para determinar correctamente las áreas de expansión del municipio a fin de evitar desastres futuros. Así mismo, en relación con el riesgo que ya existe, la incorporación del riesgo en la planificación territorial es necesaria para determinar los tratamientos urbanísticos que se deberán implementar a fin de reducir el potencial de pérdidas de vidas y daños económicos en las zonas determinadas como de alto riesgo (MAVDT, 2005).

Este proceso debe verse no como una carga más para las autoridades municipales para efectos de cumplir con las disposiciones legales y de planeación, sino como una medida con la cual se evite que los fenómenos potencialmente peligrosos se conviertan en amenazas ciertas para los componentes urbanos o rurales expuestos, que de esta forma se convierten, a su vez, en elementos o activos vulnerables, lo que influye o impide que la inversión sea efectivamente para el desarrollo social, físico, económico y en muchas ocasiones tenga que desviarse hacia la atención de emergencias y desastres debido a riesgos no manejados.

Un municipio que integre en forma correcta el riesgo dentro de su proceso de planificación territorial como determinante del uso del suelo podrá tener un apropiado conocimiento de su territorio en relación con las amenazas y las áreas de posible afectación (tanto las ya ocupadas como las no ocupadas, pero que podrían ser ocupadas), mediante la zonificación de la aptitud del suelo. Igualmente, lograría implementar una reglamentación para evitar ocupaciones que generarían riesgo y por consiguiente futuros desastres (suelo de

protección o de uso con restricciones). De igual forma podría priorizar las acciones que se deben hacer para reducir el riesgo (como por ejemplo el reasentamiento o la reubicación). Por estas razones el Ordenamiento Territorial se convierte en un instrumento de planificación y gestión del riesgo idóneo que permite actuar sobre el territorio evitando desastres y reduciendo el riesgo, y conduciendo al municipio hacia un desarrollo seguro, orientado a mejorar las condiciones de vida de la población.

Cuando las autoridades municipales, como tomadores de decisiones, optan por ciertos proyectos, desarrollos o propuestas de mejoramiento, siempre se observan los pro y los contra que se tienen en la inversión de los recursos y las ventajas y desventajas de su implementación. La ganancia que se busca se traduce en nuevos recursos o en mejoras para las condiciones de vida de la comunidad o por qué no, en el reconocimiento por parte de la población de la acertada gestión que se realiza, lo que deriva también en claros réditos políticos. Ahora bien, ¿por qué cuando se trata de inversiones en temas físicos, como vivienda, obras, vías, acueductos, alcantarillados, no se valoran las implicaciones que conlleva la ejecución de este tipo de obras en las localidades?, ¿por qué no se hace una valoración de los pro y contras de llevarlas a cabo?, ¿qué significa económicamente y socialmente la intervención que se plantea hacer?. Si se hacen cálculos del riesgo desde el punto de vista financiero ¿por qué esto no se hace usualmente con las acciones de gestión del riesgo de desastres? Es justamente este análisis el que debe realizarse para encontrar las mejores posibilidades para el territorio y por lo tanto para la comunidad y el bien común. Cada decisión usualmente implica una intervención, lo local conlleva alguna transformación positiva o negativa del entorno. Si se aplican estrategias de gestión del riesgo de desastres adecuadamente se pueden tomar decisiones acertadas, conforme con las posibilidades reales del medio, evitando posteriores emergencias y desastres. Se trata de poder tomar las decisiones sensatas de adaptación de acuerdo con el contexto social y natural. No se propone restringir ni frenar el desarrollo que potencialmente pueda tener un municipio, sino en identificar posibilidades reales, un crecimiento sostenible y una visión inteligente de futuro. En cualquier caso se trata de economía, pues el invertir en forma correcta e inteligente los recursos conduce a que no se tenga que invertir en deficiencias y en problemas no calculados.

Aquellos que logran visualizar las bondades del trabajo integrado de la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial sin duda se le va a reconocer por su acierto, por su visión y por propender la sostenibilidad, la calidad de vida y la seguridad de la población. Sin embargo, equivocadamente hay quienes ven la gestión del riesgo como una carga más para la administración, un simple requisito sin sentido, como un problema o una restricción para desarrollo. Es importante aquí reiterar que se trata justamente de todo lo contrario; pues poder invertir los recursos sabiendo que el potencial de beneficio es el óptimo conduce a tener la seguridad que se están tomando las mejores determinaciones.

Las autoridades municipales deben siempre preguntarse: ¿cuántos recursos se invierten anualmente en la atención recurrente de emergencias y desastres en el territorio?, ¿cuántas de estas familias se les repite su situación año tras año?, ¿cuántos programas del plan de gobierno se ven afectados o se han visto afectados por que deben desviarse sus recursos para atender un deslizamiento, una inundación, una avalancha, entre otros? Además, ¿cuántas vidas se han perdido, cuántas familias se han quedado sin vivienda? Aunque evaluar lo que ha dejado de ocurrir resulte difícil, hay que intentar cuantificar mejor, ¿cuántas vidas se han salvado?, ¿cuántas ayudas no se han tenido que entregar?, o en términos de gestión y prevención ¿cuántas viviendas se han reubicado?, ¿en cuántos proyectos se ha incorporado la gestión del riesgo de manera apropiada? Segura-

mente las respuestas desde todo punto de vista serán positivas. Es importante para el tomador de decisiones y todo su grupo técnico reconocer que ambos procesos, tanto la gestión del riesgo como el ordenamiento territorial son procesos de adaptación que tienen relación directa el uno con el otro, pues están basados en el conocimiento del territorio, sus posibilidades y sus restricciones; dando orientación a cómo debe ser el desarrollo en forma adecuada y su con la posibilidad de mantenerse en el futuro. Lograr tener encadenados ambos procesos sirve para que el municipio opte por un mejor crecimiento, disminuyan sus emergencias o desastres y realmente pueda encaminarse hacia la inversión social y la competitividad.

Se han identificado varias relaciones entre estos dos procesos mutuamente vinculados:

- Ambos buscan mejorar la calidad de vida de las comunidades pensando en un desarrollo sostenible, equilibrando el crecimiento económico y social con la dimensión ambiental y territorial.
- Involucran diferentes actores del nivel nacional, regional y local, además de la comunidad y el sector privado, a fin de que cada uno desde su ámbito de competencia, reconozca sus responsabilidades y cuál es su rol en la generación de los problemas y lo más importante en la generación de soluciones.
- La concertación es una de las principales estrategias de ambos procesos, debe llegarse a la priorización de las necesidades de todos los involucrados, para que se tomen las decisiones acordes y coordinadamente en el municipio.
- La incorporación del riesgo en los procesos de planeación y ordenamiento territorial, facilita la implantación de medidas orientadas a la disminución del riesgo existente y evitar la generación de nuevos riesgos a futuro. Medidas que de igual forma deben articularse con los demás procesos de la gestión del riesgo (el conocimiento del riesgo y el manejo de desastres cuando se presenten).
- La ausencia de la aplicación de estos dos procesos interrelacionados se ve reflejada en las recurrentes inversiones de tipo remedial que deben asumir los municipios, afectando directamente las arcas de otros programas de tipo social.
- Impedir la ocupación de terrenos no apropiados para la urbanización debido a la existencia de amenazas naturales o socio-naturales no es una simple restricción sino una oportunidad para el desarrollo local, ya que evita costosas inversiones en que de una u otra manera los municipios debe incurrir en el momento de presentarse un desastre. Identificar y zonificar de forma anticipada las zonas donde se puede generar riesgo es fundamental para determinar correctamente las áreas de expansión del municipio a fin de evitar desastres futuros. Así mismo en relación con el riesgo ya existente, la incorporación del riesgo en la planificación territorial es necesaria para determinar los tratamientos urbanísticos que se deberán implementar a fin de reducir el potencial de pérdidas de vidas y daños económicos en las zonas determinadas como de alto riesgo. (MAVDT, 2005). Sin embargo, el poder determinar las zonas de amenaza y riesgo, establecer los usos de suelo adecuado para el crecimiento e identificar los proyectos prioritarios del municipio, no son el único resultado de la gestión del riesgo en el territorio y la adaptación, también hay otros aspectos que hacen que sea atractivo para una administración aplicar todo el conjunto de estrategias que existen y que conducen a un mejor desarrollo. Al ejecutar, realizar y trabajar sobre las acciones encaminadas al

control, disminución y preparación frente al riesgo, se están reduciendo a su vez los impactos potenciales devastadores de eventos ambientales peligrosos y las emergencias que de ellos se derivan en la localidad, lo cual a su vez está expresado en:

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

De otro lado, incorporar la gestión del riesgo en todos los procesos de planeación (ordenamiento y plan de desarrollo) contribuye a encaminar todos los programas planteados hacia el desarrollo sostenible, entendido éste como el satisfacer las necesidades actuales sin mermar las posibilidades de que las generaciones futuras satisfagan las suyas; dicho de otro modo, se deben utilizar los recursos de manera racional y equitativa.

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

Ahora bien, es cierto que se necesitan inversiones en el conocimiento bien fundamentadas en su alcance técnico para poder tener insumos apropiados y sólidos en los municipios para la toma de decisiones. ¿Cuáles son las amenazas o peligros existentes? ¿cuál es la probabilidad de ocurrencia de los eventos que las caracterizan; es decir, que tan factible es que se presenten o con qué frecuencia?, ¿cuáles son sus posibles impactos, daños o pérdidas que se pueden producir si estos eventos se presentan? y ¿qué se debe hacer para disminuir dichas posibles consecuencias? ya sea porque la población ya se encuentra expuesta o porque frente a una futura ocupación de áreas propensas a eventos peligrosos se podría configurar un riesgo; es decir un desastre potencial. Esto no significa en todos los casos tener que realizar estudios muy detallados y exigentes desde el punto de vista técnico, pues en muchas ocasiones se puede generar información acerca de las amenazas y riesgos con procesos metodológicos muy simples y sencillos y se pueden tomar decisiones informadas y con criterios apropiados como administradores de lo público, no obstante las incertidumbres que siempre existirán en este tipo de evaluaciones y análisis.

REVISITANDO LA NORMATIVA

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

Entre los conceptos y finalidad del ordenamiento territorial, la Ley 1454 de 2011 en su Artículo 2º, define además que este es: “un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal [...]”, con el objeto de alcanzar una organización político administrativa apropiada del Estado en el territorio, la cual facilite: “el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial”, interpretado como un: “desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia”, estos alcances se enmarcan dentro de los principios del desarrollo sostenible (WECD, 1987), entendido como el que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (equidad intergeneracional) y satisfacer las necesidades de una región de forma que no comprometa el desarrollo de otras regiones (equidad intrageneracional); lo cual se ve reflejado en el Artículo 6 bajo la premisa: “El ordenamiento del territorio municipal y distrital se hará tomando en consideración las relaciones intermunicipales, metropolitanas y regionales [...]; e incorporará instrumentos que permitan regular las dinámicas de transformación territorial de manera que se optimice la utilización de los recursos naturales y humanos para el logro de condiciones de vida dignas para la población actual y las generaciones futuras”. Todo esto se logra a partir de la orientación del crecimiento cuantitativo hacia un desarrollo cualitativo, es decir, en el que el consumo material y energético de la economía, no crezcan por encima de la capacidad de carga de los ecosistemas ni del sistema sociocultural de la comunidad y con el mantenimiento de la capacidad adaptativa de los sistemas naturales, económicos y socioculturales frente al proceso de cambio global. Esa búsqueda de la sostenibilidad se convierte en un punto de articulación entre la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial. La cual se sustenta a través de los instrumentos dados por normativa, los cuales son descritos a continuación.

El Decreto 93 de 1998, entre los objetivos² contempla acciones en concordancia con el ordenamiento territorial descritas en el Artículo 3 titulado: “La reducción de riesgos y prevención de desastres. [...] formular las medidas para prevenir o mitigar sus efectos mediante el fortalecimiento institucional y a través de las acciones de mediano y corto plazo que se deben establecer en los procesos de planificación del desarrollo a nivel sectorial, territorial y de ordenamiento a nivel municipal”. Actualmente está en proceso la aprobación de un nuevo Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres que igualmente invoca la incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial como uno de los objetivos estratégicos del plan en su componente general.

La normativa establece la sostenibilidad como uno de los principios rectores del ordenamiento territorial³ bajo el concepto que: “El ordenamiento territorial conciliará el crecimiento económico, la sostenibilidad fiscal, la equidad social y la sostenibilidad ambiental, para garantizar adecuadas condiciones de vida de la población” y así mismo son competencias del municipio: formular y adoptar los planes de ordenamiento del territorio; reglamentar de manera específica los usos del suelo, en las áreas urbanas, de expansión y rurales, de acuerdo con las leyes; y optimizar los usos de las tierras disponibles y coordinar los planes sectoriales, en armonía con las políticas nacionales y los planes departamentales y metropolitanos.”

En lo que respecta a la gestión de riesgos, la normativa también contempla la sostenibilidad como una de sus premisas a lograr, y determina en el Capítulo denominado: “La gestión del riesgo, responsabilidades, principios, definiciones y sistema nacional e gestión del riesgo de desastres⁴ en el Artículo 1º como un proceso orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.

Adicionalmente, el párrafo 1 dice que: “La gestión del riesgo se constituye en una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos,, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está relacionado con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población.

La gestión del riesgo de acuerdo a la normativa, se ha venido incorporando en el ordenamiento territorial, desde la aplicación de la Ley 9ª de 1989 por la cual se dictan normas sobre planes de desarrollo municipal, desde diferentes artículos como lo definido en el Artículo 2, sobre los aspectos que debe tener un plan de desarrollo ⁵: “[...]1. Un plan y un reglamento de usos del suelo [...], así como normas urbanísticas específicas [...]”; 4. La reserva de tierras urbanizables necesarias [...] para reubicar aquellos asentamientos humanos que presentan graves riesgos para la salud e integridad personal de sus habitantes”; Más adelante habla acerca de “5. La asignación en las áreas urbanas de actividades, tratamientos y prioridades para desarrollar los terrenos

2 Decreto 93 de 1998, por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.

3 Artículo 3º de la Ley 1454 de 2011.

4 Descrito en el Artículo 1º, Capítulo I de la Ley 1523 de 2012

5 Modificado Ley 2 de 1991 y posteriormente derogado Artículo 138 Ley 388 de 1997.

no urbanizados, construir los inmuebles no construidos, conservar edificaciones y zonas de interés histórico, arquitectónico y ambiental, reservar zonas para la protección del medio ambiente y de la ecología, delimitar las zonas de desarrollo diferido, progresivo, restringido y concertado, renovar y redesarrollar zonas afectadas con procesos de deterioro económico, social y físico y rehabilitar las zonas de desarrollo incompleto o inadecuado”.

En el Artículo 10 se habla acerca de la expropiación destinada para diferentes fines, entre los cuales se destacan: la constitución de zonas de reserva para la protección del medio ambiente y de los recursos hídricos, y la reubicación de asentamientos humanos ubicados en sectores de alto riesgo y rehabilitación de inquilinatos⁶. A partir de esta normativa se observa por primera vez la obligatoriedad de incluir en los Planes de Desarrollo, acciones concretas para la intervención del territorio, y la definición de responsabilidades y competencias con respecto a la visión de futuro de los municipios.

Aunque ya ha sido actualizada, modernizada y armonizada la legislación de la gestión del riesgo, es importante destacar de la legislación anterior expedida mediante la Ley 46 de 1988, que creó y organizó el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres varios aspectos fundamentales. El Capítulo I, Artículo 5. Sobre aspectos de planeación regional, departamental y municipal señalaba lo siguiente: “Los organismos de planeación del orden territorial, tendrán en cuenta las orientaciones y directrices señaladas en el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y contemplarán las disposiciones y recomendaciones específicas sobre la materia, en especial en lo que hace relación a los planes de desarrollo regional de que trata la Ley 76 de 1985, los planes y programas de desarrollo departamental de que trata el Decreto 1527 de 1981 y los planes de desarrollo municipal regulados por el Decreto 1306 de 1980 y las demás disposiciones que las reglamentan o complementan”. Por otro lado, el Decreto ley 919 de 1989, reglamentario de la Ley 46 de 1988, desde su Artículo 3 determinó entre las políticas, acciones y programas, tanto de carácter sectorial como del orden nacional, regional; “[...] la coordinación interinstitucional e intersectorial. Los sistemas y procedimientos de control y evaluación de los procesos de prevención y atención.”⁷ Así mismo en su Artículo 5, titulado: “Planeación regional, departamental y municipal”. En el que se definió que: “los organismos de planeación del orden territorial, tendrán en cuenta las orientaciones y directrices señaladas en el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, y contemplarán las disposiciones y recomendaciones específicas sobre la materia, en especial en lo que hace relación a los planes de desarrollo regional de que trata la Ley 76 de 1985, los planes y programas de desarrollo departamental de que trata el Decreto 1222 de 1986 y los planes de desarrollo municipal regulados por el Decreto 1333 de 1986 y las demás disposiciones que las reglamentan o complementan.

Dicha legislación, más adelante, en el Artículo 6 señalaba: “Todas las entidades territoriales tendrán en cuenta en sus planes de desarrollo, el componente de prevención de desastres y, especialmente, disposiciones relacionadas con el ordenamiento urbano, las zonas de riesgo y los asentamientos humanos, así como

6 Modificado Artículo 58 Ley 388 de 1997.

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

las apropiaciones que sean indispensables para el efecto en los presupuestos anuales. Cuando sobre estas materias se hayan previsto normas en los planes de contingencia, de orientación para la atención inmediata de emergencias y en los planes preventivos del orden nacional, regional o local, se entenderá que forman parte de los planes de desarrollo y que modifican o adicionan su contenido.”⁸ En relación con el ordenamiento territorial el Artículo 12 señalaba en los “Elementos del planeamiento de operaciones en caso de situaciones de desastre”: “[...] d) Identificación de la amenaza, es decir de la probabilidad de que ocurra un desastre en un momento y en un lugar determinados. e) Análisis de la vulnerabilidad de la población, los bienes y el medio ambiente amenazados, o sea la determinación de la magnitud en que son susceptibles de ser afectados por las amenazas. i) Inclusión de la dimensión de prevención en los planes de desarrollo. k) Lugares utilizables durante el desastre y formas de utilización.” Significa lo anterior que desde la legislación que entonces se expidió bajo la denominación de prevención de desastres y que hoy es el antecedente de la legislación sobre gestión del riesgo de desastres (Lay 1523 de 2012), ya se tenía total claridad de el vínculo de la planificación con la reducción del riesgo y la necesidad de considerarlo como elemento fundamental y determinante para la ocupación segura del territorio.

Por su parte, la Ley 99 de 1993. En el Artículo 5 define el Ministerio de Medio Ambiente como órgano articulador entre la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial, mediante sus funciones: Realizar actividades de análisis, seguimiento, prevención y control de desastres, en coordinación con las demás autoridades competentes, y asistirles en los aspectos medioambientales en la prevención y atención de emergencias y desastres; adelantar con las administraciones municipales o distritales programas de adecuación de áreas urbanas en zonas de alto riesgo, tales como control de erosión, manejo de cauces y reforestación; en el Parágrafo 3 se menciona como objeto principal de la Corporación Autónoma Regional “la defensa y protección del medio ambiente urbano”, la cual podrá adelantar con las administraciones municipales o distritales programas de adecuación de áreas urbanas en zonas de alto riesgo, tales como control de erosión, manejo de cauces y reforestación; así mismo podrá administrar, manejar, operar y mantener las obras ejecutadas o aquellas que le aporten o entreguen los municipios o distritos para esos efectos.⁹

El Artículo 31, Funciones. Adicionado por el Artículo 9, Decreto Nacional 141 de 2011 señala que son “Funciones de las Corporaciones Autónomas Regionales: Participar con los demás organismos y entes competentes en el ámbito de su jurisdicción, en los procesos de planificación y ordenamiento territorial a fin de que el factor ambiental sea tenido en cuenta en las decisiones que se adopten; Participar con los demás organismos y entes competentes en el ámbito de su jurisdicción, en los procesos de planificación y ordenamiento territorial a fin de que el factor ambiental sea tenido en cuenta en las decisiones que se adopten.”¹⁰ En el Artículo 56: “El Diagnóstico Ambiental de Alternativas incluirá información sobre la localización y características del entorno geográfico, ambiental y social de las alternativas del proyecto, además de un análisis comparativo de los efec-

8 Artículo 6°. El componente de prevención de desastres en los planes de desarrollo de las entidades territoriales.

9 Reglamentado por el Decreto Nacional 1713 de 2002, Reglamentada por el Decreto Nacional 4688 de 2005, Reglamentada parcialmente por el Decreto Nacional 3600 de 2007, Reglamentada por el Decreto Nacional 2372 de 2010.

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

tos y riesgos inherentes a la obra o actividad y de las posibles soluciones y medidas de control y mitigación para cada una de las alternativas.”¹¹. Y en el Artículo 65. En materia ambiental a los municipios y a los distritos con régimen constitucional especial, corresponden las siguientes atribuciones especiales: “Dictar, dentro de los límites establecidos por la ley, los reglamentos y las disposiciones superiores, las normas de ordenamiento territorial del municipio y las regulaciones sobre usos del suelo.”¹²

En la Ley 388 de 1997. Capítulo I. Artículo 1. Se establecen los mecanismos que permitan al municipio, “[...] en ejercicio de su autonomía, promover el ordenamiento de su territorio, el uso equitativo y racional del suelo, la preservación y defensa del patrimonio ecológico y cultural localizado en su ámbito territorial y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo, así como la ejecución de acciones urbanísticas eficientes. El Artículo 3 define el ordenamiento del territorio como una función pública para el cumplimiento de algunos fines entre los que se destacan: “Atender los procesos de cambio en el uso del suelo y adecuarlo en aras del interés común, procurando su utilización racional en armonía con la función social de la propiedad a la cual le es inherente una función ecológica, buscando el desarrollo sostenible; Mejorar la seguridad de los asentamientos humanos ante los riesgos naturales.” Luego el Artículo 8. Define la función pública del ordenamiento del territorio local, la cual se realiza mediante: “la acción urbanística de las entidades distritales y municipales, referida a las decisiones administrativas y a las actuaciones urbanísticas que les son propias, relacionadas con el ordenamiento del territorio y la intervención en los usos del suelo.” Y “[...] Determina las zonas no urbanizables que presenten riesgos para la localización de asentamientos humanos, por amenazas naturales, o que de otra forma presenten condiciones insalubres para la vivienda.” Más adelante el Artículo 10. Define las determinantes de los planes de ordenamiento territorial, entre las cuales se destacan¹³: Las relacionadas con la conservación y protección del medio ambiente, los recursos naturales la prevención de amenazas y riesgos naturales: “Las políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales.” En el Artículo 12 se señala que: “La determinación y ubicación en planos de las zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos, por amenazas o riesgos naturales o por condiciones de insalubridad”.¹⁴ El Artículo 13, el cual integra “políticas de mediano y corto plazo, procedimientos e instrumentos de gestión y normas urbanísticas.”; La delimitación, en suelo urbano y de expansión urbana, de las áreas de conservación y protección de los recursos naturales, paisajísticos y de conjuntos urbanos, históricos y culturales, de conformidad con la legislación general aplicable a cada caso y las normas específicas que los complementan en la presente Ley; así como de las áreas expuestas a amenazas y riesgos naturales. [...] el señalamiento de los correspondientes instrumentos de gestión; así como los mecanismos para la reubicación de los asentamientos humanos localizados en zonas de alto riesgo para la salud e integridad de sus habitantes, incluyendo la estrategia para su transformación para evitar su nue-

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

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

13 Reglamentado por el Decreto Nacional 2201 de 2003.

14 Artículo 12° de la Ley 388 de 1997. Describe el contenido del componente general del plan de ordenamiento territorial.

va ocupación.”¹⁵ El Artículo 14, entre los contenidos del componente rural del plan de ordenamiento territorial: “La delimitación de las áreas de conservación y protección de los recursos naturales paisajísticos, geográficos y ambientales, incluyendo las áreas de amenazas y riesgos, o que formen parte de los sistemas de provisión de los servicios públicos domiciliarios o de disposición final de desechos sólidos o líquidos.”¹⁶ El Artículo 15, el cual define las normas urbanísticas que regulan el uso, la ocupación y el aprovechamiento del suelo y definen la naturaleza y las consecuencias de las actuaciones urbanísticas. Entre esas normas urbanísticas en relación con el riesgo se tienen: “Las que definan las áreas de protección y conservación de los recursos naturales y paisajísticos, las que delimitan zonas de riesgo [...]; la localización de terrenos cuyo uso es el de vivienda de interés social y la reubicación de asentamientos humanos localizados en zonas de alto riesgo.” Y en el Artículo 16, se establecen las áreas de reserva y las regulaciones para la protección del medio ambiente, conservación de los recursos naturales y defensa del paisaje, así como para las áreas de conservación y protección del patrimonio histórico, cultural y arquitectónico; así mismo, el inventario de las zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos, por amenazas naturales o por condiciones de insalubridad.¹⁷

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

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

Ahora bien, la Ley 1523 de 2012 determina la gestión de riesgo de desastres como: “[...] un proceso orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y

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

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

17 En el Artículo 16° de la Ley 388 de 1997, se determina el contenido de los planes básicos de ordenamiento territorial.

para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.”¹⁸ En el parágrafo 1 se señala que la gestión del riesgo se constituye en: “[...] una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, [...] mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está relacionado con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población.” El Artículo 7 habla acerca de los cuatro componentes del sistema nacional, entre los que se destacan los instrumentos de planificación. Y en el Artículo 12 se especifica que los Alcaldes son conductores del sistema nacional de gestión del riesgo de desastres “[...] en su nivel territorial y están investidos con las competencias necesarias para conservar la seguridad, la tranquilidad y la salubridad en el ámbito de su jurisdicción.”¹⁹ pues son ellos como jefes de la administración local quienes “[...] representan al Sistema Nacional en el Distrito y el municipio [...]”. Como conductores “[...] del desarrollo local, es el responsable directo de la implementación de los procesos de gestión del riesgo [...] incluyendo el conocimiento y la reducción del riesgo y el manejo de desastres en el área de su jurisdicción.”²⁰

Adicionalmente se señala que: “Los alcaldes y la administración municipal o distrital, deberán integrar en la planificación del desarrollo local, acciones estratégicas y prioritarias en materia de gestión del riesgo de desastres, especialmente, a través de los planes de ordenamiento territorial, de desarrollo municipal o distrital y demás instrumentos de gestión pública”. Específicamente desde el capítulo III de la Ley en mención, se tienen previstos “Los tres niveles de gobierno formularán e implementarán planes de gestión del riesgo para priorizar, programar y ejecutar acciones por parte de las entidades del sistema nacional, en el marco de los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y de manejo del desastre, como parte del ordenamiento territorial y del desarrollo, así como para realizar su seguimiento y evaluación.”²¹ Más adelante en el Parágrafo 2 del Artículo 37 de los planes departamentales, distritales y municipales de gestión del riesgo y estrategias de respuesta dice: “Los programas y proyectos de estos planes se integrarán en los planes de ordenamiento territorial, de manejo de cuencas y de desarrollo departamental, distrital o municipal y demás herramientas de planificación del desarrollo [...]” En el Artículo 39 titulado explícitamente: Integración de la gestión del riesgo en la planificación territorial y del desarrollo. El cual determina que: “Los planes de ordenamiento territorial, de manejo de cuencas hidrográficas y de planificación del desarrollo en los diferentes niveles de gobierno, deberán integrar el análisis del riesgo en el diagnóstico biofísico, económico y socioambiental y, considerar, el riesgo de desastres, como un condicionante para el uso y la ocupación del territorio, procurando de esta forma evitar la configuración de nuevas condiciones de riesgo.” En el mismo sentido, el Artículo 40 sobre la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación, dice que: “Los distritos, áreas metropolitanas y municipios en un plazo no mayor a un (1) año, posterior a la fecha en que se sancione la presente ley, deberán incorporar en sus respectivos planes de desarrollo y de ordenamiento territorial las consideraciones sobre desarrollo seguro y sostenible derivadas de la gestión del riesgo [...]”. Y finalmente, el Artículo 41 de la misma

18 Artículo 1º, Capítulo I de la Ley 1523 de 2012.

19 Artículo 12. Los Gobernadores y Alcaldes.

20 Artículo 14º de la Ley 1523 de 2012. Los Alcaldes en el sistema nacional.

21 Artículo 32 de la Ley 1523 de 2012, el cual se titula instrumentos de planificación. Planes de gestión del riesgo.

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

Por otra parte y en relación con el fortalecimiento de los organismos locales, desde el Decreto 93 de 1998, se menciona que se debe trabajar en la elaboración de metodologías e instructivos para el desarrollo de planes de emergencia y contingencia para escenarios potenciales de desastre que tengan en cuenta las características físicas, económicas y sociales de cada región y se deben fortalecer los organismos operativos locales. En el Artículo 3 se mencionan: “[...] La recuperación rápida de zonas afectadas [...]” y al respecto se reconoce que se debe: “fortalecer la capacidad técnica, administrativa y financiera necesaria para agilizar los procesos de recuperación rápida de las zonas afectadas”. Para llegar a superar la situación de desastre se requiere: “[...] una gran coordinación interinstitucional que evite la duplicidad de funciones y disminuya los tiempos transcurridos entre la formulación de proyectos, su estudio y aprobación y finalmente su ejecución para la rehabilitación y reconstrucción.” Y así mismo ese fortalecimiento se debe reflejar en: “[...] la capacidad técnica a nivel local en la identificación y formulación de proyectos [...], mediante la capacitación de funcionarios locales [...]”²²

A lo largo de todo el análisis realizado a la normativa, que se refiere explícitamente al ordenamiento territorial y la que se refiere la gestión del riesgo, se puede concluir que se evidencia un reconocimiento gradual desde ambos ámbitos, de la necesidad de que se deben integrar para lograr una gestión más sostenible del territorio.

Finalmente, es importante a modo de resumen y para fines de este instructivo tener en cuenta la clasificación del suelo de acuerdo al Artículo 30 de la Ley 388 de 1997. La Tabla 1 describe el suelo urbano, rural, suburbano, de expansión urbana y de Protección.

Ahora bien, dentro del suelo urbano se suele dar una clasificación de uso del suelo de acuerdo con las actividades y equipamientos. De manera general dicha clasificación puede ser la siguiente:^z

- **Residencial:** abarca todo tipo de viviendas, edificios de apartamentos.
- **Comercio:** agrupa todas las actividades comerciales de tipo minorista y mayorista.
- **Industrial:** Está relacionado con todas las actividades industriales y se clasifica en liviana, mediana y pesada.
- **Institucional:** son aquellos usos necesarios para la vida urbana destinados a la prestación de servicios de orden educativo, de salud, de seguridad, de cultura, de culto y administrativo, requeridos por la comunidad.

22 Artículo 3º del Decreto 93 de 1998, por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.

- Servicios: destinados a los servicios profesionales, empresariales, administrativos, bancarios, de esparcimiento, técnicos especializados, actividades económicas e inmobiliarias, en general y/o similares.
- Protección: se trata de las zonas clasificadas por la Ley 388 de 1997 bajo el mismo nombre.
- Actividades análogas compatibles con uso suelo rural, definidas por la Ley 388 de 1997 (ecoturismo, etnoturismo, entre otras).
- *Transitorio: esta clasificación provisional permitirá que tanto las zonas sujetas a intervención prospectiva como las zonas de intervención prescriptiva puedan realizar las obras pertinentes para habilitar el suelo para futuros desarrollos urbanos.

* El uso del suelo propuesto aquí como Transitorio (no está definido en la normativa) y corresponde a una situación condicional para el desarrollo. Se propone para compatibilizar la imagen objetivo del ordenamiento territorial y la necesidad de que durante la implementación del ordenamiento territorial se lleguen a realizar obras de mitigación que puedan cambiar la amenaza o el nivel riesgo implícito mediante la estabilización de taludes o el control de inundaciones. Esta clasificación podría ser una alternativa e incluso una solución frente al problema de designar un área como “suelo de protección por riesgo”, que existe en la normativa pero que tiene implicaciones dado que puede significar la imposibilidad incluso de hacer obras de mitigación factibles para cambiar las condiciones de riesgo; es decir de realizar un tratamiento habilitante para otro tipo de suelo y usos del suelo de lograrse un cambio en el nivel de amenaza y riesgo.

En el suelo rural los usos de suelo de acuerdo con el Artículo 33 de la Ley 388 de 1997, artículo 3, 4 y 7 del Decreto 3600 de 2007 son: Agrícola, Pecuario, Forestal, Agroforestal, Minero y Actividades análogas compatibles con uso suelo rural (ecoturismo, etnoturismo, entre otras).

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN EL ARTÍCULO 30, LEY 388 DE 1997

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

PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL RIESGO Y DERIVAR INTERVENCIONES

Desde el punto de vista del ordenamiento territorial no todas las amenazas son realmente relevantes en la definición de los usos del suelo; es decir, no todos los fenómenos tienen una alta incidencia en la posibilidad de que ciertas áreas deban ser ocupadas o que se puedan realizar actividades que signifiquen la exposición permanente de activos, bienes o servicios y, sobretodo, de personas que puedan permanecer en dichas áreas consideradas como propensas a ser afectadas por fenómenos peligrosos. A este tipo de amenazas se pueden asociar fenómenos como los deslizamientos o movimientos en masa, los flujos de lodo o de escombros, las avalanchas, las inundaciones de alta pendiente o comportamiento torrencial, entre otros, cuya energía es tan alta que su intensidad se considera lo suficientemente severa que cualquier elemento expuesto, en términos prácticos, esté sujeto a un daño total o casi total en caso de presentarse o desencadenarse el evento peligroso. En otras palabras, estar expuesto en las áreas propensas a este tipo de fenómenos implica un alto potencial de consecuencias o una situación de “riesgo implícito”. Por esta razón, la zonificación de amenazas de este tipo se traduce en términos prácticos en una zonificación del riesgo, sea porque ya exista algo expuesto o porque algo pueda estar expuesto en ese sitio en el futuro. Esta es la razón fundamental por la cual en la Ley 388 de 1997, de desarrollo territorial, se refiere a que es necesario identificar las zonas de amenaza y riesgo como determinante o estructurante del ordenamiento territorial y con fines de prevención de desastres (hoy entendida como gestión del riesgo de desastres de acuerdo con la Ley 1523 de 2012 y en la cual se definen claramente conceptos como amenaza, vulnerabilidad, riesgo, intervención correctiva e intervención prospectiva que son relevantes para el diagnóstico).

De acuerdo con lo anterior, es importante señalar que el concepto de vulnerabilidad de los elementos expuestos, que media entre la amenaza y el riesgo, no tiene en este caso la misma pertinencia que cuando se trata de fenómenos cuya amenaza es de un amplio espectro de intensidades (desde valores muy pequeños a valores muy altos) y para las cuales se establecen en forma prescriptiva las exigencias de seguridad que se deben cumplir. Es el caso de la actividad sísmica, la acción del viento, la caída de nieve/granizo, la caída de

cenizas de origen volcánico, las inundaciones lentas e incluso los incendios forestales, entre otros fenómenos. Claramente en estos casos existe una gradación de la vulnerabilidad que da cuenta del grado de fragilidad de los elementos expuestos ante la severidad de los fenómenos y es fundamental evaluarla para poder estimar el nivel de riesgo físico frente a las intensidades de los eventos factibles. La diferencia fundamental es que en este caso la vulnerabilidad es variable y sólo se satura o es total cuando se trata de un evento extremadamente severo, mientras que en los casos de las amenazas previamente descritas la vulnerabilidad del elemento expuesto es total o se satura ante el fenómeno y por eso la identificación de las zonas de amenaza, que usualmente están asociadas más a la frecuencia de los fenómenos que a su intensidad, es en la práctica la identificación de las zonas de riesgo implícito: es decir, tácito o sobreentendido.

En la Tabla 2, se presenta la manera como se pueden definir y utilizar los niveles de amenaza, usando criterios de probabilidad relativa, y cómo se derivan los niveles de riesgo implícito con fines de orientación de la imagen objetivo de la planificación del territorio (Mendes 2013).

TABLA 2. NIVELES DE AMENAZA RELATIVA Y RIESGO IMPLÍCITO PARA EL CASO DE INUNDACIONES Y DESLIZAMIENTOS (MOVIMIENTOS EN MASA)

Amenaza relativa en el área	Probabilidad relativa	Inundaciones *	Deslizamientos	Riesgo implícito
Muy alta	90% – 100 %	Mancha de inundación para Tr = 10 años	Virtualmente inestable	Área virtualmente afectada
Alta	66 % – 100 %	Mancha de inundación 11 < Tr < 25 años	Inestabilidad muy factible	Afectación muy factible
Moderada	33% – 66 %	Mancha de inundación 25 < Tr < 50 años	Inestabilidad factible	Afectación factible
Baja	0% – 33 %	Mancha de inundación 50 < Tr < 100 años	Inestabilidad poco factible	Afectación poco factible
Muy baja	0% – 10 %	Mancha de inundación Tr > 100 años	Virtualmente estable	Área virtualmente no afectable

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

Ahora bien, la sola caracterización del riesgo implícito en un área no es suficiente si no se deriva de dicha caracterización la imagen objetivo o vocación del territorio en un plazo determinado y el tratamiento correspondiente que debe platearse o que se deriva. Es importante tener en cuenta que los niveles de amenaza y riesgo son en cualquier caso relativos y que la definición de si un riesgo es mitigable o no, también es una definición relativa que depende no sólo del grado de mitigabilidad de la amenaza y del riesgo sino de la factibilidad o decisión de llevar a cabo las intervenciones que implique la reducción o el control del nivel de amenaza existente, lo que sólo es posible de definir si se realizan estudios detallados y cuidadosos en cada caso. De esto dependerá si la vocación del suelo o la imagen objetivo de su uso (y sus restricciones o condicionamientos)

puedan llegar a cambiar en el futuro por la modificación de nivel de amenaza o riesgo del área en consideración durante el tiempo previsto de implementación del instrumento de planificación.

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

Por lo anterior, se considera fundamental no sólo establecer los niveles de riesgo implícito antes mencionados sino las acciones que se derivan de la calificación de las áreas respectivas. Se propone aquí tres tipos de intervenciones asociadas a cada nivel de riesgo implícito (ver definiciones de la Ley 1523 de 2012). La intervención prospectiva en zonas aún no ocupadas por asentamientos humanos, la intervención correctiva en zonas ya ocupadas y, por lo tanto, donde ocurren actividades que están en riesgo, y una intervención prescriptiva que plantea el tipo de análisis y exigencias que se deben cumplir con el fin de reducir o controlar (asegurarse de no dejar aumentar) la amenaza y si es del caso la exposición en las áreas propensas a los fenómenos peligrosos. Dichas exigencias deben obedecer a una normativa propia de requisitos mínimos de idoneidad y seguridad que no serían más que las reglas del juego para establecer la posible mitigabilidad de la amenaza y el riesgo. La Tabla 3 presenta el tipo de intervenciones en las áreas identificadas con los diferentes niveles de riesgo implícito (Mendes 2013).

TABLA 3. INTERVENCIONES PROSPECTIVAS, CORRECTIVAS Y PRESCRIPTIVAS, ASOCIADAS A LOS NIVELES DE RIESGO IMPLÍCITO.

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

En síntesis, no basta con sólo evaluar la amenaza ante estos fenómenos y el riesgo implícito que ella implica con fines de ordenamiento territorial, sino que se necesita asociar los niveles de amenaza a intervenciones correctivas, prospectivas y prescriptivas, para finalmente definir las restricciones, los condicionamientos y las exigencias que se deben cumplir en las zonas propensas a la ocurrencia de eventos peligrosos. Al respecto se propone utilizar en los instrumentos de planificación un enfoque metodológico que permita desarrollar lo indicado en las Tablas 2 y 3, con lo cual se puede incluir la variable riesgo como determinante en el ordenamiento territorial.

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

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

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

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

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

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

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

CUADRO 1. LINEAMIENTOS A MODO DE EJEMPLO PARA LA GESTIÓN DE RIESGO IMPLÍCITO EN ÁREAS URBANAS:

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

CUADRO 2. LINEAMIENTOS A MODO DE EJEMPLO PARA LA GESTIÓN DE RIESGO IMPLÍCITO EN ÁREAS RURALES

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

CUADRO 3. MATRIZ RESUMEN A MODO DE EJEMPLO DE USOS PERMITIDOS EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

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

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

De lo anterior se concluye que el proceso de planificación territorial depende de la categorización de la amenaza y del riesgo implícito que se deriva, lo que depende de una evaluación técnica que permita dar cuenta de los niveles de peligro y de las posibles consecuencias, daños o pérdidas potenciales que existe en cada sitio o área en consideración. Para este análisis y evaluación existen diferentes metodologías técnicas y científicas desarrolladas desde el punto de vista de la ingeniería y las ciencias de la tierra y que deben estar asociadas a los criterios de planificación ambiental y urbana. La definición si un área es susceptible a que se presenten deslizamientos y en qué grado existe esa susceptibilidad, y finalmente cuál es el nivel de amenaza y de riesgo que este fenómeno representa es un trabajo que pueden hacer profesionales idóneos relacionados con la ingeniería geotécnica y la geología. Por otra parte, la determinación de las manchas de inundación o las franjas de los cauces que se podrían ver afectadas y con qué frecuencia o con qué período de retorno es un trabajo que pueden realizar profesionales idóneos relacionados con la hidrología, la ingeniería hidráulica y la geomorfología aluvial.

Dada la ausencia de una normativa explícita de alcances mínimos de los estudios y las metodologías o tipos de enfoques técnicos para determinar los niveles de amenaza y riesgo implícito por deslizamientos e inundaciones, este instructivo propone una serie de métodos desde técnicas muy sencillas o simplificadas hasta técnicas de alta sofisticación o complejidad que exigen información muy detallada para evaluar la amenaza y riesgo implícito por deslizamientos e inundaciones. Se propone en el siguiente apartado la manera como según el tipo y características de cada municipio se pueden aplicar estas técnicas, teniendo en cuenta que de ser posible se utilicen las técnicas más avanzadas y como mínimo las que se recomiendan para cada municipio.

1. CLASIFICACIÓN DE LOS MUNICIPIOS PARA EL ALCANCE DE LOS ESTUDIOS DE RIESGO

Para la categorización de los municipios se considerado apropiado tener en cuenta la normativa que en Colombia ha permitido la clasificación de los municipios de acuerdo con el Artículo 320 de la Constitución Política de Colombia, el cual faculta al legislador para adelantar dicha labor teniendo en cuenta la densidad poblacional, los recursos fiscales, la importancia económica y la situación geográfica de cada entidad territorial. El desarrollo de dicho precepto constitucional se dio inicialmente con la Ley 136 de 1994, Artículo 6, pero fue modificado por el Artículo 7 de la Ley 1551 de 2012. El texto es el siguiente: Los distritos y municipios se clasificarán atendiendo su población, ingresos corrientes de libre destinación, importancia económica y situación geográfica. Para efectos de lo previsto en la ley y las demás normas que expresamente lo dispongan, las categorías describen en la Tabla 4.

TABLA 4. CATEGORIZACIÓN DE MUNICIPIOS SEGÚN LA LEY 1551 DE 2012

Categorías	Nº Habitantes	Ingresos corrientes de libre destinación anual	Importancia económica
Especial	Superior o igual a 500.000	Superior a 400.000 smlv	Grado 1
Primera	100.001-500.000	Superior a 100.000 y hasta 400.000 smlv	Grado 2
Segunda	50.001-100.000	Superior a 50.000 y hasta 100.000 smlv	Grado 3
Tercera	30.001-50.000	Superior a 30.000 y hasta 50.000 smlv	Grado 4
Cuarta	20.001-30.000	Superior a 25.000 y hasta 30.000 smlv	Grado 5
Quinta	10.001-20.000	Superior a 15.000 y hasta 25.000 smlv	Grado 6
Sexta	Igual o inferior a 10.000	No superior a 15.000 smlv	Grado 7

A partir de esta categorización y la clasificación de tipo de ordenamiento territorial de la Ley 388 de 1997 se puede concluir lo consignado en la Tabla 5. En dicha tabla se cruza la información de la clasificación de ordenamiento territorial y la categorización de municipios y se observa que la mayor cantidad de municipios en Colombia se encuentran en la sexta categoría, correspondiente a los municipios cuya población es igual o inferior a 10.000 habitantes, sus ingresos corrientes de libre destinación anual no son superiores a 15.000 SMLV y, así mismo, su importancia económica en el país es de Grado 7. Mientras que en los municipios clasificados en categoría especial, los cuales tienen una población superior o igual a 500.000 habitantes, sus ingresos corrientes de libre destinación anual son superiores a 400.000 SMLV y su importancia económica es de Grado 1. Haciendo una agrupación a partir del criterio del alcance del ordenamiento territorial (Ley 388 de 1997) se obtienen tres grupos:

1. Municipios que deben implementar Planes de Ordenamiento Territorial POT
2. Municipios que deben implementar Planes Básicos de Ordenamiento Territorial PBOT
3. Municipios que deben implementar Esquemas de Ordenamiento Territorial EOT

De lo anterior se concluye que se puede utilizar la categorización de 3 grupos para definir las exigencias mínimas de aplicación de la metodologías de evaluación de amenaza y riesgo implícito.

TABLA 5. CATEGORIZACIÓN DE MUNICIPIOS HACIENDO UN CRUCE CON LA LEY 388 DE 1997

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

Aunque la normativa (Ley 1551 de 2012) clasifica los municipios en orden de importancia de acuerdo a criterios como: número de habitantes, ingresos corrientes, e importancia económica para el desarrollo de este instructivo y la definición de máximo tres grupos de municipios para aplicar las metodologías aquí propuestas se concluye el criterio establecido en la Ley 388 de 1997 es suficiente y apropiado. La Tabla 6 presenta un resumen teniendo en cuenta también la categorización de municipios realizada por la Contaduría General de la Nación (Vigencia 2013-Resolución 696 de noviembre de 2012).

TABLA 6. CATEGORIZACIÓN EN TRES GRUPOS Y NÚMERO DE MUNICIPIOS

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

La Partes II y III de este instructivo presentan la metodologías técnicas asociadas a cada uno de los niveles de exigencia técnica y que corresponden a los grupos de municipios antes señalados para la estimación de la amenaza por deslizamientos e inundaciones y se presentan algunos ejemplos de aplicación ilustrativos. La Tabla 7 presenta qué entidades podrían tener información e insumos útiles para las evaluaciones técnicas y la Tabla 8 presenta direcciones de internet en las cuales se encuentran documentos relevantes y de utilidad.

TABLA 7. INFORMACIÓN E INSUMOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS TÉCNICOS

Versión Adaptada de la Guía Metodológica 1, (MAVDT 2005)

Tipo de Información	Características	Donde se Encuentra
Antecedentes Históricos	Eventos Ocurredos en el Municipio (Fecha, Magnitud, o Daños causados, recurrencia, etc)	Oficinas de Planeación Municipal, Consejos Municipales y Departamentales de Gestión de Riesgos, Corporaciones Autónomas Regionales, Bomberos, Cruz Roja, Defensa Civil.
Geología y Geomorfología	Cartografía geológica, geofor- mas del terreno y procesos morfoodinámicos, etc (de dife- rentes escalas).	Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Servicio Geológico Co- lombiano SGC, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, Corporaciones Autónomas Regionales.
Suelos	Mapa agrológico a escala 1:200.000 o 1:100.000, Carto- grafía pedológica (de suelos), a escala 1:50.000. Propiedades mecánicas o ingenieriles	Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Los Comités Depar- tamentales de Cafeteros, Estudios geotécnicos realizados para obras específicas, Curadurías, Oficinas de Planeación Municipal
Hidrología	Mediciones de caudales de los ríos en las estaciones limnigráficas	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, Empresas locales prestadoras de servicio de acueducto y alcantarillado, distritos de riego, Corporaciones Autónomas Regio- nales, Entidades como ISAGEN y otras empresas productoras de energía hidroeléctrica, estudios e investigaciones de Universidades.
Meteorología y climatología	Temperatura media, máxima y mínima, pluviosidad, vientos, humedad relativa, etc.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, Empresas locales prestadoras de servicio de acueducto y Alcantarillado, Corporaciones Autónomas Regionales, Federa- ción Nacional de cafeteros , Empresas Públicas locales y/o regio- nales de servicios, estudios e investigaciones en Universidades, Consejos Departamentales o Municipales de Gestión de Riesgos
Vegetación y formaciones vegetales	Información proveniente de los mapas "ecológicos"	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Corporaciones Autónomas Regionales, Oficinas de Planeación , Oficinas de medio Ambiente
Oceanografía	Profundidad del suelo oceá- nico, ubicación y actividad de fallas y volcanes submarin- os, dirección y velocidad de corrientes. Erosión costera), aumento del nivel medio del mar (Caribe y Pacífico)	INVEMAR, DIMAR, CCO
Población	Información de censos, tipo de población, densidad etc.	DANE , Departamento de la Prosperidad Social
Actividad sísmica y vulca- nológica	Registro de sismos en el país, magnitud, intensidad, epicen- tro. Volcanes activos en el país, seguimiento de actividad.	Servicio Geológico Colombiano SGC, Corporación OSSO, Centros de investigación en Universidades.

TABLA 8. DOCUMENTOS ORIENTADORES DE LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL

Guía Metodológica 1 Incorporación de la Prevención y la Reducción de Riesgos en los procesos de Ordenamiento territorial. MAVDT	http://www.sigpad.gov.co/sigpad/paginas_detalle.aspx?idp=96
Ley 388 de 1997	https://www.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/DDTS/Gestion_Publica_Territorial/1bnormatividadley_388_1997.pdf
Decreto 4002 DE 2004	http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15288
Decreto 879 DE 1998	http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1369
Ley 1523 De 2012	http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/legislacion/ley1523_2012.pdf
Decreto 19 DE 2012	http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/decreto/2012/decreto_0019_2012.html
	http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=45322
Circular Externa 7000-2-041773 DE 2012	http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=48932
Ley 1454 de 2011	http://camacol.co/sites/default/files/base_datos_juridico/LEY%201454%20DE%202011%20NORMAS%20ORGANICAS%20DE%20ORDENAMIENTO%20TERRITORIAL.pdf
Serie de Ordenamiento Territorial, Guía Metodológica 2. Revisión y Ajuste de Planes de Ordenamiento Territorial	http://www.minvivienda.gov.co/Vivienda/Desarrollo%20urbano%20y%20territorial/Asistencia%20T%C3%A9cnica%20Municipios%20y%20Regiones/Planes%20de%20ordenamiento/Gu%C3%ADa%20Revisi%C3%B3n%20y%20Ajuste%20POT.pdf
Serie ambiente y Ordenamiento Territorial. Instructivo , la Gestión de Riesgos un Tema de ordenamiento Territorial.	http://www.minvivienda.gov.co/Vivienda/Desarrollo%20urbano%20y%20territorial/Asistencia%20T%C3%A9cnica%20Municipios%20y%20Regiones/Planes%20de%20ordenamiento/Gu%C3%ADa%20Gesti%C3%B3n%20de%20Riesgos.pdf
Guía Ambiental para evitar, Corregir y Compensar los Impactos de las Acciones de Reducción y Prevención de Riesgos en el nivel Municipal	http://www.minambiente.gov.co/documentos/42_guia_reduccion_y_prevencion_de_riesgos.pdf
Guía Formulación PMGRD	http://www.sigpad.gov.co/sigpad/archivos/FormulariosPMGRD2012/Guia_PMGRD_2012_v1.pdf
Incorporando la Gestión del Riesgo de Desastres en la Planificación y Gestión Territorial- Guía Técnica para la Interpretación y aplicación del análisis de amenazas y Riesgos	http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/libros/GUIA+OT+web.pdf
Incorporando la Gestión del Riesgo de Desastres en la Planificación y Gestión Territorial - Lineamientos Generales para la formulación de planes a nivel Local	http://www.comunidadandina.org/predecan/doc/libros/LIN+PLAN+DES+web.pdf

ALGUNAS DEFINICIONES RELEVANTES

De acuerdo a la Ley 1523 de 2012 (Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre), algunos conceptos que marcan este trabajo son:

Adaptación: Comprende el ajuste de los sistemas naturales o humanos a los estímulos climáticos actuales o esperados a sus efectos, con el fin de moderar prejuicios o explorar oportunidades beneficiosas. En el caso de los eventos hidrometeorológicos la adaptación al cambio climático corresponde a la gestión del riesgo de desastres en la medida en que está encaminada a la reducción de la vulnerabilidad o al mejoramiento de la resiliencia en respuesta a los cambios observados o esperados del clima y su variabilidad.

Alerta: Estado que se declara con anterioridad a la manifestación de un evento peligroso, con base en el monitoreo del comportamiento del respectivo fenómeno, con el fin de que las entidades y la población involucrada activen procedimientos de acción previamente establecidos.

Amenaza: Peligro latente de que un evento físico de origen natural, causado o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdida en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.

Análisis y evaluación del riesgo: Implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales, y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación.

Cambio climático: Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste en un periodo prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras.

Conocimiento del riesgo: Es el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la identificación de escenarios de riesgos, el análisis y evaluación del riesgo, el monitoreo y seguimiento del riesgo y sus componentes

y la comunicación para promover una mayor conciencia del mismo que alimenta los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastre.

Desastre: Es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del estado y del sistema nacional ejecutar de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción.

Emergencia: Situación caracterizada por la alteración o interrupción intensa y grave de las condiciones normales de funcionamiento u operación de una comunidad causada por un evento adverso o por la inminencia del mismo, que obliga a una reacción inmediata y que requiere la respuesta de las instituciones del estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general.

Exposición (elementos expuestos): Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales y recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.

Gestión del riesgo: Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como la posterior recuperación (rehabilitación y reconstrucción). Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.

Manejo de desastres: Es el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación post desastre, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la prospectiva recuperación (rehabilitación y reconstrucción).

Mitigación del riesgo: Medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se pueden presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente.

Prevención del riesgo: Medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse a evitar o neutralizar la amenaza o la exposición y la vulnerabilidad ante la misma forma definitiva para impedir que se genere nuevo riesgo. Los instrumentos esenciales de la prevención son aquellos previstos en la planificación, la inversión pública y el ordenamiento ambiental territorial, que tienen como objetivo reglamentar el uso y la ocupación del suelo de forma segura y sostenible.

Protección financiera: Mecanismos o instrumentos financieros de retención intencional o transferencia del riesgo que se establecen en forma ex ante con el fin de acceder de manera ex post a recursos económicos oportunos para la atención de emergencias y la recuperación.

Recuperación: Son las acciones para el establecimiento de las condiciones normales de vida mediante la rehabilitación, reparación o reconstrucción del área afectada, los bienes y servicios interrumpidos o deteriorados y el restablecimiento e impulso del desarrollo económico y social de la comunidad. La recuperación

tiene como propósito central evitar la reproducción de las condiciones de riesgo preexistente en el área del sector afectado.

Reducción del riesgo: Es el proceso de la gestión del riesgo que está compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes (mitigación del riesgo) y a evitar nuevo riesgo en el territorio (prevención del riesgo). Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y las pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera.

Vulnerabilidad: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

BIBLIOGRAFÍA

Cardona, O.D. (1997). Estudio y definición de criterios para la elaboración y ejecución de la política de prevención de desastres. Ministerio del Ambiente. Enero – Abril, 1997.

Cardona, O.D., (2004). The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management”, in Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People, G. Bankoff, G. Frerks, D. Hilhorst (Ed), Earthscan Publishers, London, UK.

IPCC, (2007): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC, (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, y P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, y New York, NY, USA.

Lavell, A. (2000) Draft Annotated Guidelines for Inter-Agency Collaboration in Programming for Disaster Reduction, unprinted for Emergency Response División at UNDP, Geneva.

Lavell, A. (2011). Desempacando la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo: Buscando las relaciones y diferencias: Una crítica y construcción conceptual y epistemológica. Secretaría General de la FLACSO y La Red para el Estudio Social de la Prevención de Desastres en América Latina. Elaborado en el marco del Proyecto UICN-FLACSO sobre Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático. Febrero, 2011. Disponible en:

http://www.desenredando.org/public/varios/2011/2011_UICN_FLACSO-Lavell_Adaptacion_Cambio_Climatico.pdf

Mendes, K.C. (2013) La reducción del riesgo de desastres en la planificación urbana. Caso de estudio la parroquia Caraballeda en el estado Vargas. Tesis de Maestría en Planificación Urbana: Mención Política y Acción Local Universidad Central de Venezuela, Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), (2005). Serie Ambiente y Desarrollo Territorial, Guía No. 1: Guía Metodológica para Incorporar la Prevención y la Reducción de Riesgos en los Procesos de Ordenamiento Territorial. Bogotá, 2005.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico Viceministerio de Ambiente, Dirección de Ecosistemas, Grupo de Gestión del Recurso Hídrico.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (2012). Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos. Dirección de Bosques, Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos.

Plan Regional Integral de Cambio Climático, Región Capital Bogotá, Cundinamarca (PRICC), (2013). Documento Técnico 3. Propuesta para desarrollar una experiencia piloto de asistencia técnica para la incorporación de los riesgos climáticos en el ordenamiento territorial a nivel subregional en la Región Capital.

República de Colombia, (2012). Ley 1523 de 2012. Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre.

República de Colombia, (1989). Decreto 919 de 1989. Sistema Nacional de Prevención y Atención de Desastres.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2010). Adaptation Assessment, Planning and Practice: an Overview from the Nairobi Work Programme on Impacts, Vulnerability and Adaptation to Climate Change. Bonn. Disponible en: http://unfccc.int/resource/docs/publications/10_nwp_adap_assess_en.pdf

Wilches-Chaux, Gustavo (2007). Qu-ENOS pasa? Guía de La Red para la gestión radical de riesgos asociados con el fenómeno ENOS, ARFO Editores e Impresores Ltda., Bogotá

PARTE 2

Evaluación de la amenaza frente a deslizamientos en diferentes niveles territoriales

Omar Darío Cardona Arboleda

Con el apoyo de:

Juan Pablo Londoño

BOGOTÁ - NOVIEMBRE, 2013

TABLA DE CONTENIDIO

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA FRENTE A DESLIZAMIENTOS EN DIFERENTES NIVELES TERRITORIALES	54
NIVEL 1. MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN CON BAJOS NIVELES DE INFORMACIÓN	55
<i>Requerimientos de información.....</i>	<i>55</i>
1.Método 1. Observación directa	55
2.Método 2: Zonificación heurística basada en criterio experto.....	56
2.1 Paso 1. Elaboración de mapas por cada factor de inestabilidad.....	57
2.2 Paso 2. Valoración de la influencia de los factores de inestabilidad.....	57
2.3 Paso 3. Ponderación de los factores.....	59
NIVEL 2. MÉTODO DE ZONIFICACIÓN CON NIVELES MEDIOS DE INFORMACIÓN.....	61
1.Método 3. Métodos heurísticos basados en datos.....	61
1.1 Requerimientos de información.....	61

1.2	<i>Paso 1: Cálculo del Índice de Relieve Relativo (Rr)</i>	63
1.3	<i>Paso 2: Estimación de la Influencia de la litología</i>	63
1.4	<i>Paso 3. Estimación de la Humedad del suelo</i>	65
1.5	<i>Paso 4a. Influencia de la actividad sísmica</i>	66
1.6	<i>Paso 4b. Lluvias intensas</i>	66
1.7	<i>Paso 5. Determinación de la amenaza por deslizamientos</i>	67
2.Método 4. Métodos Geotécnicos asociados a Factores de Seguridad		68
NIVEL 3. MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN CON NIVELES ALTOS DE INFORMACIÓN.....		69
<i>Requerimientos de información</i>		70
<i>Extracción de la muestra de datos para los análisis</i>		72
1.Método 5. Análisis Discriminante		73
1.1	<i>Paso 1. Selección de variables</i>	74
1.2	<i>Paso 2. Estimación de funciones de susceptibilidad</i>	74
1.3	<i>Paso 3. Estimación del rendimiento de los modelos</i>	74
2.Método 6. Redes Neuronales Artificiales		75
2.1	<i>Paso 1: Selección de datos de entrenamiento, validación y test</i>	76
2.2	<i>Paso 2: Implementación de diferentes modelos y estimación del valor medio de susceptibilidad</i>	77
BIBLIOGRAFÍA		78
ANEXO I.....		82
1.Nivel I. Métodos con bajos niveles de información.....		83
1.1	<i>Método 1. Observación directa</i>	83
1.2	<i>Método 2: Zonificación heurística basada en criterio experto</i>	84
2.Nivel 2. Métodos con niveles intermedios de información		85
2.1	<i>Método 3. Métodos heurísticos basados en datos</i>	85
2.2	<i>Método 4. Métodos Geotécnicos asociados a Factores de Seguridad</i>	86

3.Nivel 3. Métodos con altos niveles de información	88
3.1 Método 5. Análisis Discriminante.....	88
3.2 Método 6. Redes Neuronales Artificiales.....	106
1.2 Curvas PADF.....	174

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA FRENTE A DESLIZAMIENTOS EN DIFERENTES NIVELES TERRITORIALES

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

En el presente instructivo se sugieren tres niveles de trabajo según el grupo al cual pertenece el municipio (ver Parte I de este instructivo) y cinco métodos (Tabla 9) para valorar la amenaza por deslizamiento, según los requerimientos de información y la complejidad de los procedimientos de cálculo.

TABLA 9. NIVELES DE CÁLCULO DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO

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

NIVEL 1. MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN CON BAJOS NIVELES DE INFORMACIÓN

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

REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

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

1. MÉTODO 1. OBSERVACIÓN DIRECTA

De manera empírica, cuando no exista información detallada, pueden establecerse grados de susceptibilidad de manera directa, mediante la observación del terreno y la valoración de un profesional en ciencias de la tierra. Como apoyo, la Tabla 10 muestra algunos criterios generales que permiten establecer grados subjetivos de susceptibilidad mediante observación.

TABLA 10. CRITERIOS PARA DETERMINAR EL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS (KANUNGO, 1993)

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

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

2. MÉTODO 2: ZONIFICACIÓN HEURÍSTICA BASADA EN CRITERIO EXPERTO.

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

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

Los pesos sugeridos para la combinación de los factores se presentan en la tabla Tabla 12.

TABLA 12. FACTORES DE INESTABILIDAD Y PESOS CORRESPONDIENTES (AMBALAGAN, 1992)

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

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

2.1 PASO 1. ELABORACIÓN DE MAPAS POR CADA FACTOR DE INESTABILIDAD

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

2.2 PASO 2. VALORACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES DE INESTABILIDAD

La valoración de cada factor individual sigue una métrica similar: se debe ponderar ciertas características para obtener un índice de influencia. En el sentido práctico, debe asignarse a cada subárea de cada mapa su peso correspondiente; una breve descripción de los criterios para asignar pesos se presentan en la Tabla 14. **TABLA 14. PESOS DE LOS DIFERENTES FACTORES A CONSIDERAR EN LA EVALUACIÓN DE AMENAZAS A DESLIZAMIENTOS (AMBALAGAN, 1992)**

Tabla 11.7 Pesos de los diferentes factores a tener en cuenta en la evaluación de amenazas a deslizamientos (Ambalagan (1992))

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

FACTORES TOPOGRAFICOS Y AMBIENTALES		
Factor	Categoría	Peso
Morfometría Pendiente de los taludes	Más de 45°	2.0
	36° a 45°	1.7
	26° a 35°	1.2
	16° a 25°	0.8
	Menos de 15°	0.5
Relieve relativo Diferencia de altura entre la divisoria de aguas y el valle	Menos de 100 metros	0.3
	101 a 300 metros	0.6
	Más de 300 metros	1.0
Uso de la Tierra	Area Urbana	2.00
	Cultivos anuales	2.00
	Vegetación intensa	0.80
	Vegetación moderada	1.20
	Vegetación escasa	1.50
	Terrenos áridos	2.00
Aguas subterráneas	Inundable	1.0
	Pantanosos	0.8
	Muy húmedo	0.5
	Húmedo	0.2
	Seco	0.0
SUMATORIA O AMENAZA TOTAL		
Amenaza total	Descripción	Suma de los pesos
I	Amenaza muy baja	3.5
II	Amenaza baja	3.5 a 5
III	Amenaza moderada	5.1 a 6.0
IV	Amenaza alta	6.1 a 7.5
V	Amenaza muy alta	7.5

2.3 PASO 3. PONDERACIÓN DE LOS FACTORES

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

El procedimiento se basa en la siguiente ecuación, derivada de la Tabla 12:

$$\text{Amenaza} = 2 * LIT + 2 * EST + 2 * MRF + RRE + 2 * USO + ASU$$

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

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

TABLA 16. ASIGNACIÓN DE CATEGORÍAS DE AMENAZA SEGÚN LA SUMA DE PESOS

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

NIVEL 2. MÉTODO DE ZONIFICACIÓN CON NIVELES MEDIOS DE INFORMACIÓN

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

1. MÉTODO 3. MÉTODOS HEURÍSTICOS BASADOS EN DATOS

1.1 REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

Modelo digital de elevación del terreno

Datos geotécnicos, o mapa de litología, o inspección en campo del área de estudio

Precipitación promedio mensual o datos de evapotranspiración de la zona

Mapa de distribución de intensidades sísmicas (opcional)

Serie histórica de precipitaciones diarias

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

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

Categoría 1: Factores de susceptibilidad

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

Categoría 2: Factores de disparo

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

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

$$Ad = Susc \cdot Disp$$

Ad: Amenaza de deslizamientos

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

Disp: parámetros de disparo: intensidad sísmica y pluviométrica

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

R_r: índice de influencia del relieve relativo

L: índice de influencia de las condiciones litológicas

H: índice de influencia de la humedad usual del suelo

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

$$Disp = S + Ll$$

S: índice de influencia de la intensidad sísmica máxima

Ll: índice de influencia de la intensidad de las lluvias

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

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

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

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

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

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

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

En cuanto se definan las condiciones y limitaciones de trabajo, podrá aplicarse la metodología ya sea mediante la combinación manual de los datos o utilizando un Sistema de Información Geográfica para facilitar la combinación de información cartográfica y los cálculos correspondientes. A continuación se presentan los pasos detallados de cálculo.

1.2 PASO 1: CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RELIEVE RELATIVO (RR)

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

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

Generalmente se expresa en m/km²; dh_{max} es la mayor diferencia de elevación en el área A. La Tabla 18 sugiere los calificativos del parámetro R_r a utilizar según los valores de relieve relativo obtenidos.

TABLA 18. ESTIMACIÓN DEL PARÁMETRO DE RELIEVE RELATIVO RR EN EL MÉTODO DE MORA Y VAHRSON

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

1.3 PASO 2: ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA LITOLOGÍA

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

- Resistencia al corte del material (cohesión, fricción interna, grados de meteorización)
- Pesos volumétricos
- Disposición espacial, geometría, discontinuidades, orientación (diaclasas, esquistosidad, estratificación fallas, cuñas, diedros) tipos de relleno en las discontinuidades (calcita, ceolita, arcilla, fisuras limpias), rugosidad.
- Capacidad de drenaje, disipación rápida o no de la presión de poros, posición del nivel freático y zonas de saturación total o parcial; flujos hidrodinámicos

La Tabla 20 muestra un ejemplo de las condiciones litológicas típicas. Los calificativos e índices de influencia se definen subjetivamente a partir de la experiencia. Para cada región en particular deben revisarse las litologías existentes y definir los índices correspondientes

TABLA 20. ESTIMACIÓN DEL PARÁMETRO ASOCIADO A LITOLOGÍA EN EL MÉTODO DE MORA Y VAHRSON

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

Litologías:

Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica, rocas con estado de alteración avanzado, drenaje pobre. Se incluyen los casos 3 y 4 con niveles freáticos muy someros, sometidos a gradientes hidrodinámicos elevados.

Características físico mecánicas: resistencia al corte muy baja, materiales blandos con muchos finos.

1.4 PASO 3. ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO

La mejor manera de determinar la humedad del suelo es por medio de mediciones directas en campo. En ausencia de estas mediciones, la humedad puede determinarse mediante balances hídricos estimativos. A continuación se presenta una forma simplificada de balance que solo requiere como dato de entrada de la precipitación promedio mensual.

Como primer paso, se categorizan los promedios mensuales (sobre todos los datos de registro) según la clasificación de la Tabla 22

TABLA 22. CLASIFICACIÓN DE LOS PROMEDIOS MENSUALES MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN

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

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

TABLA 24. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO DE HUMEDAD EN EL MÉTODO DE MORA Y VAHRSON

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

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

1.5 PASO 4A. INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA

La Tabla 26 muestra una correlación entre la intensidad (Mercalli Modificada) y los índices de influencia de la sismicidad, definiendo 10 clases para cada situación específica. Dado que la información más abundante y confiable es la de las intensidad MM, se recomienda utilizarlas bajo la forma de mapas de máximos históricos, corregidos de la intensidad relativa a un período de recurrencia de 100 años.

TABLA 26. ESTIMACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL MÉTODO DE MORA Y VAHRSON

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

1.6 PASO 4B. LLUVIAS INTENSAS

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

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

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

Asignar el valor del parámetro LI según la Tabla 27

TABLA 27. DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO LL DE LLUVIAS INTENSAS EN EL MÉTODO DE MORA Y VAHRSON

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

1.7 PASO 5. DETERMINACIÓN DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS

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

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

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

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

y 1250 para el caso sísmico, mediante la formulación

$$\square DS = (R_r \cdot L \cdot H) \cdot (S)$$

Estos valores deben clasificarse en rangos de amenaza. La Tabla 28 muestra una clasificación de niveles de amenaza particular. Ésta clasificación puede redefinirse según los valores obtenidos en cada área de estudio específica.

TABLA 28. RANGOS DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS POR EL MÉTODO DE MORA Y VAHRSON

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

2. MÉTODO 4. MÉTODOS GEOTÉCNICOS ASOCIADOS A FACTORES DE SEGURIDAD

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

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

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

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

Y en términos de esfuerzos quedaría como:

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

Donde τ_{res} y τ_{act} son los esfuerzos resistentes y actuantes, respectivamente.

Existen varios métodos que utilizan esta métrica de Factores de Seguridad mediante simplificaciones que permiten su utilización en áreas extensas con el apoyo de sistemas de información geográfica o software específico. Tal es el caso de la plataforma ERN-Deslizamientos, integrada en el sistema CAPRA; allí se integran tres métodos basados en factores de seguridad, que pueden aplicarse siempre que se disponga de datos suficientes.: Análisis Regional de Newmark para deslizamientos inducidos por sismos, Mecanismo de falla traslacional o falla plana y Mecanismo de falla rotacional.

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

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

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

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

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

NIVEL 3. MÉTODOS DE ZONIFICACIÓN CON NIVELES ALTOS DE INFORMACIÓN

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

El supuesto principal que se utiliza para el proceso de modelización es que los deslizamientos futuros tendrán lugar bajo condiciones similares a los deslizamientos pasados. El esquema general de estos métodos se presenta en la Figura 1. Se trata de obtener interrelaciones entre los factores de propensividad a la inestabilidad, conociendo las características de zonas donde han ocurrido eventos previamente. Adicionalmente, se supone que todos los factores de propensividad importantes son conocidos y están incluidos en la base de datos y todos los eventos de inestabilidad se encuentran debidamente registrados en el inventario.

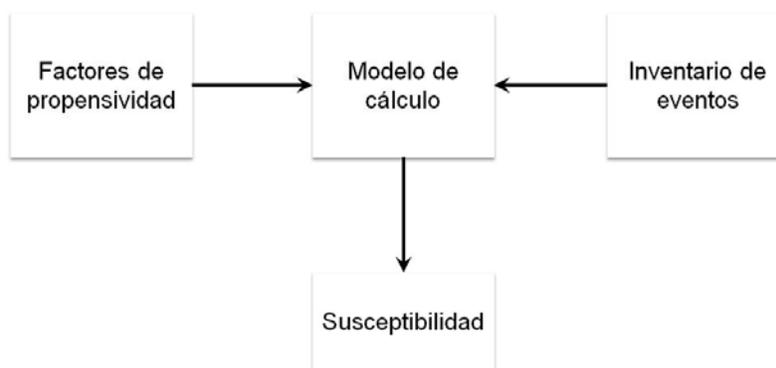


FIGURA 1. ESQUEMA GENERAL DE CÁLCULO PARA LOS MODELOS DE NIVEL 3

El esquema conceptual se presenta en la Figura 2. Los modelos de cálculo de Nivel 3 permiten obtener una susceptibilidad de inestabilidad, representada en una zonificación de la “probabilidad” espacial de inestabilidad de laderas, valorada numéricamente mediante una función acotada en el rango entre cero (0) o estable y uno (1) o inestable.

La incorporación del componente temporal (frecuencia) viene asociada al factor detonante, representado por la actividad sísmica o la pluviometría. Cuando existe disponibilidad de datos suficientes, es posible mediante análisis de precipitaciones, obtener mapas de factor detonante asociado a períodos de retorno, o bien mapas de intensidades sísmicas, para ser combinados con la susceptibilidad, obteniendo mapas de amenaza. Para áreas con extensiones contenidas, la diferencia entre mapas de susceptibilidad y amenaza es mínima dada la poca variabilidad espacial de los factores detonantes.

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

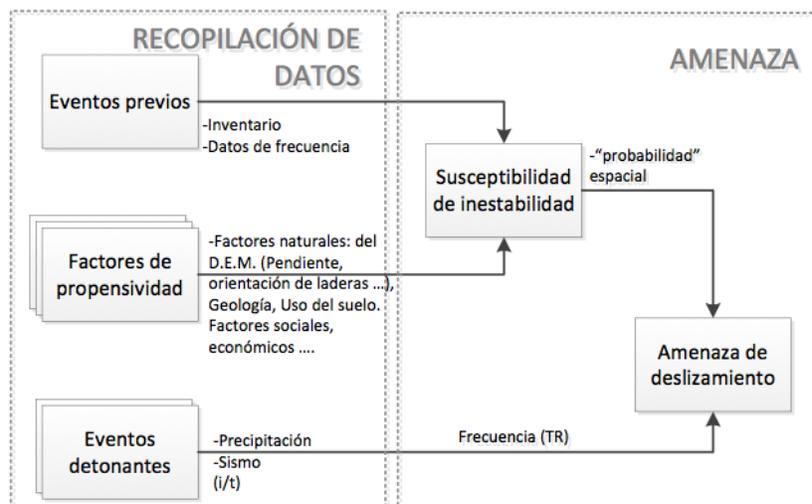


FIGURA 2. ESQUEMA CONCEPTUAL PARA EL CÁLCULO DE LA AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS EN EL NIVEL 3

REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

- a. Inventario de eventos previos:

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

- b. Factores de propensividad:

Aquí se agrupan todos los factores intrínsecos que determinan que una zona sea propensa a sufrir inestabilidad y puedan cuantificarse y representarse en un mapa. La cantidad de factores dependerá de la información disponible en la zona. La Tabla 29 sugiere algunos factores generales que son ampliamente conocidos y pueden estar disponibles en diversas zonas. En la medida en que se disponga de mayor información, puede extenderse el número de factores a utilizar.

TABLA 29. FACTORES GENERALES DE PROPENSIVIDAD A LA INESTABILIDAD DE LADERAS

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

Uno de los factores básicos que merece especial atención es la topografía, plasmada en el modelo digital de elevaciones del terreno DEM, de cuya resolución dependerá la calidad de los resultados a obtener. Generalmente el DEM es un dato bastante frecuente en los diferentes municipios; no obstante, a falta de un mejor mapa (con mayor resolución/precisión) elaborado por expertos locales, puede obtenerse uno de manera gratuita, con resolución de 30m x 30m a partir del proyecto NASA-GDEM, de la Agencia Espacial de los Estados Unidos en equipo con el Gobierno del Japón. El DEM es el primer paso para derivar mediante operaciones SIG otros mapas de interés como la Pendiente, Orientación de Laderas e Insolación.

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

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

EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA DE DATOS PARA LOS ANÁLISIS

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

- Dado el número de puntos del inventario se establece el tamaño de la muestra como el doble de este valor.
- Se crea un buffer de 50m alrededor de los puntos con deslizamiento.
- En el área de estudio restante (a excepción del buffer) se ubican aleatoriamente un número de puntos igual a la cantidad de puntos con deslizamientos previos. Se requiere tener en la muestra una porción de terreno estable (que en este caso se asume como cualquier punto del terreno donde no se tienen registrados deslizamientos previos).
- Se crea una capa (shape) con los puntos del inventario de deslizamientos (zona inestable) y los puntos estables, asignando un campo denominado SUSC, que en el primer caso será igual a 1 y en el segundo a 0. Este shape constituirá la muestra de análisis.
- Teniendo en un mismo proyecto de SIG todos los mapas ráster correspondientes a los factores causales de susceptibilidad y el shape correspondiente a la muestra de análisis, se extraen los valores correspondientes a cada uno de los factores causales en los puntos de la muestra de análisis.
- Los datos así obtenidos se exportan a una hoja de cálculo en forma de matriz, con un número de filas igual al número de datos de la muestra y un número de columnas igual al número de factores más 3; las dos coordenadas geográficas de cada punto y el campo binario correspondiente a susceptibilidad (0 o 1). Un ejemplo de este tipo de matriz se representa en la Figura 3.

X	Y	ACCA	ASPE	SINA	COSA	ATGE	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DPBR	DPNE	DRIO	DVIA	DVNE	ESTR	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	LCCA	RUGO	SE2P	SLOP	V50M	DESL	
1171961	1053452	0.00	0.27	1.00	0.43	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.06	0.32	0.24	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	1.00	0.70	0.03	0.20	0.21	0.99	0.00	1.00	0.20	0.09	0.22	0	
1178210	1048923	0.00	0.21	0.98	0.64	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.42	0.19	0.00	0.00	0.13	0.03	0.00	1.00	0.60	0.75	0.60	0.00	0.98	0.00	1.00	0.27	0.09	0.00	0	
1178493	1047884	0.00	0.51	0.46	0.00	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	Factores de propensividad																0						
1179319	1050420	0.00	0.60	0.20	0.10	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.27	0.40	0.15	0.67	0.23	0.00	0.00	0.53	0.29	0.00	1.00	0.70	1.00	0.80	0.00	0.99	0.00	1.00	0.27	0.09	0.00	0	
1181107	1049753	0.00	0.25	1.00	0.52	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.21	0.17	0.20	0.55	0.19	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	0.94	0.28	0.10	0.00	0	
1183185	1049042	0.00	0.88	0.15	0.86	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.40	0.45	0.34	0.66	0.04	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	1.00	0.60	0.75	0.20	0.01	0.99	0.00	0.99	0.28	0.10	0.01	0	
1171153	1053027	0.00	0.69	0.03	0.32	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.02	0.03	0.03	0.34	0.07	0.11	0.15	0.41	0.02	0.13	1.00	0.50	0.63	1.00	0.12	0.99	0.01	1.00	0.28	0.10	0.13	0	
1172738	1051691	0.00	0.40	0.80	0.10	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.08	0.46	0.10	0.41	0.36	0.40	0.00	0.28	0.13	0.70	0.63	0.20	0.59	0.99	0.00	1.00	0.29	0.10	0.60	0	
1177322	1051311	0.00	0.98	0.43	0.99	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.03	0.04	0.48	0.07	0.00	0.00	0.07	0.03	0.00	1.00	1.00	0.38	0.20	0.00	0.98	0.00	0.99	0.28	0.10	0.01	0	
1180209	1049593	0.00	0.45	0.66	0.03	0.00	0.60	0.88	0.35	0.78	0.14	0.14	0.00	0.52	0.16	0.00	0.00	0.17	0.18	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.98	0.04	0.90	0.31	0.11	0.00	0	
1182369	1049009	0.00	0.73	0.00	0.44	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.15	0.22	0.06	0.59	0.01	0.00	0.00	0.06	0.09	0.00	1.00	0.60	0.75	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.31	0.11	0.00	0	
1174449	1050922	0.00	0.64	0.11	0.18	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.03	0.36	0.04	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	1.00	0.70	1.00	0.20	0.36	0.99	0.00	1.00	0.32	0.11	0.41	0	
1174105	1053746	0.00	0.44	0.68	0.03	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.14	0.04	0.42	0.27	0.00	0.00	0.17	0.19	0.00	1.00	0.70	0.38	1.00	0.00	0.98	0.01	1.00	0.33	0.11	0.00	0	
1175572	1051063	0.00	0.03	0.59	0.99	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.01	0.03	0.46	0.06	0.00	0.00	0.31	0.04	0.00	1.00	0.70	1.00	0.20	0.00	0.98	0.00	0.99	0.34	0.12	0.00	0	
1172897	1052096	0.00	0.52	0.44	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.14	0.47	0.07	0.00	0.00	0.45	0.01	0.00	0.25	0.70	0.63	0.20	0.34	0.97	0.00	1.00	0.35	0.12	0.39	0	
1173700	1050998	0.00	0.51	0.48	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.03	0.34	0.09	0.00	0.00	0.17	0.02	0.00	1.00	1.00	1.00	0.20	0.54	0.97	0.01	1.00	0.35	0.12	0.47	0	
1178045	1051371	0.00	0.58	0.27	0.06	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.10	0.54	0.02	0.00	0.13	0.00	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.10	0.98	0.00	0.98	0.35	0.12	0.11	0		
1177146	1049133	0.00	0.74	0.00	0.46	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.02	0.03	0.39	0.14	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	0.97	0.36	0.12	0.00	0	
1176166	1054729	0.00	0.46	0.62	0.02	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.05	0.03	0.03	0.50	0.35	0.00	0.00	0.12	0.05	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.00	0.97	0.01	1.00	0.36	0.12	0.00	0	
1173034	1051216	0.00	0.21	0.98	0.63	0.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.03	0.01	0.35	0.04	0.00	0.00	0.21	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	1.00	0.02	0.95	0.00	0.99	0.85	0.34	0.01	1	
1173837	1052721	0.00	0.26	1.00	0.49	1.00	0.10	0.88	0.35	0.78	0.00	0.00	0.02	0.45	0.03	0.00	0.00	0.07	0.01	0.00	1.00	0.70	1.00	1.00	0.48	0.96	0.00	0.99	0.85	0.34	0.45	1	
1173753	1052760	0.00	0.82	0.04	0.71	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.03	0.45	0.06	0.00	0.00	0.08	0.03	0.00	0.13	0.70	1.00	1.00	0.51	0.95	0.00	0.99	0.85	0.34	0.49	1	
1173602	1053160	0.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.02	0.41	0.21	0.00	0.00	0.04	0.01	0.00	0.13	1.00	0.63	1.00	0.16	0.86	0.00	0.99	0.86	0.35	0.15	1	
1172400	1051630	0.00	0.41	0.77	0.08	0.00	0.10	0.88	0.34	0.79	0.01	0.01	0.01	0.44	0.04	0.00	0.00	0.43	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	0.20	0.09	0.89	0.00	0.97	0.86	0.35	0.12	1	
1173210	1051180	0.00	0.64	0.12	0.18	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.02	0.02	0.03	0.35	0.03	0.00	0.00	0.19	0.01	0.00	0.00	0.50	1.00	0.80	0.01	0.92	0.00	1.00	0.86	0.35	0.01	1	
1174060	1052650	0.00	0.29	0.99	0.39	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.03	0.01	0.40	0.06	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.21	0.95	0.00	0.99	0.87	0.35	0.20	1
1174700	1052520	0.00	0.86	0.12	0.82	0.00	0.60	0.89	0.34	0.78	0.02	0.02	0.00	0.45	0.09	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.25	0.50	0.63	0.20	0.07	0.88	0.00	0.99	0.88	0.36	0.08	1	
1172155	1052500	0.00	0.58	0.26	0.06	1.00	0.80	0.88	0.35	0.78	0.01	0.01	0.01	0.48	0.05	0.00	0.00	0.51	0.01	0.00	1.00	1.00	0.63	0.20	0.07	0.88	0.00	0.99	0.88	0.36	0.08	1	
1172920	1051880	0.00	0.48	0.58	0.01	1.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.07	0.46	0.03	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.70	0.63	0.20	0.43	0.85	0.00	0.98	0.88	0.36	0.45	1	
1171970	1050680	0.00	0.25	1.00	0.50	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.04	0.39	0.25	0.00	0.00	0.24	0.00	0.00	1.00	0.50	0.63	0.60	0.14	0.95	0.00	0.99	0.88	0.36	0.16	1	
1175120	1051601	0.00	0.32	0.96	0.30	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.46	0.00	0.18	0.07	0.28	0.00	0.06	0.38	0.70	1.00	0.20	0.13	0.94	0.60	0.99	0.88	0.36	0.15	1	
1173264	1053893	0.00	0.69	0.04	0.31	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.02	0.38	0.06	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	1.00	0.10	0.38	1.00	0.00	0.94	0.00	0.99	0.89	0.37	0.00	1	
1173640	1051650	0.00	0.51	0.47	0.00	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.03	0.42	0.08	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.13	0.70	1.00	0.20	0.46	0.85	0.00	1.00	0.89	0.37	0.44	1	
1173250	1051270	0.00	0.71	0.02	0.37	0.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.00	0.01	0.05	0.39	0.05	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.50	1.00	0.20	0.27	0.95	0.00	0.99	0.89	0.37	0.22	1	
1177872	1051422	0.00	0.81	0.03	0.68	1.00	0.10	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.10	0.51	0.05	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	1.00	0.30	0.38	1.00	0.12	0.94	0.00	0.98	0.89	0.37	0.12	1	
1172500	1051370	0.00	0.34	0.92	0.23	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.02	0.00	0.00	0.36	0.01	0.00	0.00	0.33	0.02	0.00	0.00	0.50	0.63	0.60	0.05	0.93	0.00	0.97					

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

1.1 PASO 1. SELECCIÓN DE VARIABLES

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

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

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

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

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

1.2 PASO 2. ESTIMACIÓN DE FUNCIONES DE SUSCEPTIBILIDAD

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

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

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

1.3 PASO 3. ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO DE LOS MODELOS

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

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

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

2. MÉTODO 6. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

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

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

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

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

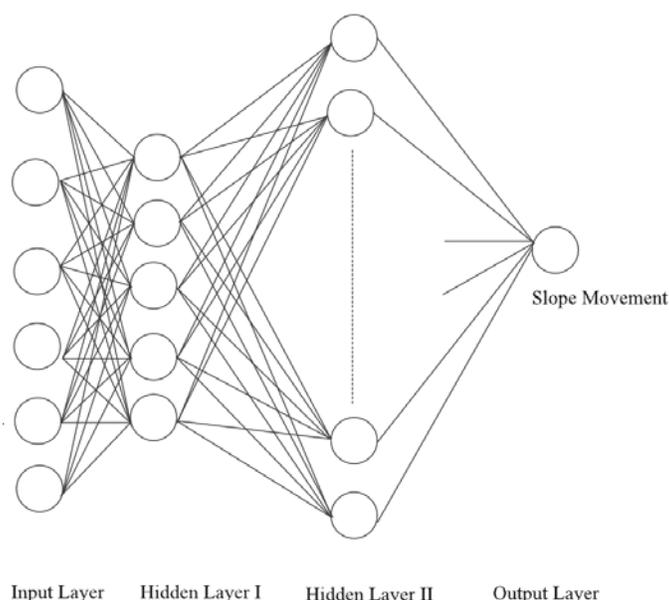


FIGURA 4. TOPOLOGÍA DE LA RNA PARA SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

2.1 PASO 1: SELECCIÓN DE DATOS DE ENTRENAMIENTO, VALIDACIÓN Y TEST

El proceso de cálculo sigue el diagrama mostrado en la Figura 5. Los datos disponibles son divididos en tres grupos: entrenamiento, validación cruzada y test. Los datos de entrenamiento son utilizados para ajustar los pesos del modelo; los datos de validación cruzada se utilizan para detener el proceso de entrenamiento y evitar el efecto de memorización; y los datos de test se utilizan para medir el rendimiento en cuanto a capacidad de clasificación del modelo. La proporción de datos en los grupos es: 60% para entrenamiento, 20% para validación cruzada, y 20% para test.

En casos de insuficiencia de datos, el modelo obtenido puede presentar sensibilidad a la distribución de los grupos de datos mencionados. Para prevenir esta situación se deben evaluar como mínimo cinco modelos diferentes, cambiando la asignación de grupos como se muestra en la Tabla 30. Dependiendo la longitud de la muestra de datos, este número de modelos puede incrementarse, manteniendo una distribución de datos proporcional.

TABLA 30. DISTRIBUCIÓN DE DATOS EN GRUPOS PARA CONFIGURAR MODELOS DE RNA

	RNA01	RNA02	RNA03	RNA04	RNA05
20%	Entrenamiento	Test	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento
20%	Entrenamiento	Entrenamiento	Test	Validación	Entrenamiento
20%	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento	Test	Validación
20%	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento	Test
20%	Test	Validación	Entrenamiento	Entrenamiento	Entrenamiento

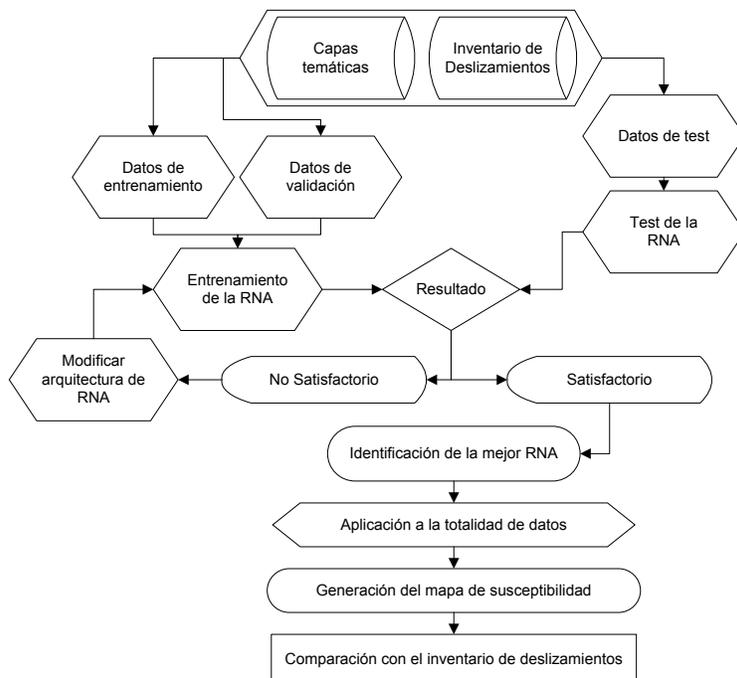


FIGURA 5. PROCESO DE MODELIZACIÓN MEDIANTE RNAS

2.2 PASO 2: IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES MODELOS Y ESTIMACIÓN DEL VALOR MEDIO DE SUSCEPTIBILIDAD

A partir de la distribución de datos sugerida en la Tabla 30 se deben elaborar y entrenar diferentes modelos de redes neuronales. Cada modelo neuronal debe aplicarse al área de estudio completa para obtener un modelo/mapa de susceptibilidad en cada caso.

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

BIBLIOGRAFÍA

Alcántara-ayala, I.. (2002). geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology* 47, 107-124.

Ambalagan, R. (1992) Terrain evaluation and Landslide Hazard Zonation for Environmental Regeneration and Land Use Planning in Mountainous Terrain. Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, pp. 861-871. En Suarez (1998).

Baeza, C., and J. Corominas. 1996. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques, ed. K. Senneset.

Baeza, C. y Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *EarthSurfaceProcesses and Landforms*, 26: 1251-1263.

Baeza, Cristina, N. Lantada, and J. Moya. 2010. Influence of sample and terrain unit on landslide susceptibility assessment at la pobla de lillet, eastern pyrenees, spain. *Environmental Earth Sciences* 60 (1): 155-67.

Bernknopf, R.; Champbell, R.; Brookshire, D.; Saphiro, C. (1988). A probabilistic approach landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with application of economic evaluation. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. 25, No. 1, pp 39-56.

Blanc, R; Cleveland, G. (1968). Natural Slope Stability as Related to Geology, San Clemente Area, Orange and San Diego Counties, California. California Division of Mines and Geology, Special Report 98, pp 19.

Crozier, M., Glade, T. (2005). Landslide hazard and risk: Issues, Concepts and Approach. En *Landslide Hazard and Risk*, Glade, Anderson and Crozier eds. John Willy and Sons., pp. 1-40.

Dobrovolny, E. (1971). Landslide susceptibility in and near anchorage as interpreted from topographic and geologic maps in the great Alaska earthquake of 1964. *Geology* volume. Publication 1603. U.S. Geological

Survey Open Field Report 86-329, National Research Council, committee on the Alaska earthquake, National Academy of Sciences, USA, pp 735-745.

Ermini, Leonardo, Filippo Catani, and Nicola Casagli. 2005. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66 (1-4): 327-43.

Fell, R. (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 261-272.

Gomez, H., and T. Kavzoglu. 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa river basin, Venezuela. *Engineering Geology* 78 (1-2): 11-27.

Hungr, O., Corominas, J., Eherhardt, E. (2005). Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity. *Landslide Risk Management, Proceedings of the international conference on landslide risk management, Vancouver, Canada, 31 May-3 June 2005*. Balkema, 99-128.

Kanungo (1993). En Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Editor: Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga, Colombia.

Katz, O., Crouvi, O. (2007). The geotechnical effects of long human habitation (2000<years): Earthquake induced landslide hazard in the city of Zefat, northern Israel. *Engineering Geology*, 95, 57-78.

Legros F. (2002). The mobility of long-runout landslides. *Engineering Geology*, 301-331.

Mora S. y Vahrson W.G. (1993). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. *Tecnología Ice*. Vol 3 No. 1. Octubre, 1993.

Mora S. y Vahrson W.G. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. XXXI, No. 1, pp. 49-58.

Nilsen, T.H., Wright, R.H., Vlastic, T.C. y Spangle, V.E. 1979. Relative slope stability and land use planning in the San Francisco Bay region, California. U.S. Geological Survey Professional Paper no 944, 96pp.

Pradhan, Biswajeet, and Saro Lee. 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: Backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software* 25 (6) (6): 747-59.

Pradhan, Biswajeet, Saro Lee, and Manfred F. Buchroithner. 2010. A GIS-based back-propagation neural network model and its cross-application and validation for landslide susceptibility analyses. *Computers Environment and Urban Systems* 34 (3) (MAY): 216-35.

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. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica ETSECCPB., Universidad Politécnica de Cataluña.

Santacana, N., B. Baeza, J. Corominas, A. De Paz, and J. Marturia. 2003. A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in the Pobla de Lillet area (eastern pyrenees, Spain). *Natural Hazards* 30 (3) (Nov): 281-95.

Soeters R., Van Westen C.J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. Capítulo 8 en *Landslides: investigation and mitigation*, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council.

Suárez, J. (1998). Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Editor: Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga, Colombia.

Van Westen C. J. (1994). GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes Colombia, en *Mountain environments and geographic information systems*, editado por Martin F. Price y D. Ian Heywood, 309 pp.

Van Westen, C. J., y Terlien, M.T.J. (1996). An approach towards deterministic landslide hazard analysis using GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol 21, 853-868.

Varnes, D.J. "Slope movement types and processes". Capítulo 2 de "Landslides Analysis and Control". Transportation Research Board. National Academy of Sciences. Washington, D.C. 1978

Varnes, D. J., and IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. 1984. *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. The UNESCO Press: 63.

Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation : a review of principles and practice*. UNESCO Press, 63 pp.

Voight, B. 1989. Materials science law applied to time forecast of slope failure. *Landslide News*, 3: 8-11.

Yesilnacar, E., and T. Topal. 2005. Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, hendek region (turkey). *Engineering Geology* 79 (3-4): 251-66.

ANEXO I

EJEMPLOS DE MÉTODOS PARA EVALUAR LA SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR DESLIZAMIENTOS (MOVIMIENTOS EN MASA)

1. NIVEL I. MÉTODOS CON BAJOS NIVELES DE INFORMACIÓN

1.1 MÉTODO 1. OBSERVACIÓN DIRECTA

A partir de la Tabla 32, es posible establecer zonas con características similares, que lleven a generar grados de susceptibilidad para el terreno.

TABLA 32. CRITERIOS PARA DETERMINAR EL GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

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

A manera de ilustración, se presenta en la Figura 7 un mapa con cinco categorías que pueden obtenerse después de una inspección en campo con la ayuda de un GPS o cartografía temática, para definir los contornos.

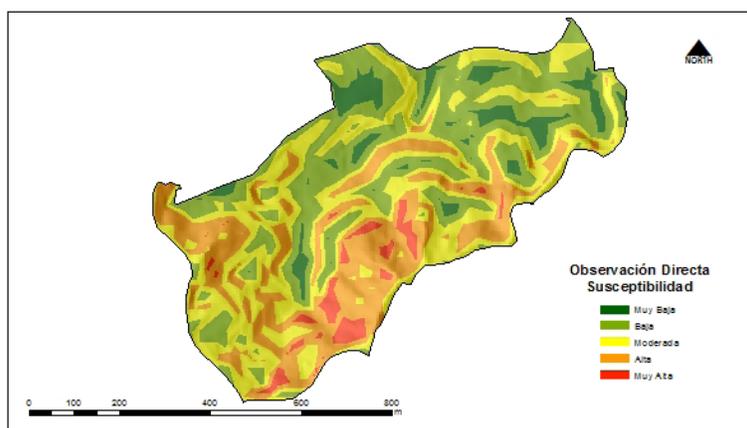


FIGURA 7. ZONIFICACIÓN DIRECTA DE SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTOS

1.2 MÉTODO 2: ZONIFICACIÓN HEURÍSTICA BASADA EN CRITERIO EXPERTO.

Suponiendo que después de una inspección de campo se llegó a la identificación de una zona con las siguientes características:

- Vegetación intensa, área húmeda
- Material predominante: Lutitas no arcillosas
- Espesor de la capa del suelo: 8 metros
- Pendiente media: 38°
- Diferencia de altura entre la divisoria de aguas y el valle: 120 metros
- El ángulo que forman la dirección del talud y la dirección de las discontinuidades más representativas es mayor a 30°
- La relación entre buzamiento de las discontinuidades e inclinación del talud de más de 10°

Para asignar pesos con estas características del terreno, debe emplearse la tabla 4. Los pesos específicos son:

TABLA 34. ASIGNACIÓN DE PESOS A LOS DIFERENTES FACTORES DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Factor	Descripción	Peso
Litología	Lutitas no arcillosas	1.80
Estructura	Espesor de 6 a 10 metros	0.85
	Relación de paralelismo entre talud y discontinuidades 31°	0.20
	Relación entre buzamiento e inclinación: 15°	0.30
	Buzamiento 27°	0.30
Morfometría	16° a 25°	0.80
Relieve relativo	95 metros	0.30
Uso de la tierra	Vegetación intensa	0.80
Aguas subterráneas	Húmedo	0.20

$$Amenaza = 2 * 1.8 + 2 * \frac{0.85 + 0.2 + 0.3 + 0.3}{4} + 2 * 0.8 + 0.3 + 2 * 0.8 + 0.2$$

$$Amenaza = 8.1$$

La zona así delimitada correspondería a una amenaza relativa muy alta.

2. NIVEL 2. MÉTODOS CON NIVELES INTERMEDIOS DE INFORMACIÓN

2.1 MÉTODO 3. MÉTODOS HEURÍSTICOS BASADOS EN DATOS

Para efecto de ilustrar la metodología de Mora y Vahrson, se presenta un ejemplo ficticio (Mora y Vahrson, 1993).

Una cuadrícula tiene como características

L=4 piroclastos poco compactados

Pendiente: Elevación máxima=1750m

Elevación mínima=1430m

Relieve relativo: 320m

Rr=3

3 meses < 125 mm $3*0= 0$

4 meses 125 - 250 mm $4*1= 4$

5 meses > 125 mm $5*2= 10$

Sumatoria 14

H=3

$$Susc = R_r \cdot L \cdot H = 36$$

La actividad sísmica máxima en esta cuadrícula llegó a un valor de IX en la escala Mercalli Modificada, por lo tanto, S=7.

Las lluvias máximas para una duración de 24 horas, en un período de retorno de 100 años poseen un valor de 321mm, entonces, Ll=4

El factor de disparo total se obtiene de la suma $Disp=S+Ll=11$

El potencial de deslizamientos disparado por sismos posee un valor de $PDS=S*Susc=252$, clasificándose como de mediano grado de amenaza;

El potencial de deslizamientos disparados por lluvias intensas asciende al valor de $PDI=Ll*Susc=144$, clasificada como amenaza moderada;

La amenaza total de deslizamiento tiene un valor de

$$Ad=PDS+PDI=Susc*Disp$$

$$Ad=252+144=36*11=396$$

Lo cual, hace que la ladera posea un mediano grado de amenaza por generación de deslizamientos.

2.2 MÉTODO 4. MÉTODOS GEOTÉCNICOS ASOCIADOS A FACTORES DE SEGURIDAD

Utilizando el software ERN-Deslizamientos se ha llevado a cabo un análisis de susceptibilidad mediante el método de falla plana traslacional. Los factores necesarios para este procedimiento se ilustran en la Figura 9 y son: modelo digital de elevaciones, archivo .AME de aceleraciones sísmicas, mapas de cohesión, ángulo de fricción, peso unitario y espesores de suelos.

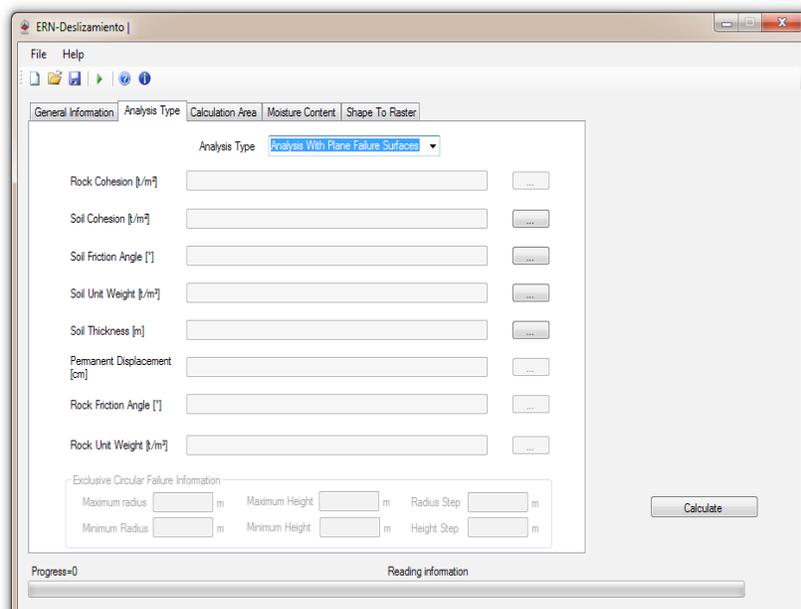


FIGURA 7. PARÁMETROS DE ENTRADA DEL SOFTWARE ERN-DESLIZAMIENTOS PARA ANÁLISIS DE FALLA PLANA.

Se ha efectuado un análisis sin sismo, con suelo completamente saturado. Los resultados son el inverso del Factor de Seguridad y expresan el grado de susceptibilidad de las diferentes celdas que constituyen el área de estudio (Figura 9).

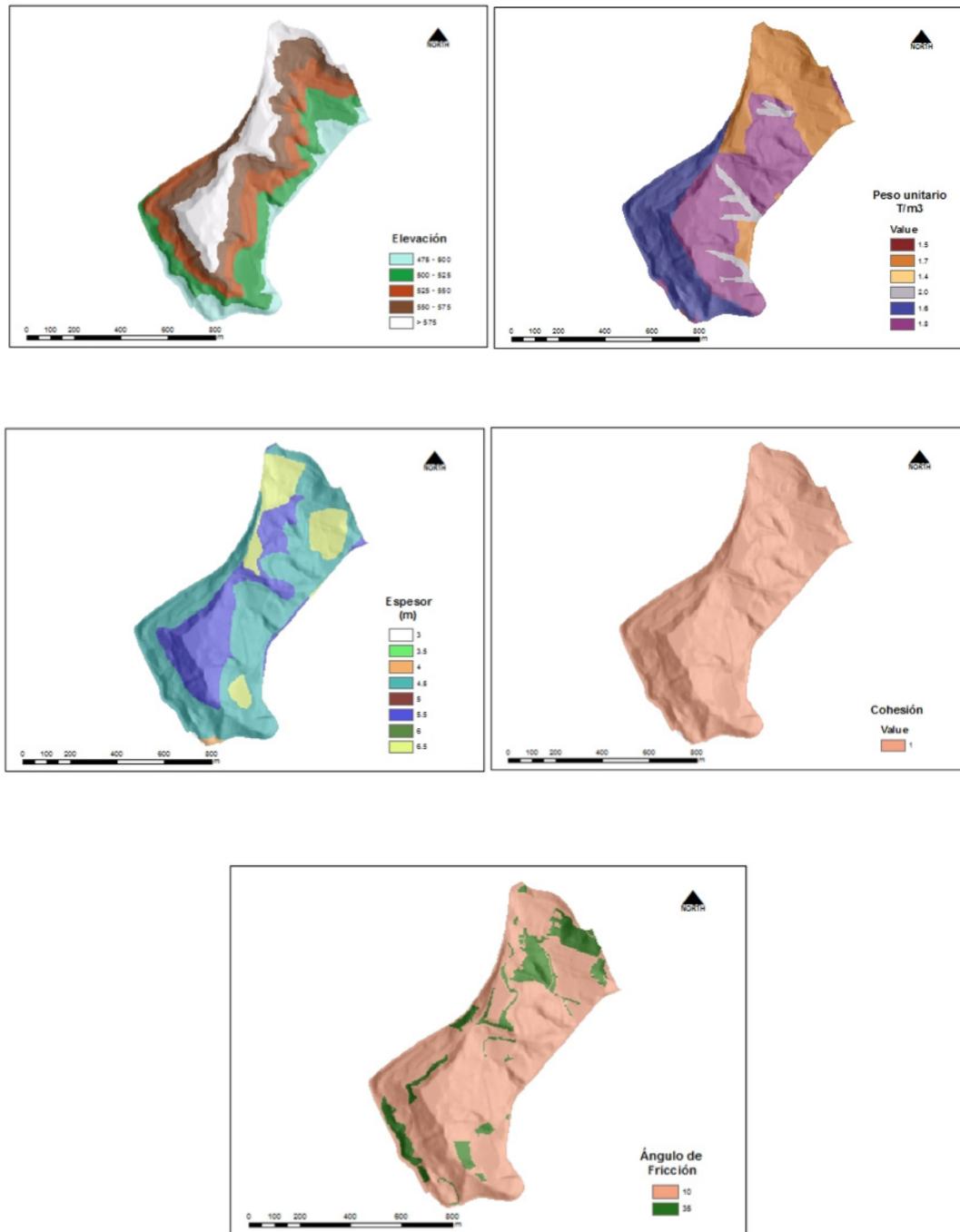


FIGURA 9. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL TERRENO PARA ANÁLISIS DE FALLA PLANA. ELEVACIÓN, PESO UNITARIO, ESPESOR, COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN DEL SUELO.

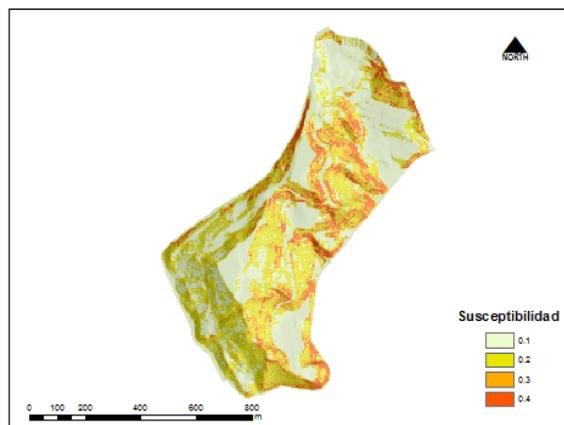


FIGURA 9. ÍNDICES DE SUSCEPTIBILIDAD CALCULADOS

3. NIVEL 3. MÉTODOS CON ALTOS NIVELES DE INFORMACIÓN

3.1 MÉTODO 5. ANÁLISIS DISCRIMINANTE

Para un área de estudio se han logrado extraer datos relacionados con 22 factores de propensividad a la inestabilidad de laderas.

TABLA 35. LISTADO DE FACTORES DE PROPENSIVIDAD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Modelo de elevación digital (DEM)
Pendientes (SLOP)
Insolación (INSO)
Orientación de las laderas (ASPE)
Rugosidad (RUGO)
Curvatura perpendicular a la pendiente (CRPL)
Curvatura paralela a la pendiente (CRPR)
Curvatura en dos dimensiones del terreno (CURV)
Áreas aferentes (ACCA)

Coberturas (COBE)
Formaciones superficiales (FMSU)
Geología (GEOL) Geomorfología (GEOM)
Distancia a red de acueductos (DACU)
Distancia a red de alcantarillado (DALC)
Distancia a drenajes y cauces (DDRE)
Distancia a fallas geológicas y lineamientos (DFAL)
Distancia a la red vial (DVIA)
Densidad poblacional (hab/ha) (DPNE)
Densidad neta de viviendas (viv/ha) (DVNE)
Densidad poblacional (habitantes en 50 metros) (H50M)
Densidad de viviendas (viviendas en 50 metros) (V50M)

Tales factores tienen su representación cartográfica en los mapas mostrados desde la Figura 10 hasta la Figura 32.

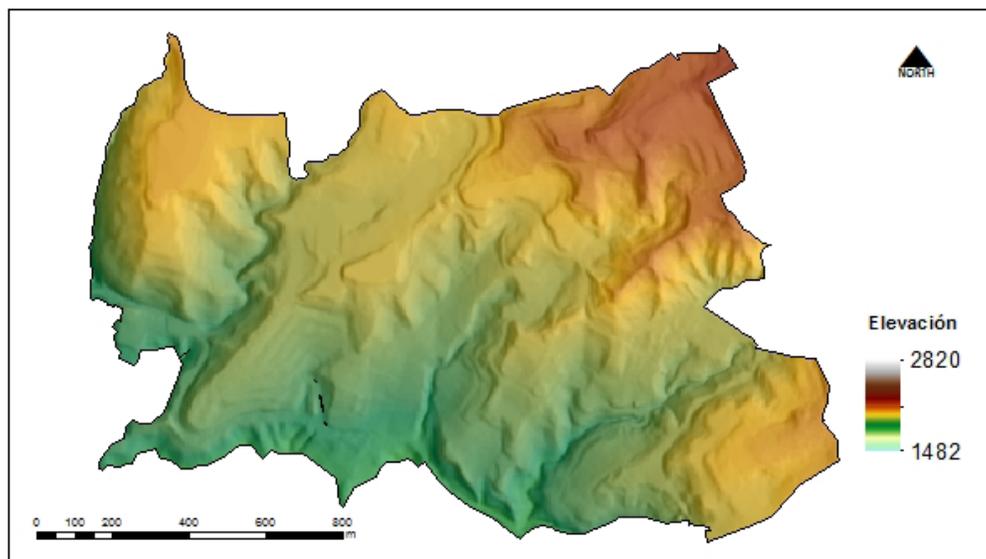


FIGURA 10. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

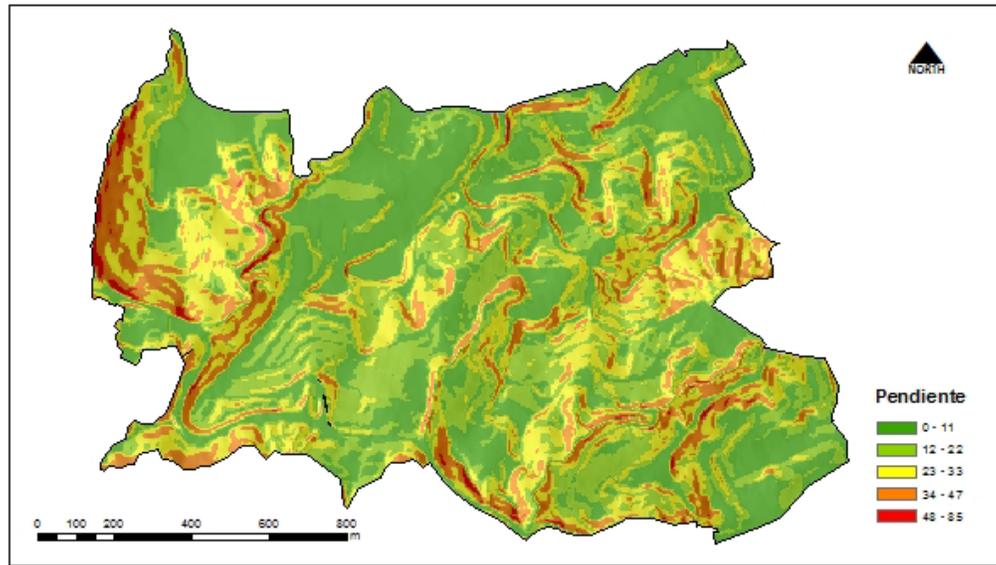


FIGURA 11. MAPA DE PENDIENTE PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

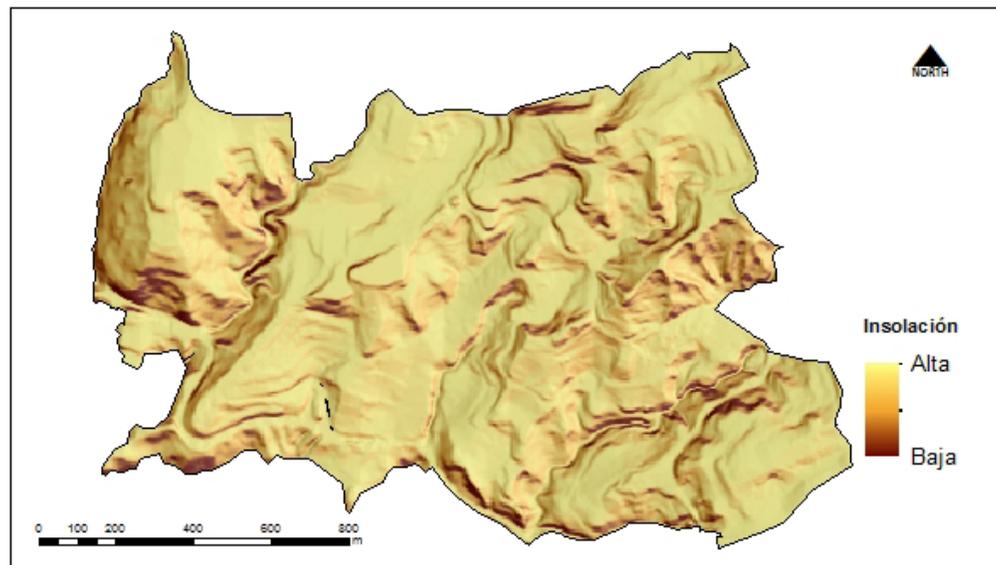


FIGURA 12. MAPA DE INSOLACIÓN CALCULADO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

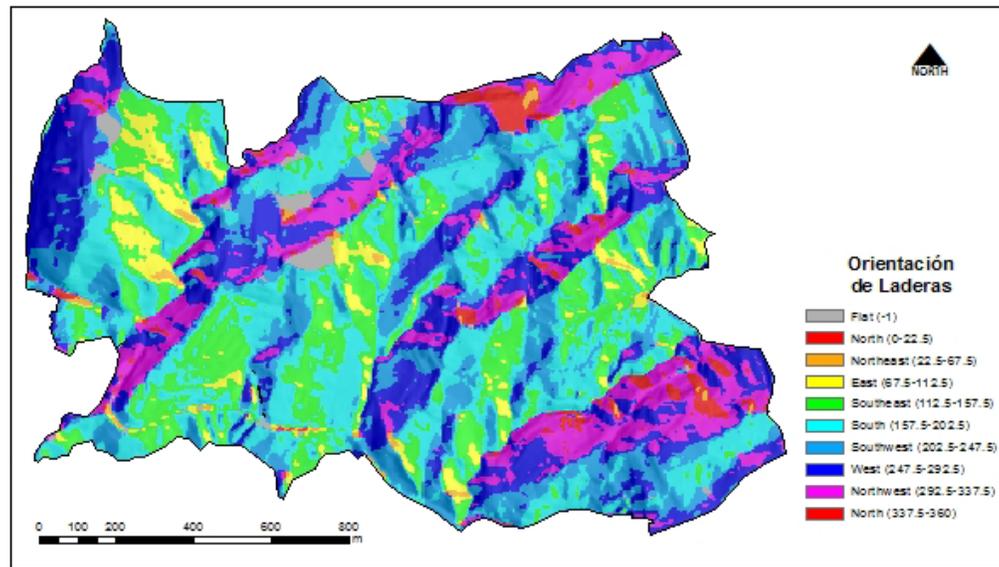


FIGURA 13. MAPA DE ORIENTACIÓN DE LADERAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

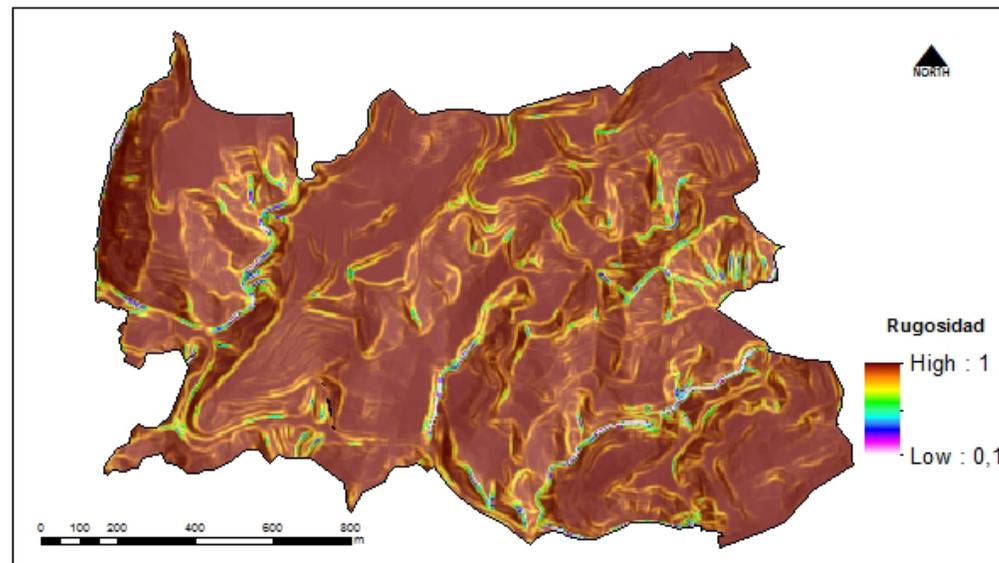


FIGURA 14. MAPA DE RUGOSIDAD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

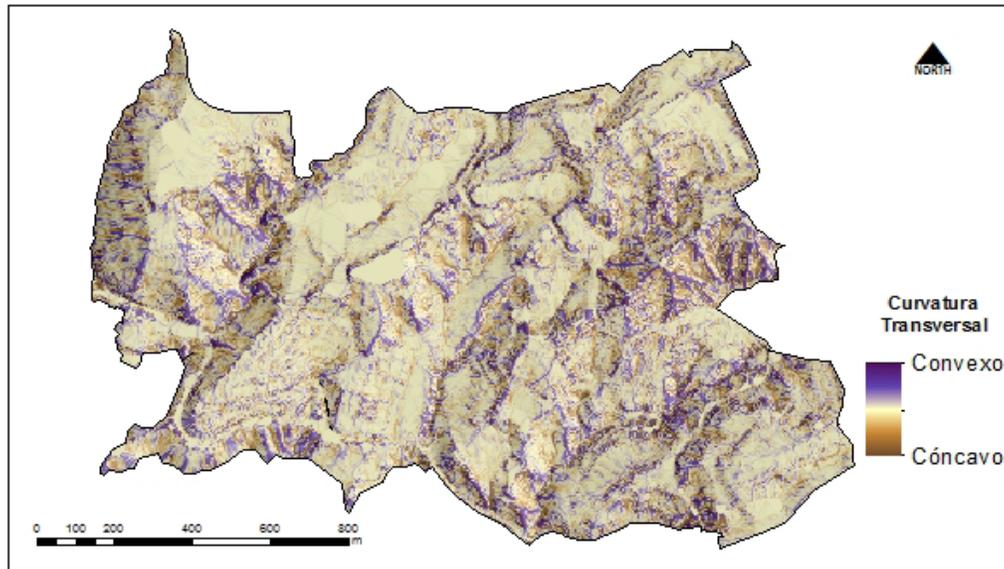


FIGURA 15. MAPA DE CURVATURA EN EL SENTIDO PERPENDICULAR A LA PENDIENTE PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

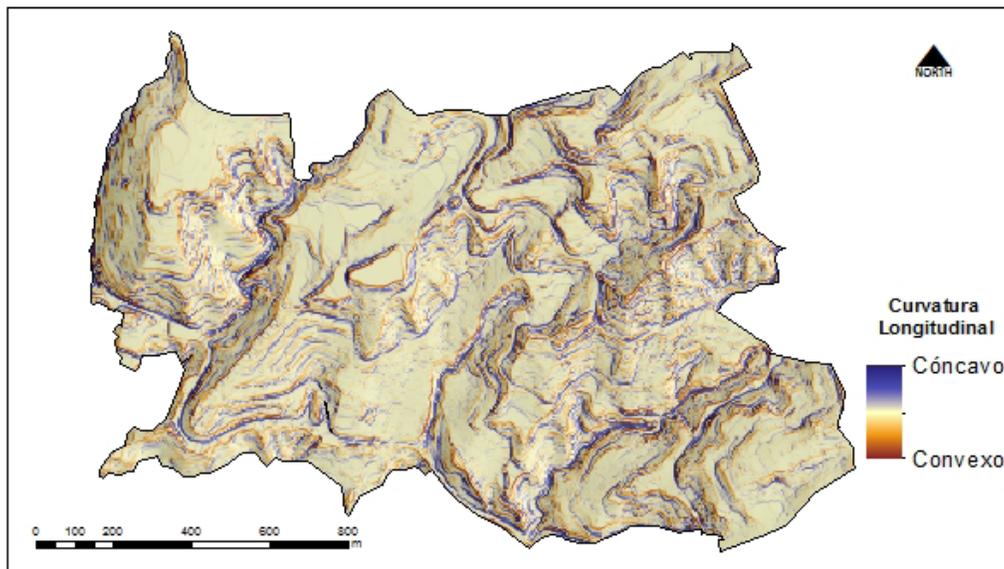


FIGURA 16. MAPA DE CURVATURA EN EL SENTIDO PARALELO A LA PENDIENTE PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

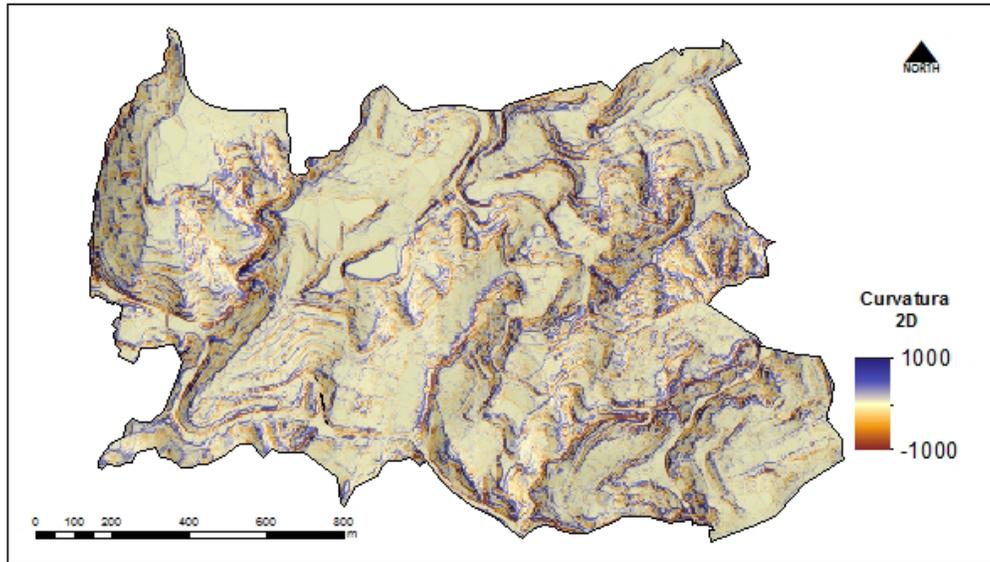


FIGURA 17. MAPA DE CURVATURA (EN DOS DIMENSIONES) PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

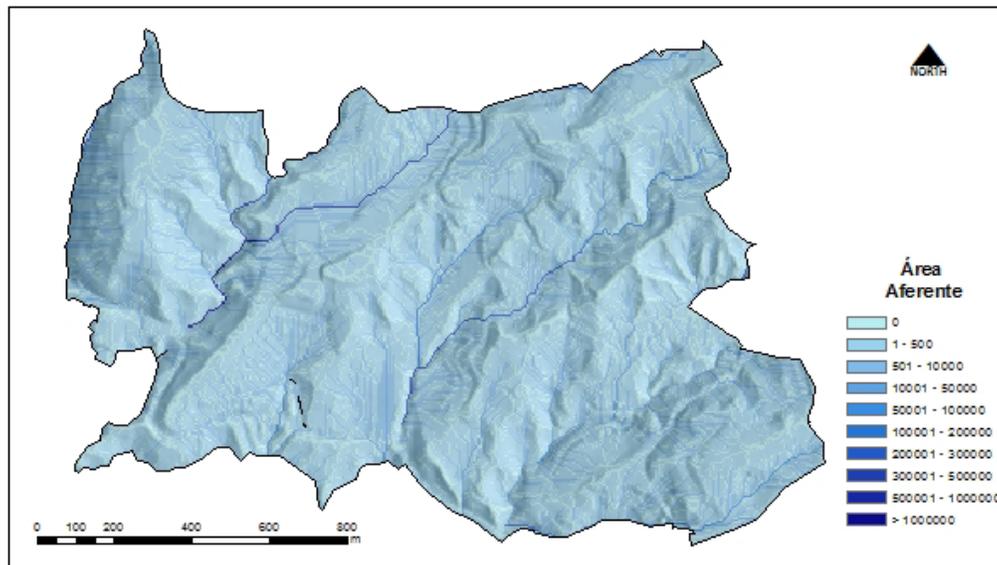


FIGURA 18. MAPA DE ÁREAS AFERENTES POR PÍXEL (ÁREA ACUMULADA)

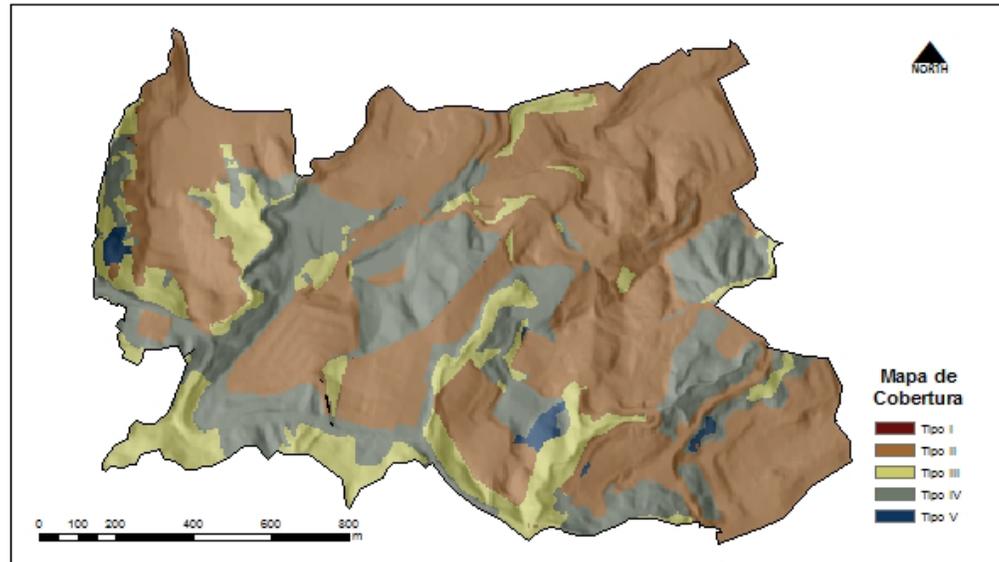


FIGURA 19. MAPA DE COBERTURAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

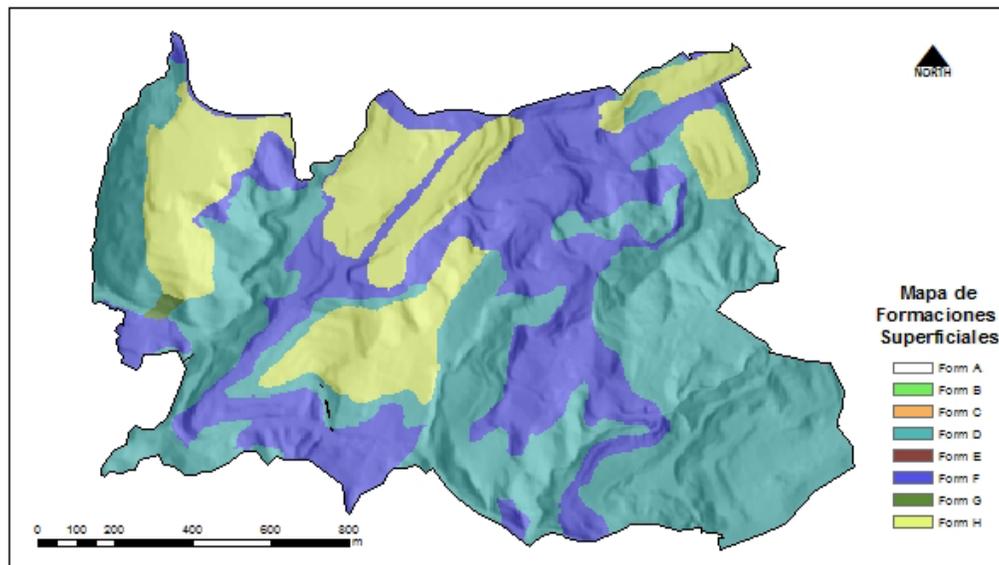


FIGURA 20. MAPA DE FORMACIONES SUPERFICIALES PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

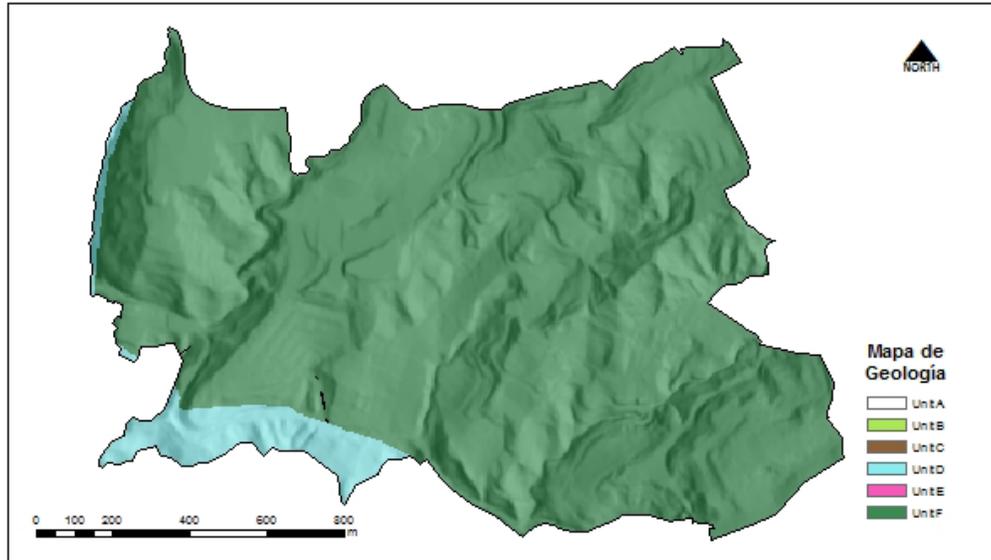


FIGURA 21. MAPA DE GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

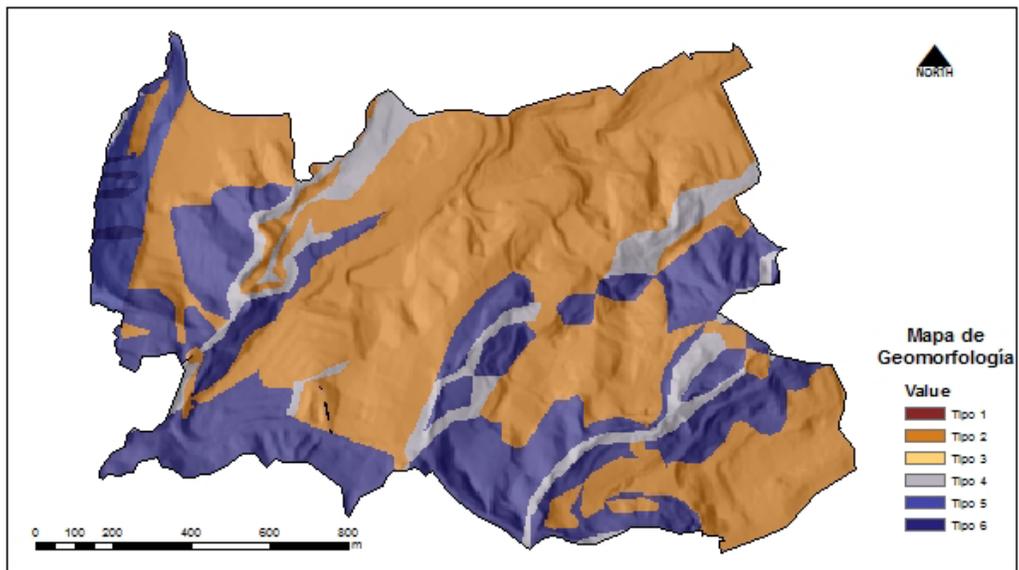


FIGURA 22. MAPA DE GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

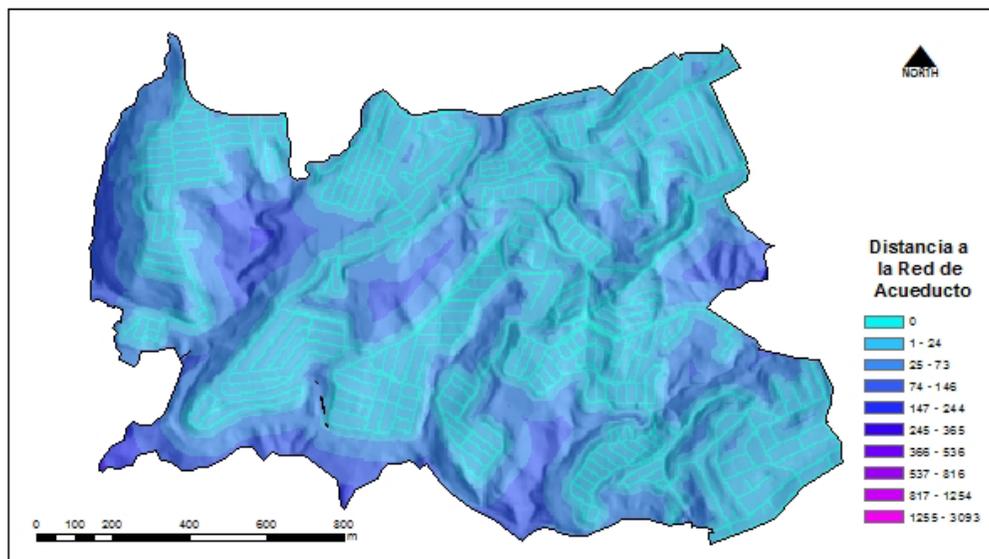


FIGURA 23. MAPA DE DISTANCIA A LA RED DE ACUEDUCTO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

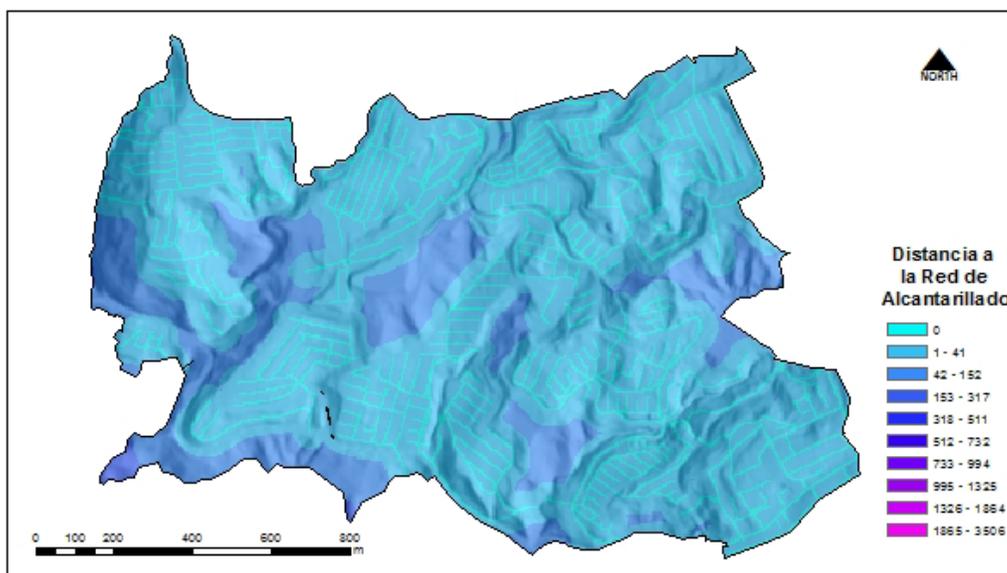


FIGURA 24. MAPA DE DISTANCIA A LA RED DE ALCANTARILLADO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

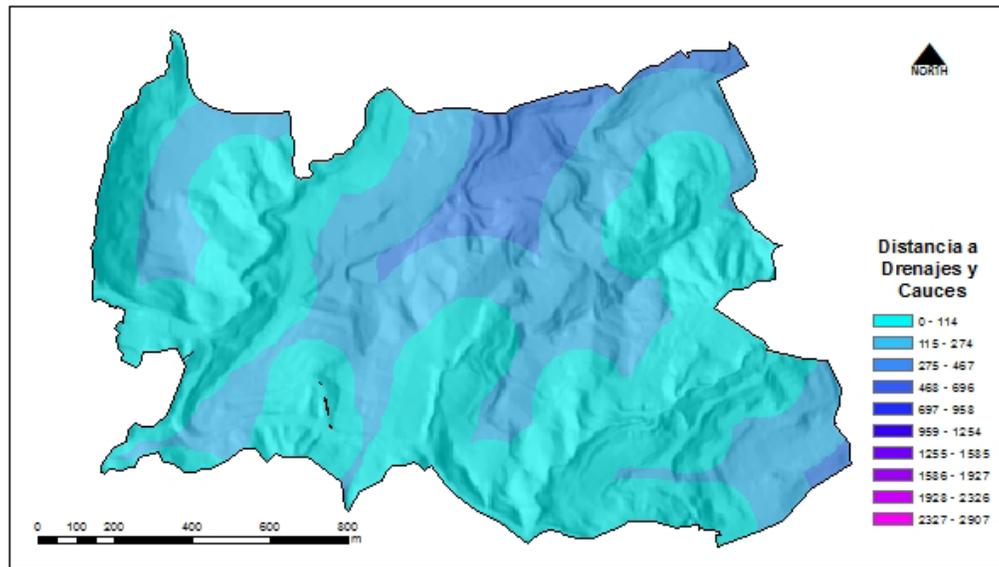


FIGURA 25. MAPA DE DISTANCIA A DRENAJES Y CAUCES PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

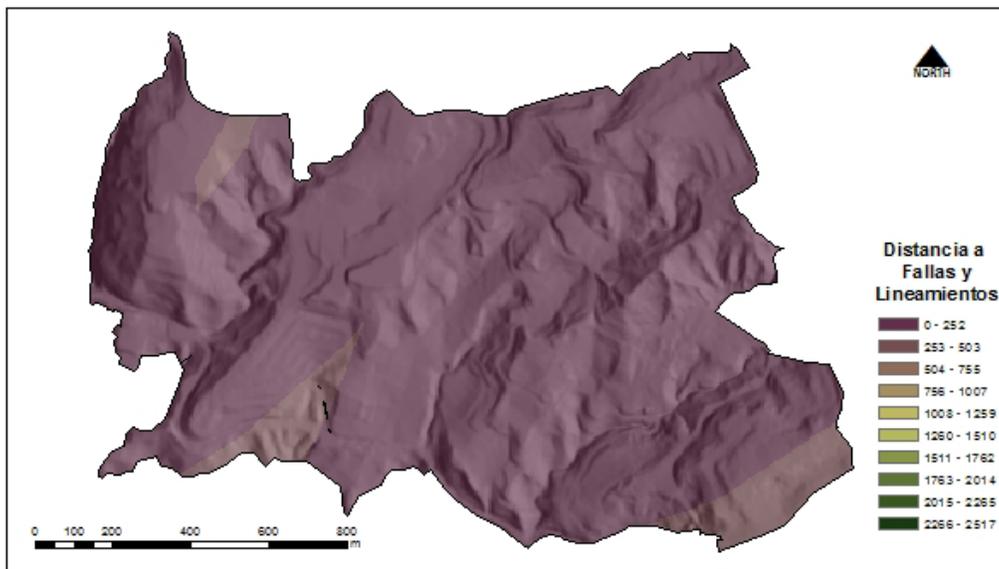


FIGURA 26. MAPA DE DISTANCIA A FALLAS GEOLÓGICAS Y LINEAMIENTOS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

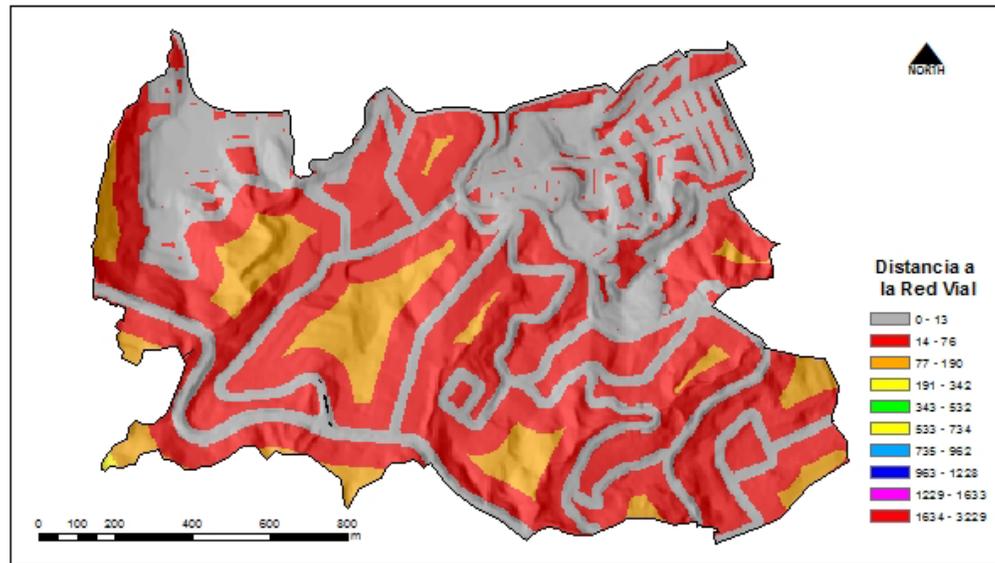
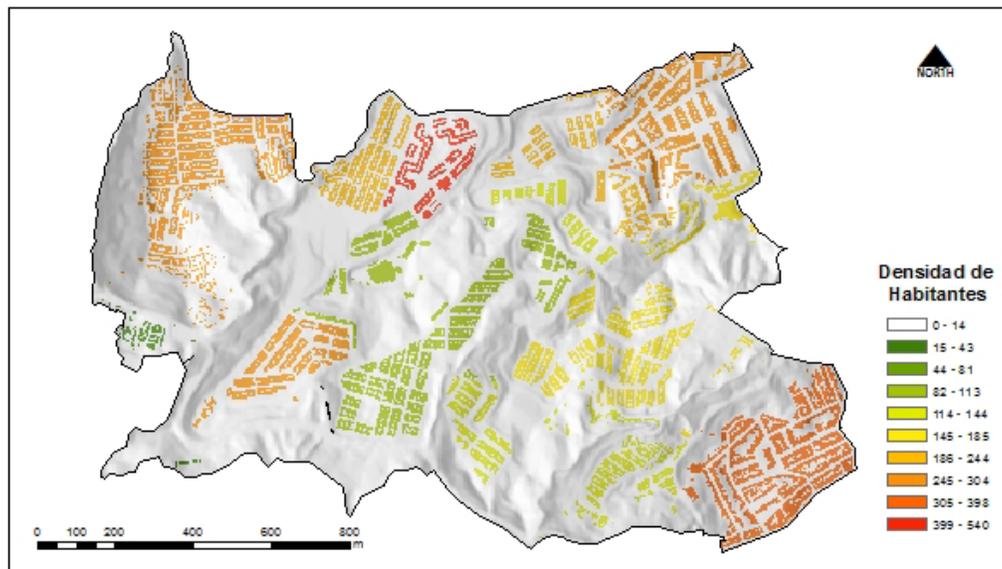


FIGURA 27. MAPA DE DISTANCIAS A LA RED VIAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

FIGURA 28. MAPA DE DENSIDAD POBLACIONAL EXPRESADA EN HABITANTES POR HM² PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

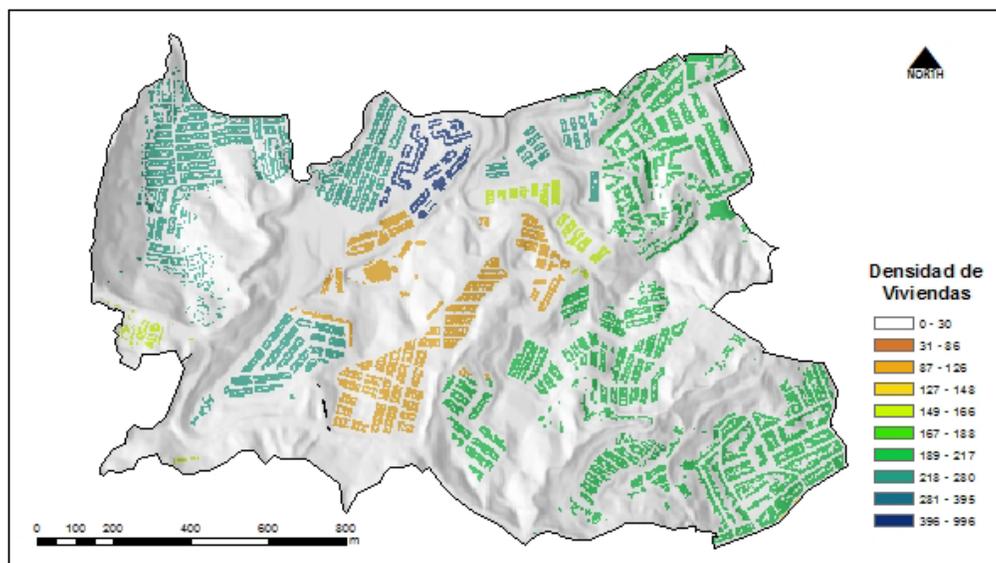


FIGURA 29. MAPA DE DENSIDAD NETA DE VIVIENDAS (VIVIENDAS POR HM²) PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

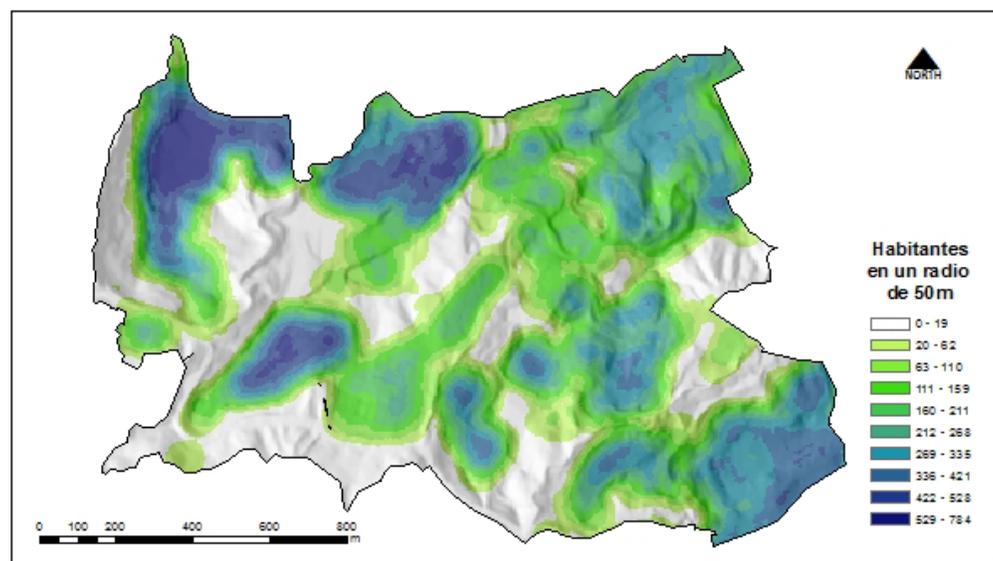


FIGURA 30. DENSIDAD POBLACIONAL, EXPRESADA EN HABITANTES EN UN RADIO DE 50M PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

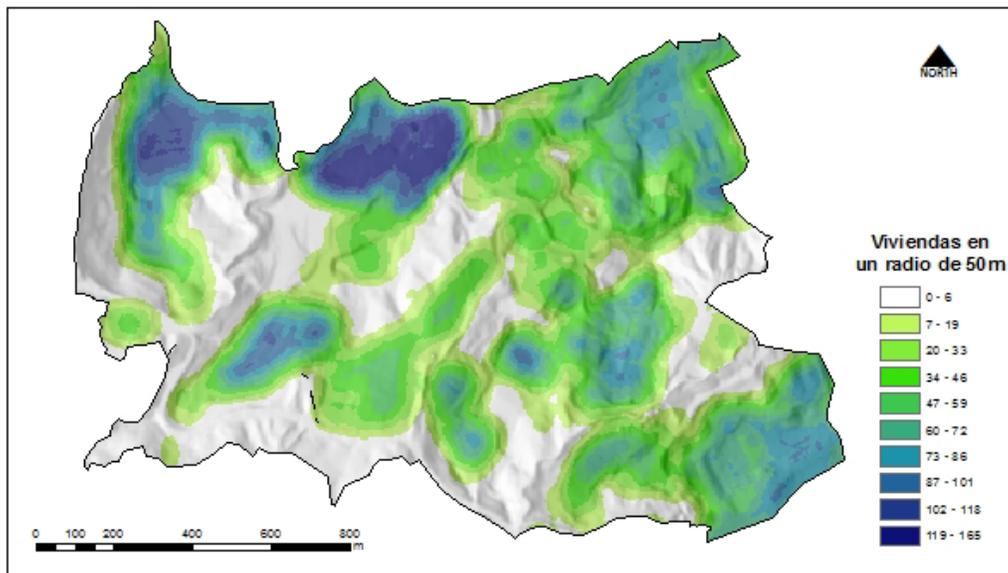


FIGURA 32. MAPA DE DENSIDAD DE VIVIENDAS, EXPRESADA EN VIVIENDAS EN UN RADIO DE 50 METROS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Adicionalmente se cuenta con el inventario de deslizamientos que aparece en la Figura 32, donde se tienen registrados 50 eventos pasados de deslizamientos.

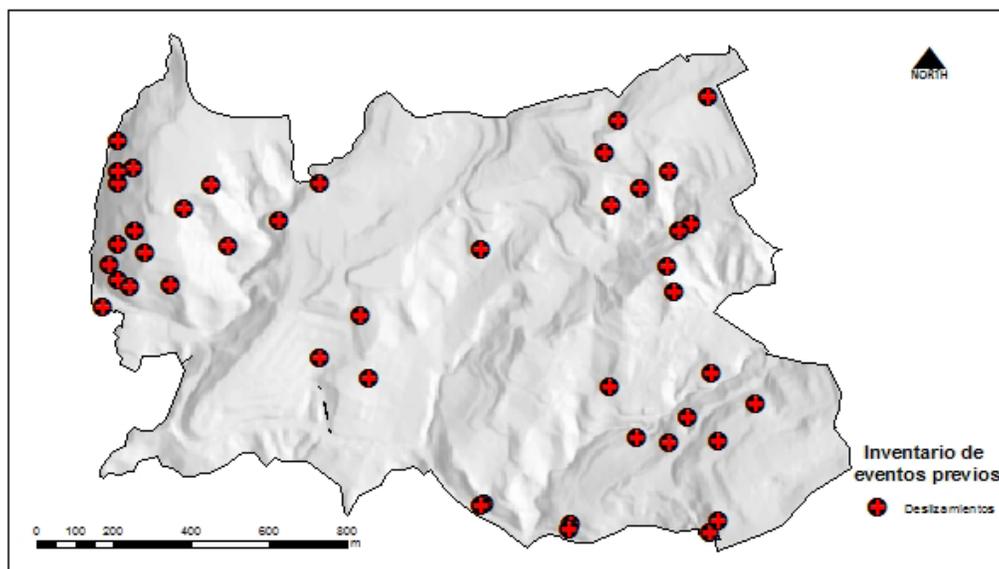


FIGURA 32. INVENTARIO DE EVENTOS PREVIOS DE DESLIZAMIENTO EN EL ÁREA DE ESTUDIO

Con la información disponible del área de estudio se conforma una muestra de 50 eventos de deslizamiento, que constituyen uno de los dos grupos sobre los que se realizarán los análisis posteriores. El otro grupo estará constituido por otros 50 puntos elegidos aleatoriamente dentro del área donde no existen eventos registrados. En total se tienen 100 puntos (Tabla 36) como muestra de análisis dividida en dos grupos: área estable (DESL=0) y área inestable (DESL=1).

TABLA 36. EXTRACTO DE LA MUESTRA DE ANÁLISIS OBTENIDA CON LOS DATOS DISPONIBLES (SOLO SE MUESTRAN 50 DE LOS 100 ELEMENTOS)

ID	ACCA	ASPE	SINA	COSA	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DPNE	DVIA	DVNE	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	RUGO	SLOP	V50M	DESL
26	300.00	178.09	0.03	-1.00	80	-0.09	-1.76	1.67	264.01	180.62	50.00	2030.33	841.86	0.00	295.68	0.00	60	60	60	0.00	124	1.00	33.46	0	0
27	25.00	151.68	0.47	-0.88	80	1.01	-0.67	1.68	641.40	1160.83	439.00	2258.98	393.96	0.00	574.33	0.00	70	30	60	0.00	128	1.00	34.45	0	0
28	75.00	280.28	-0.98	0.18	80	-1.24	-0.57	-0.67	31.62	163.25	314.01	2245.05	83.82	0.00	75.00	0.00	70	30	100	1.00	141	1.00	34.55	0	0
29	100.00	234.49	-0.81	-0.58	80	-0.35	-1.59	1.24	431.86	85.00	65.00	1971.89	553.94	0.00	178.89	0.00	30	30	100	0.00	135	0.99	34.69	0	0
30	375.00	282.56	-0.98	0.22	60	-7.38	-0.88	-6.50	200.12	199.06	20.62	2176.46	188.22	0.00	237.17	0.00	70	30	80	0.00	140	0.99	34.87	0	0
31	75.00	172.45	0.13	-0.99	80	2.03	-1.11	3.13	197.80	123.49	115.43	2073.64	620.75	0.00	367.19	0.00	60	60	60	7.00	122	1.00	35.16	1	0
32	50.00	308.27	-0.79	0.62	80	2.56	-1.06	3.62	30.41	35.00	31.62	2001.54	140.89	0.00	35.36	0.00	70	50	60	51.00	134	0.99	35.41	12	0
33	25.00	203.89	-0.40	-0.91	60	-5.24	-1.32	-3.92	156.60	61.03	15.81	1877.89	25.00	0.00	156.60	0.00	50	50	60	0.00	140	0.98	36.68	0	0
34	425.00	234.24	-0.81	-0.58	60	2.32	-4.84	7.16	199.06	236.01	46.10	1916.61	185.27	0.00	582.00	0.00	50	50	100	0.00	132	0.99	38.05	0	0
35	25.00	308.43	-0.78	0.62	60	0.48	-4.57	5.05	57.01	101.24	25.00	2207.77	425.82	0.00	90.14	0.00	70	30	100	0.00	132	0.98	38.20	0	0
36	25.00	134.62	0.71	-0.70	80	-0.42	0.22	-0.64	32.02	39.05	82.01	2114.63	29.15	0.00	40.00	0.00	70	80	20	4.00	129	0.99	38.51	1	0
37	75.00	203.89	-0.40	-0.91	60	-1.04	-8.82	7.78	95.52	90.00	22.36	1900.51	10.00	0.00	20.00	0.00	70	80	80	11.00	121	0.99	39.03	2	0
38	25.00	184.30	-0.07	-1.00	60	5.04	0.04	5.00	53.85	60.42	142.13	2060.98	613.62	0.00	55.90	0.00	70	50	100	0.00	113	0.98	40.57	0	0
39	25.00	259.55	-0.98	-0.18	60	0.78	0.74	0.04	892.75	1061.14	262.39	2273.95	326.88	0.00	1107.81	0.00	70	80	100	0.00	137	1.00	40.61	0	0
40	0.00	174.56	0.09	-1.00	60	11.17	28.72	-17.54	75.00	71.59	0.00	2022.76	395.28	0.00	256.22	0.00	30	60	60	0.00	112	0.74	41.62	0	0
41	50.00	335.09	-0.42	0.91	80	1.32	-1.08	2.41	506.95	1565.84	1092.93	2325.16	218.40	0.00	685.51	0.00	60	60	100	0.00	118	1.00	41.63	0	0
42	100.00	222.19	-0.67	-0.74	80	-3.90	2.68	-6.58	145.34	155.32	288.14	2010.70	477.13	0.00	275.41	0.00	60	60	40	0.00	123	1.00	42.58	0	0
43	7725.00	354.18	-0.10	0.99	100	-0.14	13.94	-14.08	40.31	15.00	47.43	2018.93	485.72	0.00	5.00	0.00	60	60	20	0.00	109	0.96	43.29	0	0
44	250.00	296.42	-0.90	0.45	60	-4.87	5.78	-10.65	101.24	105.48	68.01	1981.70	35.36	0.00	116.73	0.00	50	10	100	0.00	131	1.00	43.48	0	0
45	25.00	89.15	0.93	0.36	80	2.21	-8.88	11.09	5.00	344.42	80.00	2004.10	300.83	0.00	7.07	0.00	50	50	80	0.00	132	0.98	44.12	0	0
46	25.00	285.67	0.96	0.27	60	-1.78	5.28	-7.05	303.73	285.39	60.21	1925.63	139.46	0.00	428.08	0.00	50	50	100	0.00	128	1.00	49.23	0	0
47	25.00	242.21	-0.88	-0.47	60	27.07	-23.69	50.76	732.27	1277.60	501.32	2318.41	599.60	0.00	704.56	0.00	70	30	60	0.00	124	0.96	49.99	0	0
48	175.00	299.57	-0.87	0.49	80	-1.80	-13.95	12.16	7.07	32.02	343.98	2152.81	180.07	0.00	18.03	0.00	70	30	100	62.00	120	0.99	53.11	14	0
49	75.00	4.84	0.08	1.00	80	-6.03	11.34	-17.36	191.05	183.85	40.31	2151.33	482.60	0.00	183.85	0.00	70	30	80	0.00	85	1.00	55.33	0	0
50	0.00	104.68	0.97	-0.25	60	7.63	-9.61	17.23	320.04	1682.00	300.37	2198.07	46.10	0.00	1394.10	0.00	60	60	60	0.00	121	1.00	57.31	0	0
51	150.00	43.80	0.69	0.72	10	1.10	-0.70	1.81	11.18	7.07	71.59	1968.11	272.26	922.00	14.14	200.00	50	30	20	206.00	144	1.00	20.16	44	1
52	25.00	181.38	-0.02	-1.00	10	0.51	2.14	-1.63	10.00	7.07	120.21	2069.83	65.19	0.00	11.18	0.00	50	50	20	317.00	139	1.00	20.35	71	1
53	150.00	21.61	0.37	0.93	10	0.18	0.98	-0.80	18.03	21.21	323.11	2103.68	344.38	0.00	21.21	0.00	70	80	20	251.00	141	1.00	20.71	64	1
54	125.00	355.11	-0.09	1.00	10	-1.75	7.64	-9.39	35.36	0.00	82.76	2015.13	267.68	0.00	65.00	0.00	70	50	20	158.00	139	0.92	20.81	31	1
55	25.00	191.81	-0.20	-0.98	10	2.08	0.14	1.95	36.40	47.43	106.30	2073.50	143.00	0.00	5.00	0.00	70	50	20	112.00	140	1.00	20.95	23	1
56	25.00	322.33	-0.61	0.79	80	0.43	-0.44	0.88	25.00	0.00	76.32	2107.89	204.02	0.00	15.00	0.00	100	80	20	25.00	142	1.00	21.20	7	1
57	3200.00	13.31	0.23	0.97	60	-3.61	-8.34	4.73	33.54	46.10	49.24	2020.55	148.41	0.00	85.00	0.00	50	30	100	81.00	140	0.95	21.28	16	1
58	75.00	314.82	-0.71	1.00	10	0.20	1.29	-1.10	18.03	18.03	203.96	2177.13	190.00	0.00	20.62	0.00	100	30	252.00	143	1.00	21.38	57	1	
59	0.00	333.32	-0.45	0.89	80	3.44	0.72	2.72	15.81	14.14	49.24	1951.55	305.37	0.00	42.43	0.00	70	50	100	86.00	141	1.00	21.56	21	1
60	175.00	130.89	0.76	-0.65	60	-1.06	0.45	-1.51	271.71	122.58	7.07	1848.24	107.94	0.00	272.86	0.00	50	50	100	0.00	143	1.00	22.28	0	1
61	75.00	127.13	0.80	-0.60	10	0.53	0.21	0.32	5.00	5.00	33.54	2027.76	284.69	1715.00	85.00	342.00	70	80	100	154.00	144	1.00	22.91	30	1
62	0.00	112.84	0.92	-0.39	10	4.90	-1.88	6.78	0.00	0.00	42.43	2064.60	69.46	0.00	5.00	0.00	70	80	20	267.00	146	1.00	23.19	67	1
63	250.00	329.47	-0.51	0.86	10	-2.11	0.84	-2.95	10.00	7.07	165.08	2137.14	65.00	730.00	20.62	164.00	80	30	60	275.00	140	1.00	23.44	62	1
64	150.00	266.96	-1.00	-0.05	10	-3.13	5.87	-9.00	22.36	7.07	80.00	2071.28	74.33	0.00	182.48	0.00	70	50	20	353.00	146	0.99	23.89	78	1
65	275.00	337.70	-0.38	0.93	10	-4.24	8.85	-13.09	49.50	83.82	70.71	2062.00	163.78	0.00	226.38	0.00	70	50	100	0.00	138	0.99	24.26	0	1
66	350.00	122.15	0.85	-0.53	80	-5.82	11.51	-17.33	7.07	0.00	316.23	2062.16	80.62	0.00	5.00	0.00	70	80	60	177.00	144	0.99	24.31	41	1
67	275.00	240.58	-0.87	-0.49	80	-2.04	-1.61	-0.43	81.39	74.33	97.08	1921.42	354.68	0.00	83.82	0.00	50	50	80	6.00	144	1.00	24.52	1	1
68	0.00	113.65	0.92	-0.40	10	0.97	2.75	-1.79	20.00	15.00	389.65	2071.25	116.62	0.00	18.03	0.00	70	80	20	148.00	145	0.99	24.58	34	1
69	175.00	105.52	0.96	-0.27	10	-1.97	5.96	-7.93	7.07	11.18	362.22	2097.54	407.06	0.00	38.08	0.00	70	80	20	262.00	145	0.98	25.12	68	1
70	200.00	53.15	0.80	0.60	60	-5.36	13.01	-18.36	50.00	49.50	125.00	2034.35	138.65	0.00	15.00	0.00	50	50	20	0.00	142	0.97	25.30	0	1
71	0.00	193.75	-0.24	-0.97	10	2.39	-4.70	7.08	20.00	22.36	315.16	2123.80	303.03	0.00	50.00	0.00	100	50	20	225.00	136	0.98	25.35	56	1
72	0.00	283.39	-0.97	0.23	80	0.59	-8.79	9.38	36.06	20.62	164.01	2080.68	185.00	0.00	20.62	0.00	100	80	20	25.00	145	0.99	25.45	6	1
73	100.00	80.90	0.99	0.16	10	-2.41	11.51	-13.92	5.00	0.00	215.06	2087.90	66.71	0.00	5.00	0.00	70	50	20	280.00	145	0.99	25.58	62	1
74	17825.00	38.25	0.62	0.79	10	-4.37	-0.62	-3.75	22.36	0.00	0.00	2048.53	5.00	0.00	81.39	0.00	50	80	20	246.00	139	0.99	25.68	49	1
75	3175.00	156.73	0.40	-0.92	80	-4.77	0.08	-4.85	78.10	92.20	121.04	1956.33	170.00	0.00	67.08										

TABLA 38. MATRIZ DE CORRELACIONES ENTRE LOS FACTORES DE PROPENSIVIDAD A LA INESTABILIDAD DE LADERAS

	ACCA	SINA	COSA	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DPNE	DVIA	DVNE	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	RUGO	SLOP	V50M
ACCA	1.00	0.00	0.03	0.04	-0.01	0.02	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	-0.08	-0.03	-0.02	-0.03	-0.02	0.00	-0.02	-0.02	-0.03	0.04	0.00	-0.07	-0.03
SINA	0.00	1.00	-0.01	-0.10	0.01	-0.03	0.02	-0.07	-0.07	-0.10	-0.07	0.10	0.01	0.01	0.01	0.06	-0.02	0.00	0.06	-0.03	0.00	0.04	0.06
COSA	0.03	-0.01	1.00	-0.07	0.00	0.00	0.00	-0.06	-0.06	-0.01	0.03	-0.01	0.03	-0.11	0.03	0.04	-0.06	-0.06	0.01	0.06	-0.04	-0.05	0.02
COBE	0.04	-0.10	-0.07	1.00	0.01	0.02	-0.01	0.26	0.28	-0.01	0.07	0.08	-0.30	0.28	-0.32	-0.23	-0.12	0.44	-0.63	-0.19	-0.06	0.22	-0.66
CRPL	-0.01	0.01	0.00	0.01	1.00	-0.50	0.82	0.00	0.01	0.01	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.06	-0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00
CRPR	0.02	-0.03	0.00	0.02	-0.50	1.00	-0.90	0.02	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.05	-0.01	-0.05	-0.02	0.00	0.01	-0.03	0.02	-0.16	-0.03	-0.03
CURV	-0.02	0.02	0.00	-0.01	0.82	-0.90	1.00	-0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.03	-0.02	-0.01	0.00	0.02	-0.01	0.12	0.03	0.02
DACU	-0.02	-0.07	-0.06	0.26	0.00	0.02	-0.01	1.00	0.84	0.66	0.58	0.08	-0.13	0.65	-0.14	-0.02	0.12	0.22	-0.26	-0.04	0.01	0.08	-0.27
DALC	-0.03	-0.07	-0.06	0.28	0.01	0.00	0.01	0.84	1.00	0.72	0.60	0.07	-0.14	0.77	-0.15	-0.01	0.08	0.23	-0.28	-0.06	0.01	0.09	-0.29
DDRE	-0.04	-0.10	-0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.66	0.72	1.00	0.61	-0.02	-0.01	0.36	-0.01	0.15	0.17	-0.08	0.02	0.04	0.11	-0.07	0.03
DEM	-0.08	-0.07	0.03	0.07	0.01	-0.01	0.02	0.58	0.60	0.61	1.00	0.19	-0.06	0.37	-0.05	0.17	0.02	-0.01	-0.09	0.09	0.07	-0.11	-0.07
DFAL	-0.03	0.10	-0.01	0.08	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.07	-0.02	0.19	1.00	-0.03	0.23	-0.02	0.03	-0.03	0.17	-0.10	-0.03	0.01	0.04	-0.08
DPNE	-0.02	0.01	0.03	-0.30	0.00	-0.05	0.03	-0.13	-0.14	-0.01	-0.06	-0.03	1.00	-0.14	0.99	0.06	0.06	-0.19	0.40	0.12	0.07	-0.13	0.41
DVIA	-0.03	0.01	-0.11	0.28	0.00	-0.01	0.01	0.65	0.77	0.36	0.37	0.23	-0.14	1.00	-0.15	-0.04	0.07	0.34	-0.29	-0.09	-0.01	0.13	-0.30
DVNE	-0.02	0.01	0.03	-0.32	0.00	-0.05	0.03	-0.14	-0.15	-0.01	-0.05	-0.02	0.99	-0.15	1.00	0.07	0.06	-0.21	0.40	0.13	0.08	-0.14	0.43
FMSU	0.00	0.06	0.04	-0.23	-0.06	-0.02	-0.02	-0.02	-0.01	0.15	0.17	0.03	0.06	-0.04	0.07	1.00	0.20	-0.27	0.22	0.14	0.14	-0.16	0.24
GEOL	-0.02	-0.02	-0.06	-0.12	-0.02	0.00	-0.01	0.12	0.08	0.17	0.02	-0.03	0.06	0.07	0.06	0.20	1.00	-0.11	0.17	0.08	0.13	-0.12	0.17
GEOM	-0.02	0.00	-0.06	0.44	0.01	0.01	0.00	0.22	0.23	-0.08	-0.01	0.17	-0.19	0.34	-0.21	-0.27	-0.11	1.00	-0.48	-0.16	-0.09	0.27	-0.51
H50M	-0.03	0.06	0.01	-0.63	0.00	-0.03	0.02	-0.26	-0.28	0.02	-0.09	-0.10	0.40	-0.29	0.40	0.22	0.17	-0.48	1.00	0.19	0.11	-0.23	0.99
INSO	0.04	-0.03	0.06	-0.19	0.01	0.02	-0.01	-0.04	-0.06	0.04	0.09	-0.03	0.12	-0.09	0.13	0.14	0.08	-0.16	0.19	1.00	0.23	-0.84	0.20
RUGO	0.00	0.00	-0.04	-0.06	0.04	-0.16	0.12	0.01	0.01	0.11	0.07	0.01	0.07	-0.01	0.08	0.14	0.13	-0.09	0.11	0.23	1.00	-0.24	0.12
SLOP	-0.07	0.04	-0.05	0.22	0.01	-0.03	0.03	0.08	0.09	-0.07	-0.11	0.04	-0.13	0.13	-0.14	-0.16	-0.12	0.27	-0.23	-0.84	-0.24	1.00	-0.25
V50M	-0.03	0.06	0.02	-0.66	0.00	-0.03	0.02	-0.27	-0.29	0.03	-0.07	-0.08	0.41	-0.30	0.43	0.24	0.17	-0.51	0.99	0.20	0.12	-0.25	1.00

Como puede observarse, existen algunos factores que presentan correlaciones altas (en negrita). En este caso deben analizarse por pares para evaluar la conveniencia de descartar o conservar esos factores.

El test de igualdad de media entre grupos permite medir el potencial de cada variable independiente. Puede notarse que algunas variables no son relevantes en el modelo (valores F de Fisher bajos, Lambda de Wilks altos y significancia estadística alta).

TABLA 40. TEST DE IGUALDAD DE MEDIA ENTRE GRUPOS

	Wilks' Lambda	F	Sig.
COBE	0.867	164.026	0.000
DACU	0.890	132.004	0.000
DALC	0.927	84.330	0.000
DDRE	0.933	76.776	0.000
DEM	0.939	69.815	0.000
DFAL	0.946	61.224	0.000
DVIA	0.948	58.490	0.000
H50M	0.961	43.407	0.000
INSO	0.962	41.959	0.000
RUGO	0.963	40.833	0.000
SLOP	0.987	14.338	0.000
V50M	0.987	14.063	0.000
SINA	0.993	7.284	0.007
GEOM	0.995	5.245	0.022
FMSU	0.999	1.269	0.260
CRPR	0.999	0.983	0.322
CRPL	1.000	0.303	0.582
DPNE	1.000	0.266	0.606
GEOL	1.000	0.261	0.610
ACCA	1.000	0.230	0.631
CURV	1.000	0.141	0.708
COSA	1.000	0.022	0.881
DVNE	1.000	0.019	0.890
DPBR	1.000	0.000	0.985

El análisis de varianza permite descartar las variables FMSU CRPR CRPL DPNE GEOL ACCA CURV COSA DVNE DPBR por su bajo poder discriminante.

El test Box's M (Tabla 41) es utilizado para probar la homogeneidad de las matrices de covarianza, chequea el supuesto de igualdad de covarianzas entre grupos.

TABLA 41. TEST BOX M

Box's M		3765,654
F	Approx.	21,640
	Sig.	,000

El Lambda de Wilks (Tabla 43) es una medida de la manera como la función separa los casos en grupos. Pequeños valores de Lambda indican gran poder discriminante de la función. E Chi-cuadrado asociado chequea la hipótesis de que las medias de las funciones son iguales entre grupos. Valores de significancia estadística pequeños indican que la función tiene resultados mejores al azar en la separación entre grupos.

TABLA 43. LAMBDA DE WILKS PARA EL MODELO GENERAL

Wilks' Lambda	Chi-square	Sig.
,739	320,263	,000

El modelo lineal obtenido con la función discriminante se ensambla con los coeficientes canónicos mostrados en la Tabla 45.

TABLA 45. COEFICIENTES PARA ENSAMBLAR LA FUNCIÓN DISCRIMINANTE

Canonical Discriminant Function Coefficients	
GEOM	0.00564
INSO	0.01356
RUGO	-6.18953
SLOP	0.03399
V50M	-0.00566
DEM	0.00125
DACU	-0.00031
DALC	-0.00024
SINA	0.09161
COBE	-0.00885
DDRE	-0.00079
DVIA	-0.00168
H50M	0.00297
DFAL	-0.00046
(Constant)	1.52521

La Tabla 47 muestra los resultados de clasificación del modelo obtenido. Un 67.5% de celdas estables fueron correctamente clasificados; un 73.5% de deslizamientos fueron correctamente clasificados como inestables.

TABLA 47. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DEL MODELO

Resultados de Clasificación				
		0	1	Total
%	0	67.5	32.5	100
	1	26.5	73.5	100

Con los coeficientes de la Tabla 45 es posible ensamblar una ecuación lineal para obtener la susceptibilidad del terreno, y mediante un SIG, expresarla en términos cartográficos (Figura 33). En la Figura 34 se presenta la susceptibilidad organizada en 5 categorías.

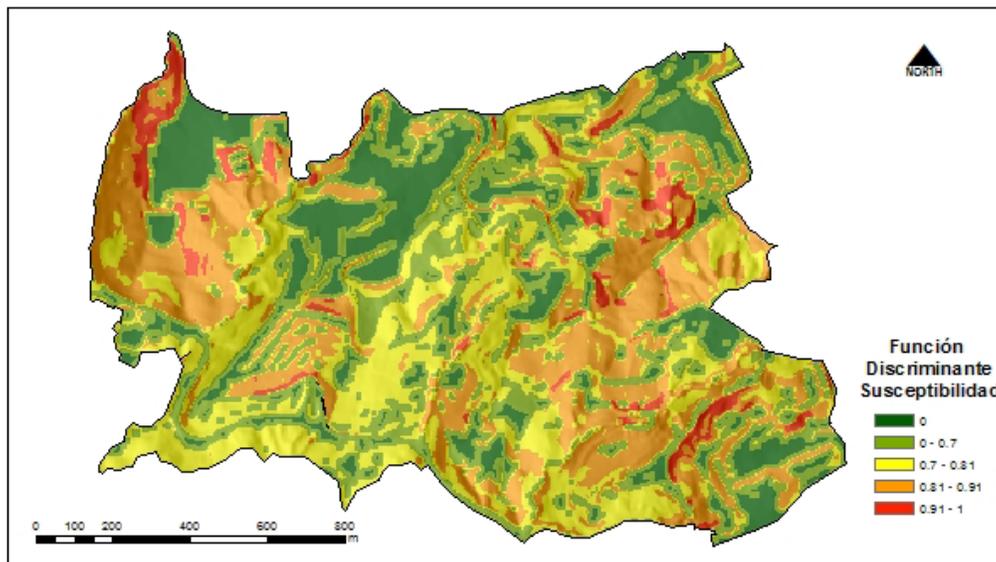


FIGURA 33. MAPA RESULTADO DE LA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DISCRIMINANTE

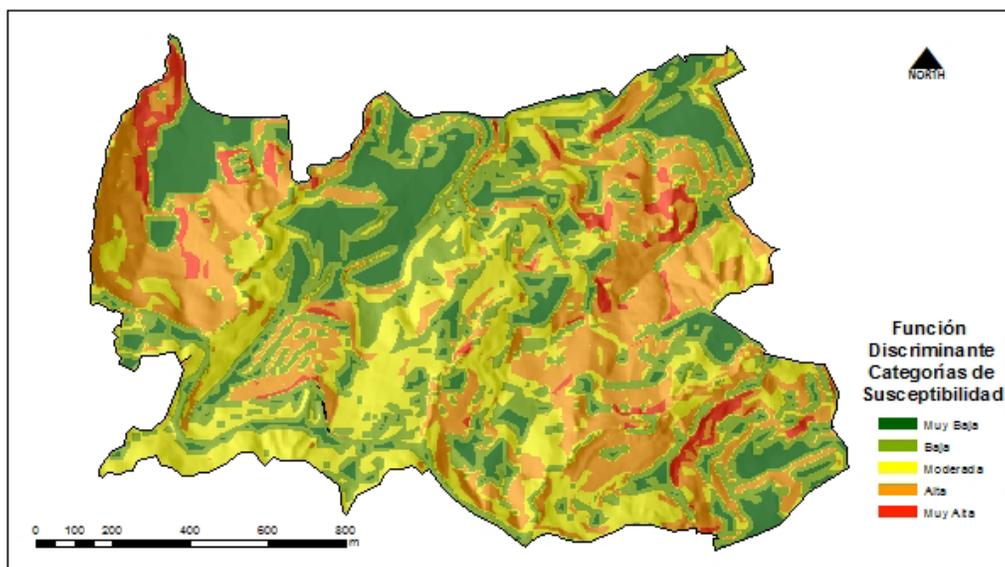


FIGURA 34. MAPA FINAL DE SUSCEPTIBILIDAD EXPRESADA EN CATEGORÍAS

3.2 MÉTODO 6. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

Para modelar la susceptibilidad a deslizamientos por este método se han utilizado los factores de propensividad enumerados en la Tabla 49 y presentados desde la Figura 35 hasta la Figura 56.

TABLA 49. FACTORES DE PROPENSIVIDAD PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE REDES NEURONALES

Modelo digital de elevaciones (DEM)
Pendientes (SLOP)
Insolación (INSO)
Orientación de las laderas (ASPE)
Rugosidad (RUGO)
Curvatura perpendicular a la pendiente (CRPL)
Curvatura paralela a la pendiente (CRPR)
Curvatura en dos dimensiones del terreno (CURV)
Áreas aferentes (ACCA)
Longitudes de flujo (LCCA)
Coberturas (COBE)
Formaciones superficiales (FMSU)
Geología (GEOL)
Geomorfología (GEOM)
Distancia a red de acueductos (DACU)
Distancia a red de alcantarillado (DALC)
Distancia a drenajes y cauces (DDRE)
Distancia a fallas geológicas y lineamientos (DFAL)
Distancia a la red vial (DVIA)
Densidad neta de viviendas (viv/ha) (DVNE)
Densidad poblacional (habitantes en 50 metros) (H50M)
Densidad de viviendas (viviendas en 50 metros) (V50M)

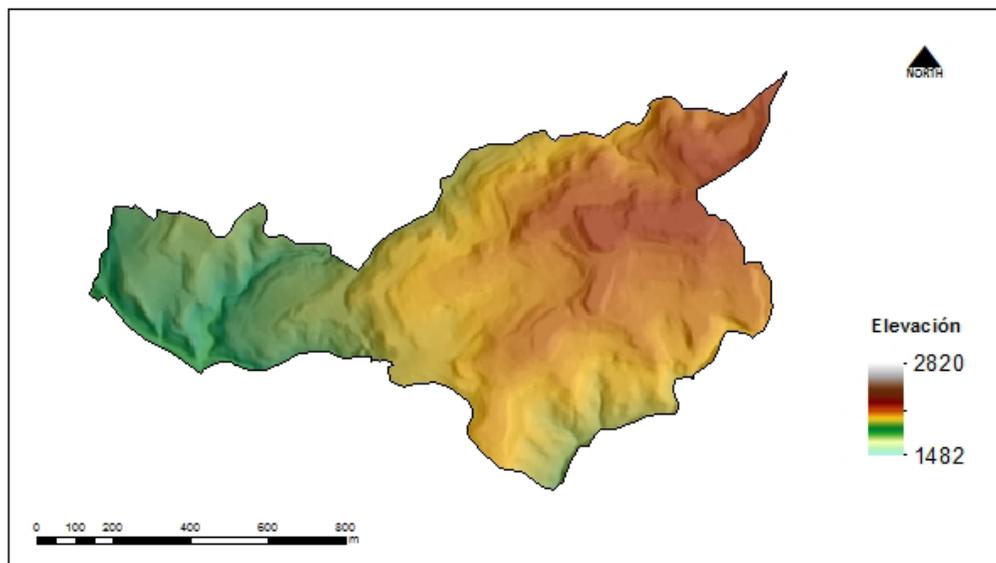


FIGURA 35. MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

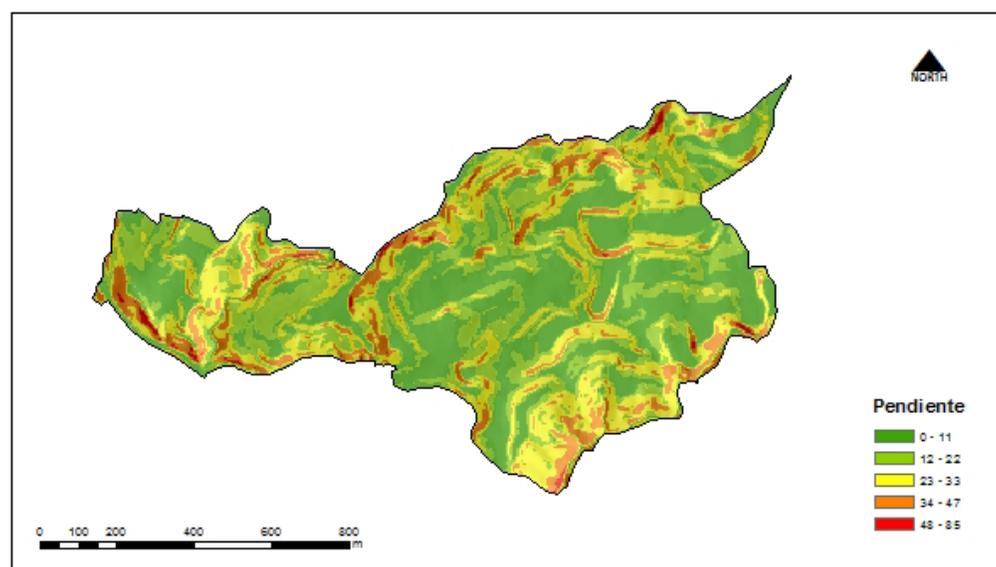


FIGURA 36. MAPA DE PENDIENTE PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

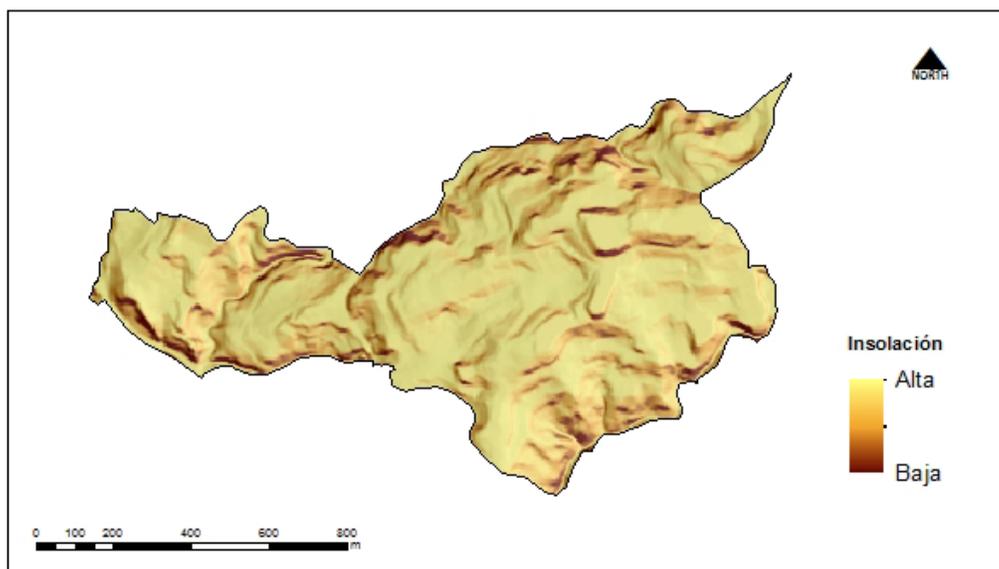


FIGURA 37. MAPA DE INSOLACIÓN CALCULADO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

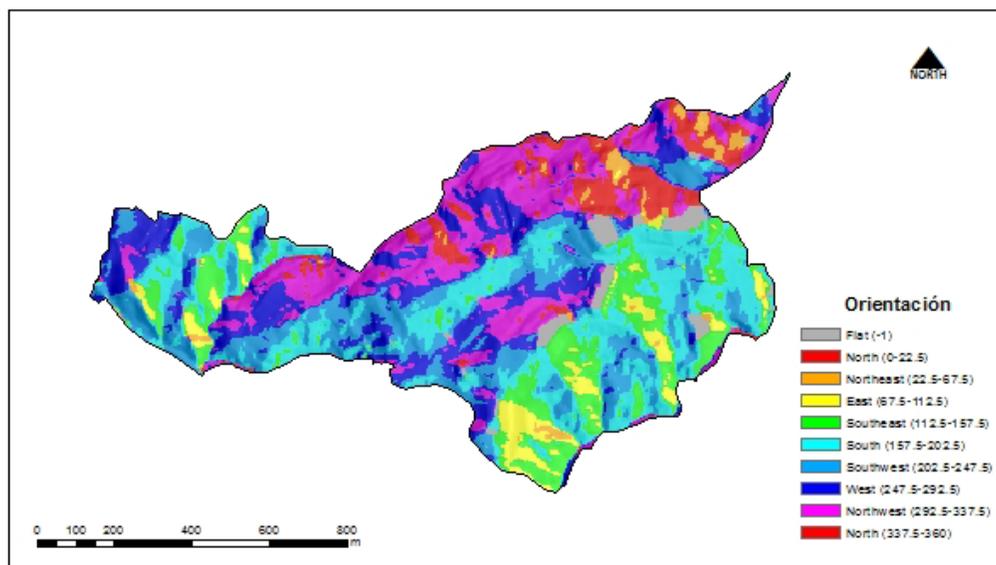


FIGURA 38. MAPA DE ORIENTACIÓN DE LADERAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

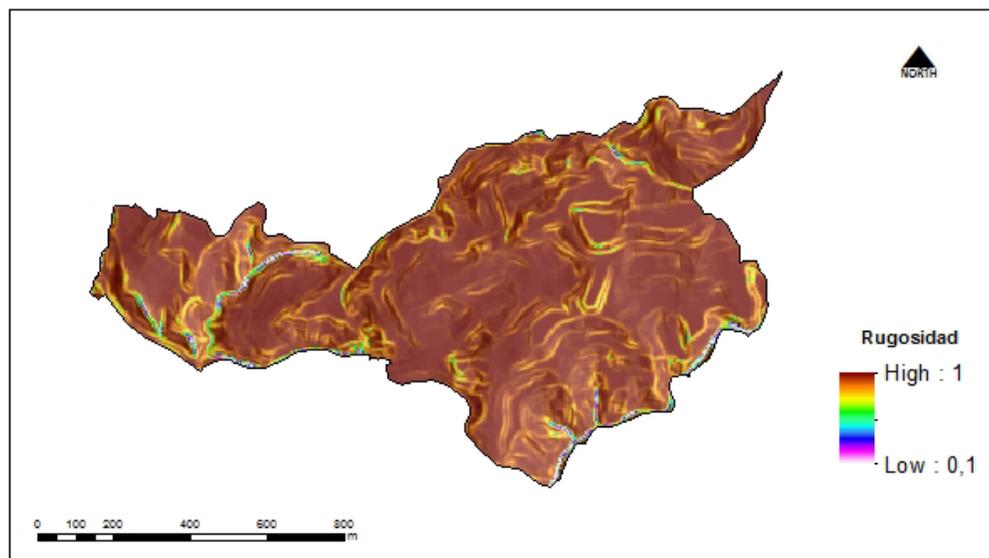


FIGURA 39. MAPA DE RUGOSIDAD PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

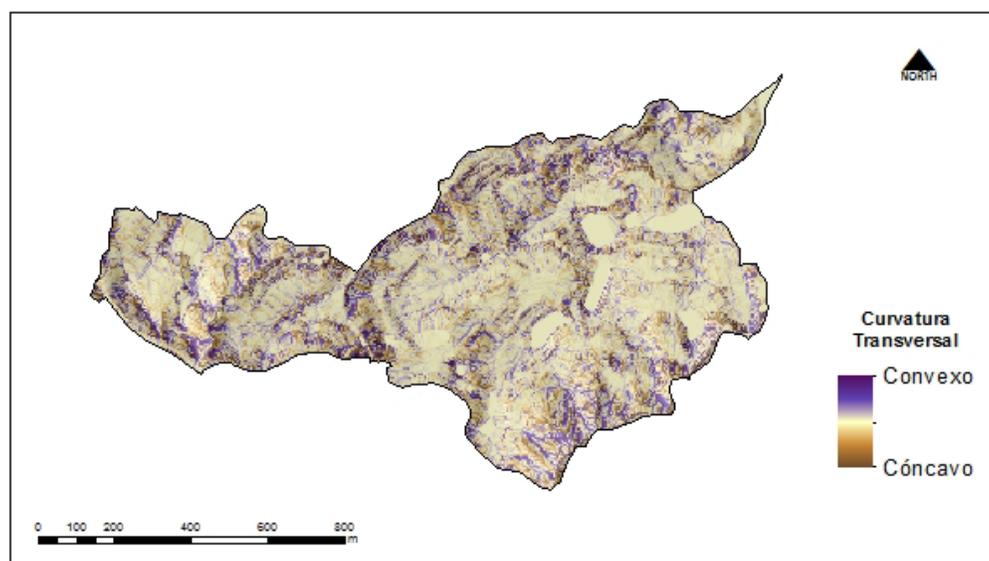


FIGURA 40. MAPA DE CURVATURA EN EL SENTIDO PERPENDICULAR A LA PENDIENTE PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

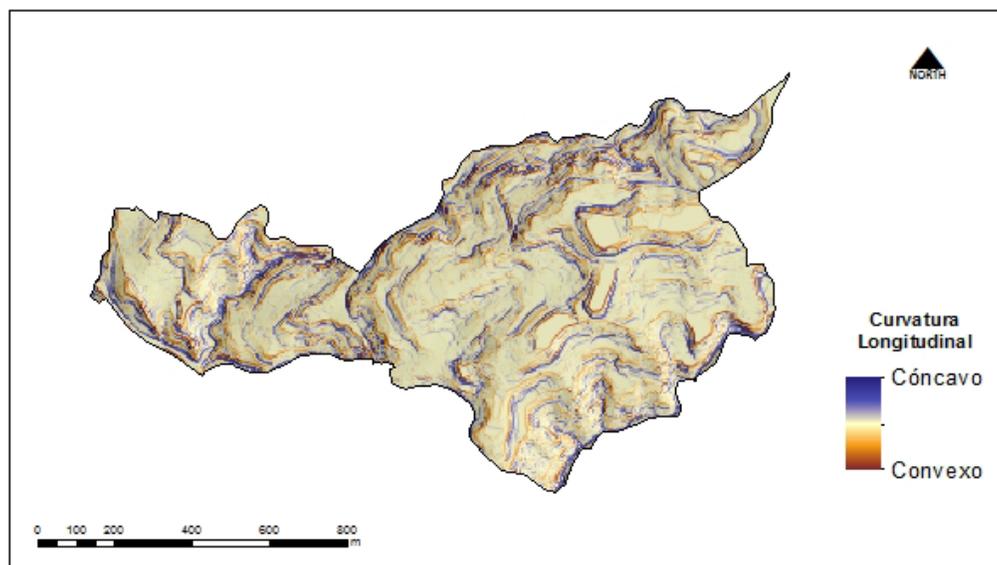


FIGURA 41. MAPA DE CURVATURA EN EL SENTIDO PARALELO A LA PENDIENTE PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

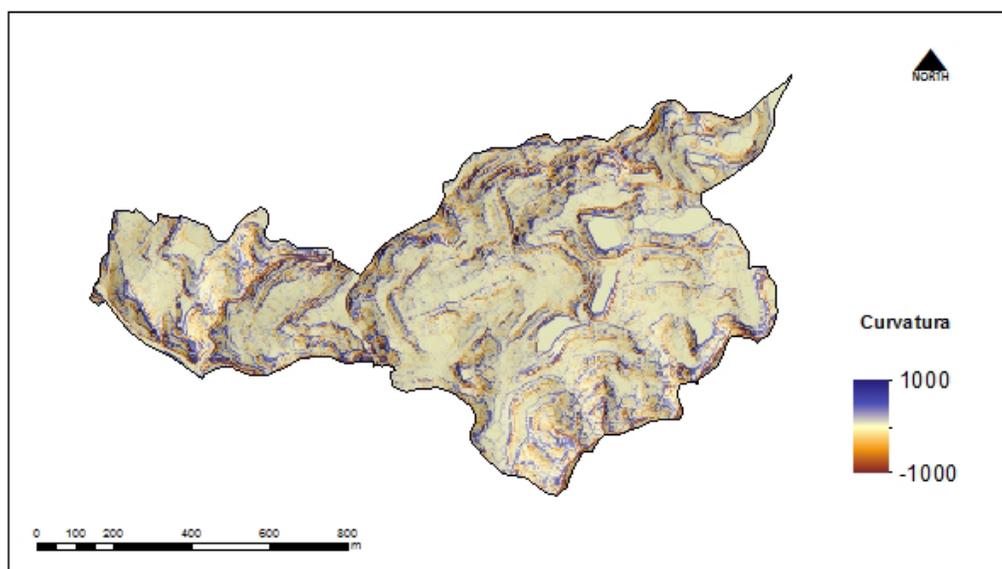


FIGURA 42. MAPA DE CURVATURA (EN DOS DIMENSIONES) PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

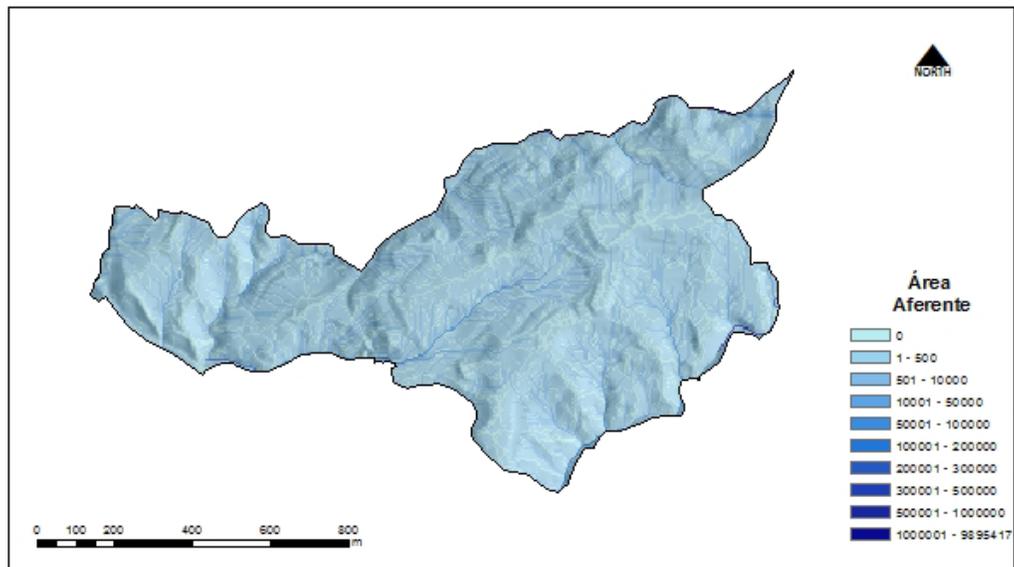


FIGURA 43. MAPA DE ÁREAS AFERENTES POR PÍXEL (ÁREA ACUMULADA)

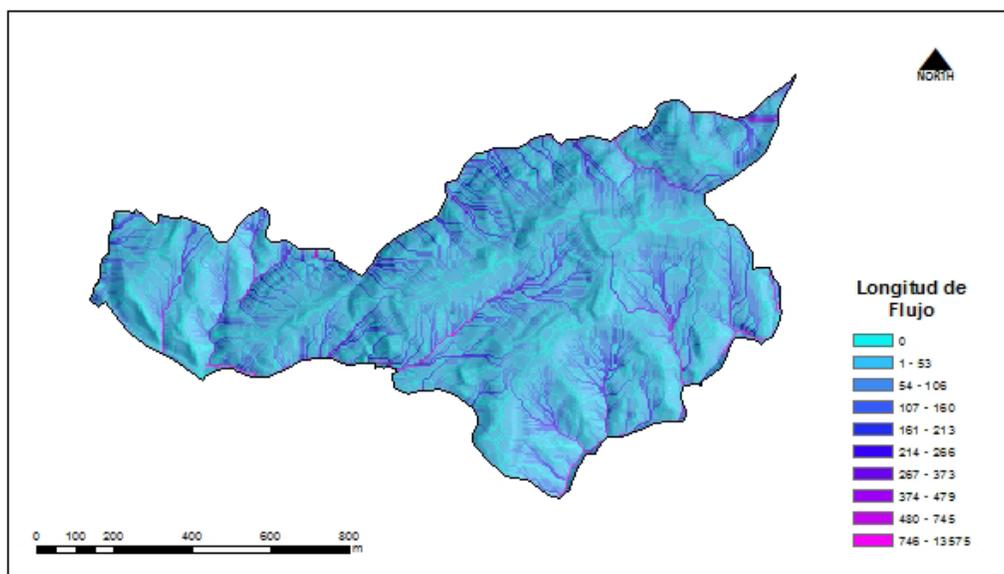


FIGURA 44. MAPA DE LONGITUDES DE FLUJO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

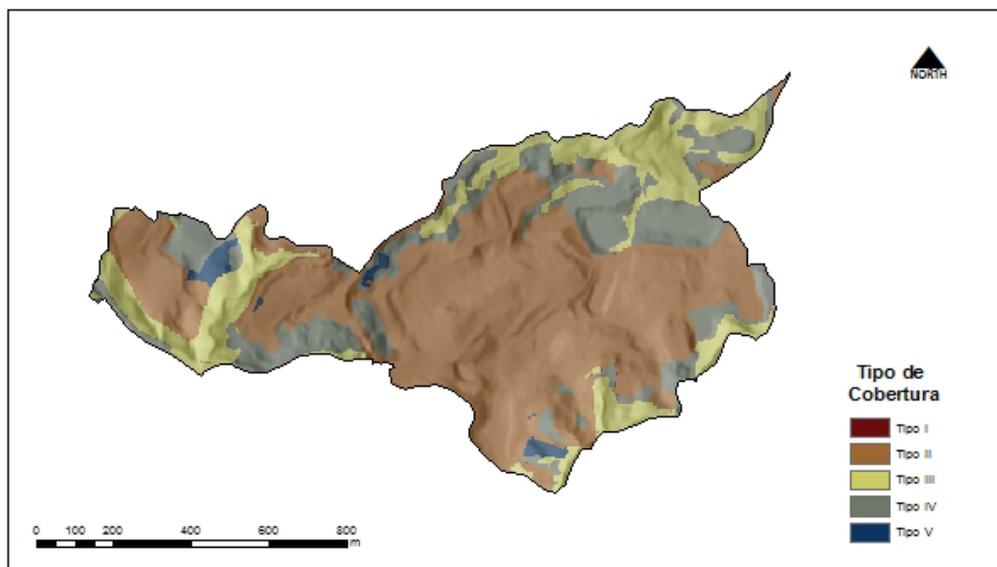


FIGURA 45. MAPA DE COBERTURAS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

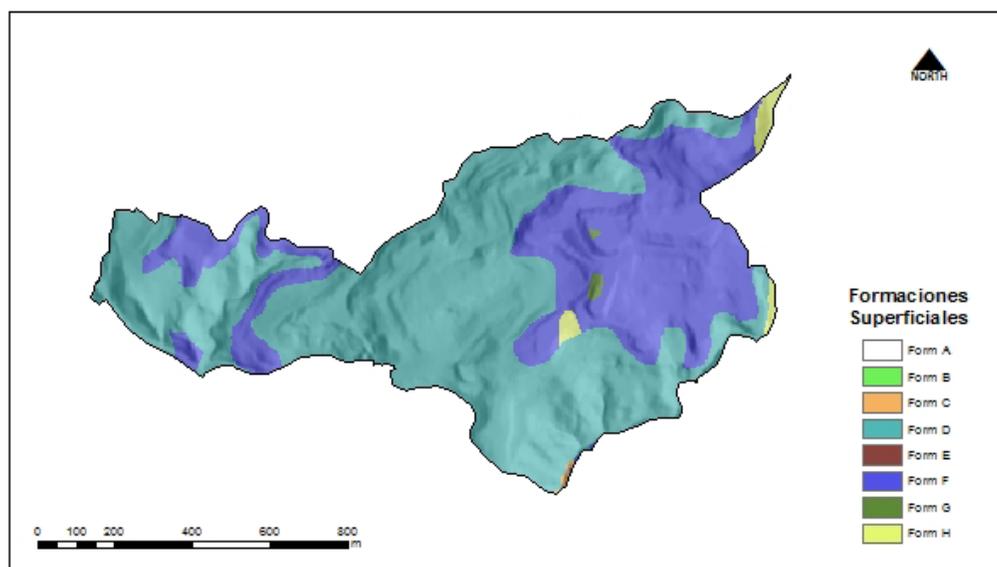


FIGURA 46. MAPA DE FORMACIONES SUPERFICIALES PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

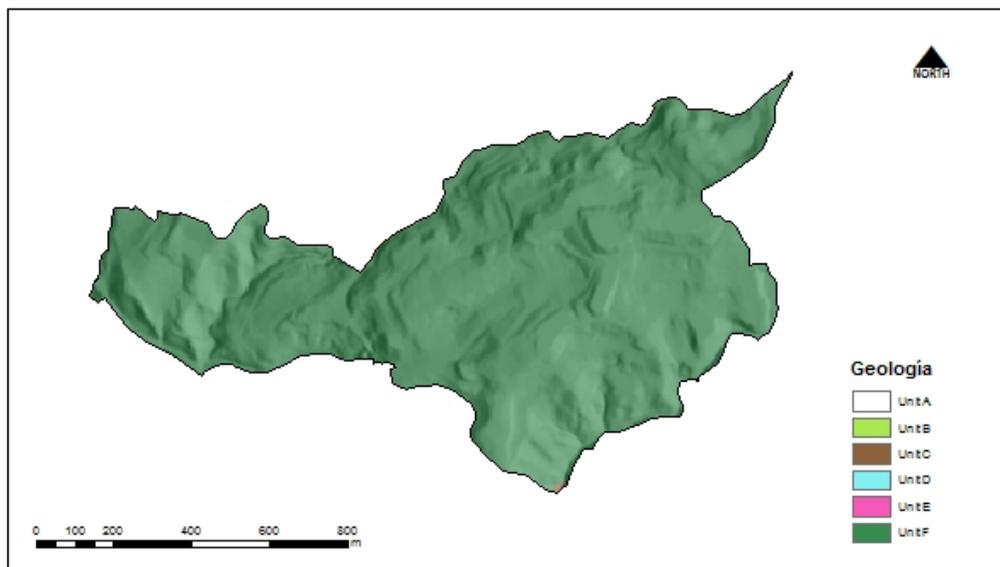


FIGURA 47. MAPA DE GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

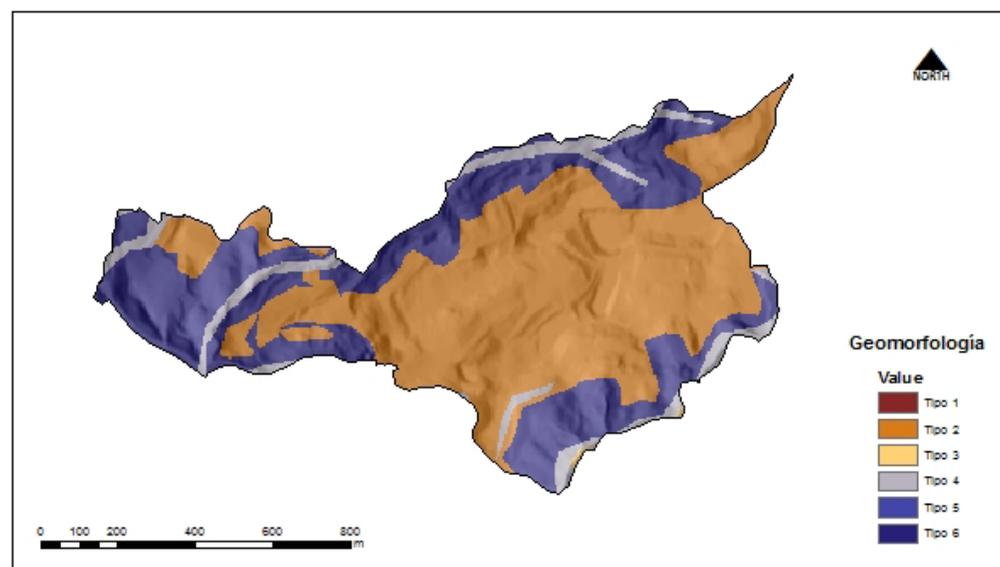


FIGURA 48. MAPA DE GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

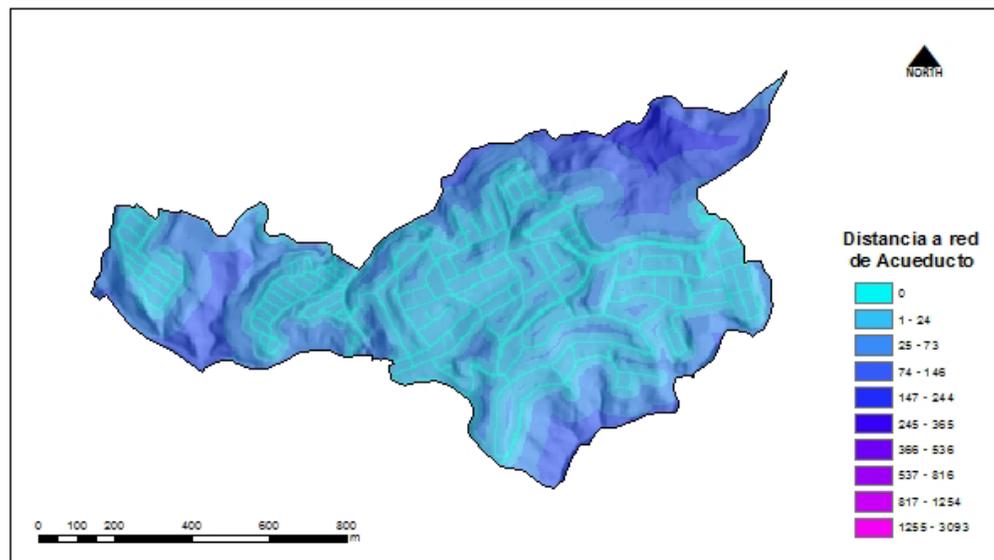


FIGURA 49. MAPA DE DISTANCIA A LA RED DE ACUEDUCTO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

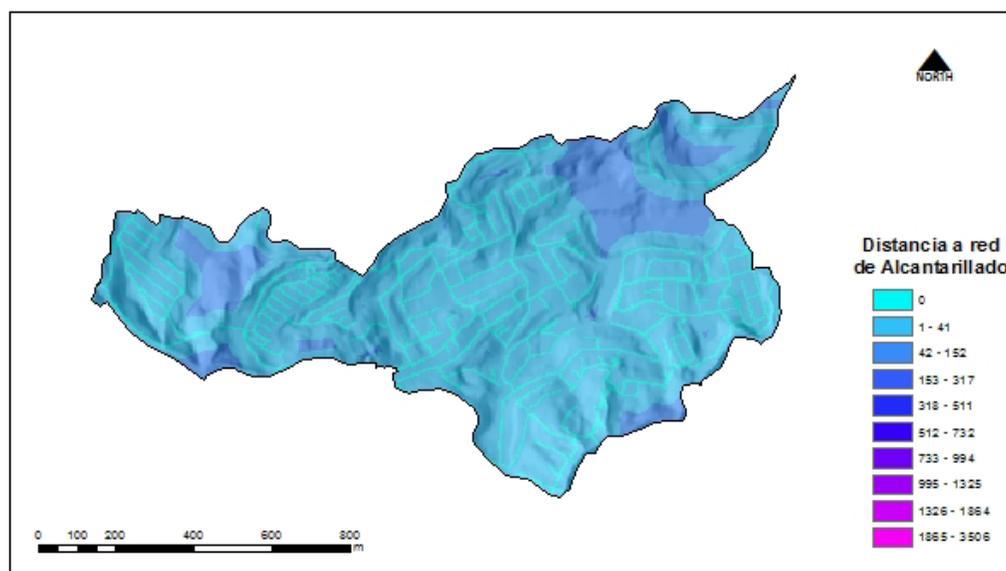


FIGURA 50. MAPA DE DISTANCIA A LA RED DE ALCANTARILLADO PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

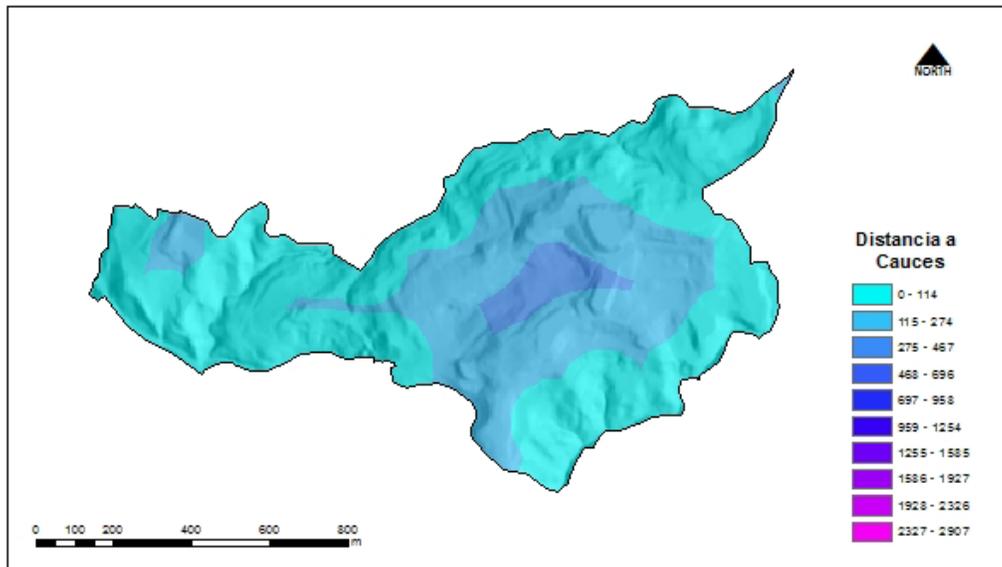


FIGURA 51. MAPA DE DISTANCIA A DRENAJES Y CAUCES PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

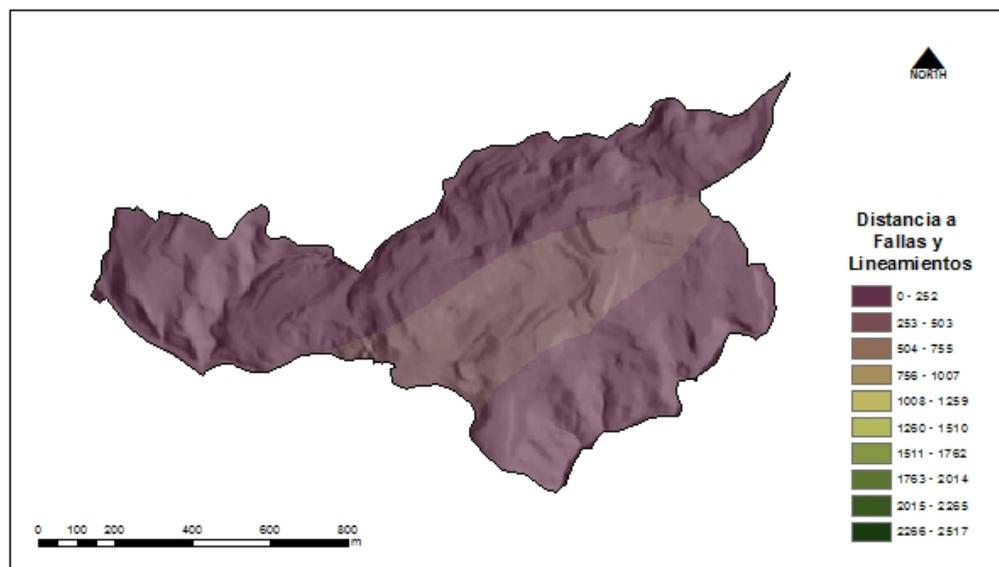


FIGURA 52. MAPA DE DISTANCIA A FALLAS GEOLÓGICAS Y LINEAMIENTOS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

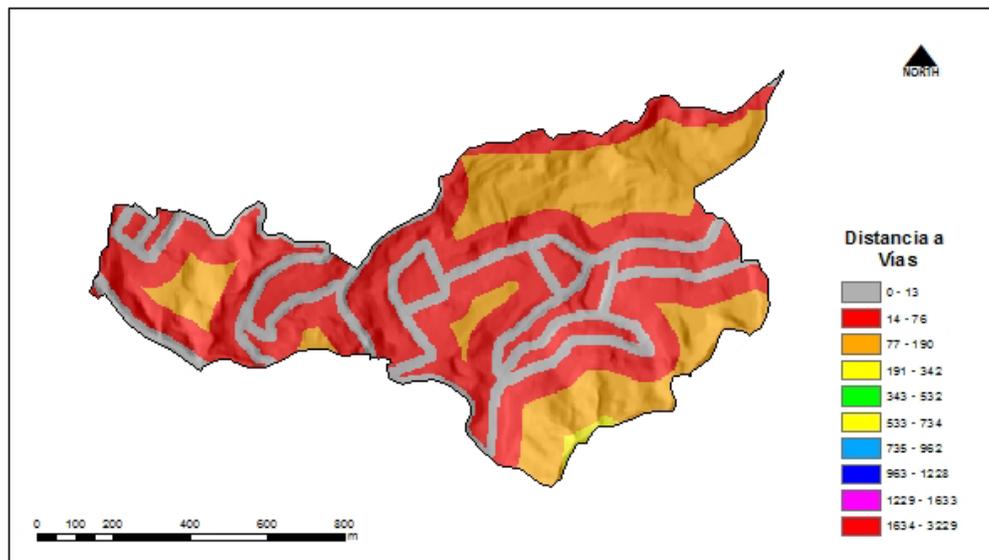


FIGURA 53. MAPA DE DISTANCIAS A LA RED VIAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

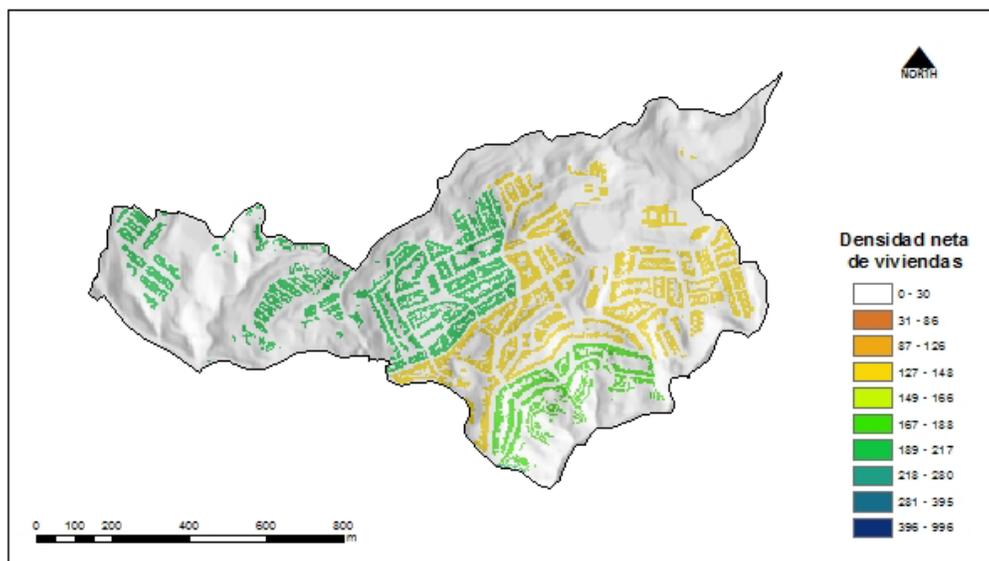


FIGURA 54. MAPA DE DENSIDAD NETA DE VIVIENDAS (VIVIENDAS POR HECTÁREA) PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

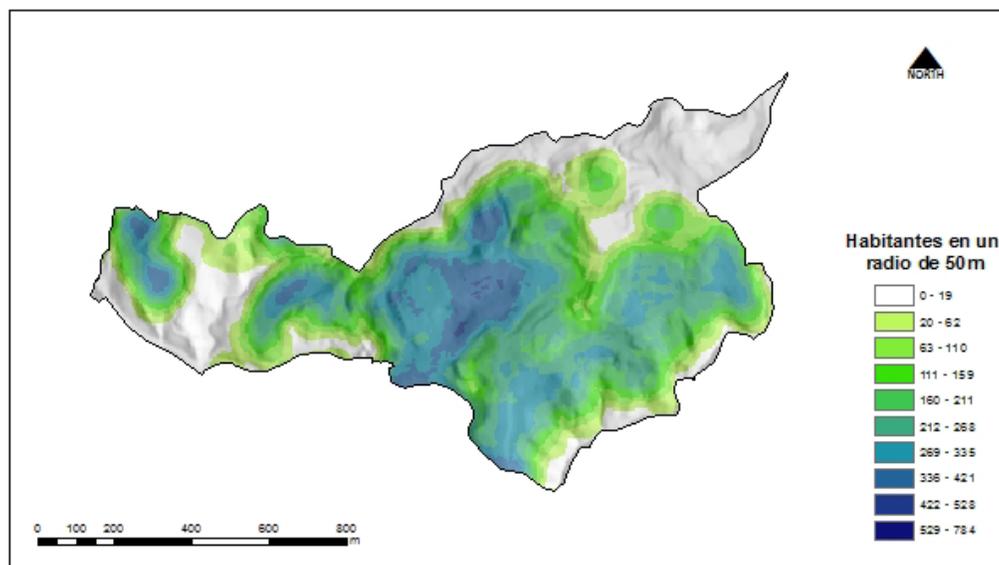


FIGURA 55. DENSIDAD POBLACIONAL, EXPRESADA EN HABITANTES EN UN RADIO DE 50 METROS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

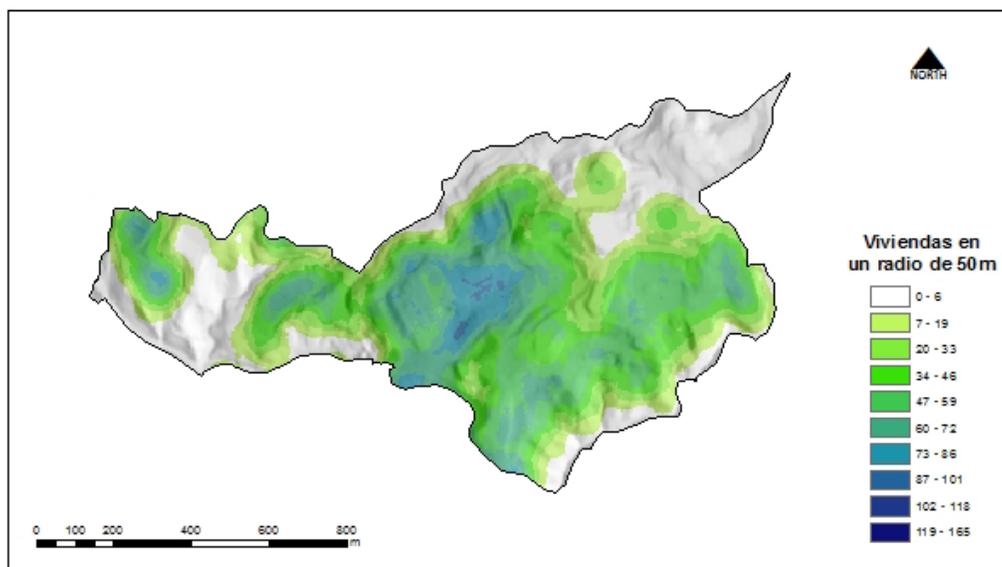


FIGURA 56. MAPA DE DENSIDAD DE VIVIENDAS, EXPRESADA EN VIVIENDAS EN UN RADIO DE 50 METROS PARA EL ÁREA DE ESTUDIO

Se dispone también de un inventario con 71 eventos previos registrados dentro del área de estudio (Figura 57)

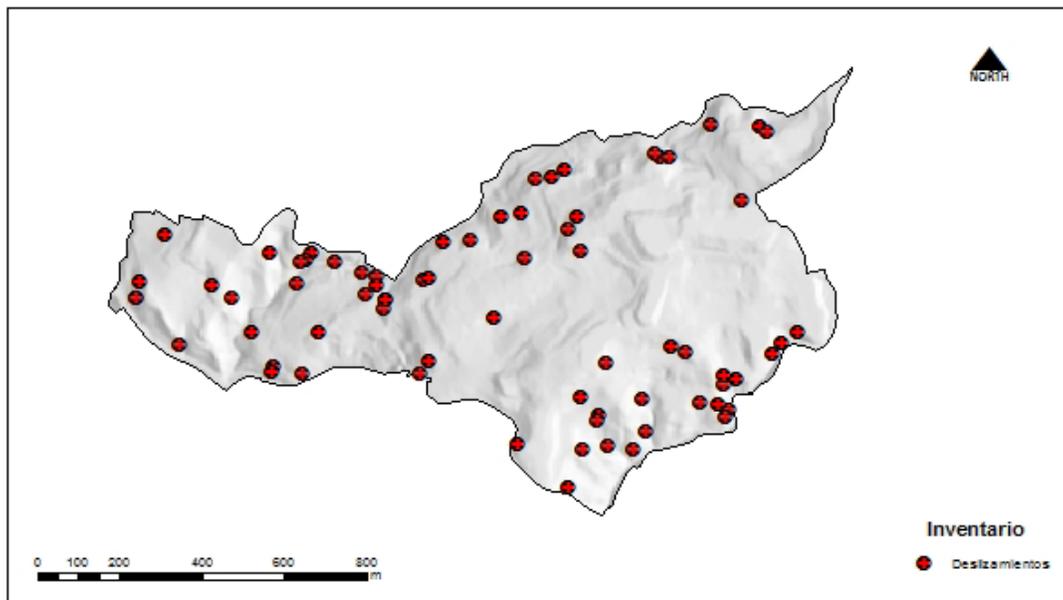


FIGURA 57. INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS

Se ha ensamblado una muestra de análisis con los 71 puntos con deslizamientos previos (zona inestable), adicionando 71 puntos más, ubicados aleatoriamente en el área restante (zona estable), para conformar la muestra de análisis de 142 puntos, con la cual se efectuará todo el proceso de entrenamiento, validación y test de un modelo de redes neuronales.

Para iniciar el proceso de modelización se ha optado por normalizar todas las variables para que queden en el rango 0-1. En la Tabla 51 aparece una vista parcial de la muestra de datos obtenida.

TABLA 51. MUESTRA DE DATOS NORMALIZADA

ID	ACCA	ASPE	SINA	COSA	COBE	CRPL	CRPR	CURV	DACU	DALC	DDRE	DEM	DFAL	DVIA	DVNE	FMSU	GEOL	GEOM	H50M	INSO	LCCA	RUGO	SLOP	V50M	DESL
41	0.00	0.32	0.95	0.29	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.10	0.52	0.04	0.01	0.13	1.00	0.38	0.20	0.09	0.98	0.00	1.00	0.20	0.10	0
42	0.00	0.21	0.98	0.63	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.18	0.01	0.30	0.08	0.22	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.20	0.00	0
43	0.00	0.75	0.00	0.50	0.60	0.88	0.34	0.78	0.14	0.43	0.37	0.61	0.06	0.22	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.99	0.03	0.94	0.20	0.00	0
44	0.00	0.73	0.01	0.42	0.60	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.10	0.53	0.20	0.01	0.00	0.70	1.00	1.00	0.03	0.99	0.00	1.00	0.20	0.04	0
45	0.00	0.82	0.04	0.70	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0.07	0.02	0.56	0.02	0.01	0.00	0.60	0.75	0.20	0.00	0.98	0.00	1.00	0.20	0.00	0
46	0.00	0.50	0.51	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.07	0.46	0.06	0.00	0.00	0.70	1.00	0.20	0.19	0.95	0.00	0.99	0.20	0.24	0
47	0.00	0.81	0.04	0.70	0.80	0.88	0.34	0.78	0.06	0.07	0.10	0.51	0.01	0.06	0.00	0.70	0.75	0.40	0.00	0.98	0.01	1.00	0.20	0.00	0
48	0.00	0.67	0.06	0.27	0.80	0.88	0.34	0.78	0.20	0.21	0.03	0.57	0.15	0.24	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.98	0.00	1.00	0.21	0.00	0
49	0.00	0.12	0.83	0.88	0.10	0.88	0.35	0.78	0.00	0.00	0.06	0.46	0.39	0.00	0.00	1.00	0.63	0.20	0.15	0.97	0.00	0.98	0.21	0.22	0
50	0.00	0.04	0.61	0.99	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.17	0.04	0.58	0.01	0.00	0.00	0.70	0.38	0.80	0.00	0.95	0.00	1.00	0.22	0.00	0
51	0.00	0.92	0.24	0.93	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.14	0.48	0.13	0.02	0.25	0.70	0.38	0.20	0.60	0.95	0.01	1.00	0.22	0.64	0
52	0.00	0.85	0.09	0.79	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.10	0.47	0.10	0.03	0.16	0.30	0.38	0.20	0.35	0.97	0.00	1.00	0.22	0.37	0
53	0.00	0.67	0.06	0.27	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.02	0.43	0.18	0.01	0.25	0.70	0.38	0.20	0.50	0.97	0.00	1.00	0.22	0.54	0
54	0.00	0.72	0.01	0.40	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.04	0.45	0.10	0.02	0.00	1.00	0.63	0.20	0.53	0.98	0.00	1.00	0.22	0.54	0
55	0.00	0.27	1.00	0.45	1.00	0.88	0.34	0.78	0.15	0.16	0.04	0.55	0.18	0.23	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.99	0.00	1.00	0.22	0.00	0
56	0.00	0.36	0.89	0.19	0.60	0.88	0.34	0.78	0.09	0.25	0.02	0.59	0.31	0.31	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.97	0.00	1.00	0.22	0.00	0
57	0.00	0.40	0.80	0.10	0.80	0.88	0.34	0.78	0.05	0.04	0.00	0.52	0.34	0.08	0.00	0.30	0.38	1.00	0.00	0.95	0.01	0.95	0.23	0.00	0
58	0.00	0.84	0.07	0.75	0.80	0.88	0.34	0.78	0.04	0.01	0.01	0.45	0.11	0.08	0.00	0.50	1.00	1.00	0.00	0.97	0.00	0.99	0.23	0.00	0
59	0.00	0.05	0.66	0.97	0.80	0.88	0.34	0.78	0.05	0.03	0.00	0.47	0.06	0.01	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.94	0.01	0.97	0.24	0.00	0
60	0.00	0.96	0.36	0.98	0.60	0.88	0.34	0.78	0.02	0.01	0.07	0.53	0.23	0.00	0.00	0.30	0.38	0.20	0.00	0.94	0.00	1.00	0.24	0.00	0
61	0.00	0.40	0.80	0.10	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.05	0.34	0.08	0.03	0.12	1.00	1.00	0.20	0.25	0.95	0.00	1.00	0.24	0.28	0
62	0.00	0.83	0.06	0.75	0.80	0.88	0.34	0.78	0.27	0.34	0.21	0.63	0.03	0.00	0.00	0.60	0.75	0.40	0.00	0.97	0.00	0.99	0.24	0.00	0
63	0.00	0.40	0.80	0.10	0.80	0.88	0.34	0.78	0.06	0.06	0.03	0.31	0.06	0.07	0.00	0.60	0.75	0.40	0.00	0.95	0.01	1.00	0.25	0.00	0
64	0.00	0.02	0.56	1.00	0.80	0.88	0.34	0.78	0.73	0.74	0.62	0.79	0.07	0.26	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.93	0.00	1.00	0.25	0.00	0
65	0.00	0.52	0.43	0.00	0.60	0.88	0.34	0.78	0.36	0.30	0.20	0.64	0.08	0.34	0.00	0.70	1.00	1.00	0.00	0.93	0.01	1.00	0.25	0.00	0
66	0.00	0.83	0.06	0.74	0.80	0.88	0.35	0.78	0.03	0.27	0.01	0.28	0.09	0.29	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.97	0.00	0.99	0.25	0.00	0
67	0.00	0.64	0.12	0.18	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.07	0.45	0.14	0.01	0.25	0.70	0.38	0.20	0.64	0.96	0.00	1.00	0.26	0.68	0
68	0.00	0.60	0.20	0.10	1.00	0.88	0.34	0.78	0.01	0.05	0.10	0.55	0.04	0.03	0.00	0.70	0.38	1.00	0.00	0.94	0.00	0.96	0.26	0.00	0
69	0.00	0.52	0.43	0.01	0.60	0.87	0.34	0.78	0.10	0.08	0.00	0.27	0.04	0.25	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.92	0.01	0.95	0.26	0.00	0
70	0.00	0.97	0.42	0.99	0.60	0.87	0.34	0.78	0.06	0.06	0.00	0.36	0.09	0.11	0.00	0.50	0.13	0.60	0.00	0.92	0.03	0.81	0.27	0.00	0
71	0.00	0.12	0.85	0.86	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.02	0.36	0.11	0.00	0.20	0.50	0.38	0.20	0.26	0.96	0.00	1.00	0.24	0.27	1
72	0.00	0.51	0.49	0.00	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.04	0.44	0.03	0.00	0.00	0.50	0.63	0.20	0.40	0.93	0.00	1.00	0.24	0.43	1
73	0.00	0.06	0.68	0.96	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.11	0.46	0.14	0.01	0.00	0.70	1.00	0.20	0.32	0.94	0.00	1.00	0.24	0.39	1
74	0.00	0.99	0.46	1.00	0.10	0.88	0.35	0.78	0.01	0.00	0.03	0.40	0.11	0.02	0.00	0.70	0.63	0.20	0.20	0.93	0.00	0.90	0.24	0.19	1
75	0.00	0.53	0.40	0.01	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.04	0.44	0.06	0.00	0.00	0.70	0.63	0.20	0.14	0.93	0.00	1.00	0.25	0.14	1
76	0.00	0.90	0.19	0.90	0.80	0.88	0.34	0.78	0.01	0.00	0.03	0.47	0.08	0.00	0.00	1.00	1.00	0.20	0.03	0.95	0.00	0.99	0.25	0.04	1
77	0.00	0.04	0.62	0.99	0.60	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.02	0.40	0.06	0.03	0.00	0.50	0.38	1.00	0.10	0.93	0.01	0.94	0.25	0.10	1
78	0.00	0.87	0.15	0.85	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.07	0.52	0.08	0.01	0.00	1.00	0.38	0.20	0.32	0.95	0.00	1.00	0.25	0.35	1
79	0.00	0.93	0.28	0.95	0.80	0.89	0.34	0.78	0.01	0.00	0.02	0.35	0.12	0.01	0.00	0.70	0.63	1.00	0.11	0.94	0.00	1.00	0.25	0.13	1
80	0.00	0.37	0.88	0.17	0.60	0.88	0.34	0.78	0.09	0.03	0.00	0.27	0.04	0.08	0.00	0.50	0.63	1.00	0.00	0.95	0.00	1.00	0.26	0.00	1
81	0.00	0.35	0.90	0.20	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.01	0.41	0.11	0.03	0.34	0.70	1.00	1.00	0.20	0.96	0.00	1.00	0.27	0.18	1
82	0.00	0.32	0.96	0.31	0.10	0.89	0.34	0.78	0.00	0.00	0.01	0.44	0.03	0.00	0.00	0.70	1.00	0.20	0.34	0.97	0.00	1.00	0.27	0.41	1
83	0.00	0.92	0.25	0.93	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.06	0.49	0.03	0.01	0.16	0.80	0.38	0.60	0.35	0.93	0.00	1.00	0.28	0.38	1
84	0.00	0.74	0.00	0.47	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.00	0.03	0.44	0.03	0.06	0.00	0.70	0.63	0.20	0.45	0.97	0.00	0.99	0.28	0.47	1
85	0.00	0.94	0.31	0.96	0.10	0.88	0.35	0.78	0.02	0.02	0.02	0.43	0.07	0.07	0.00	0.70	0.63	1.00	0.00	0.92	0.00	0.99	0.28	0.00	1
86	0.00	0.34	0.92	0.23	0.80	0.88	0.35	0.78	0.00	0.00	0.11	0.43	0.03	0.00	0.00	0.70	1.00	0.60	0.23	0.96	0.00	0.99	0.29	0.25	1
87	0.00	0.67	0.06	0.25	0.80	0.88	0.34	0.78	0.03	0.02	0.03	0.33	0.14	0.03	0.00	0.50	0.63	0.80	0.01	0.96	0.01	1.00	0.29	0.41	1
88	0.00	0.32	0.96	0.30	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.00	0.13	0.44	0.05	0.01	0.00	0.70	1.00	0.20	0.19	0.97	0.00	0.98	0.29	0.21	1
89	0.00	0.30	0.98	0.37	0.10	0.88	0.34	0.78	0.00	0.00	0.12	0.46	0.16	0.01	0.00	0.70	1.00	0.20	0.33	0.97	0.00	0.98	0.29	0.41	1
90	0.00	0.15	0.90	0.80	0.60	0.88	0.35	0.78	0.02	0.01	0.04	0.41	0.06	0.00	0.00	0.50	0.63	0.20	0.00	0.95	0.00	0.96	0.30	0.00	1
91	0.00	0.54	0.38	0.01	0.10	0.88	0.34	0.78	0.01	0.01	0.11	0.48	0.12	0.02	0.00	1.00	0.63	0.20	0.29	0.91	0.00	0.97	0.30	0.34	1
92	0.00	0.79	0.01	0.62	0.80	0.88	0.34	0.78																	

TABLA 52. DISTRIBUCIÓN DE CONJUNTOS DE DATOS PARA ENTRENAMIENTO (E), VALIDACIÓN (V) Y TEST (T)

	EVT01	EVT02	EVT03	EVT04	EVT05	EVT06	EVT07	EVT08	EVT09	EVT10
10%	E	T	T	V	V	E	E	E	E	E
10%	E	E	T	T	V	V	E	E	E	E
10%	E	E	E	T	T	V	V	E	E	E
10%	E	E	E	E	T	T	V	V	E	E
10%	E	E	E	E	E	T	T	V	V	E
10%	E	E	E	E	E	E	T	T	V	V
10%	V	E	E	E	E	E	E	T	T	V
10%	V	V	E	E	E	E	E	E	T	T
10%	T	V	V	E	E	E	E	E	E	T
10%	T	T	V	V	E	E	E	E	E	E

Los 10 modelos de susceptibilidad así obtenidos se presentan desde la Figura 58 hasta la Figura 67

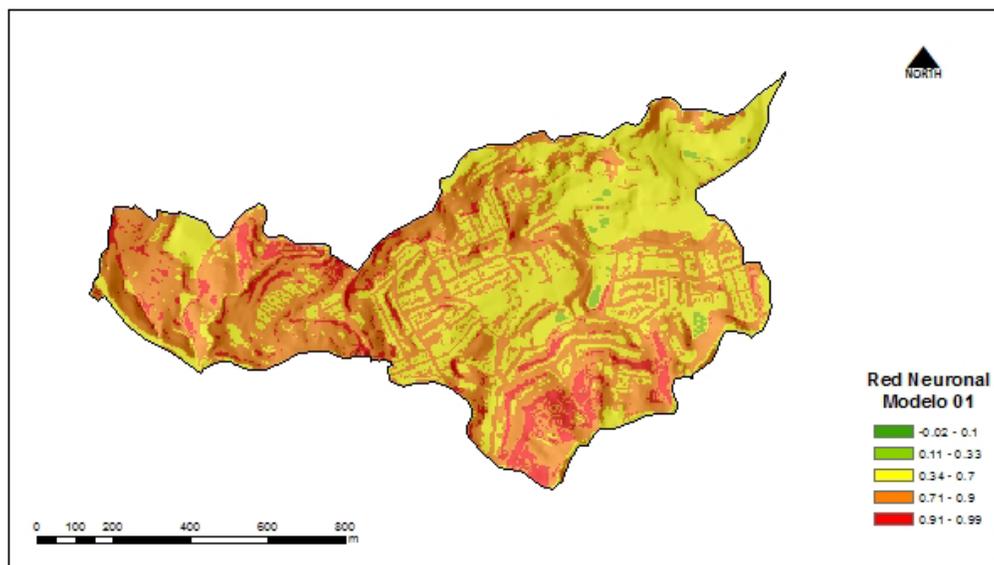


FIGURA 58. MODELO 01 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

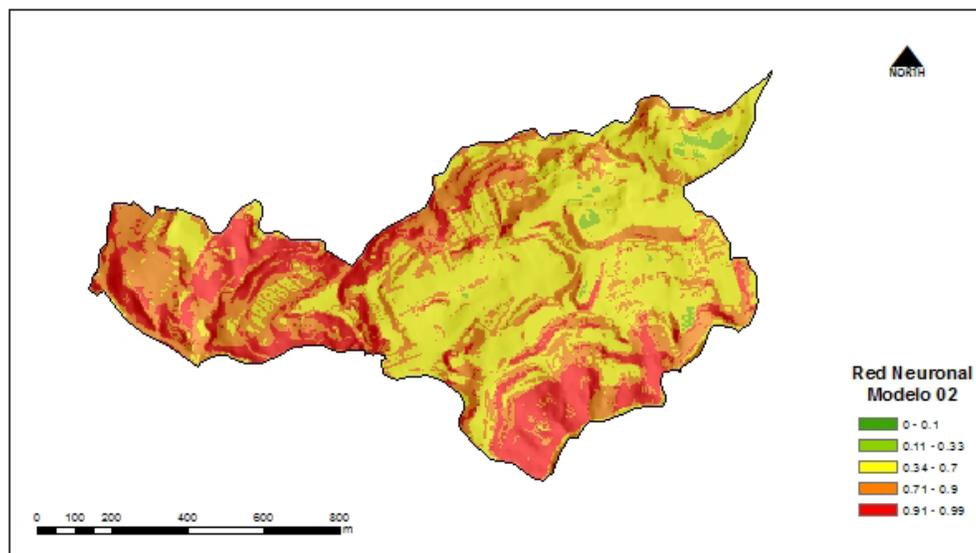


FIGURA 59. MODELO 02 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

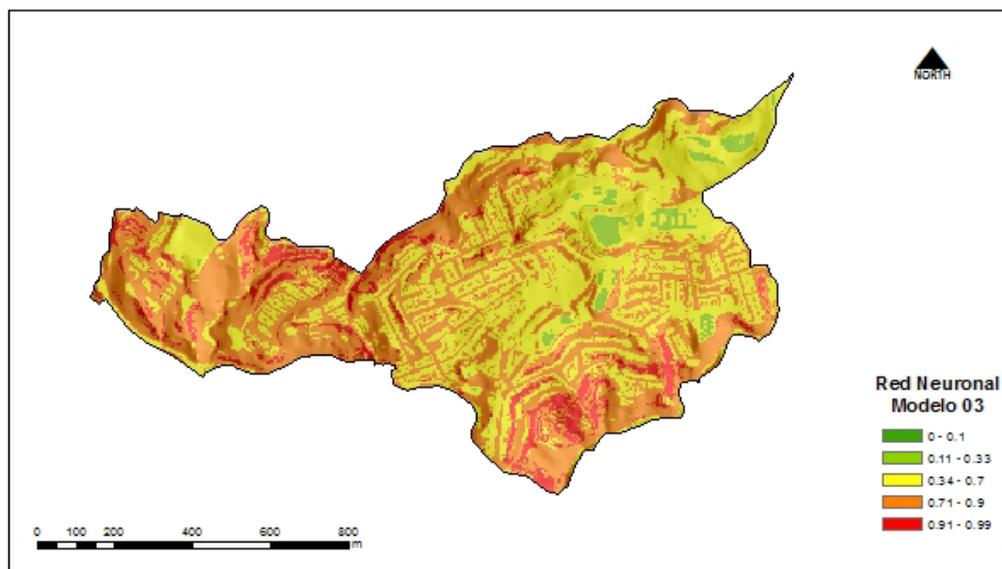


FIGURA 60. MODELO 03 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

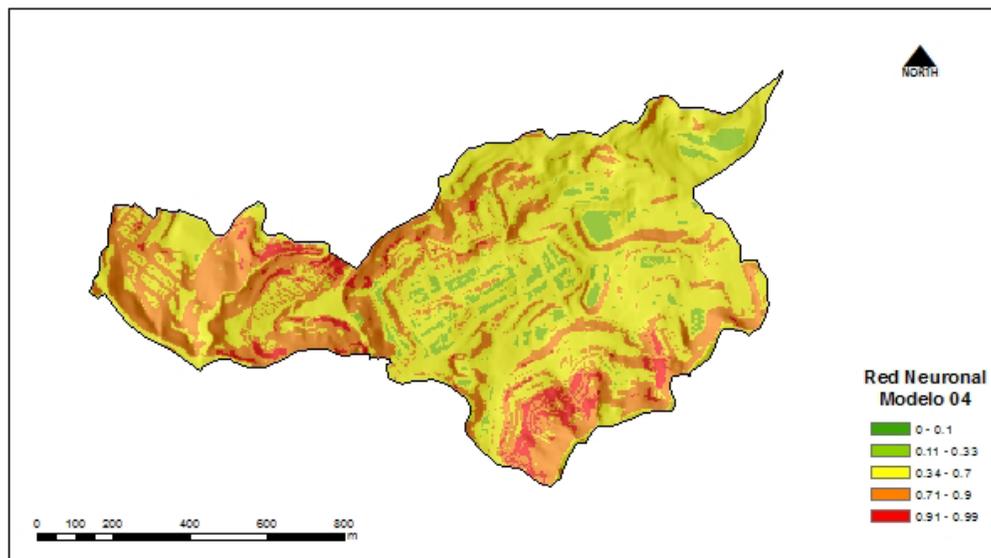


FIGURA 61. MODELO 04 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

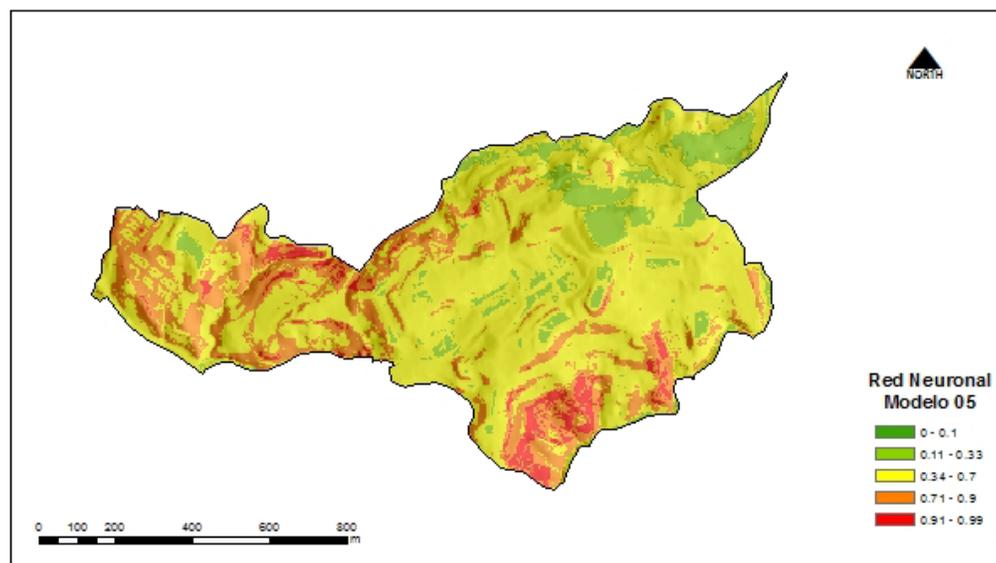


FIGURA 62. MODELO 05 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

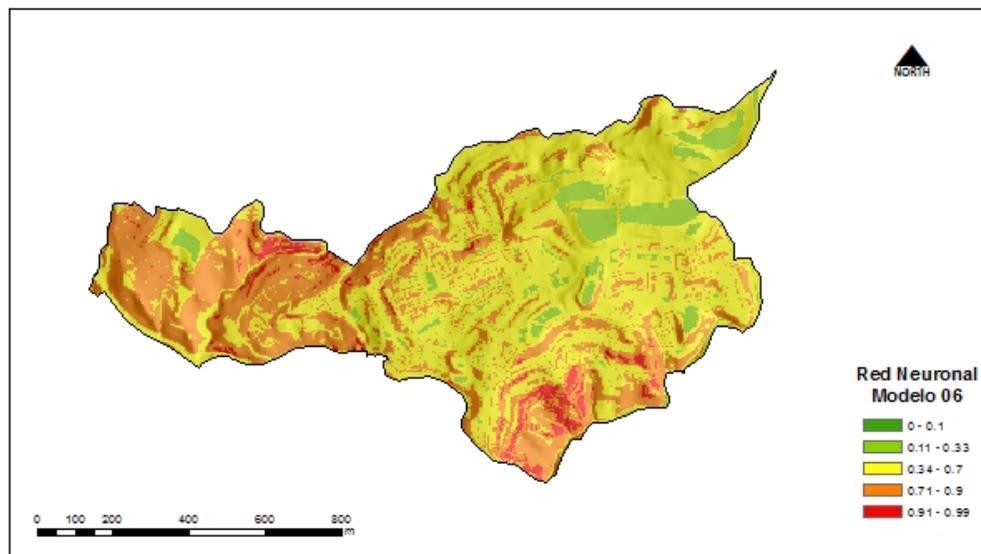


FIGURA 63. MODELO 06 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

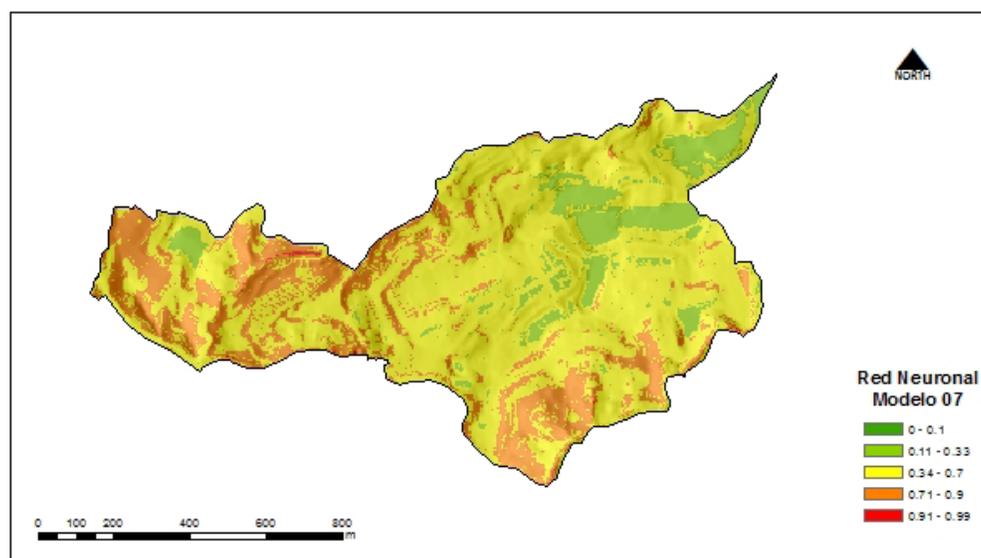


FIGURA 64. MODELO 07 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

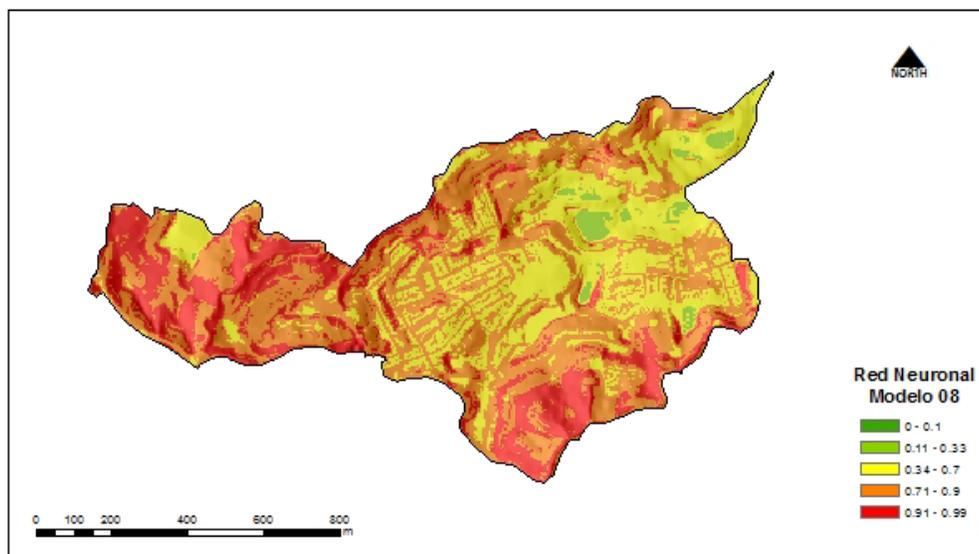


FIGURA 65. MODELO 08 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

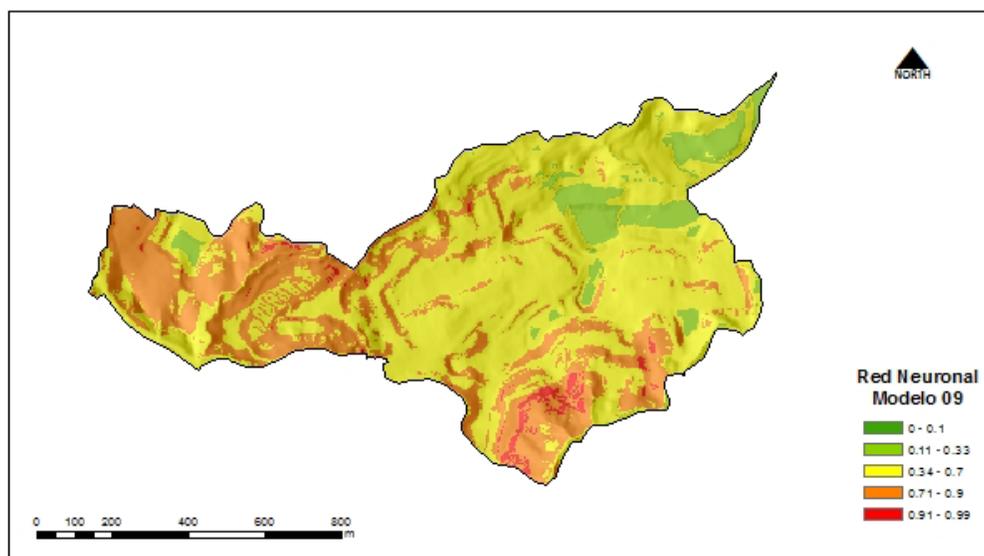


FIGURA 66. MODELO 09 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

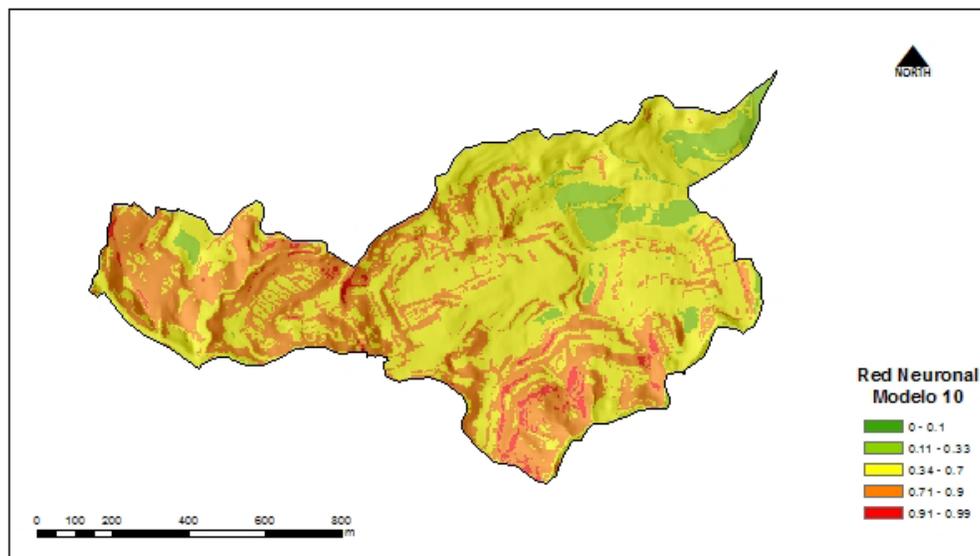


FIGURA 67. MODELO 10 APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

Como resultado final, se obtiene un valor medio de susceptibilidad (Figura 68) y su dispersión (Figura 69)

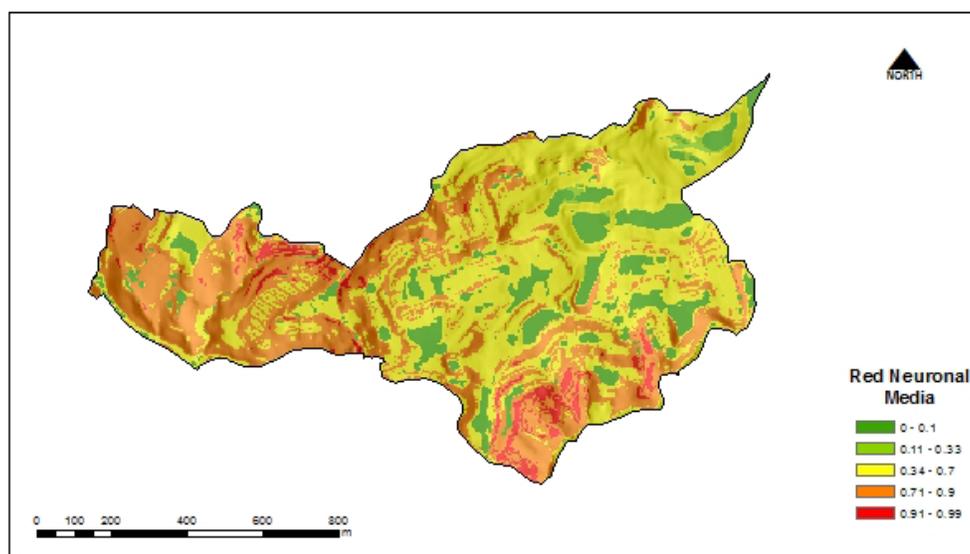


FIGURA 68. MODELO FINAL (MEDIO) APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

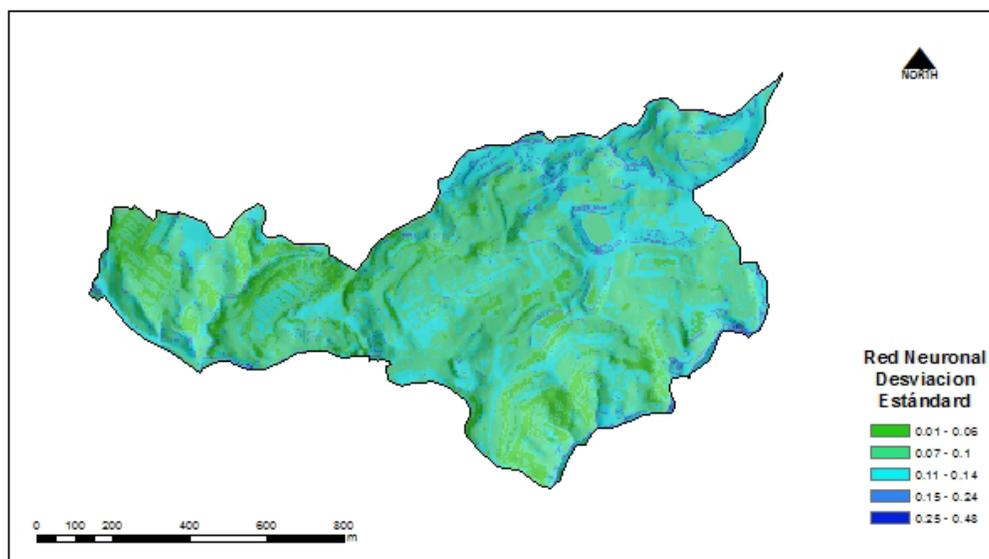


FIGURA 69. DISPERSIÓN DEL MODELO FINAL APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

Los resultados de clasificación obtenidos se presentan en la Tabla 53

TABLA 53. RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES MODELOS PROBADOS

	Modelo 01	Modelo 02	Modelo 03	Modelo 04	Modelo 05	Modelo 06	Modelo 07	Modelo 08	Modelo 09	Modelo 10
Celdas estables correctamente clasificadas	70.2%	76.6%	68.2%	61.5%	69.4%	69.4%	68.5%	65.4%	70.5%	66.3%
Celdas inestables correctamente clasificadas	76.9%	77.6%	74.5%	77.1%	74.1%	72.2%	78.7%	83.2%	74.3%	77.9%

El resultado así obtenido puede categorizarse para su mejor interpretación. En la Figura 70 se han utilizado cinco categorías de susceptibilidad.

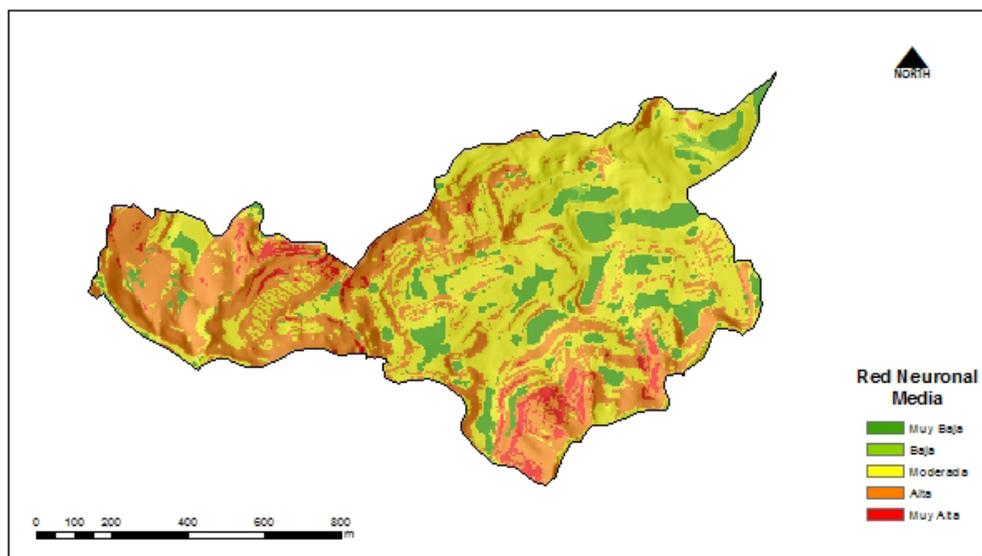


FIGURA 70. MODELO FINAL REAGRUPADO EN CATEGORÍAS, APLICANDO LA METODOLOGÍA DE RNA

PARTE 3

Piloto de asistencia técnica para incorporar la gestión integral de riesgos hidrológicos en el ordenamiento territorial municipal

Incorporación del riesgo en el ordenamiento territorial instructivo para el nivel municipal

Omar Darío Cardona Arboleda

Con el apoyo de:

Gabriel Andrés Bernal

BOGOTÁ - NOVIEMBRE, 2013

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	131
1.Alcance.....	131
1.Acerca de los modelos	132
2.Organización de este instructivo.....	133
PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LOS MODELOS	134
1.Nivel de complejidad 1:.....	134
2.Nivel de complejidad 2:.....	135
3.Nivel de complejidad 3:.....	135
4.Requerimientos de información	136
4.1 <i>Modelo digital de elevación</i>	136

4.2	<i>Registros de precipitación diaria o intra-diaria</i>	137
4.3	<i>Cobertura vegetal, usos del suelo y zonificación geotécnica</i>	137
5.	Procedimiento general para la evaluación de inundaciones.....	137
DELIMITACIÓN DE RONDAS HÍDRICAS		139
1.	Clasificación geomorfológica	139
1.1	<i>Paso 1: Procesamiento del MDE</i>	140
1.2	<i>Paso 2: Clasificación morfológica y dimensionamiento de canales</i>	140
1.2.1	Separación de tramos.	140
1.2.2	Clasificación morfológica	140
1.2.3	Dimensionamiento de canales	141
1.3	<i>Paso 3: Delimitación del componente geomorfológico</i>	142
SUSCEPTIBILIDAD TOPOGRÁFICA		144
1.	Información requerida	144
2.	Delimitación de las zonas bajas de la topografía	144
2.1	<i>Variables</i>	145
2.2	<i>Cálculo de factores de exposición por viento</i>	145
CURVAS PADF Y TORMENTAS ESTOCÁSTICAS		147
1.	Análisis espacial con curvas PADF	147
1.	Distribución temporal de la precipitación.....	152
VOLÚMENES DE FLUJO		156
ANÁLISIS LLUVIA-ESCORRENTÍA		158
1.	Hidrograma triangular	158
2.	Método de Clark modificado	160

2.1	<i>Traslación</i>	160
2.2	<i>Atenuación</i>	160
	INUNDACIÓN POR ENCHARCAMIENTO	162
	INUNDACIÓN ALUVIAL O TORRENCIAL – MODELO 1D	163
	INUNDACIÓN ALUVIAL – MODELO 2D	165
	ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA	167
1.	Paso 1: integración de la amenaza.....	167
2.	Paso 2: Selección de los períodos de retorno	168
	ANEXO I	169
1.	Información pluviométrica.....	170
1.	Análisis de la precipitación	172
1.1	<i>Complementación de la información faltante o incompleta</i>	172
1.3	<i>Comportamiento histórico de precipitación en la cuenca</i>	174
2.	Mapas de amenaza por lluvias intensas para la cuenca del río Chinchiná.....	175
3.	Factores de escurrimiento.....	178
4.	Modelación de la inundación.....	180
	REFERENCIAS	187

EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIONES CON DIFERENTES NIVELES DE COMPLEJIDAD

INTRODUCCIÓN

En el marco del Plan Regional Integral de Cambio Climático (PRICC) en la región capital, se presenta este instructivo de referencia técnica para la modelación de la amenaza por inundación y su incorporación en Planes de Ordenamiento Territorial (POT).

Este instructivo se limita a dar lineamientos para la construcción de modelos de inundación que permitan generar zonas de amenaza en el territorio de análisis. Los modelos deberán ser construidos por un profesional o grupo de profesionales que tengan los conocimientos y experiencia mínimos para este fin.

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

1. ALCANCE

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

1. Inundación de tipo aluvial (inundación lenta)

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

2. Inundación de tipo torrencial (inundación súbita):

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

3. Encharcamiento:

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

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

1. ACERCA DE LOS MODELOS

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

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

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

Las clases presentadas anteriormente aplican en términos generales a todos los modelos de amenaza por inundaciones. No obstante, se define una clasificación adicional, de primer nivel, con el fin de darle mayor cobertura y aplicabilidad a lo propuesto en este instructivo. En ese sentido, los modelos pueden clasificarse como de *susceptibilidad* o de *amenaza*. Los modelos de susceptibilidad son modelos abstractos que toman características morfológicas, geológicas e hidrológicas del territorio para establecer zonas en donde es posible que se presenten inundaciones. Por otra parte, los modelos de amenaza se basan en modelos abstractos para pronosticar inundaciones a partir de la transformación de datos de entrada (lluvias) en variables físicas de la severidad del fenómeno (extensión, profundidad, velocidad o duración). Adicionalmente, los modelos de amenaza tienen representación en el dominio de la frecuencia, entregando resultados en términos de periodos de retorno.

2. ORGANIZACIÓN DE ESTE INSTRUCTIVO

La Tabla 37 muestra la manera como está organizado este instructivo. La sección 2 presenta los lineamientos generales para la selección de los modelos, y el procedimiento para su aplicación. Las secciones 3 a 10 presentan los modelos propuestos en este instructivo. La sección 11 contiene un procedimiento para la zonificación de la amenaza. Finalmente, la sección 12 presenta un ejemplo de aplicación de lo consignado en este instructivo.

TABLA 37 ORGANIZACIÓN DE ESTE INSTRUCTIVO

Sección	Tema	Descripción
1	Introducción	Introducción a este instructivo.
2	Parámetros para la selección de los modelos	Lineamientos para la selección de los modelos y procedimiento general para su aplicación.
3	Delimitación de rondas hídricas	Procedimiento para la delimitación del componente geomorfológico de la ronda hídrica.
4	Susceptibilidad topográfica	Procedimiento para la delimitación de zonas bajas de la topografía.
5	Curvas PADF y tormentas estocásticas	Procedimiento para la obtención de un catálogo de tormentas estocásticas, con distribución espacial y temporal de la precipitación.
6	Volúmenes de flujo	Procedimiento para determinar la fracción del volumen de precipitación disponible para escurrir.
7	Análisis lluvia esorrentía	Procedimientos para el cálculo del hidrograma de salida del sistema bajo análisis.
8	Inundación por encharcamiento	Procedimiento para la evaluación de la amenaza por inundación por encharcamiento.
9	Inundación aluvial o torrencial – modelo 1D	Procedimiento para la evaluación de la amenaza por inundación aluvial o torrencial, mediante un modelo de flujo unidimensional.
10	Inundación aluvial – modelo 2D	Procedimiento para la evaluación de la amenaza por inundación mediante un modelo de flujo bidimensional.
11	Zonificación de la amenaza	Procedimiento para la definición de zonas de amenaza.
12	Anexo I: Ejemplo de cálculo	Ejemplo de cálculo de inundación en la parte baja de la cuenca del río Chinchiná.

PARÁMETROS PARA LA SELECCIÓN DE LOS MODELOS

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

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

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

TABLA 39 RELACIÓN ENTRE EL NIVEL DEL MUNICIPIO Y EL NIVEL DE COMPLEJIDAD

Nivel de municipio	Nivel de complejidad
1	3
2	3
3	2
4	2
5	1
6	1

1. NIVEL DE COMPLEJIDAD 1:

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

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

Para inundaciones por encharcamiento: Susceptibilidad topográfica.

2. NIVEL DE COMPLEJIDAD 2:

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

Para inundaciones aluviales o torrenciales:

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

Para inundaciones por encharcamiento:

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

3. NIVEL DE COMPLEJIDAD 3:

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

Para inundaciones aluviales o torrenciales:

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

Para inundaciones por encharcamiento:

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

4. REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

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

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

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

4.1 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

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

- Cartografía IGAC. En corredores aluviales con bajo nivel de confinamiento, las estrategias de análisis geoespacial basadas en MDE deben apoyarse en la representación vectorial de redes de drenaje como las disponibles en la bases de datos de Instituto Geográfico Agustín Codazzi, o producto de planes de actualización de redes hídricas por parte de las Corporaciones Autónomas Regionales.
- Bases de datos internacionales. Las principales fuentes de información digital corresponden a la misión satelital ASTER²³, cuyos productos cuentan con una resolución espacial de aproximadamente 30m. Adicionalmente, la misión satelital SRTM²⁴, provee información con resolución espacial de 90m, los cuales son relativamente adecuados para la delimitación de rondas geomorfológicas en tramos con anchos superiores a 30m. Asimismo, la misión SRTM provee, con mayor restricción, modelos de elevación con resolución de 30 m que dependiendo de la región pueden tener mejor calidad que la de aquellos correspondientes a la misión ASTER.

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

24 <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

4.2 REGISTROS DE PRECIPITACIÓN DIARIA O INTRA-DIARIA

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

- Registros pluviométricos de precipitación en la región de análisis. Para obtener esta información deben consultarse localmente las entidades que sean propietarias de estaciones pluviométricas. Particularmente debe consultarse con la Corporación Autónoma Regional correspondiente.
- Precipitación derivada de sensores remotos. En caso que no esté disponible o no exista la información pluviométrica requerida para la zona de análisis, puede usarse la información de precipitación obtenida por la misión satelital TRMM²⁵. Esta información se presenta en mallas de resolución de 0.25° (aproximadamente 27 Km en el trópico). Contiene información de precipitación desde finales de la década de los años 90, hasta la fecha. Esta información debe calibrarse mediante comparación con las condiciones de precipitación dadas por mapas regionales de precipitación media multianual.

4.3 COBERTURA VEGETAL, USOS DEL SUELO Y ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

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

5. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE INUNDACIONES

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

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

En caso que el modelo aplicado sea de amenaza, el procedimiento general de análisis es el siguiente, para inundaciones aluviales o torrenciales:

25 <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>

1. Construcción de las curvas PADF y generación de un conjunto de tormentas estocásticas a partir de los registros históricos de precipitación para la cuenca de análisis (sección 5). En función del tipo de modelo de lluvia-escurrimiento que se seleccione, deberá o no incluirse la distribución temporal de la precipitación (sección 5). Cada tormenta del conjunto constituye un escenario de análisis.
2. Con la información de precipitación neta para cada escenario de lluvia se obtienen los volúmenes de escurrimiento dentro de la cuenca (sección 6).
3. Para determinar el hidrograma a la salida, se emplea el método del hidrograma unitario triangular o el método de Clark modificado, en función del nivel de complejidad seleccionado (sección 7).
4. Se selecciona un punto a partir del cual se llevará a cabo el análisis hidráulico de la inundación. Este debe corresponder a un punto del cauce cercano a alguna población de interés o a la desembocadura de la cuenca de análisis.
5. Con la topografía detallada y el hidrograma de cada escenario, se aplica el procedimiento de cálculo de flujo unidimensional o bidimensional (secciones 9 y 10), según sea el caso.
6. Se almacenan los valores de inundación máxima para cada escenario, con lo que se crea una malla de inundación por escenario. Esto implica que el resultado final de la evaluación es un conjunto de escenarios de inundación.
7. Se aplica el procedimiento de zonificación de la amenaza para establecer niveles de amenaza por zonas del territorio (sección 11).

Para inundaciones por encharcamiento, el procedimiento es el siguiente:

1. Construcción de las curvas PADF y generación de un conjunto de tormentas estocásticas a partir de los registros históricos de precipitación para la cuenca de análisis (sección 5). Cada tormenta del conjunto constituye un escenario de análisis.
2. Con la información de precipitación neta para cada escenario de lluvia se obtienen los volúmenes de escurrimiento dentro de la cuenca (sección 6).
3. Cálculo de la susceptibilidad topográfica, con el fin de determinar las zonas bajas de la topografía (sección 4).
4. Cálculo de la inundación por encharcamiento (sección 8), para cada escenario.
5. Se almacenan los valores de inundación máxima para cada escenario, con lo que se crea una malla de inundación por escenario. Esto implica que el resultado final de la evaluación es un conjunto de escenarios de inundación.
6. Se aplica el procedimiento de zonificación de la amenaza para establecer niveles de amenaza por zonas del territorio (sección 11).

DELIMITACIÓN DE RONDAS HÍDRICAS

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

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

1. CLASIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA

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

La clasificación geomorfológica es un proceso de tres pasos:

1. Procesamiento del modelo digital de elevación (MDE) disponible, con el fin de determinar la red hidrológica rasterizada.

2. Realizar una preclasificación morfológica de la red de drenaje de la región, o del corredor aluvial estudiado, con base al procesamiento realizado en el paso 1. El objetivo es determinar la mejor relación de geometría hidráulica que permita la estimación del ancho medio del cauce.

3. Definición de la franja de terreno correspondiente al componente geomorfológico, a partir de la correlación del ancho medio del cauce con procesos migratorios. No obstante, dado que los procesos migratorios son exclusivos de ciertos tipos de morfología, este paso tiene en cuenta la elevación relativa de las laderas adyacentes a cada corriente para prevenir la delimitación del componente geomorfológico donde, debido al grado de confinamiento, no podrían presentarse procesos migratorios.

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

1.1 PASO 1: PROCESAMIENTO DEL MDE

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

- Áreas acumuladas: Representa para cada píxel el área de la cuenca tributaria aguas arriba.
- Red de drenaje rasterizada: Representa para cada píxel aquellas celdas que efectivamente corresponden a un canal de flujo. Así, el mapa tendrá valores de 1 para celdas que representan la red de drenaje y 0 para celdas que representan laderas o llanuras inundables.

1.2 PASO 2: CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA Y DIMENSIONAMIENTO DE CANALES

1.2.1 Separación de tramos.

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

1.2.2 Clasificación morfológica

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

$$w = \frac{\gamma Q S_0}{W}$$

(Ec. 1)

en donde γ es el peso específico del agua, Q el caudal, S_0 la pendiente y W el ancho superficial.

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

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

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

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

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

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

Flores et al. (2006) emplearon un valor para $(b-d)$ de 0.4 con el fin de establecer un índice de potencia específica ($S_0 A^{0.4}$). La clasificación morfológica se realiza entonces en función de este índice, según lo indicado en la Figura 71.

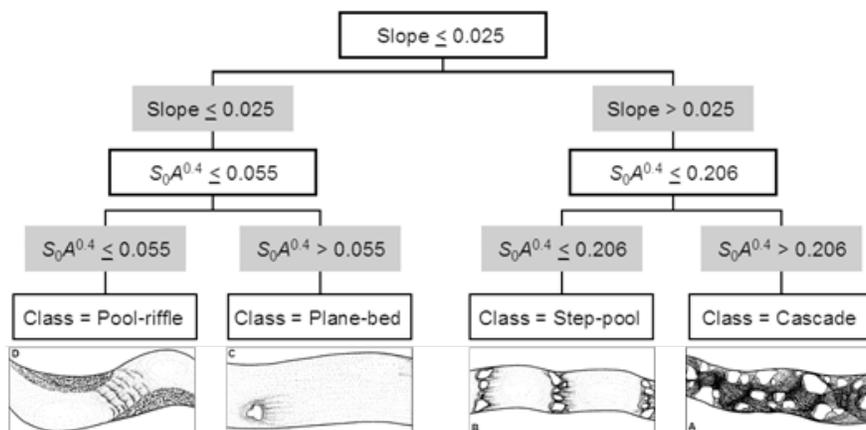


FIGURA 71 ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA BASADA EN INFORMACIÓN GEOESPACIAL (FUENTE: FLORES ET AL., 2006)

1.2.3 Dimensionamiento de canales

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

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

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

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

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

1.3 PASO 3: DELIMITACIÓN DEL COMPONENTE GEOMORFOLÓGICO

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

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

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

5. Para cada uno de los pixeles que conforman el tramo homogéneo, se seleccionan los pixeles ubicados a una distancia $D = W + R_c$, como se ilustra en la Figura 73.

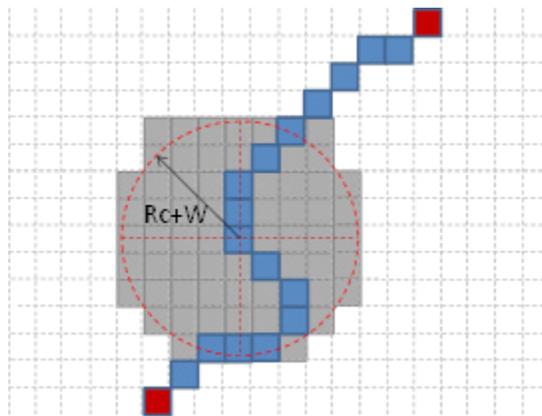


FIGURA 73. ESQUEMA DE SELECCIÓN DE CELDAS PERTENECIENTES A RONDA GEOMORFOLÓGICA

(Fuente: UNAL-Medellín, 2012)

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

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

La asignación del nivel de amenaza se hace de acuerdo a la Tabla 40.

TABLA 40 ASIGNACIÓN DE NIVELES DE AMENAZA PARA EL MÉTODO DE LA RONDA GEOMORFOLÓGICA

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

SUSCEPTIBILIDAD TOPOGRÁFICA

1. INFORMACIÓN REQUERIDA

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

2. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS BAJAS DE LA TOPOGRAFÍA

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

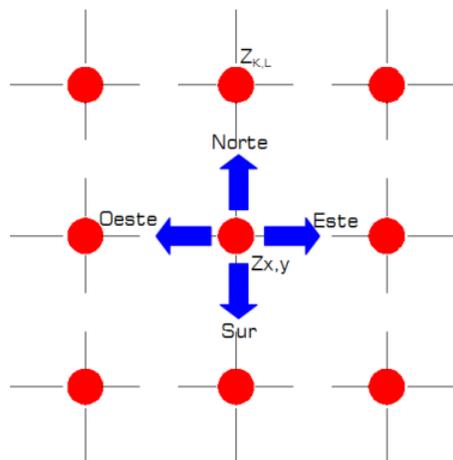


FIGURA 75. PROCEDIMIENTO PARA ESTIMAR ÁREAS DE EXPOSICIÓN POR VIENTO. EN ESTA FIGURA SE EJEMPLIFICA EL CASO DE ANALIZAR EL PUNTO $Z_{x,y}$ EN LA DIRECCIÓN NORTE, $Z_{k,L}$

2.1 VARIABLES

Nmax. Distancia horizontal máxima a la que se evaluará la variación de la topografía respecto a un punto fijo.

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

2.2 CÁLCULO DE FACTORES DE EXPOSICIÓN POR VIENTO

Para cada punto (X,Y) de la malla de topografía, se busca en cuatro direcciones cardinales (norte, sur, este, oeste; Ver Figura 3.) que se cumpla la siguiente condición:

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

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

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

a) que el número de pasos en la dirección de análisis (N_k), exceda o sea igual al número de pasos que cumplen con la distancia horizontal máxima (Nmax).

b) se llega a los límites de la malla.

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

a) $Z_{K,L} \geq Z_{X,Y} + Z_{Lim}$. Se trata de un sitio protegido, en el que para la dirección analizada la altitud del punto de comparación (K,L) es mayor a la altitud del punto de origen ($Z_{x,y}$) más la altura límite (Z_{Lim}) que permite contar con una pendiente de por lo menos 5%. Esto es un sitio que se clasifica como zona baja.

b) Si la condición anterior no se cumple, se calcula la pendiente media del terreno entre el punto en que se desean conocer los efectos topográficos (X,Y) y el punto en que se cumplen las condiciones analizadas (K,L).

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

$$\overline{m_e} = \frac{Z_{X,Y} - Z_{K,L}}{D} \quad (\text{Ec. 9})$$

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

La asignación del nivel de amenaza se hace de acuerdo a la Tabla 42.

TABLA 42 ASIGNACIÓN DE NIVELES DE AMENAZA PARA EL MÉTODO DE LA RONDA GEOMORFOLÓGICA

Clasificación topográfica	Nivel de amenaza
Zonas bajas	Alta
Zonas planas	Media
Cimas de promontorios o colinas	Baja

CURVAS PADF Y TORMENTAS ESTOCÁSTICAS

1. ANÁLISIS ESPACIAL CON CURVAS PADF

El objetivo del modelo es establecer las relaciones entre la profundidad máxima de precipitación promedio (P), el área (A) sobre la cual cae esta profundidad, la duración (D) durante la cual se produce esa precipitación y la frecuencia (F) con la cual se presenta ese evento con esas características de profundidad, cobertura espacial y duración. Esto corresponde a las curvas profundidad – área – duración – frecuencia (PADF). El análisis PAD determina las cantidades máximas de precipitación sobre áreas de diferentes tamaños y para varias duraciones de precipitación. Estas curvas deben ser características de las áreas homogéneas mencionadas anteriormente. Un aspecto adicional relacionado con esas curvas es el análisis y definición de patrones geométricos (p.e. de distribución espacial de la precipitación, los cuales se hacen a partir del estudio de mapas de curvas isoyetas de eventos de tormentas considerados, identificando centros de tormentas y zonas asociadas con hipocentros, es decir áreas consistentemente de menor precipitación). Otra consideración que debe tomarse en cuenta, es la distribución temporal de los eventos espacialmente distribuidos. Criterios para el análisis espacial de precipitaciones máximas se describen a continuación:

1. Definición de área mínima por debajo de la cual la precipitación se considera como puntual y definición adicional de área máxima (en razón a que el número de tormentas de gran extensión puede ser escaso dentro de tormentas históricas disponibles y por lo tanto las series anuales correspondientes pueden resultar no suficientemente largas para realizar análisis de frecuencia de igual confiabilidad que para el resto de eventos disponibles de menor extensión).
2. Definición del número mínimo de estaciones pluviométricas y/o pluviográficas que registren un determinado aguacero para la generación de los mapas de isoyetas correspondientes (este número podría estar alrededor de 10 pero depende indudablemente de la densidad de estaciones en cada caso de estudio), de tal manera que éstos sean confiables para la descripción espacial del evento.
3. Definición de un valor umbral para la selección de un evento para ser considerado como significativo, es decir que, además que este evento esté registrado en el número mínimo de estaciones definido en el

punto 2, la precipitación registrada en cada una de estas estaciones supere ese valor umbral (p.e. mayor que 10 mm en 24 horas).

4. Por razones de consistencia, se debe utilizar la misma distribución de probabilidad y el mismo método de estimación de parámetros que el definido para los análisis puntuales de frecuencia.

5. El análisis de la distribución espacial de la precipitación para los eventos considerados debe permitir establecer el o los patrones geométricos más representativos para su caracterización genérica (p.e. patrón circular, patrón elíptico, etc) con localizaciones preferenciales de hiper e hipocentros, además de alineamientos del patrón, al igual que relaciones funcionales entre parámetros del patrón (p.e. relación entre eje mayor y eje menor en patrón elíptico entre 2 y 3).

6. La distribución temporal de los aguaceros con extensión espacial debe obtenerse del comportamiento temporal de las tormentas registradas en áreas extensas en conjunto con las estaciones pluviométricas y pluviográficas, y no exclusivamente de los registros de estas últimas de manera individual. Así se puede garantizar la consistencia de los patrones temporales y espaciales obtenidos del análisis de precipitaciones máximas en áreas extensas.

La metodología para la determinación de relaciones PAD y PADF debe basarse en procedimientos propuestos en la literatura, como por ejemplo el de la OMM (1969). El rango de variación de las áreas se debe establecer a partir de los mapas de isoyetas generados para cada uno de los eventos disponibles, desde el valor mínimo equivalente puntual, hasta la mayor de las extensiones cubiertas por estos eventos. Eventualmente, puede ser necesario extrapolar curvas PAD Y PADF para valores mayores a este máximo histórico en el área. En relación con las duraciones, se considera que éstas pueden ir desde 1 hora hasta alrededor de 10 días, en razón a las precipitaciones asociadas a huracanes. Al igual que se considera adecuada la distribución Gumbel, con MPP para los análisis puntuales, ésta también se considera adecuada para los análisis espaciales.

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

Para construir una curva PAD en una zona hidrológicamente homogénea, se establece primero la duración considerada; a continuación se recopilan o generan los mapas de isoyetas de los eventos históricos para esta duración. En seguida, cada mapa se procesa para identificar el o los sitios de mayor pluviosidad, calculando la precipitación promedio correspondiente y midiendo el área cubierta respectiva. Esto se repite

sucesivamente, extendiendo las áreas de cubrimiento de las isoyetas (progresivamente con valores mayores a menores), calculando la precipitación promedio sobre las isoyetas consideradas y midiendo las áreas respectivas. Así, en la medida en que se amplía la cobertura de isoyetas, la profundidad promedio disminuye progresivamente y el área aumenta, definiéndose así una relación inversa entre área y precipitación máxima promedio. El algoritmo del procedimiento se describe a continuación:

1. Para cada año seleccionar los eventos intensos de precipitación con extensión espacial. Los pasos 2 a 16 corresponden al análisis de eventos de cada año con información disponible.
2. Para cada evento elaborar mapas de isoyetas para una duración D utilizando herramientas computacionales. Deben involucrarse estaciones periféricas que no hayan registrado precipitación.
3. Identificar las isoyetas de mayor valor. Sea este mayor valor de precipitación p_1 , y sea m_1 el número de isoyetas con valor p_1 .
4. Medir las áreas encerradas en las isoyetas con valor p_1 , y denotar estas áreas como a_1 , con i desde 1 hasta m_1 .
5. Estimar el valor promedio de precipitación en a_1 como $h_1 = p_1 + (p_{max} - p_1)/3$, donde p_{max} es el valor máximo puntual de precipitación dentro del área a_1 .

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

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

$$H_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} h_{1i} a_{1i}}{A_1}$$

(Ec. 10)

8. Identificar la(s) isoyeta(s) con valor inmediatamente inferior a p_1 , y sea este valor p_2 . Sea m_2 el número de isoyetas con valor p_2 .
9. Medir cada una de las áreas internas a las isoyetas con valor p_2 . Sean estas áreas a_2 .
10. Estimar el valor promedio de precipitación en a_2 como:

$$h_{2i} = \frac{h_{1i} a_{1i} + 0.5[p_2 + p_1][a_{2i} - a_{1i}]}{a_{2i}}$$

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

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

$$H_2 = \frac{\sum_{i=1}^{m_2} h_{2i} a_{2i}}{A_2}$$

(Ec. 12)

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

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

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

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

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

16. Graficar A_j vs. H_j .

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

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

19. Establecer la envolvente superior de precipitación para la superposición del paso anterior. Esta envolvente representa la relación entre la precipitación máxima y la extensión espacial para ese año y esa duración o curva PAD. En esta envolvente determinar los valores de precipitación máxima para valores predefinidos de área.

20. Repetir los pasos 2 a 19 para cada uno de los demás años disponibles.

21. Conformar las series anuales de precipitación máxima de duración D para cada una de las áreas predeterminadas del paso 19. Hacer análisis de frecuencia con esta serie usando la misma distribución de probabilidad y mismo método de estimación de parámetros aplicados en los análisis puntuales.

22. Repetir pasos 2 a 21 para otras duraciones D .

23. Con los resultados de los análisis de frecuencia de los pasos 21 y 22 conformar las curvas PADF.

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

24. Seleccionar un determinado período de retorno T
25. Determinar aleatoriamente una duración D
26. Seleccionar valores de área, A_i , dentro del rango cubierto por la curva PADF correspondiente a la duración D y frecuencia T anteriores
27. Con base en la curva PADF determinar los respectivos valores de profundidad máxima promedio P_i
28. Generar aleatoriamente la ubicación, forma y tamaño del patrón de precipitación;
29. Generar con el patrón típico las correspondientes curvas isoyetas que preserven para las anteriores áreas A_i las respectivas profundidades de precipitación P_i

En la Tabla 44 se presentan las ecuaciones para confeccionar un patrón espacial circular o elíptico, pues una elipse está definida por los semiejes menor y mayor, a y b respectivamente, y se puede expresar el uno en función del otro como $b = Ka$. En la Tabla 44 las dos primeras columnas corresponden a los valores de áreas y precipitaciones máximas promedio adoptados de la curva PADF (pasos 3 y 4), con las áreas ordenadas de menor a mayor. La tercera columna muestra las ecuaciones para determinar el valor correspondiente de la isoyeta del patrón elíptico. Las columnas 4 y 5 permiten calcular los valores para cada isoyeta de los semiejes mayor y menor.

TABLA 44 DETERMINACIÓN DE PATRONES SINTÉTICOS ESPACIALES

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

Para la generación sintética de eventos de precipitación máxima, es necesario definir tres elementos complementarios a lo anteriormente descrito: (1) la ubicación espacial del centro de la tormenta; (2) el valor de K, y (3) la dirección del eje mayor. En relación con la ubicación espacial del centro de tormenta, con base

en los mapas históricos de isoyetas se debe identificar la o las zonas de mayor frecuencia de ubicación, las cuales se pueden representar mediante polígonos. Por lo tanto, es dentro de estos polígonos donde se deben generar centros aleatorios de tormentas. Con respecto al valor K, nuevamente del análisis de mapas históricos de isoyetas se pueden determinar rangos de valores de K más representativos, ajustando una distribución uniforme o triangular simétrica, por ejemplo. Para la dirección del eje mayor, los mapas históricos de isoyetas permiten establecer alineamientos preferenciales de los patrones de tormentas, a partir de los cuales se pueden definir rangos de valores de azimut del eje mayor, dentro de los cuales se deben generar valores aleatorios.

1. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN

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

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

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

El valor de distribución de la precipitación se multiplica por la precipitación total para obtener la precipitación acumulada en el tiempo. Para cada momento en el tiempo se determina el incremento en la precipitación total como la diferencia entre los valores de precipitación acumulada en dos momentos contiguos del tiempo. La Tabla 46 presenta un ejemplo de transformación de la curva de distribución mostrada en la Figura 76 (columna 'Valor de distribución' en la Tabla 46) a el hietograma presentado en la Figura 78 (columna 'Precipitación' en la Tabla 46).

Empleando este procedimiento, es posible generar hietogramas sintéticos en cualquier ubicación dentro de la extensión de las tormentas estocásticas. La

Figura 80 muestra de manera esquemática este resultado. El procedimiento se repite para todo el conjunto de tormentas generado, de manera que se obtiene una representación integral de la precipitación, con distribución espacial y temporal.

TABLA 46 EJEMPLO DE GENERACIÓN DE UN HIETOGRAMA A PARTIR DE SU CURVA DE DISTRIBUCIÓN

Precipitación total (P):	100 mm				
Duración (D):	24 horas				
Paso	Minuto	Hora	Valor de distribución	Profundidad acumulada	Precipitación
0	0	0	0	0	0
1	30	0.5	0.005	0.5	0.5
2	60	1	0.01	1	0.5
3	90	1.5	0.015	1.5	0.5
4	120	2	0.02	2	0.5
5	150	2.5	0.026	2.6	0.6
6	180	3	0.032	3.2	0.6
7	210	3.5	0.037	3.7	0.5
8	240	4	0.043	4.3	0.6
9	270	4.5	0.05	5	0.7
10	300	5	0.057	5.7	0.7
11	330	5.5	0.065	6.5	0.8
12	360	6	0.072	7.2	0.7
13	390	6.5	0.081	8.1	0.9
14	420	7	0.089	8.9	0.8
15	450	7.5	0.102	10.2	1.3
16	480	8	0.115	11.5	1.3
17	510	8.5	0.13	13	1.5
18	540	9	0.148	14.8	1.8
19	570	9.5	0.167	16.7	1.9
20	600	10	0.189	18.9	2.2
21	630	10.5	0.216	21.6	2.7
22	660	11	0.25	25	3.4
23	690	11.5	0.298	29.8	4.8
24	720	12	0.6	60	30.2
25	750	12.5	0.702	70.2	10.2
26	780	13	0.751	75.1	4.9
27	810	13.5	0.765	76.5	1.4
28	840	14	0.811	81.1	4.6
29	870	14.5	0.83	83	1.9
30	900	15	0.848	84.8	1.8
31	930	15.5	0.867	86.7	1.9
32	960	16	0.886	88.6	1.9
33	990	16.5	0.895	89.5	0.9

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

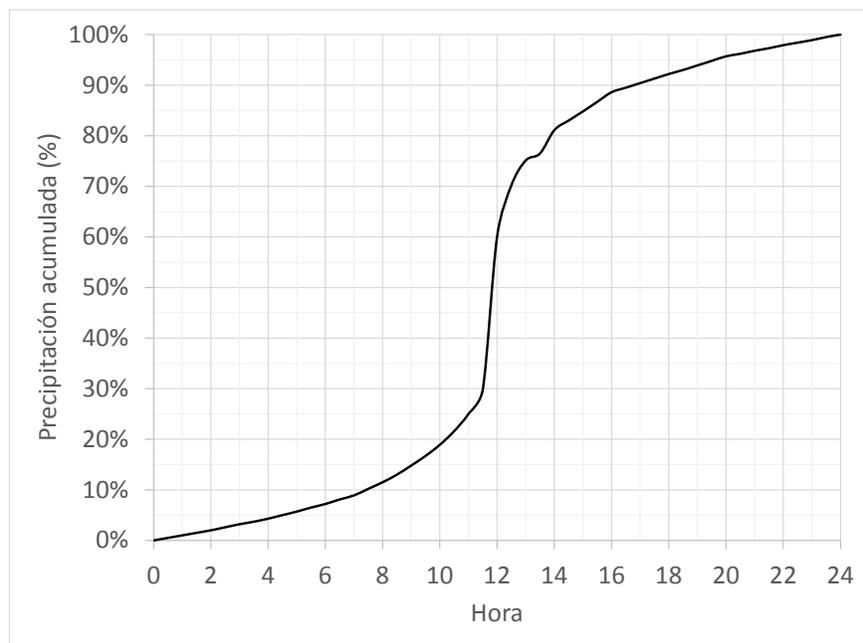


FIGURA 76 CURVA DE DISTRIBUCIÓN DE PRECIPITACIÓN TIPO III DEL SOIL CONSERVATION SERVICE

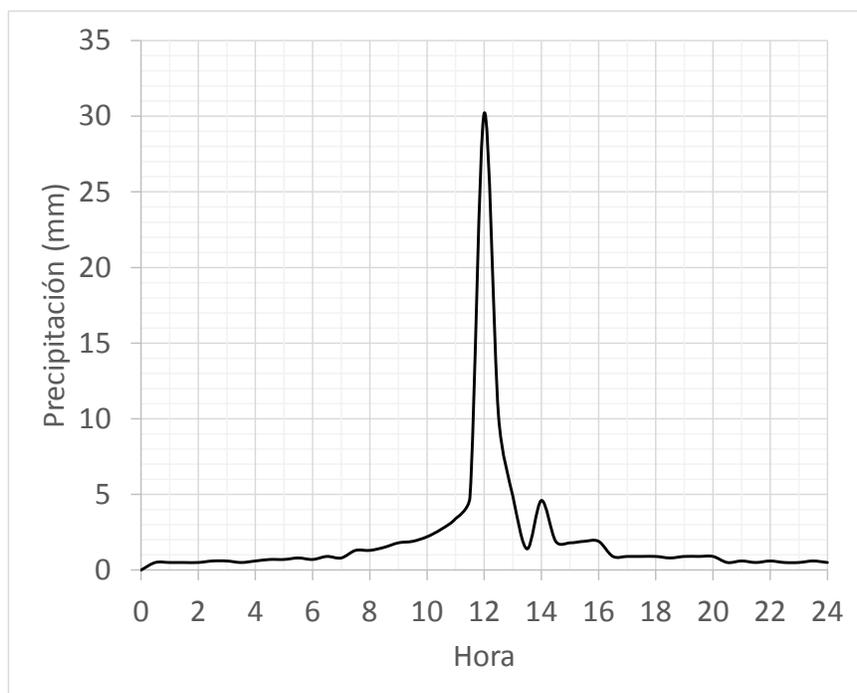


FIGURA 78 HIETOGRAMA DERIVADO DE LA CURVA DE DISTRIBUCIÓN

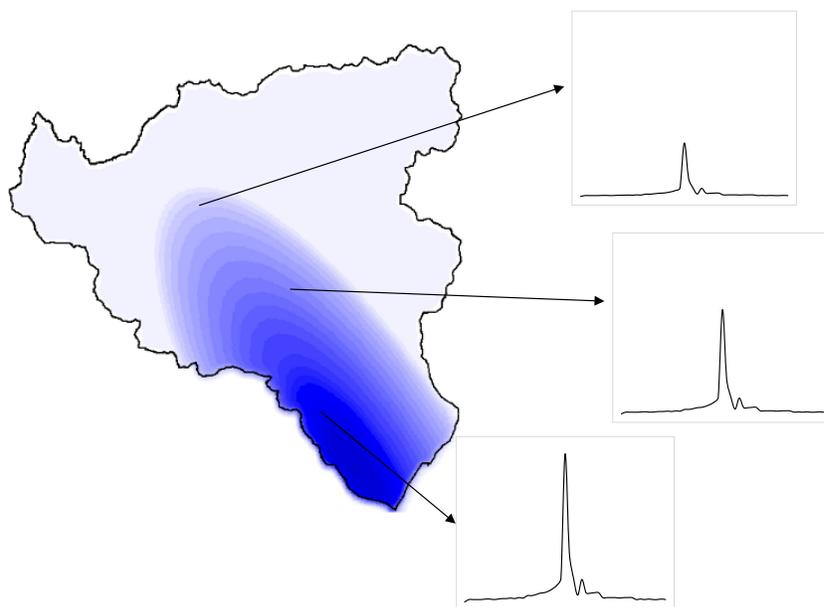


FIGURA 80 ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE HIETOGRAMAS EN UNA TORMENTA ESTOCÁSTICA

VOLÚMENES DE FLUJO

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

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

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

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

El factor de escurrimiento es un indicador global de la cantidad de agua que será absorbida o transpirada por los suelos superficiales. Se obtiene como función del uso de la tierra, la cobertura vegetal y las condiciones de infiltración y transpiración del suelo superficial. En la Tabla 48 se presentan los valores de N para diferentes suelos y condiciones de uso.

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

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

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

TABLA 48 VALORES DE N PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO Y USOS DE LA TIERRA (COBERTURA)

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

ANÁLISIS

LLUVIA-ESCORRENTÍA

1. HIDROGRAMA TRIANGULAR

En éste procedimiento se ha seleccionado por simplicidad el método del hidrograma unitario triangular (Figura 82), para caracterizar los hidrogramas de entrada al cauce bajo análisis. Para aplicarlo se requiere conocer las características fisiográficas de la cuenca.

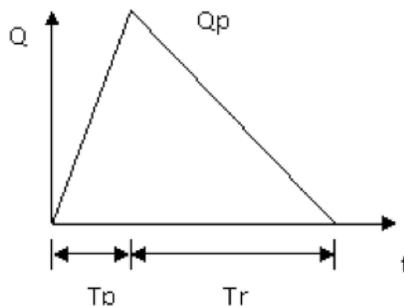


FIGURA 82 MODELO DE HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR

El caudal pico se estima como:

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

donde,

$$T_p = \frac{T_c}{2} + 0.6T_c \quad (\text{Ec. 18})$$

para cuencas pequeñas

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

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

$$T_b = n T_p ; T_b = T_p + T_r \quad (\text{Ec. 21})$$

en donde hpe es la lámina de lluvia efectiva en mm, A el área de la cuenca en km², Tc el tiempo de concentración en horas, Tp el tiempo pico en horas, Tr el tiempo de retraso en horas, Tb el tiempo base en horas y n el factor de corrección por área.

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

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

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

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

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

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

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

Información requerida

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

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

2. MÉTODO DE CLARK MODIFICADO

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

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

2.1 TRASLACIÓN

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

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

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

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

2.2 ATENUACIÓN

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

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

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

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

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

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

en donde CA y CB son coeficientes de enrutamiento., que se calculan como

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

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

El caudal de salida promedio para el tiempo t es entonces

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

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

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

Información requerida

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

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

INUNDACIÓN POR ENCHARCAMIENTO

La profundidad de inundación se calcula a partir de la precipitación efectiva, y *factores de inundación* que dependen principalmente de las condiciones topográficas del área de estudio. Los factores de inundación califican el potencial de un punto particular de ser inundado. En la Figura 84 se ilustran los factores de inundación de una zona particular.

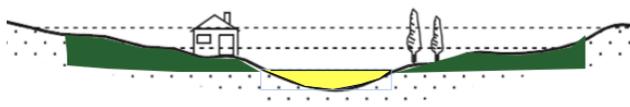


FIGURA 84 FIGURA QUE EJEMPLIFICA LAS REGIONES DE AMPLIACIÓN EN ZONAS BAJAS.

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

1. Zonas bajas o rodeadas de montañas con mayor peligro de inundación que asemejan cauces de ríos. Estas zonas se resaltan en la Error! Reference source not found. con color amarillo. El tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva más un 50%.
2. Lugares cercanos a zonas bajas identificadas como cauces. El tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva más un 20%. Estas zonas se resaltan en la Error! Reference source not found. con color verde.
3. Lugares con pendiente topográfica baja o plana. Se considera que el tirante de inundación es igual a la precipitación efectiva.
4. Lugares con pendiente topográfica alta. Se considera que no se presenta inundación.

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

INUNDACIÓN ALUVIAL O TORRENCIAL – MODELO 1D

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

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

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

en donde Y1 y Y2 son la profundidad del agua en las secciones ST1 y ST2 respectivamente, Z1 y Z2 son las elevaciones del canal en ST1 y ST2, V1 y V2 son las velocidades promedio del flujo (la descarga total dividida por el área total), α_1 y α_2 son coeficientes de ponderación, g es la aceleración de la gravedad y h_e es la cabeza de pérdida de energía. El término de la cabeza de pérdida de energía se define como

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

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

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

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

(Ec. 35)

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

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

$$Q = K \sqrt{S_f}$$

(Ec. 36)

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

(Ec. 37)

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

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

INUNDACIÓN

ALUVIAL – MODELO 2D

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

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

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{n^2 |u| u}{h^3} = - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x}$$

(Ec. 38)

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{n^2 |v| v}{h^3} = - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial z}{\partial y}$$

(Ec. 39)

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

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} uh + \frac{\partial}{\partial y} vh = 0$$

(Ec. 40)

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

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

ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA

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

1. PASO 1: INTEGRACIÓN DE LA AMENAZA

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

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

$$v(a) = \sum_{i=1}^N \Pr(A > a | E_i) \cdot F_i$$

(Ec. 41)

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

2. PASO 2: SELECCIÓN DE LOS PERÍODOS DE RETORNO

Se deben seleccionar tantos periodos de retorno como niveles de amenaza se quiera definir. Los periodos de retorno cortos están asociados a amenaza de inundación alta, dado que corresponden a procesos que se repiten muy frecuentemente. Por otra parte los periodos de retorno largos están asociados a amenaza de inundación baja. Una propuesta de selección de periodos de retorno se presenta en la

Tabla 50. En caso de duda puede usarse esta selección, sin embargo es importante conocer el territorio en el cual se está trabajando para definir estos periodos de manera correcta.

TABLA 50. PROPUESTA DE RELACIÓN ENTRE EL NIVEL DE AMENAZA Y EL PERÍODO DE RETORNO

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

ANEXO I

EJEMPLO DE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA AMENAZA POR INUNDACIONES
(Parte baja de la cuenca del Río Chinchiná)

1. INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA

La información de lluvia diaria mensual multianual recopilada para este ejemplo se obtiene a partir de estaciones pluviométricas, localizadas dentro y fuera de la cuenca distribuidas en zonas hidrológicamente homogéneas, de instituciones como la CHEC SA (Central Hidroeléctrica de Caldas SA ESP), IDEAM, CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca) y la Federación Nacional de Cafeteros en nombre de CENICAFÉ.

Con base en la localización georreferenciada de la cuenca del río Chinchiná y de la totalidad de las estaciones disponibles para el estudio, se identificaron las estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas que por su cercanía y ubicación hidrológica son representativas del régimen de precipitación de la cuenca, con el propósito de describir de manera correcta los eventos sintéticos de precipitación para un período de retorno determinado.

En la Figura 86 se muestra la topografía de la cuenca del río Chinchiná, que comprende un rango de altitud variable entre 800 y 4100 msnm, aproximadamente. Adicionalmente se presenta la localización de las estaciones pluviométricas seleccionadas para el análisis.

De un total de 41 estaciones pluviométricas, pluviográficas y climatológicas disponibles para el área aferente de la cuenca del río Chinchiná fueron seleccionadas un total de 20. La selección se realiza teniendo en cuenta 3 aspectos:

- a. Localización geográfica dentro de las zonas hidrológicamente homogéneas
- b. Completitud de la información pluviométrica
- c. Medición mínima de parámetros para un período de 30 años

A partir del análisis de estos parámetros para el conjunto de estaciones disponibles se tienen las estaciones presentadas en la Tabla 52.

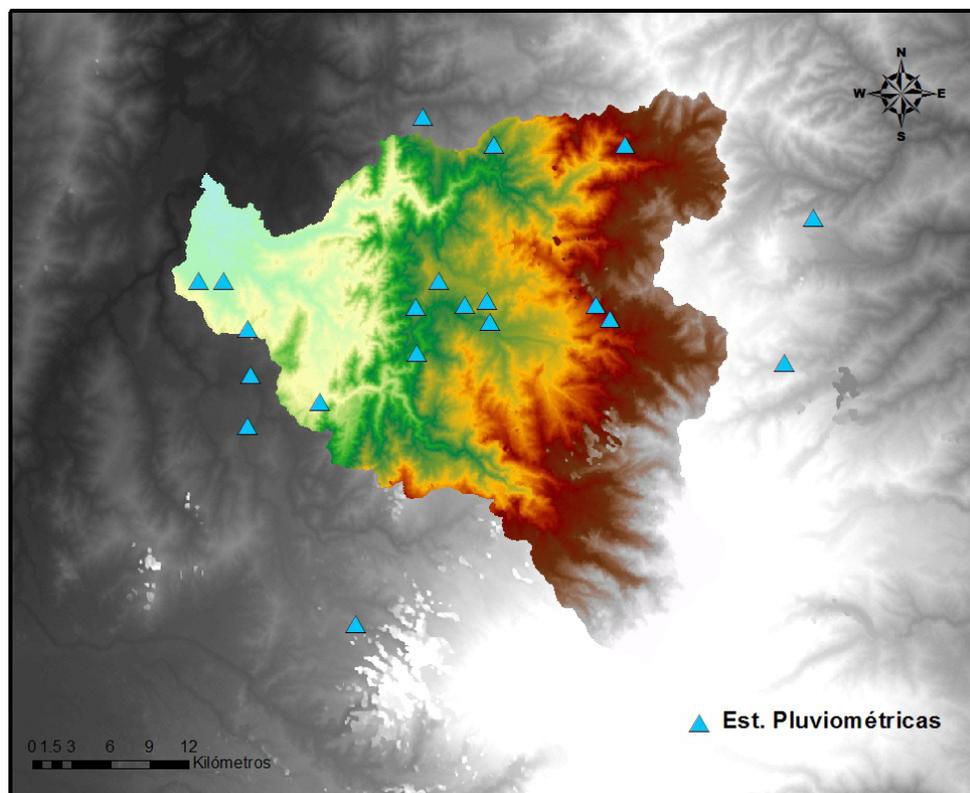


FIGURA 86 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DISPONIBLES.

TABLA 52 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS SELECCIONADAS

CÓDIGO	LONG.	LAT.	NOMBRE ESTACIÓN	ELEVACIÓN [msnm]	INSTITUCIÓN	PERIODO MEDICIÓN
6-9001	-75.58	4.83	MONTEVIDEO	1370	CHEC	1975-2010
6-9002	-75.65	5.00	INSULA	1225	CHEC	1975-2010
6-9004	-75.48	5.04	PLANTA SANCANCIO	1850	CHEC	1975-2010
6-9029	-75.52	5.07	SUBESTACION MARMATO	2000	CHEC	1976-2010
6-9039	-75.48	5.05	SUBESTACION ALTASUIZA	2055	CHEC	1976-2010
6-9041	-75.53	5.05	SUBESTACION URIBE	1842	CHEC	1976-2010
6-9045	-75.53	5.18	NEIRA	1902	IDEAM	1976-2010
Agro	-75.50	5.05	AGRONOMIA	2088	IDEAM	1975-2010
2615006	-75.40	5.04	ARAUCA	890	IDEAM	1975-2007

CÓDIGO	LONG.	LAT.	NOMBRE ESTACIÓN	ELEVACIÓN [msnm]	INSTITUCIÓN	PERIODO MEDICIÓN
2615502	-75.60	4.98	CENICAFE	1310	CENICAFE	1975-2010
2615009	-75.65	5.03	EL RECREO	1430	IDEAM	1975-2010
2615514	-75.68	5.07	GRANJA LUKER	1031	IDEAM	1975-2010
2615035	-75.53	5.02	JAVA	1778	IDEAM	1981-2010
2613505	-75.65	4.97	NARANJAL	1381	CHEC	1975-2010
2615509	-75.67	5.07	SANTAGUEDA	1026	CHEC	1975-2010
26155-110	-75.28	5.01	APTO LA NUBIA	2058	CHEC	1975-2010
26155-120	-75.41	5.05	APTO SANTAGUEDA	933	CHEC	1975-1989
26145-020	-75.48	5.16	BELLAVISTA	1932	IDEAM	1975-2010
26160-120	-75.26	5.11	LA CRISTALINA	2290	IDEAM	1975-2010
26170-260	-75.39	5.16	GUERRERITO	810	IDEAM	1979-2010

1. ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN

A continuación se describen los análisis realizados con la información de precipitación. Estos parten con la complementación de información, consistente en estimar información incompleta o inexistente en los registros históricos, con el fin de buscar disponer de series de tiempo diarias y mensuales con el mayor grado de completitud, requerida para algunos análisis. Adicionalmente, con base en el análisis espacial de precipitaciones máximas presentado en la sección 5 de este instructivo, se obtienen las curvas PADF para la cuenca del río Chinchiná.

1.1 COMPLEMENTACIÓN DE LA INFORMACIÓN FALTANTE O INCOMPLETA

El proceso de completitud de información consiste en la estimación de datos faltantes o incompletos en los registros históricos diarios y/o mensuales de las diferentes estaciones disponibles. Para ello fueron aplicadas diferentes aproximaciones, las cuales se describen a continuación.

En general éstas se basaron en el uso de información concurrente completa en las estaciones vecinas. En estaciones con registros diarios, los datos fueron inspeccionados para identificar días faltantes o incompletos. En general hubo gran cantidad de casos en los cuales los días faltantes o incompletos eran pocos (1 a 3) y disgregados en el mes, por lo cual la lluvia en cada uno de estos días se estimó con información concurrente en estaciones vecinas pertenecientes a la misma cuenca o cuencas vecinas de similar régimen pluviométrico, de la siguiente manera

$$Pd_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Pd_j$$

(Ec. 42)

en donde P_{di} es la lluvia diaria estimada en la estación incompleta i y N es el número de estaciones vecinas j con información de lluvia diaria completa P_{dj} . En aquellos casos en donde el número de días consecutivos sin dato era mayor que 4 pero no más de 10, no se intentó estimar cada uno de los datos diarios sino el valor acumulado de lluvia en ese período, como

$$Sd_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Sd_j \quad (\text{Ec. 43})$$

en donde Sd_i es la lluvia acumulada en los días consecutivos faltantes estimada en la estación i y N es el número de estaciones vecinas j con información de lluvia acumulada completa Sd_j . En la medida en que en los casos anteriormente descritos se obtuvieran meses completos con información diaria, simultáneamente se iba completando la lluvia mensual de la estación.

Cuando la información diaria faltante o incompleta era extensa (más de 10 al mes, pero menos de 20) se estimó el agregado faltante con base en la siguiente expresión

$$Sd_i = \frac{M_i}{N} \sum_{j=1}^N \frac{Sd_j}{M_j - Sd_j} \quad (\text{Ec. 44})$$

en donde M_i es el valor mensual incompleto de lluvia en la estación i , Sd_j es la lluvia acumulada en la estación j en los días sin información en la estación i y M_j es el valor mensual completo en la estación j .

A nivel mensual, meses faltantes o incompletos se estimaron con base en información mensual completa de estaciones vecinas, de la siguiente manera

$$M_i = \frac{\bar{M}_i}{N} \sum_{j=1}^N \frac{M_j}{\bar{M}_j} \quad (\text{Ec. 45})$$

en donde M_i es el mes incompleto o faltante en la estación i , N es el número de estaciones vecinas j completas en el mes concurrente, M_j es la lluvia mensual completa en cada estación j y \bar{M}_j es el valor medio multianual de lluvia en el mes. Si M_i es mayor o igual al dato incompleto en la estación i , se adoptó M_i como datos mensual completo.

1.2 CURVAS PADF

A partir de la información completa de estaciones pluviométricas para un período diario mensual multianual se obtienen las curvas PADF para una duración de 1 día, usando el procedimiento presentado en la sección 5.

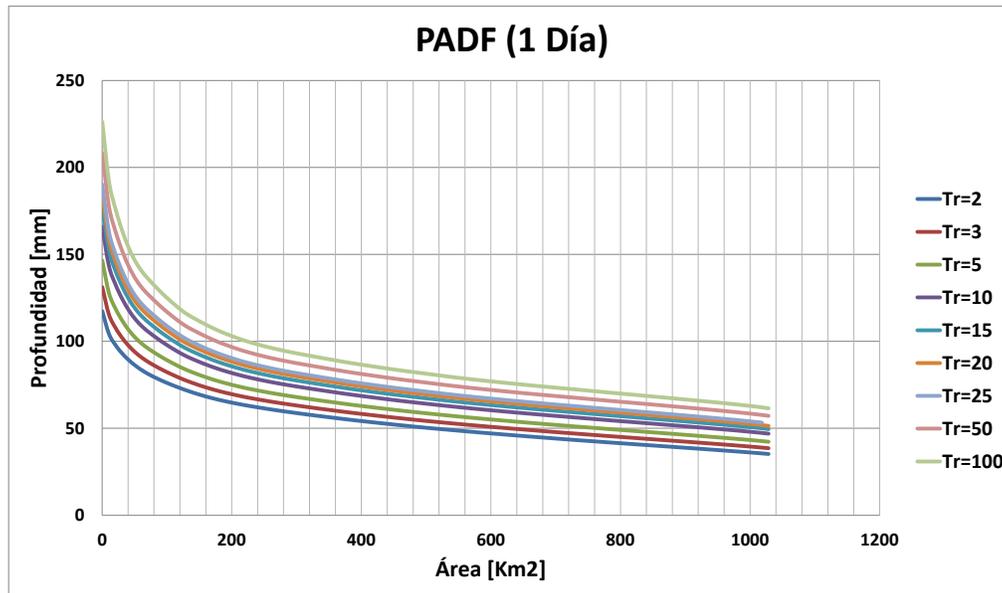


FIGURA 88. CURVAS PADF PARA EVENTOS DE PRECIPITACIÓN DE 1 DÍA EN LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ

1.3 COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA

Para la generación sintética de eventos de precipitación en la cuenca del río Chinchiná se tiene en cuenta el comportamiento espacial histórico de la lluvia a lo largo del período de registro contenido en las estaciones pluviométricas. A partir del análisis de completitud y de regímenes de lluvia para la información seleccionada se obtienen valores de precipitación diaria multianual y diaria trimensual multianual, para los meses de Marzo, Abril y Mayo y los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre. Lo anterior se hace con el fin de caracterizar con el método de las isoyetas la espacialidad de las precipitaciones históricas en la cuenca para posteriormente generar escenarios sintéticos de precipitación con mayor o menor frecuencia en las zonas delimitadas, de acuerdo a su pluviosidad.

Al trazar las isoyetas para lluvias mensuales o anuales, se pueden incorporar los efectos topográficos sobre la distribución espacial de la precipitación, tomando en cuenta factores tales como la altura y la exposición de la estación. Este método también se recomienda para calcular promedios espaciales en el caso de eventos individuales localizados.

A partir del análisis de isoyetas se determina la malla de localización preferencial de centros de tormenta que serán generados de manera sintética. La Figura 11 presenta el análisis de isoyetas diario multianual,

en el cual se observan zonas de relativa baja precipitación con valores de 1250 mm por año, en contraste con zonas en las cuales se presentan precipitaciones cercanas a los 3000 mm anuales.

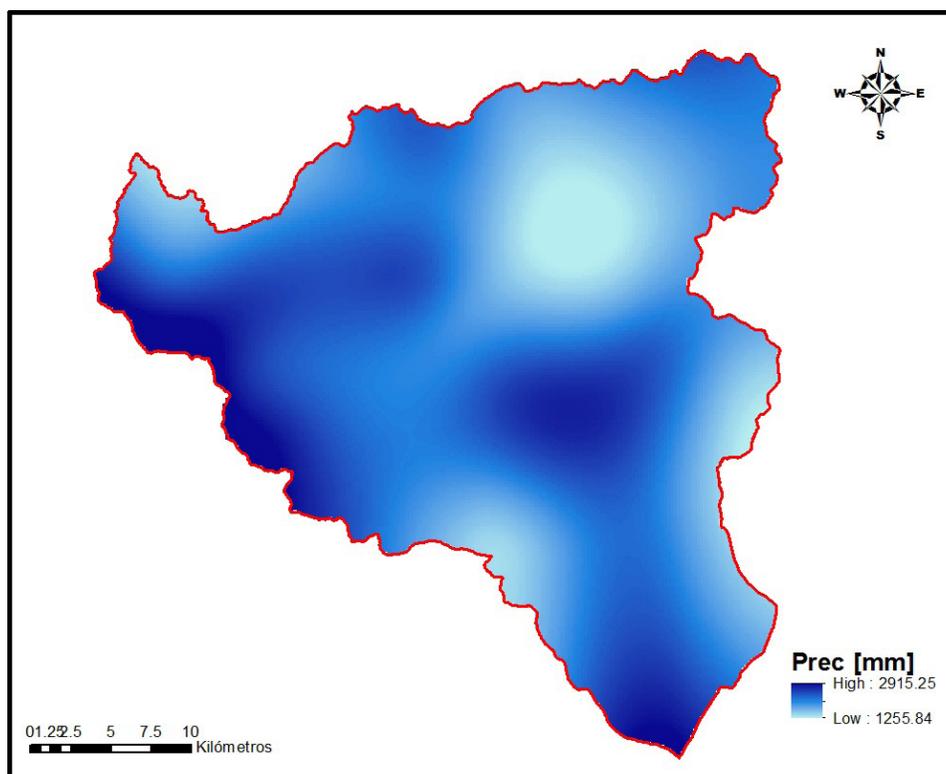


FIGURA 89. ANÁLISIS DE ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN DIARIA MULTIANUAL PARA LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ

2. MAPAS DE AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS PARA LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ

Se calcularon mapas de amenaza uniforme por lluvias intensas, tomando como única medida de intensidad la profundidad de precipitación para períodos de retorno de 10, 25, 40 y 50 años. Estos fueron calculados haciendo uso del software ERN-LLUVIA-NH (ERN-AL, 2009).

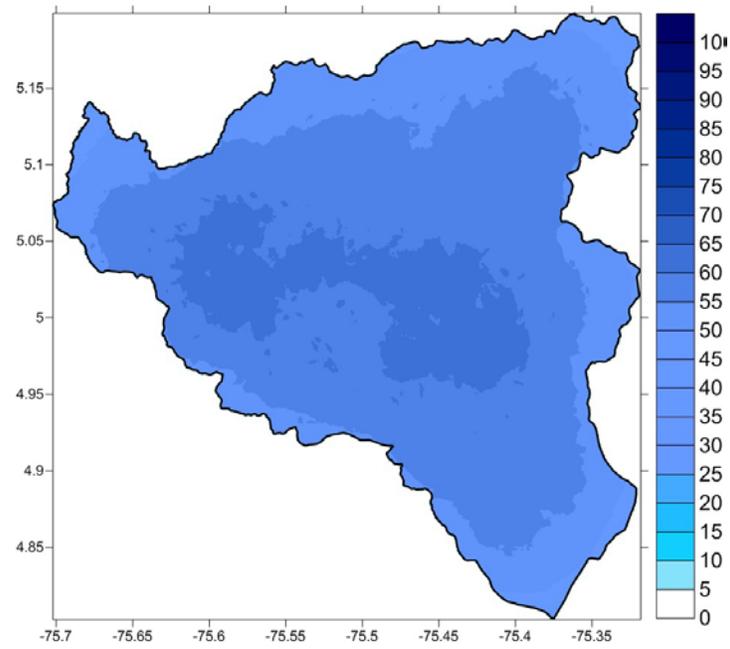


FIGURA 90. MAPA DE AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS PARA 1 DÍA DE PRECIPITACIÓN. PR 10 AÑOS. [MM]

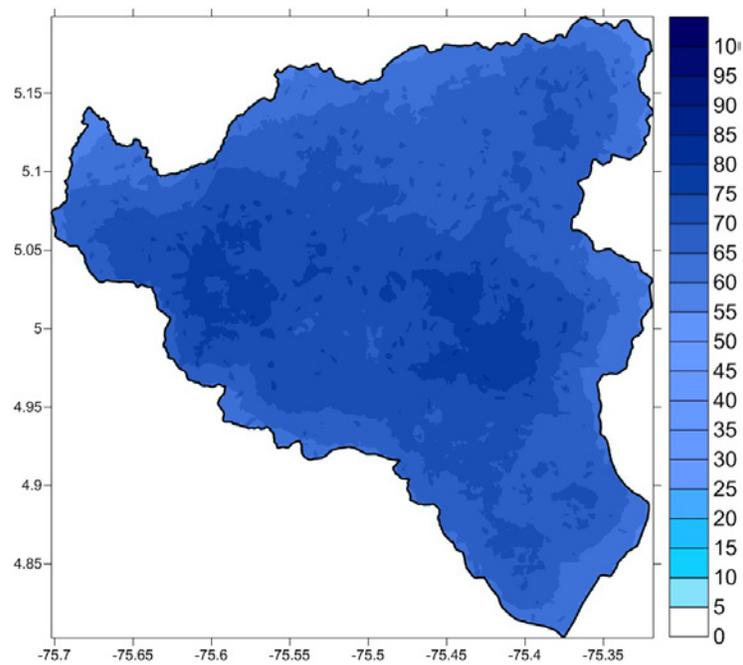


FIGURA 91. MAPA DE AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS PARA 1 DÍA DE PRECIPITACIÓN. PR 25 AÑOS. [MM]

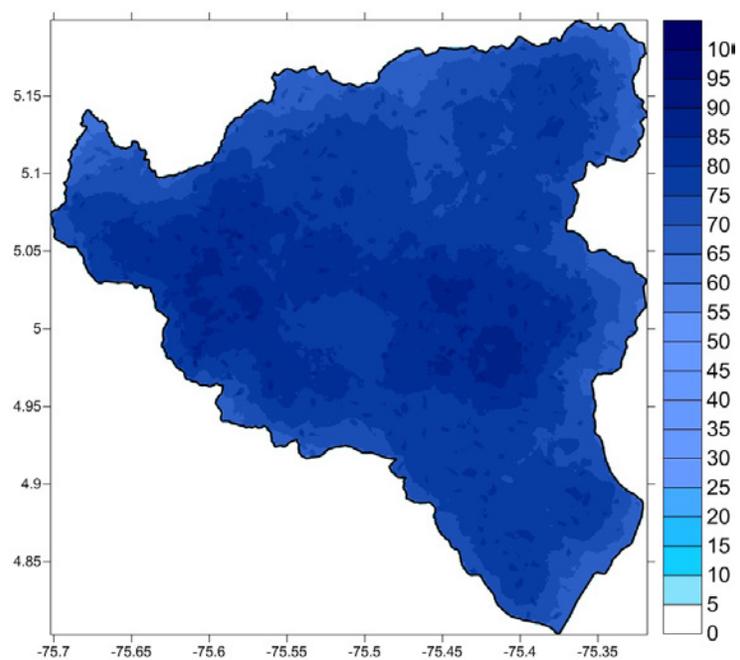


FIGURA 92. MAPA DE AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS PARA 1 DÍA DE PRECIPITACIÓN. PR 40 AÑOS. [MM]

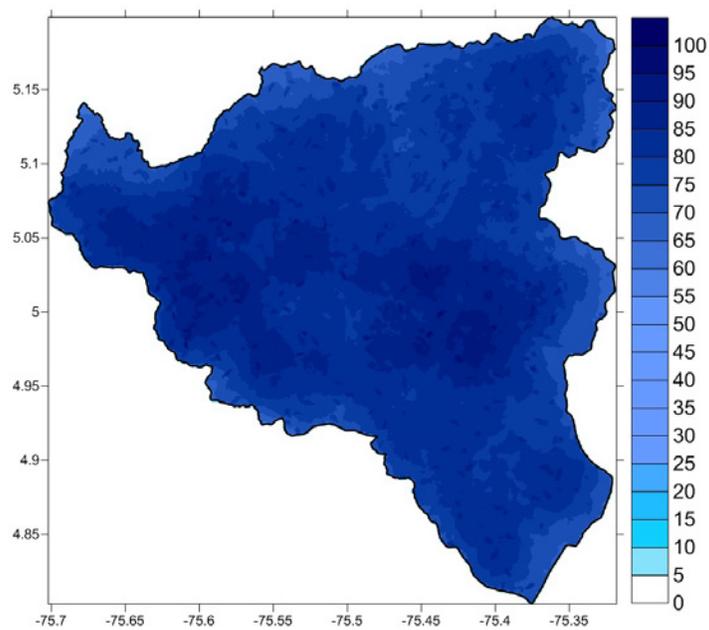


FIGURA 93. MAPA DE AMENAZA POR LLUVIAS INTENSAS PARA 1 DÍA DE PRECIPITACIÓN. PR 50 AÑOS. [MM]

3. FACTORES DE ESCURRIMIENTO

Los factores de escurrimiento se determinan de acuerdo a la metodología especificada por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos, en el cual se definen números de curva de acuerdo al uso del suelo, cobertura vegetal, tipo de suelo y condición de la superficie (sección 6).

En la Figura 16 se presentan los diferentes usos de suelo y cobertura vegetal para la cuenca del río Chinchiná y zonas aledañas. A partir de esta información es posible determinar para cada una de las áreas específicas un nivel de uso. La condición de la superficie es determinada a partir de imágenes satelitales, haciendo uso de las imágenes del satélite LANDSAT 5tm.

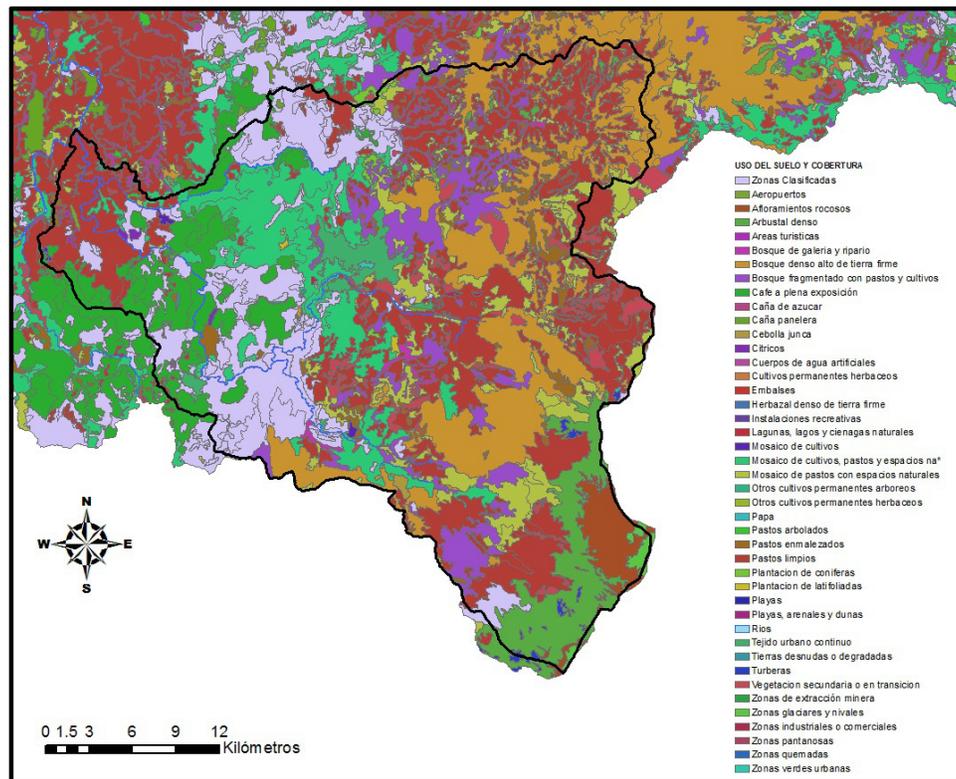


FIGURA 94.USOS DEL SUELO Y COBERTURA PARA LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ

En la Figura 17 se presentan las características geológicas y los tipos de suelo para cada zona de la cuenca del río Chinchiná y zonas aledañas. A partir de esta información es posible generar una clasificación en torno a los tipos de suelo especificados en la Tabla 7.

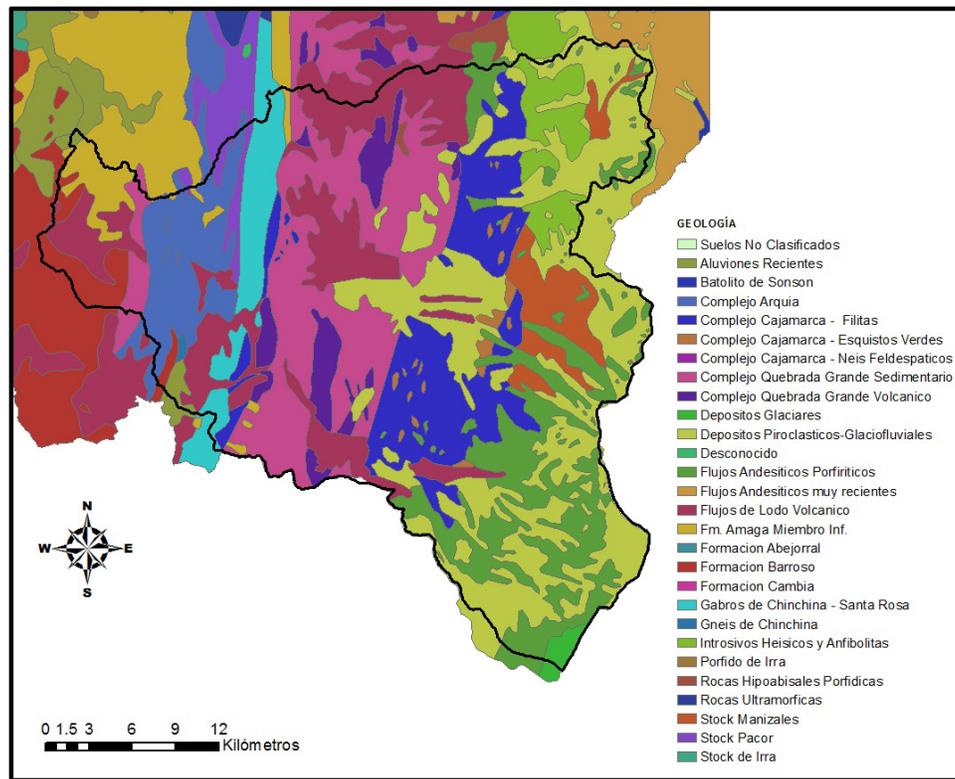


FIGURA 95. CAPA DE GEOLOGÍA Y TIPOS DE SUELO PARA LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ

A partir del uso de la información mencionada, se presenta en la Figura 18 la clasificación de cada una de las zonas de la cuenca del río Chinchiná en términos del número de curva, entre 0 y 100, en donde 0 representa las zonas que poseen mayor capacidad de absorción de agua en un evento de precipitación, mientras que zonas identificadas con números de curva cercanos a 100 poseen una mayor capacidad de escurrimiento de agua en un evento de precipitación determinado.

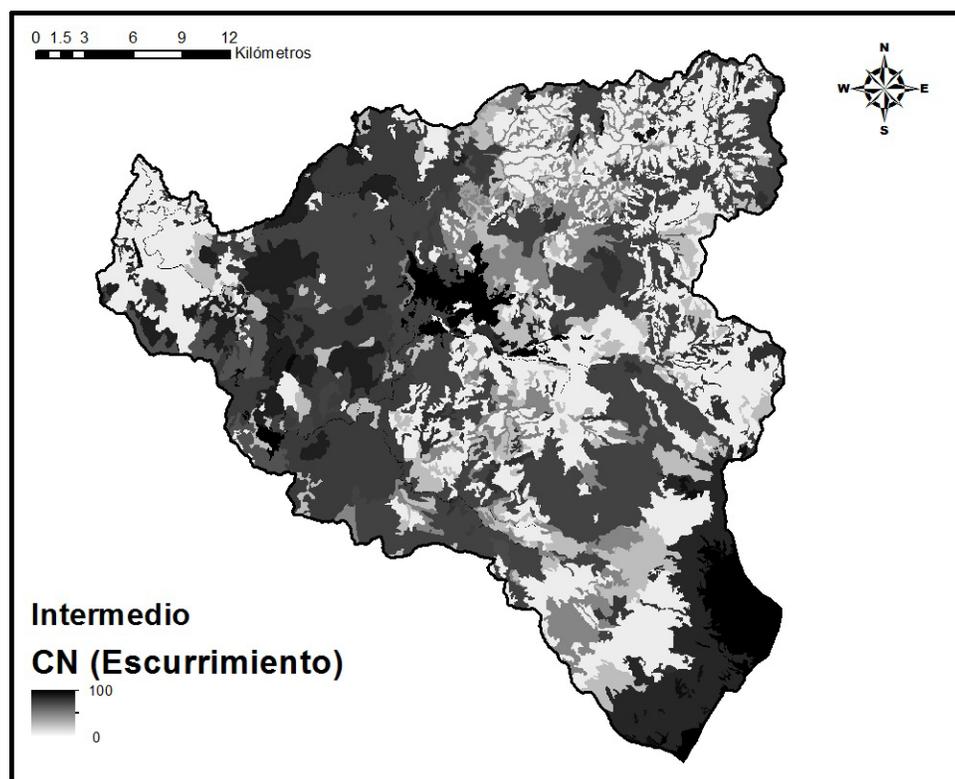


FIGURA 96. FACTORES DE ESCURRIMIENTO PARA LA CUENCA DEL RÍO CHINCHINÁ. CONDICIONES DE SATURACIÓN DEL SUELO INTERMEDIAS

4. MODELACIÓN DE LA INUNDACIÓN

La inundación se calcula para el tramo más aguas abajo del río Chinchiná, en cercanías a su desembocadura en el río Cauca. La Figura 19 muestra este tramo, en la parte más baja de la cuenca, en color azul sobre la fotografía satelital.

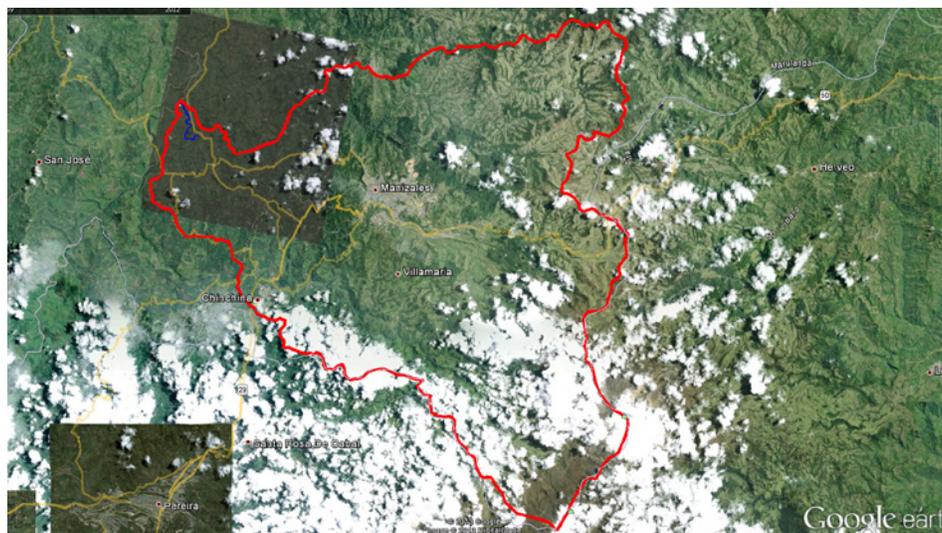


FIGURA 97. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO DE ANÁLISIS DEL RÍO CHINCHINÁ

La modelación hidráulica de este tramo se realizó con el programa HEC-RAS, el cual implementa el modelo de análisis unidimensional descrito en este instructivo. A partir de la topografía de la zona de análisis, se determinaron las secciones transversales a lo largo del cauce.

La topografía empleada corresponde a la disponible de la misión satelital ASTER, con resolución espacial de 30m.

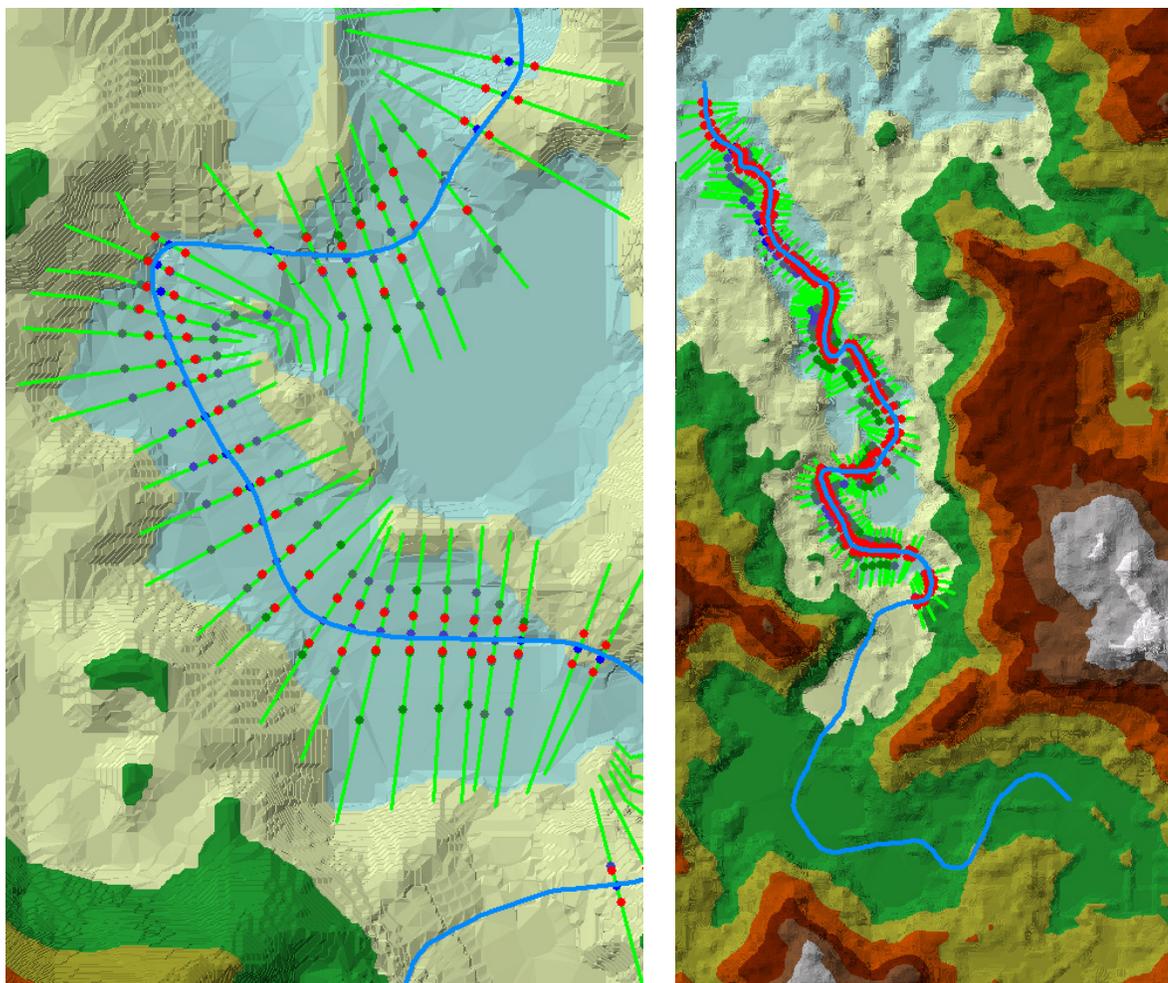


FIGURA 98. SECCIONES TRANSVERSALES A LO LARGO DEL TRAMO ANALIZADO. LA IMAGEN A LA DERECHA ES UN ACERCAMIENTO AL RECUADRO NEGRO.

Para cada una de las secciones transversales se define lo siguiente:

- Distancia a la próxima sección transversal.
- n de Manning para las subdivisiones del cauce.
- Límites izquierdo y derecho del cauce.
- Coeficientes de contracción y expansión.

La Figura 21 presenta una de las secciones transversales como se muestra en el programa HEC-RAS.

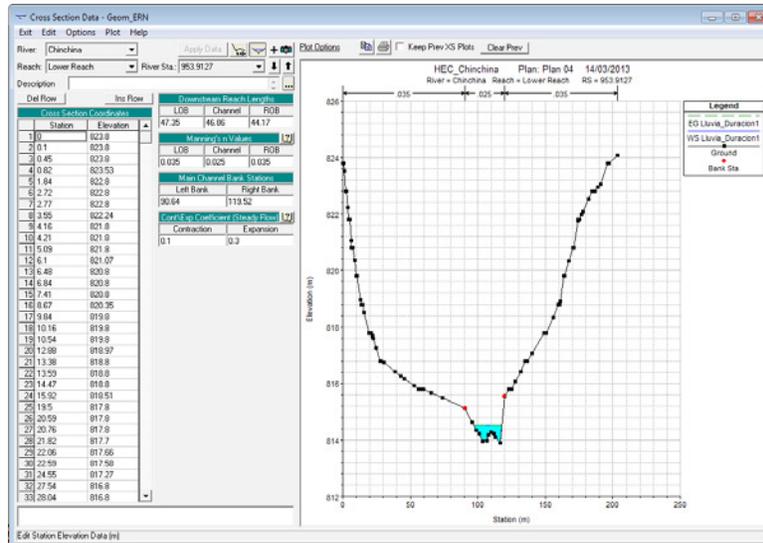


FIGURA 99. SECCIÓN TRANSVERSAL DE ANÁLISIS

Para el desarrollo del modelo de amenaza, se emplea el programa ERN-Inundación (ERN-AL, 2009), el cual implementa el método del hidrograma unitario, y adicionalmente controla el proceso de cálculo con HEC-RAS. La Figura 22 presenta el hidrograma triangular calculado por ERN-Inundación.

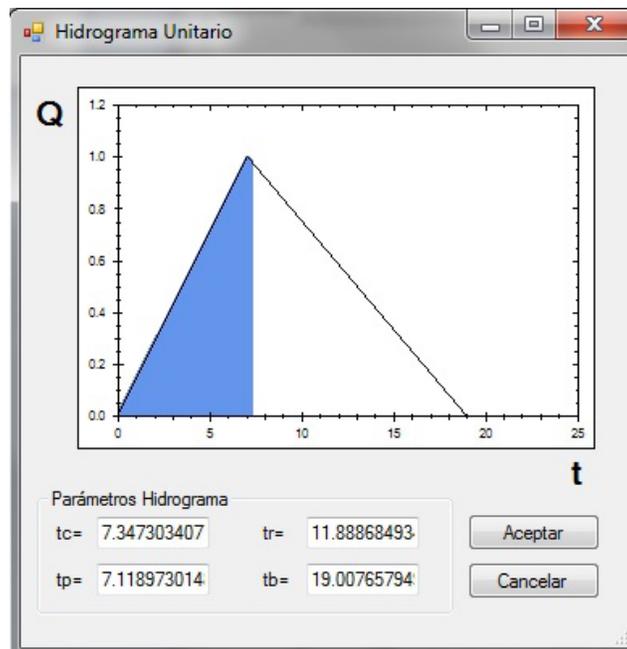


FIGURA 100. HIDROGRAMA TRIANGULAR CALCULADO CON ERN-INUNDACIÓN

ERN-Inundación calcula un hidrograma para cada escenario de precipitación, el cual es transitado empleado HEC-RAS a lo largo del tramo de análisis. El resultado es entonces un escenario de inundación para cada tormenta. La Figura 23 muestra un escenario de inundación tal como se presenta en ERN-Inundación.

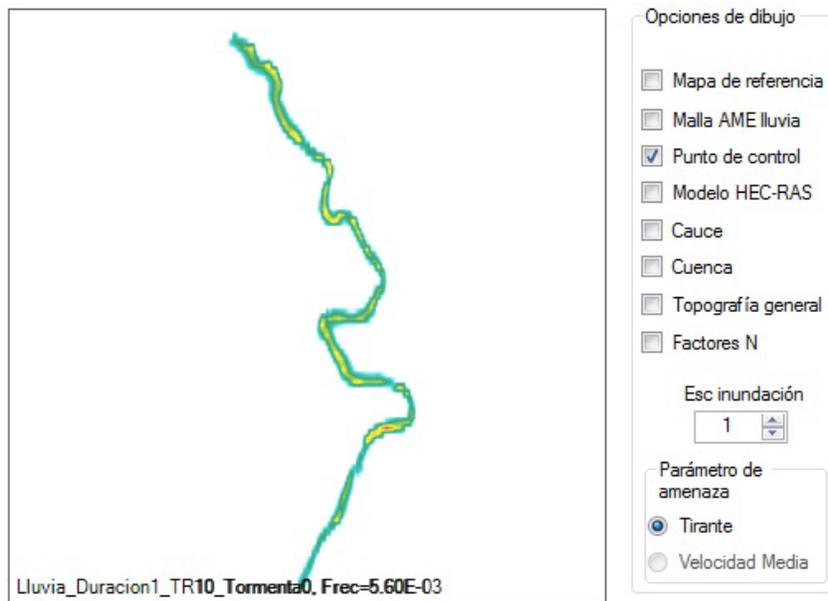


FIGURA 101. HIDROGRAMA TRIANGULAR CALCULADO CON ERN-INUNDACIÓN

Con el conjunto de escenarios de inundación, se realiza el proceso de integración de la amenaza, mediante el cual se obtienen los mapas de igual periodo de retorno. Las Figuras 24 a 26 muestran los mapas de amenaza por inundación, en términos de la profundidad del agua, para 25, 50 y 100 años de periodo de retorno.

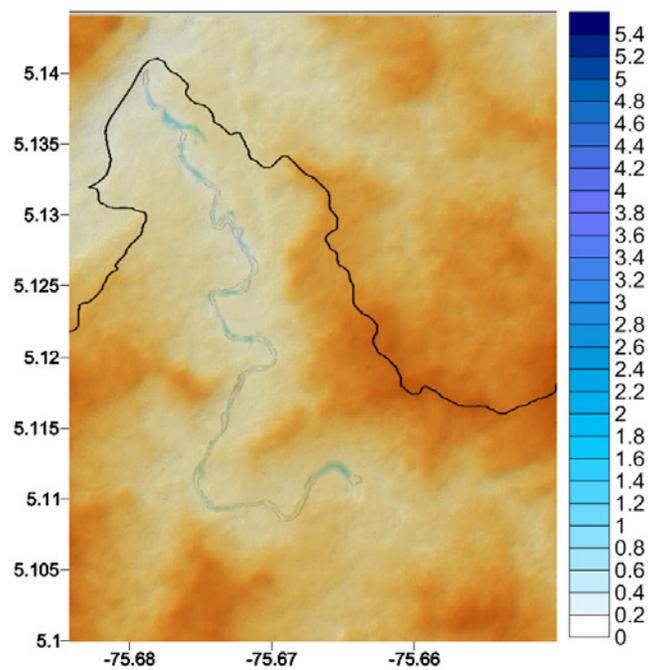


FIGURA 102. MAPA DE INUNDACIÓN DE 25 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO

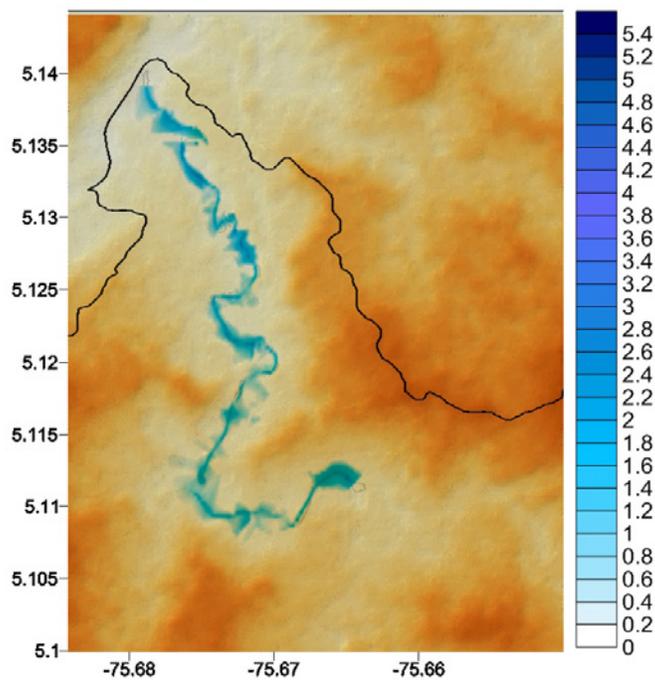


FIGURA 103. MAPA DE INUNDACIÓN DE 50 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO

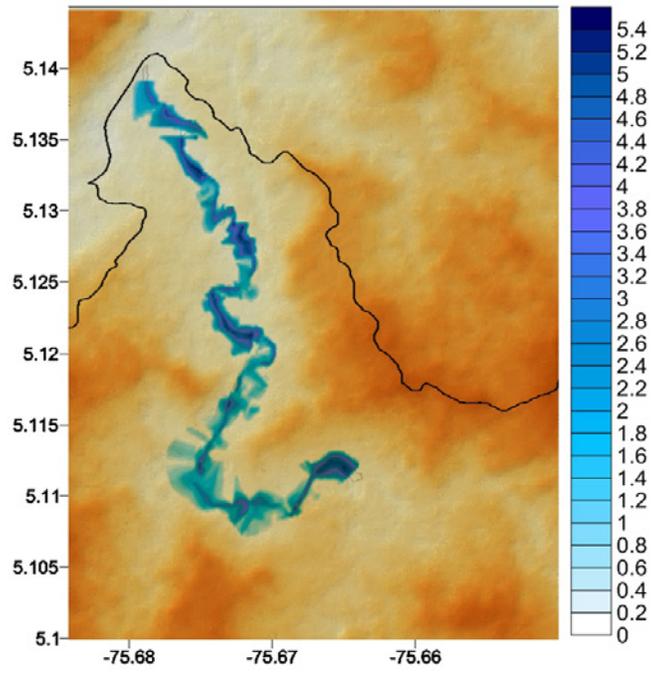


FIGURA 104. MAPA DE INUNDACIÓN DE 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO

REFERENCIAS

Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2012. Guía para el acotamiento de las rondas hídricas de los cuerpos de agua de acuerdo a lo establecido en el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 – Plan Nacional de Desarrollo.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L.W. 1988. Applied Hidrology.

ERN-AL. 2009. ERN-Inundación. Software para el cálculo probabilista de inundaciones.

U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS. Hydrologic Engineering Center – River Analysis System.

www.priccregioncapital.org